



ЭКИНГ
КОСМИЧЕСКАЯ
ГЕОЛОГИЯ
ВВЕДЕНИЕ

**SPACE
GEOLOGY**
AN INTRODUCTION

Elbert A. KING
University of Houston

John Wiley & Sons, Inc.,
New York • London • Sydney • Toronto

Э.КИНГ

2822
**КОСМИЧЕСКАЯ
ГЕОЛОГИЯ**

ВВЕДЕНИЕ

Перевод с английского
В. П. ВОЛКОВА, Б. Н. ПАНОВКИНА

под редакцией
канд. геол.-мин. наук К. П. ФЛОРЕНСКОГО

ИЗДАТЕЛЬСТВО «МИР» МОСКВА 1979



Первая книга на русском языке, обобщающая обширный материал, связанный, с одной стороны, с геологией, а с другой — с космогонией и физикой планет. Рассматриваются процессы формирования поверхности Земли, Луны и планет, их геохимия, вопросы сравнительной планетологии и т. п. Новизна материала, четкость изложения и удачно подобранные иллюстрации делают книгу весьма интересной не только для специалистов в области геологии и космических исследований, но также для широкого круга читателей, интересующихся успехами современной науки в исследовании Солнечной системы.

Редакция литературы по геологии

Copyright © 1976, by John Wiley & Sons, Inc.
All rights reserved
Authorized translation from English language
edition published by John Wiley & Sons, Inc.

© Перевод на русский язык, «Мир», 1979

1705050000

К $\frac{20801-140}{041(01)-79}$ 140—79

ПРЕДИСЛОВИЕ РЕДАКТОРА ПЕРЕВОДА

Еще в тридцатых годах нашего века академик В. И. Вернадский указывал, что данные астрономических наук так же важны для геолога, как данные наук геологических — для астронома, так как Земля представляет собой лишь одно из тел Солнечной системы.

В результате проведения учеными Советского Союза и США обширной программы космических исследований Луна и планеты настолько «приблизились» к исследователям, что их изучение стало гораздо теснее связано с методами, применяемыми в геологии, чем с традиционными методами астрономии. Сравнительное изучение небесных тел открывает новые горизонты для познания их строения и эволюции.

Изучение Луны и планет с помощью космических летающих аппаратов особенно важно для восстановления ранних этапов развития Земли, стертых последующими геологическими процессами. Как выяснилось, процессы дифференциации вещества и формирования коры на Луне и планетах происходили в геологически короткое время, непосредственно после их образования. По-видимому, именно тогда и оформились основные особенности строения планет, предопределившие геологическое развитие их коры в дальнейшем.

Среди важных процессов, которые ранее не привлекали серьезного внимания геологов, следует назвать процессы ударного кратерообразования, типичного для Луны, Меркурия, Марса и его спутников. Несомненно, что и для Земли в догеологический этап ее развития роль этих процессов была значительной. Все это заставило геологов в последнее время обратить пристальное внимание на кольцевые структуры Земли и возможность связи с ними полезных ископаемых. Уже сейчас

в отложениях разного возраста открыты кратерные структуры, имеющие признаки образования в результате метеоритных ударов. Диаметр наиболее крупных из них достигает десятков километров, и их влияние на геологическое строение некоторых участков Земли становится очевидным. Заслуживает глубокого внимания и проблема истории воды на планетах, так как на Земле именно гидросфера предопределила характер геохимических процессов и, вероятно, возможность развития биосферы.

Таким образом, для геологов стало необходимым знание строения космических, небесных, тел, а для астрономов — геологический подход к их изучению.

Несмотря на значительное количество научных статей в отдельных сборниках и журналах, посвященных этим проблемам, в советской литературе нет такой обобщающей работы по «космической геологии», которая бы отражала современное состояние достижений науки в этой области. Поэтому перевод книги Э. Кинга «Космическая геология. Введение», несомненно, представляет большой интерес для советского читателя, хотя, к сожалению, автор не использовал многие интересные результаты, полученные советскими исследователями космического пространства, в частности при описании Венеры. Содержание книги ближе всего соответствует предмету исследований сравнительной планетологии, но включает в себя также описание и других космических тел — метеоритов, астероидов, комет.

Необходимо отметить, что в русском языке еще не выработалась терминология, адекватная рассматриваемым вопросам и принятая для общего употребления. Так, вызывает споры само название книги, и точнее всего было бы ее назвать «Геология небесных (или космических) тел», хотя до сих пор дискутируется вопрос о том, насколько правомерен термин «геология» по отношению к вземным телам. Для названия этой по существу новой науки предлагали такой термин, как «астрогеология», и ряд других, но ни один из них еще не вошел в жизнь.

Успешное развитие космических исследований идет в настоящее время такими быстрыми темпами, что книга, освещающая достигнутые результаты, в какой-то степени устаревает еще до выхода в свет. В то же время необходимость серьезных работ, обобщающих достижения ученых всех стран в изучении строения космических тел, не вызывает сомнений, и можно быть уверенным, что предлагаемая советскому читателю книга — только первая достаточно удачная попытка такого научного обобщения, призванная расширить и углубить наши представления о строении и развитии тел Солнечной системы.

К. Флоренский

ПРЕДИСЛОВИЕ

Эту книгу следует рекомендовать студентам старших курсов и аспирантам первого года обучения в качестве основного учебного пособия по космической геологии (астрогеологии, планетологии и т. п.). На эту обширную тему написано много превосходных статей, охватывающих разнообразные аспекты, но, к сожалению, они чрезвычайно рассеяны по различным, обычно достаточно новым изданиям. Поэтому многочисленные ссылки вместе со списками рекомендуемой литературы для студентов и преподавателей приводятся в конце каждой главы. Некоторые из наиболее важных и интересных статей опубликованы в сравнительно малоизвестных и труднодоступных журналах и сборниках. По возможности более распространенные источники для удобства приведены в дополнительных списках рекомендуемой литературы. Эта книга *не* относится к обзорным сводкам, поэтому автор и не пытался представить полную библиографию. Списки литературы скорее преследуют цель дать читателю несколько полезных отправных точек для введения его *в обширный круг* литературы по рассматриваемой проблеме.

В целом книга основана на качественном подходе, однако особое внимание уделено таким неопровержимым данным, как образцы, фотоснимки и измерения физических параметров. Полнота освещения отдельных проблем частично отражает собственные научные интересы автора, однако в основном зависит от объема имеющихся геологических данных, относящихся к тому или иному разделу. Количественные разработки, необходимые для курсовых работ, можно выполнить практически по каждому разделу книги, если использовать списки дополнительной литературы и специальные библиографические ссылки.

В связи с исключительным размахом космических исследований объем данных по геологии внеземных объектов увеличивается в последние годы с огромной скоростью. Исторический аспект до некоторой степени отражен, но касающийся его материал по необходимости ограничен по объему. Гораздо важнее было дать описание различных аспектов рассматриваемой проблемы на уровне ее современного понимания.

Книгу удалось существенно улучшить после конструктивной критики и рецензий Дж. Батлера (Хьюстонский университет), К. Мура (Университет шт. Аризона), Б. Финнея (Принстонский университет), Дж. В. Смита (Чикагский университет) и Дж. Уэтерилла (Институт Карнеги). Всем этим коллегам автор глубоко признателен, так же как и многочисленным друзьям и товарищам по работе, предоставившим фотографии, рисунки и другой иллюстративный материал. Во всех случаях, где такой материал использован, его высокое качество и достоверность полностью гарантировано. Хотелось бы особо поблагодарить М. Дэйли и Д. Петтуса, которые обеспечивали фотографическую обработку как моих собственных материалов, так и негативов, полученных из других источников. Т. Кинг я благодарен за безотказную и высококвалифицированную помощь в правке рукописи и составлении указателей.

Надеюсь, что благодаря моей книге многие студенты будут приобщены к увлекательным проблемам космической геологии, что даст возможность совершить новые открытия или по-новому интерпретировать известные факты в столь захватывающей области, как геологическое изучение космического пространства.

г. Хьюстон, Техас

Э. Кинг

Естественно, деревня была охвачена необычайным возбуждением при вторжении столь непривычного пришельца и много было догадок по поводу причин его появления, так что я ничуть не удивился, когда услышал, что многие люди бросились поклоняться этому камню при первых признаках его появления и относились к нему так, словно он был посланцем богов.

Бабу Умеш Чандра Рай, 1906 г.

1. Метеориты

ВВЕДЕНИЕ

Метеориты являются единственными образцами внеземного вещества, если не считать материала, недавно доставленного с Луны при выполнении программы «Аполлон». Упоминания о камнях, падающих с неба, можно найти в литературных источниках древнего Китая, Греции и Рима, однако их появление связывали обычно с сильными ветрами, которые могли поднять такие камни в небо, откуда они вновь падали на Землю. Черный камень Кааба, одна из наиболее почитаемых мусульманских реликвий, сохраняется в качестве святыни в Мекке. Широко распространено мнение, что этот камень относится к метеоритам и представляет собой древнейшее из сохранившихся наблюдавшихся метеоритных выпадений¹. В связи с рассказом о падении метеорита уже в 1808 г. ссылаются на Томаса Джефферсона: «...может быть, очень трудно объяснить, каким образом камень, который находится у Вас, попал в то место, где был обнаружен. Но не легче объяснить и то, каким образом он попал в облака, откуда, как полагают, упал на Землю. Природу этого явления предстоит еще объяснить, и я смею надеяться, что это будет совершенно теми людьми, положение и знания которых позволят им это сделать»². Как только метеориты стали считать чисто природным явлением, по поводу источников и процессов, приводящих к их возникно-

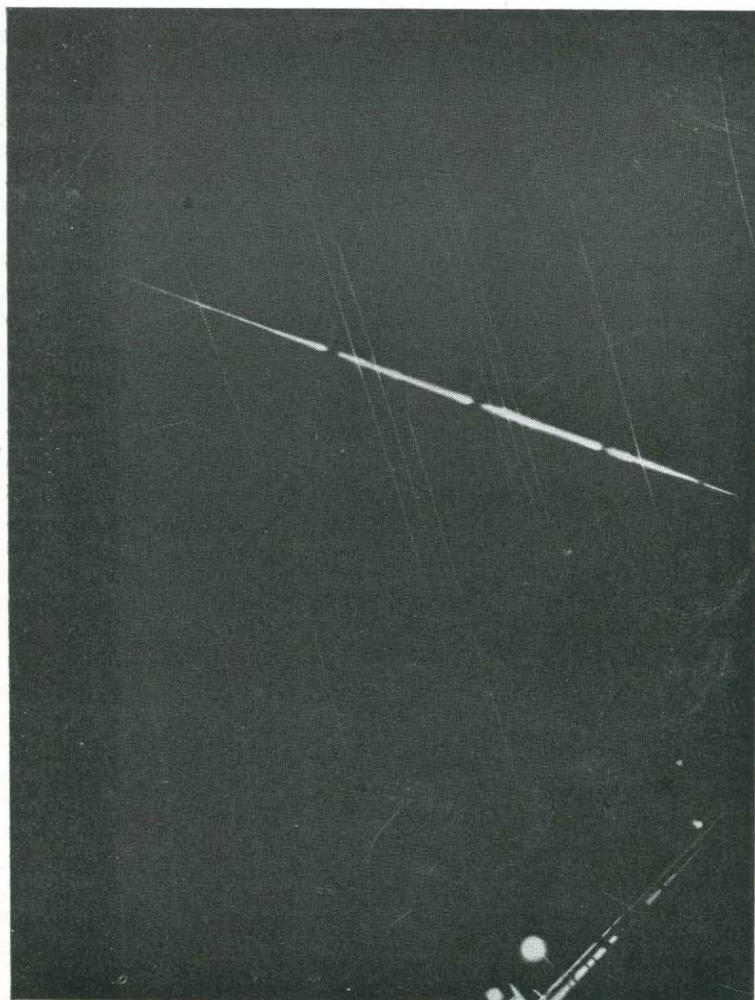
¹ Недавно Диц и Мак-Хоун высказали на этот счет сомнения, однако вопрос пока еще не решен (Meteoritics, 9, p. 173—179).

² Письмо г-ну Д. Сомону от 15 февраля 1808 г.

вению, развернулась широкая дискуссия. В 1879 г. Болл [1] вполне серьезно предполагал, что метеориты представляют собой обломки земных пород, находящиеся в околоземном космическом пространстве с начального периода геологической истории Земли как результат грандиозных вулканических взрывов.

Наши представления о природе метеоритов углубляются медленно и находятся на довольно низком уровне по сравнению с современным состоянием знаний о земных горных породах и лунных образцах. Существует обширная литература по метеоритам, где приводятся их описание и химические анализы. Однако отсутствует определенность в выявлении источника или источников происхождения различных типов метеоритов, равно как и другая «полевая информация», которую обычно считают весьма существенной для понимания происхождения земных пород и их генетических связей. Это обстоятельство приводит к резкому ограничению возможностей объяснить пути происхождения и возможные генетические связи между разнообразными типами метеоритов.

Более 1700 разнообразных метеоритов сохраняются в коллекциях многих стран. Богатые коллекции метеоритов тщательно оберегаются и пополняются в таких научных центрах, как Смитсоновский институт, Британский музей, Академия наук СССР, Парижский музей естественной истории, Центр метеоритных исследований при университете штата Аризона, Гарвардский и Йейльский университеты, Чикагский музей полевой геологии, и во многих других. Падение метеорита часто происходит в виде выпадения тысяч каменных или железных обломков, и считается, что все эти обломки являются фрагментами одного метеоритного тела. Практически во всех случаях обильные выпадения происходят в результате распада единого крупного метеороида на две и больше части в результате аэродинамического давления при вхождении его в плотные слои земной атмосферы с космической скоростью (фиг. 1). Часто сообщают о падениях единичных метеоритов. Если обнаруженный метеорит не наблюдался при его прохождении сквозь атмосферу в виде светового шара (болида) или светящегося падающего метеора, но его структура, минеральный и химический состав и строение поверхности показывают, что его следует относить к метеоритам, то говорят о «находке» (в противоположность «падению»). По международному соглашению метеоритам присваивают название ближайшего к месту находки или падения географического пункта, почтового отделения или административно-территориальной единицы, которую можно легко нанести на детальную карту района, если приведены долгота и широта места.



Фиг. 1. Фотография метеора Лост-Сити, полученная с помощью прерывистой системы Смитсоновского института.

Метеор появился 3 января 1970 г. в 20 ч 14 мин по центральному поясному времени и был сфотографирован с четырех разных точек наблюдения. Первоначально он был зафиксирован на высоте 86 км при скорости 14,2 км/с. След от метеора на фотографии имеет прерывистый вид, поскольку для определения его скорости использовался затвор с прерывателем. По серии фотоснимков, аналогичных приведенному, был предсказан район метеоритного падения, после чего на этой территории было найдено несколько обломков каменного метеорита, причем один из них весил 9,83 кг (фотоснимок предоставлен Р. Мак-Кроски, Смитсоновская астрофизическая обсерватория).

Традиционно наиболее общая классификация метеоритов опирается на относительные содержания металлического и силикатного компонента. Поэтому имеют широкое применение термины «железный», «железокаменный» и «каменный» метеориты.

Железные метеориты сложены преимущественно никелистым железом, однако могут содержать силикатные и иные включения. Каменные метеориты состоят главным образом из силикатов, среди которых преобладают силикаты железа и магния, но содержание никелистого железа иногда превышает 24%. Железокаменные метеориты образуют группу довольно редких, трудно диагностируемых тел, которые сложены силикатами и характеризуются высоким содержанием никелистого железа. Относительную распространенность этих трех групп метеоритов лучше всего представить в форме простой статистической сводки наблюдаемых падений и находок (табл. 1). Достоверность сведений о находках ограничивается субъективными факторами отбора, поскольку большинство находок принадлежит обычно неспециалистам. Сравнительно легко обнаруживают железные метеориты, поскольку они отличаются от обычных земных пород. Такие метеориты магнитны, с поверхности обычно покрыты ржавчиной, имеют высокий удельный вес (в интервале от ~7,8 до 7,98) и яркий металлический блеск в белых и светло-серых тонах на свежем изломе или на отшлифованной поверхности. Кроме того, железные метеориты, по-видимому, труднее поддаются выветриванию, чем большинство каменных, поэтому они дольше сохраняются в поверхностных условиях и находки их более вероятны. Несмотря на то что многие каменные метеориты имеют ряд характерных свойств, позволяющих проводить их диагностику без большого труда (корка плавления, наличие хондр, незначительное содержание металла и др.), они не так сильно выделяются среди земных горных пород и требуют более тщательных или квалифицированных наблюдений¹ (см. относительную распространенность железных и каменных метеоритов среди находок и падений в табл. I).

Минералогии метеоритов посвящена сводка Мейсона [2], в которой описано более 80 минеральных видов, установленных к настоящему времени в различных типах метеоритов (табл. II).

¹ Общее число идентифицированных и исследованных метеоритов, к сожалению, крайне незначительно, поэтому потребность в новых, неизученных образцах чрезвычайно велика. Если у читателя есть образцы, напоминающие метеориты, или ему известно местонахождение подобных объектов, то многие научные сотрудники музеев и университетов (в том числе и автор книги) будут признательны за возможность изучения и идентификации таких «подозрительных» образцов.

Таблица I Распространенность различных типов метеоритов среди их находок и падений¹

Тип метеоритов	Падения		Находки		Всего	
	число	%	число	%	число	%
Железные	43	6	551	54	594	33
Железокамен- ные	12	< 2	58	6	70	4
Каменные	723	93	404	40	1127	63
Сумма	778		1013		1791	

¹ Заимствована из каталога метеоритов М. Х. Хей, изд. 3-е, пересмотренное и дополненное [Hey M. H. (1966), Catalogue of Meteorites, British Museum, Pub., № 464, 637 p.].

Таблица II Минералы метеоритов (CcI, II, III—углистые хондриты типа I, II, III; Ce—энстатитовые хондриты; Ae—энстатитовые ахондриты)¹

Название	Формула	Где обнаружен
Аваруит	Ni ₃ Fe	Акцессорный в железном метеорите Odessa и Allende (CcIII)
Алабадин	(Mn, Fe)S	Акцессорный в некоторых Ce и Ae
Алмаз	C	Встречается в уреилитах и железных метеоритах
Андрадит	Ca ₃ Fe ₂ Si ₃ O ₁₂	Акцессорный в Allende (CcIII)
Барринджерит	(Fe, Ni) ₂ P	Акцессорный в палласите Ollague
Бледит (астрahanит)	Na ₂ Mg(SO ₄) ₂ ·4H ₂ O	Акцессорный в Ivuna (CcI)
Брайенит	CaNa ₂ Mg(PO ₄) ₂	Акцессорный в некоторых железных метеоритах
Бржезианит	Cr ₃ S ₄	Акцессорный в железном метеорите Tucson
Вевеллит	CaC ₂ O ₄ ·H ₂ O	Акцессорный в Murchison (CcII)
Витлокит	Ca ₉ MgH(PO ₄) ₇	Акцессорный во многих метеоритах
Волластонит	CaSiO ₃	Акцессорный в Allende (CcIII)
Гентнерит	Cu ₈ Fe ₃ Cr ₁₁ S ₁₈	Акцессорный в железном метеорите Odessa
Герцинит	(Fe, Mg)Al ₂ O ₄	Акцессорный в некоторых CcIII
Гипс	CaSO ₄ ·2H ₂ O	Акцессорный в CcI и CcII
Графит	C	Обычный акцессорный в железных и некоторых каменных метеоритах

¹ Заимствовано из кн. В. Mason, The Mineralogy of Meteorites, Meteoritics, v. 7, No. 3, p. 309-326. Для дальнейшего более детального определения типов метеоритов и их видов, отмеченных символами в графе «Где обнаружен», см. соответствующие разделы в нижеследующем описании типов метеоритов.

Название	Формула	Где обнаружен
Графтонит	(Fe, Mn) ₃ (PO ₄) ₂	Редкий акцессорный в некоторых железных метеоритах
Гроссуляр	Ca ₃ Al ₂ Si ₃ O ₁₂	Акцессорный в Allende (CcIII)
Джерфишерит	K ₃ CuFe ₁₂ S ₁₄	Акцессорный в некоторых Ce, Ae и железном метеорите Toluca
Добреелит	FeCr ₂ S ₄	Акцессорный в Ce, Ae во многих железных метеоритах
Доломит	CaMg(CO ₃) ₂	Акцессорный в CcI
Ибонит	CaAl ₁₂ O ₁₉	Акцессорный в некоторых CcII и CcIII
Ильменит	FeTiO ₃	Акцессорный во многих каменных и железокаменных метеоритах
Калиевый полевой шпат	(K, Na)AlSi ₃ O ₈	Редкий акцессорный в отдельных железных метеоритах
Кальцит	CaCO ₃	Акцессорный в CcI и CcII
Камасит	(Fe, Ni)	В железных, железокаменных метеоритах и большинстве хондритов
Карлсбергит	CrN	Акцессорный во многих железных метеоритах
Кварц	SiO ₂	Акцессорный в некоторых эвкритах и Ce
Клинопироксен	(Ca, Mg, Fe)SiO ₃	Обычный минерал каменных и железокаменных метеоритов
Когенит	(Fe, Ni) ₃ C	Акцессорный во многих железных метеоритах и Ce
Кордиерит	Mg ₂ Al ₄ Si ₅ O ₁₈	Акцессорный в Allende (CcIII)
Космохлор (юрнит)	NaCrSi ₂ O ₆	Редкий акцессорный в некоторых железных метеоритах
Криновит	NaMg ₂ CrSi ₃ O ₁₀	Редкий акцессорный в отдельных железных метеоритах
Кристобалит	SiO ₂	Акцессорный, в основном в Ce
Лавренсит	(Fe, Ni)Cl ₂	Акцессорный в некоторых метеоритах
Лонсдэлит	C	Редкий, в уреилитах и железных метеоритах
Магнетит	(Mg, Fe)CO ₃	Акцессорный в CcI
Магнетит	Fe ₃ O ₄	Акцессорный в Ce

Продолжение табл. II

Название	Формула	Где обнаружен
Маккинавит	FeS_{1-x}	Обычный акцессорный минерал
Меджорит	$Mg_3(MgSi)Si_3O_{12}$	В хондритах Соогага и Tenham
Медь	Cu	Обычный акцессорный минерал
Мелилит	$Ca_2(Mg, Al)(Si, Al)_2O_7$	В СсIII
Меррихьюит	$(K, Na)_2Fe_5Si_{12}O_{30}$	Редкий акцессорный в хондрите Mezö—Madagas
Монтичеллит	$Ca(Mg, Fe)SiO_4$	Акцессорный в хондрите Sharps
Нефелин	$NaAlSiO_4$	Акцессорный в отдельных хондритах
Нинингерит	$(Mg, Fe)S$	Акцессорный в некоторых Сс
Оливин	$(Mg, Fe)_2SiO_4$	Обычен в каменных и железокламмных метеоритах
Ольдгамит	CaS	Акцессорный в Сс и Ае
Ортопироксен	$(Mg, Fe)SiO_3$	Обычен в каменных и железокламмных метеоритах
Осборнит	TiN	Акцессорный в Ае
Панетит	$(Ca, Na)_2(Mg, Fe)_2(PO_4)_2$	Акцессорный в железном метеорите Dayton
Пентландит	$(Fe, Ni)_9S_8$	Акцессорный, в основном в СсII и СсIII
Перовскит	$CaTiO_3$	Акцессорный в СсIII
Перриит	$(Ni, Fe)_5(Si, P)_2$	Акцессорный в Сс и Ае
Пирит	FeS_2	Акцессорный в Karoonda (СсIII)
Пирротин	$Fe_{1-x}S$	Акцессорный в СсI
Плагиоклаз	$(Na, Ca)(AlSi)_4O_8$	Обычен в каменных и железокламмных метеоритах
Рёддерит	$(K, Na)_2Mg_5Si_{12}O_{30}$	Редкий акцессорный в Сс и железных метеоритах
Рёнит	$CaMg_2TiAl_2SiO_{10}$	Акцессорный в Allende (СсIII)
Рингвудит	$(Mg, Fe)_2SiO_4$	В хондритах Соогага и Tenham
Рихтерит	$Na_2CaMg_5Si_8O_{22}F_2$	Редкий акцессорный в отдельных железных метеоритах и в Аее (Сс)
Рутил	TiO_2	Редкий акцессорный
Саркопсид	$(Fe, Mn)_3(PO_4)_2$	Редкий акцессорный в некоторых железных метеоритах
Сера	S	Акцессорный в СсI
Серпентин (или хлорит)	$(Mg, Fe)_6Si_4O_{10}(OH)_8$	Слагает основную массу в СсI и СсII
Синоит	Si_2N_2O	Редкий в некоторых Сс
Содалит	$Na_8Al_6Si_6O_{24}Cl_2$	Акцессорный в некоторых СсIII

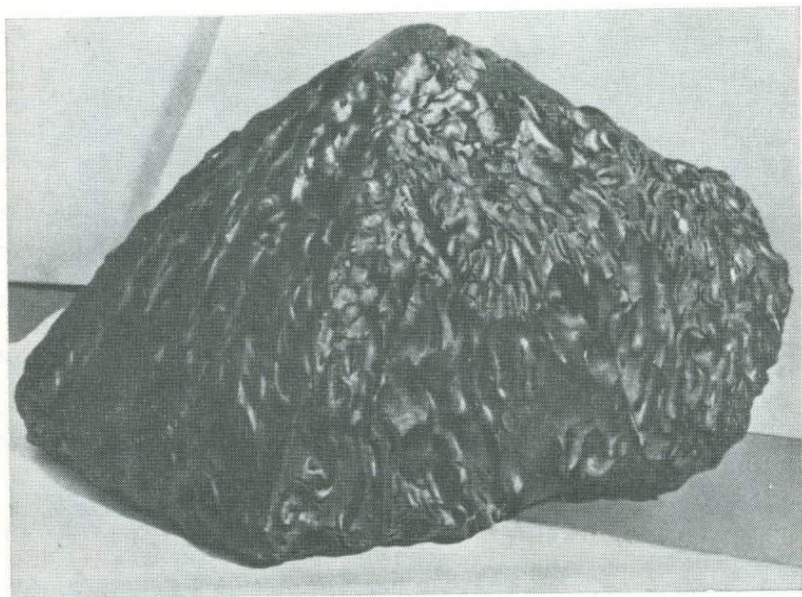
Продолжение табл. II

Название	Формула	Где обнаружен
Стеффилдит	$Ca_4(Mg, Fe)_5(PO_4)_6$	Акцессорный в некоторых железокламмных метеоритах
Сфалерит	$(Zn, Fe)S$	Акцессорный в Сс и некоторых железных метеоритах
Тридимит	SiO_2	Акцессорный в некоторых каменных, железокламмных и железных метеоритах
Троилит	FeS	Присутствует в большинстве метеоритов
Тэнит	(Fe, Ni)	См. камасит
Фаррингтонит	$Mg_3(PO_4)_2$	Акцессорный в некоторых палласитах
Халькопирит	$CuFeS_2$	Акцессорный в Karoonda (СсIII)
Хизлевудит	Ni_3S_2	Акцессорный в железном метеорите Odessa
Хлорапатит	$Ca_5(PO_4)_3Cl$	Акцессорный во многих метеоритах
Хромит	$FeCr_2O_4$	Акцессорный в большинстве метеоритов
Хэксонит	$Fe_{23}C$	Акцессорный во многих железных метеоритах
Циркон	$ZrSiO_4$	Редкий акцессорный
Чаоит	C	Редкий в уреилитах
Шпинель	$MgAl_2O_4$	Акцессорный, в основном в Сс
Шрейберзит	$(Fe, Ni)_3P$	Акцессорный в железных, железокламмных метеоритах и некоторых хондритах
Эпсомит	$MgSO_4 \cdot 7H_2O$	Часто в СсI
Ягиит	$(K, Na)_2(Mg, Al)_5(Si, Al)_{12}O_{30}$	Редкий акцессорный в железном метеорите Colomera

КАМЕННЫЕ МЕТЕОРИТЫ

ХОНДРИТЫ

Хондриты (каменные метеориты, содержащие хондры) количественно преобладают среди падений и, вероятно, в настоящее время представляют собой наиболее распространенный класс метеоритов в Солнечной системе (фиг. 2). Хондры, как правило, имеют вид шарообразных или близких к шарообразным тел, сложенных преимущественно силикатами, их размеры варьируют от менее чем 0,1 мм до более чем 20 мм. Оливин, пироксен, плагиоклаз, стекло, троилит, никелистое железо и комбинации этих минералов обычно характеризуют минеральный состав хондр. В структурном отношении хондры могут быть представлены агрегатами кристаллов, единичными кристаллами, иногда могут быть нацело сложены стеклом или кристаллами и стеклом, количественные и структурные соотношения которых



Фиг. 2. Каменный метеорит Rosebud (оливин-гиперстеновый хондрит).

Во время своего прохождения сквозь атмосферу этот метеорит, по-видимому, не менял своей ориентировки; он характеризуется ярко выраженной поверхностью абляции с точкой стагнации на макушке, имеет форму напоминающую конус, и хорошо сохранившуюся корку плавления. Вес метеорита 56,8 кг, максимальный размер в поперечнике около 45 см (коллекция Техасского университета).

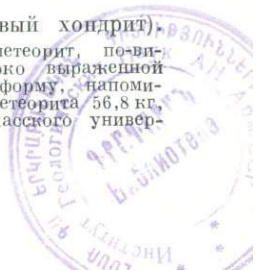


Таблица III Средний химический состав (главные элементы) обыкновенных хондритов¹

		Компоненты, вес. %	Оливин-бронзи- товые хондриты	Оливин-гиперсте- новые хондриты
Силикатная фаза	}	SiO ₂	36,41	39,70
		MgO	23,09	24,58
		FeO	8,87	14,33
		Al ₂ O ₃	2,60	2,81
		CaO	1,87	1,92
		Na ₂ O	0,93	0,94
		K ₂ O ²	0,10	0,11
		Cr ₂ O ₃	0,33	0,41
		MnO	0,26	0,26
		TiO ₂	0,11	0,11
		P ₂ O ₅	0,18	0,22
		H ₂ O	0,30	0,24
Металлическая фаза	}	Fe	17,45	7,13
		Ni	1,68	1,07
		Co	0,10	0,07
		P	0,05	0,04
		FeS	5,67	6,06

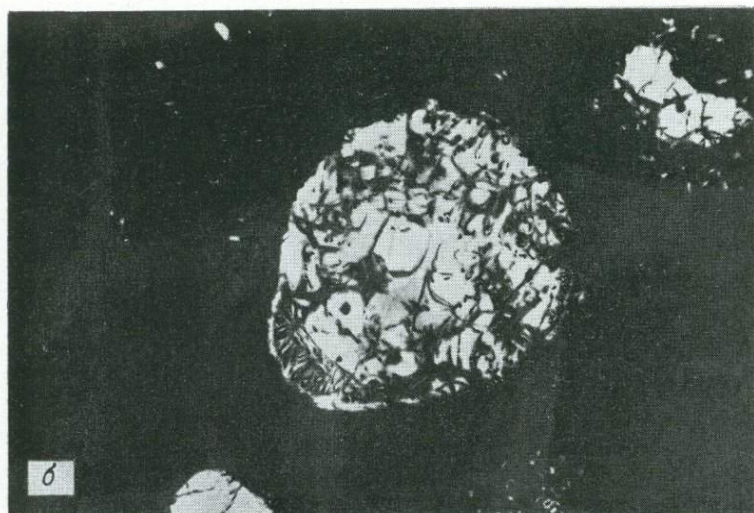
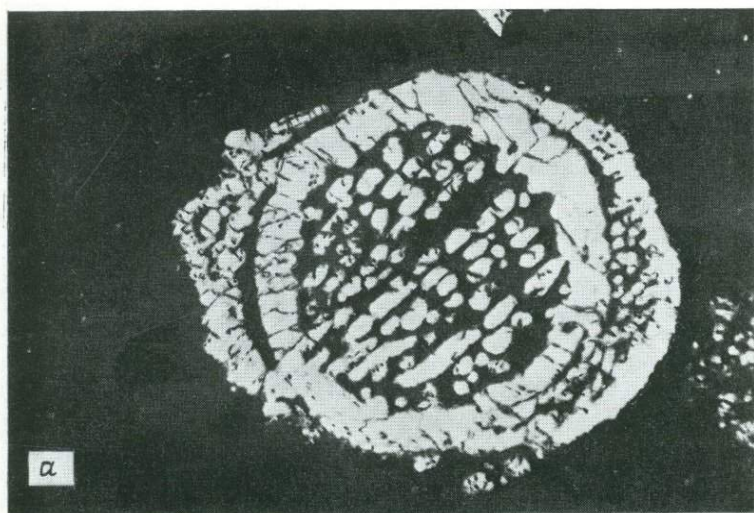
¹ Аналитические данные отобраны Юри и Крейгом [8].

² Содержание K₂O приведено по Гейссу и Хессу (Ар. Jour., 127, p. 224, 1958).

варьируют в бесконечно широких пределах (фиг. 3). По-видимому, многие хондры представляли собой отдельные капли жидкости, которые приобрели сферическую или близкую к ней форму вследствие поверхностного натяжения, а позднее подверглись затвердеванию и кристаллизации. Тем не менее очевидно, что не все хондры произошли именно таким путем: они могут представлять собой округленные обломки или являться результатом более сложных процессов (о происхождении хондр см. на стр. 43).

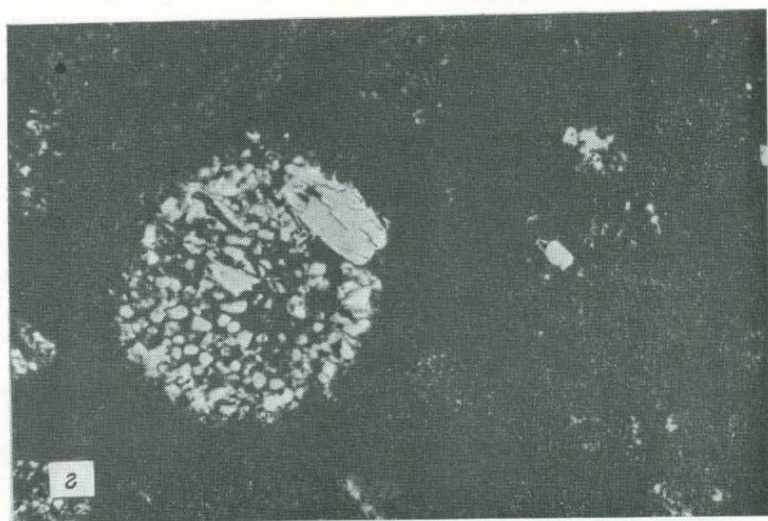
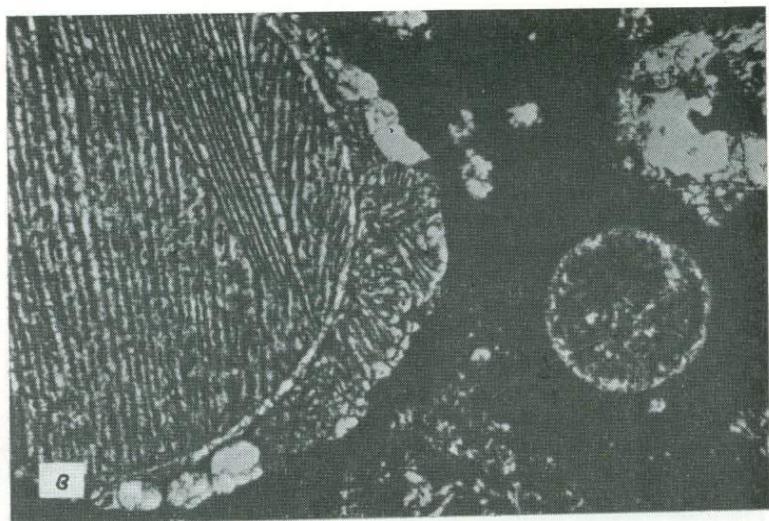
Классификация хондритов основана на их химическом и минеральном составе. Наиболее широко принята классификация, впервые предложенная Прайором [3] в 1920 г. и впоследствии усовершенствованная Мейсоном [4], согласно которой выделяют следующие классы хондритов: энстатитовые, бронзитовые (или оливин-бронзитовые), гиперстеновые (или оливин-гиперстеновые), углистые¹. По химическому составу хондриты примерно соответствуют основным и ультраосновным изверженным породам, если иметь в виду по крайней мере наиболее распространенные их типы. В табл. III помещены представительные анализы двух наиболее распространенных классов метеоритов.

¹ Мейсон предложил, кроме того, выделить класс оливин-пиконитовых хондритов, однако впоследствии сам же рекомендовал этот термин исключить.

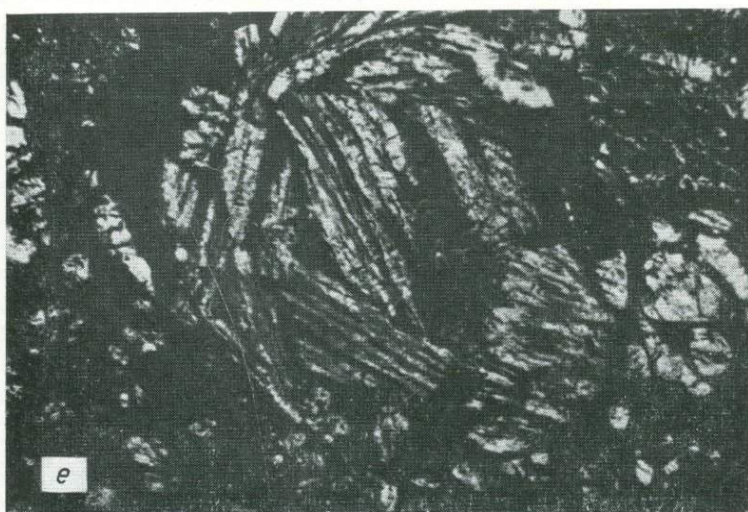
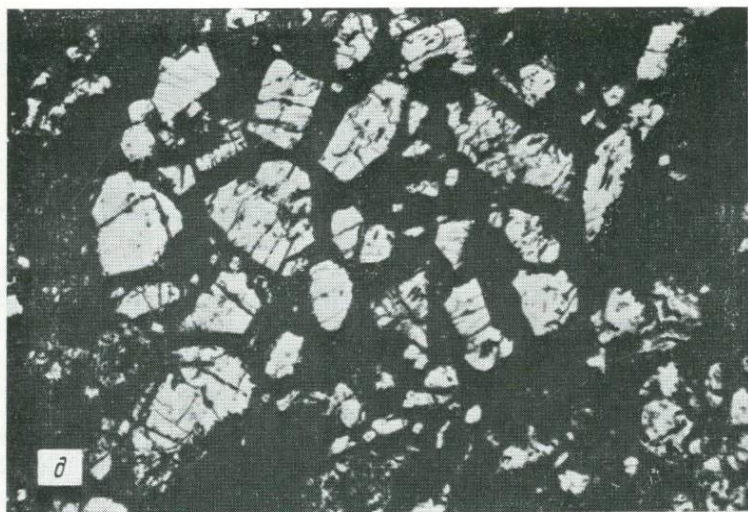


Фиг. 3. Разновидности структур и минерального состава хондр обычного типа.

а. Полосчатая хондра, состоящая из оливина и стекла, внутренняя каемка имеет большую толщину, чем внешняя. Весь оливин оптически прозрачен; стекло замутнено и имеет темно-бурый цвет. Метеорит Pueblito de Allende. *б.* Хондра, состоящая из оливина и стекла с идиоморфными и гипидиоморфными кристаллами оливина в основной массе, сложенной частично девитрифицированным прозрачным светло-бурым стеклом. Следует обратить внимание на кайму с удлинёнными кристаллами оливина в нижней левой части хондры. Метеорит Pueblito de Allende.



6. Слева — крупная полосчатая хондра, состоящая из пироксена и стекла; характерны тонкая кайма и плотная текстура основной массы; справа — менее крупная хондра, сложенная зернами оливина, пироксена и стеклом со слабо выраженной каемкой. Метеорит Pueblito de Allende. 2. Слева — хондра, сложенная беспорядочно ориентированными зернами оливина в основной массе, состоящей из замутненного бурого стекла; справа — темная хондра, содержит оливин, плагиоклаз, пироксен, имеет крайне тонкозернистую основную массу, вероятно, представляет собой обломок породы. Метеорит Pueblito de Allende.



д. Хондра, состоящая из многочисленных, беспорядочно ориентированных отдельных кристаллов оливина в темной тонкозернистой основной массе. Метеорит Weldon. е. Хондра, сложенная радиальными кристаллами клинопироксена и бурым замутненным стеклом. Метеорит Weldon. Масштаб всех фотографий одинаковый, длина поля зрения 3 мм. На снимках а — д значительная площадь занята непрозрачной основной массой, что характеризует стандартную толщину петрографических шлифов углистых хондритов.

Закономерности изменения химического и минерального состава хондритов были впервые обнаружены Прайором [3], обобщение этих наблюдений позволило сформулировать правила Прайора в следующем виде:

1. Чем меньше количество никелистого железа в хондрите, тем выше отношение никеля к железу в металлической фазе.
2. Чем меньше количество никелистого железа в хондрите, тем выше отношения железа к магнию в железо-магнезиальных силикатах.

Первые наиболее значительные исследования хондритов были выполнены Розе [5], который предложил их классификацию и впервые выделил хондриты в самостоятельную группу, а также блестящим петрографом Чермаком [6] и Бржезиной [7], последний в конечном итоге провел подразделение хондритов более чем на 30 классов. Классификация Розе — Чермака — Бржезины широко применялась исследователями метеоритов вплоть до 60-х годов. Несмотря на то, что недостатки классификаций Розе — Чермака — Бржезины, ее акцент на внешние признаки отмечались уже Прайором [3], эта система была принята вплоть до появления исчерпывающей сводки по метеоритам, составленной Мейсоном [4].

Прайор указывал, что отнесение отдельного хондрита к тому или иному классу должно определяться любым из трех видов химических определений:

1. Отношением MgO/FeO в валовом анализе.
 2. Относительным объемом металлической фазы и отношением Ni/Fe в ее составе.
 3. Отношением MgO/FeO в силикатах, нерастворимых в HCl .
- Тем не менее одна из трудностей применения химических критериев для классификации метеоритов заключается в сложности получения достоверных и представительных химических анализов. Критический обзор анализов каменных метеоритов, проведенный Юри и Крейгом [8], привел к тому, что эти авторы по тем или иным признакам забраковали примерно $2/3$ опубликованных анализов хондритов, что, естественно, было воспринято с обидой многими аналитиками. Хотя в настоящее время достоверность химических анализов резко возросла, все еще остается нерешенной серьезная проблема отбора материала для анализа из хондритов. В соответствии с любыми современными взглядами на природу хондритов они представляют собой обломочные породы, сложенные агрегатом из отдельных хондр, обломков пород и зерен основной массы, причем химический состав всех этих компонентов варьирует в широком диапазоне. Исследователи и аналитики метеоритов нередко стараются подвергать анализу минимальные навески вещества, поскольку метеориты являются редкими, уникальными объектами. Поэто-

му многие валовые анализы метеоритов выполнены на образцах, общий вес которых не превышает всего нескольких граммов. Обычно такие анализы считаются «представительными» в отношении всего метеорита. Если желательно получить данные о примерном валовом составе метеорита и если имеется достаточное количество вещества, бесспорно, следует растереть до порошка и хорошенько перемешать для выравнивания состава образец весом 50—100 г, из которого затем отбирается аликвотная часть. Однако для наименее однородных из метеоритов даже такой отбор материала не будет эффективным. Подобный анализ обычно применяют для метеоритов, относимых к падениям, однако более сложные проблемы возникают при анализе находок, поскольку их состав в той или иной мере изменяется в результате выветривания. Несмотря на то, что анализы выветрелых образцов вполне могут характеризовать химический состав сравнительно устойчивых минералов из метеоритов, результаты определения содержания металлической фазы, относительных количеств Fe, FeO, Fe₂O₃, общего содержания Ni, H₂O, органических соединений и углерода (а также содержания ряда других элементов) следует считать особенно сомнительными и интерпретировать с большой осторожностью.

Более современная попытка разработать классификацию петрографических типов хондритов, основанную на химических, минералогических и структурных признаках (табл. IV), принята Ван Шмусом и Вудом [9]. Эта классификация в настоящее время широко используется, однако некоторые неопределенности в ней вызывают трудности в применении, особенно в отношении углистых хондритов. Основопологающим принципом рассматриваемой классификации является модель прогрессивного метаморфизма хондритов [10], которая призвана объяснить сходный облик хондр, относительное постоянство состава оливина и другие критерии, показанные в табл. IV. Полная характеристика хондрита составляется из комбинации петрографического типа (*E* — энстатитовые хондриты, *C* — углистые хондриты, *H* — оливин-бронзитовые хондриты, *L* — оливин-гиперстенные хондриты, *LL* — «амфотерные» хондриты) и классификационной единицы валового химического состава, взятой из таблицы, например *C3*, *LL4*, *H6* и т. д.

Углистые хондриты. Почти все обнаруженные и изученные образцы (около 30) относятся к наблюдавшимся падениям. Однако после обнаружения метеорита Pueblito de Allende (Мексика, февраль 1969 г.) [11] общий вес метеоритов этого класса, находящихся в распоряжении ученых, возрос во много раз. Обнаружено свыше 2000 кг вещества этого падения, а масса вторгшегося метеорного тела оценивается в 20 т.

Таблица IV Петрографическая классификация хондритов по Ван Шмусу и Вуду [9]

	Петрографические типы					
	1	2	3	4	5	6
Однородность состава оливина и пироксена	—	Средние отклонения более 5%		Средние отклонения менее 5%	Состав однородный	
Структура состоит из пироксена с низким содержанием кальция	—	Преимущественно моноклинный		Много моноклинных кристаллов	Ромбический	
Развитие вторичного полевого шпата	—	Отсутствует		Преимущественно в виде микрокристаллического агрегата	Прозрачные интегретициальные зерна	
Магматогенное стекло	—	Прозрачное изотропное первичное стекло, количество варьирует		Если присутствует, то замутненное	Отсутствует	
Металлическая фаза (максимальное содержание никеля)	—	Тэнит отсутствует или его крайне мало ($Ni < 20\%$)	Присутствуют камасит и тэнит ($Ni > 20\%$)			

Продолжение табл. IV

	Петрографические типы					
	1	2	3	4	5	6
Сульфиды (среднее содержание никеля)	—	$> 0,5\%$	$< 0,5\%$			
Общая структура	Хондры отсутствуют	Хондры прекрасно выражены		Хондры четко выражены	Хондры легко выделяются	Хондры плохо выражены
Характер основной массы	Полностью тонкозернистая, непрозрачная	В основном непрозрачная	Непрозрачная	Прозрачная микрокристаллическая	Перекристаллизованная	
Суммарное содержание углерода	$\sim 2,8\%$	$0,6-2,8\%$	$0,2-1,0\%$	$< 0,2\%$		
Суммарное содержание H_2O	$\sim 20\%$	$4-18\%$	$< 2\%$			

Регистрация распространения воздушных волн при взрывах и шумов, сопровождающих волновые колебания различной длины, первоначально предназначалась для обнаружения ядерных взрывов в атмосфере и явлений, происходящих при вхождении в атмосферу спутников и баллистических ракет. Такие изыскания привели к фиксации значительного числа атмосферных явлений, очевидно обусловленных вторжением хрупких метеоритов, не обнаруженных впоследствии на поверхности Земли. Углистые хондриты, особенно относящиеся к типам I и II (см. табл. VI), обычно хрупкие, поэтому при падении их обломки легко разрушаются от удара о земную поверхность или при внедрении их в грунт. Некоторые атмосферные явления, сопровождавшиеся выделением огромного количества энергии (например, суммарная энергия падения Revelstoke в Британской Колумбии, Канада, 1965 г. [12], оценивается в 10^{19} — 10^{20} эргов), были связаны с выпадением крайне малых количеств метеоритного вещества. В районе Revelstoke после усиленных поисков обнаружили лишь 1 г углистых хондритов, однако «черная пыль», наблюдавшаяся на снегу, вполне могла относиться к метеориту, но не была собрана. Можно сделать достаточно обоснованный вывод, что углистые хондриты и(или) метеориты некоторых других «хрупких» типов распространены гораздо шире, чем это отражено в статистике зарегистрированных падений.

Первый анализ углистого хондрита был выполнен в 1834 г. Берцелиусом на материале падения Alais (Франция, 1806 г.). Результаты оказались настолько непохожими на все имевшиеся к тому времени анализы метеоритов, что Берцелиус усомнился в принадлежности исследованного образца к метеоритам. Наши современные знания о содержании главных элементов в углистых хондритах базируются в основном на результатах Виика [13]. Виик опубликовал 11 новых анализов углистых хондритов (табл. V) и показал, что последние по составу главных элементов можно подразделить на три группы (табл. VI), которые получили простые индексы: типы I, II, III. Такая классификация в настоящее время считается общепринятой. Кроме того, Виик отметил, что если анализы пересчитать после вычета летучих компонентов, то все результаты будут чрезвычайно сходными. В целом углистые хондриты характеризуются высокими содержаниями летучих соединений и элементов, в том числе воды, серы и редких газов. В соответствии с названием углистые хондриты, как правило, характеризуются высоким содержанием углерода, за исключением ряда образцов, относящихся к типу III. Характерными чертами минералогии и петрографии углистых хондритов являются отсутствие или крайне низкое содержание свободной металлической фазы, подчинен-

Таблица V Химический состав некоторых углистых хондритов (в вес. %)¹

	Название метеоритов										
	Orgueil	Ivuna	Mighei	Nawapali	Haripura	Santa Cruz	Murray	Ornans	Cold Bokkeveld	Lance	Mokoia
Fe	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,72	0,00	2,19	0,00
Ni	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	—	0,00	1,50	0,00
Co	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	—	0,00	0,07	0,00
FeS	15,07	18,38	10,05	7,67	14,93	9,04	7,67	6,43	8,16	6,49	6,74
SiO ₂	22,56	22,71	27,81	27,08	26,39	29,36	28,69	33,52	27,33	33,23	33,40
TiO ₂	0,07	0,07	0,08	0,09	0,08	0,12	0,09	—	0,08	0,13	0,10
Al ₂ O ₃	1,65	1,62	2,15	2,09	2,27	2,19	2,19	—	2,29	2,93	2,51
MnO	0,19	0,23	0,21	0,17	0,19	0,19	0,21	0,18	0,19	0,20	0,19
FeO	11,39	9,45	19,13	20,76	15,12	22,34	21,08	—	20,17	24,80	25,43
MgO	15,81	16,10	19,46	17,89	18,04	21,16	19,77	23,87	18,73	23,54	23,98
CaO	1,22	1,89	1,66	2,20	2,01	2,30	1,92	1,99	1,56	2,64	2,56
Na ₂ O	0,74	0,75	0,63	0,54	0,70	0,50	0,22	0,55	0,61	0,58	0,51
K ₂ O	0,07	0,07	0,05	0,16	0,07	0,12	0,04	0,17	0,05	0,14	0,04
P ₂ O ₅	0,28	0,41	0,30	0,26	0,23	0,32	0,32	0,35	0,30	0,32	0,38
H ₂ O ⁺	} 19,89	18,68	12,86	16,41	13,70	{ 9,23	9,98	0,25	15,17	1,40	2,07
H ₂ O ⁻											
Cr ₂ O ₃	0,36	0,33	0,36	0,38	0,45	0,39	0,44	0,50	0,42	0,49	0,52
NiO	1,23	1,34	1,53	1,54	1,71	1,64	1,50	0,00	1,49	0,00	1,64
CoO	0,06	0,06	0,07	0,06	0,08	0,08	0,08	0,00	0,08	0,00	0,08
C	3,10	4,83	2,48	2,50	4,00	2,54	2,78	—	1,30	0,46	0,47
П.п.п.	6,96	4,10	0,36	2,03	—	—	0,62	—	2,23	—	—
Сумма	100,65	101,02	99,19	101,83	99,97	102,62	100,04	—	100,16	101,11	100,62

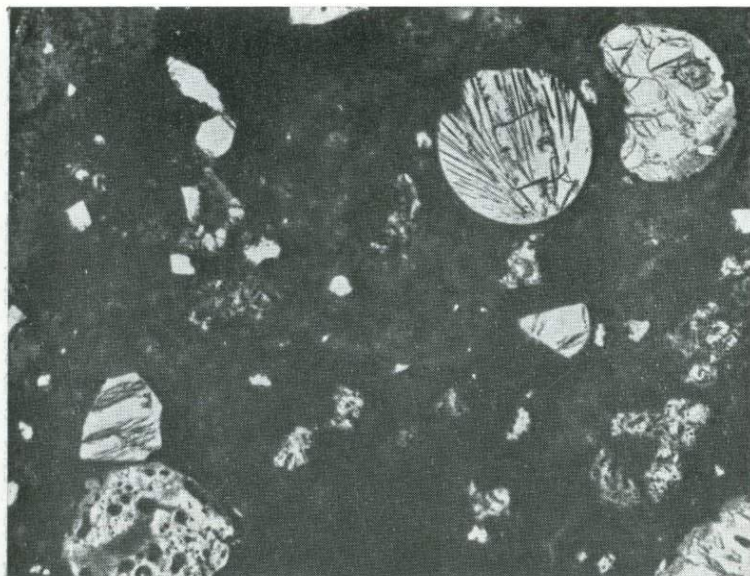
¹ Анализы выполнены Вингом [13].

Таблица VI Среднее содержание некоторых компонентов в различных типах углистых хондритов [13]

Тип	Название метеорита	SiO ₂	MgO	FeO	C	H ₂ O	FeS
I	Orgueil, Tonk, Ivuna	22,56	15,21	9,77	3,54	20,08	16,52
II	Cold Bokkeveld, Nougoya, Mighei, Nawapali, Haripura, Борискино, Santa Cruz, Murray	27,57	19,18	20,28	2,46	13,35	8,66
III	Felix, Lance, Mokoia, Warrenton, Orans	33,58	23,74	24,20	0,46	0,99	6,05

ная роль троилита и широкие пределы колебаний минерального состава, структуры и размеров хондр (фиг. 3, *a—z*). В типе I хондры отсутствуют, что, по словам Мейсона [4], является «трудно объяснимым противоречием». Тем не менее такие углистые метеориты следует уверенно относить к группе углистых хондритов, поскольку они весьма близки к образцам типа II по химизму и минеральному составу. Цвет углистых хондритов в основном изменяется от темно-серого до черного, а ряд образцов (например, Mokoia) имеет зеленоватый оттенок. Некоторые образцы типа III характеризуются более светлой окраской, вплоть до серых и светло-серых тонов. По удельному весу образцы типа I относятся к наиболее легким из всех метеоритов (приблизительно 2,2), однако метеориты типов II и III имеют удельный вес приблизительно от 2,5 до 3,7.

Основная масса в углистых хондритах темная и почти непрозрачная при наблюдениях в шлифах стандартной толщины (0,03 мм), однако, если изготовить специальные, вдвое тоньше, шлифы (фиг. 4), то микрокристаллическое строение основной массы становится более доступным для исследований. Крайне мелкие размеры зерен основной массы, как правило, приводят к затруднениям при идентификации минералов и определении петрографического состава. Кроме того, наблюдается довольно большое разнообразие минеральных видов в составе основной массы. В образцах типа I и II обычно присутствует серпентин и другие минералы, содержащие воду. Основная масса метеорита Pueblito de Allende (тип III) состоит главным образом из оливина и магнетита, причем этот оливин обогащен фаялитовой молекулой по сравнению с оливином хондр. Общий серый цвет метеорита, вероятно, в определенной степени зависит от содержания магнетита в основной массе и вряд ли связан

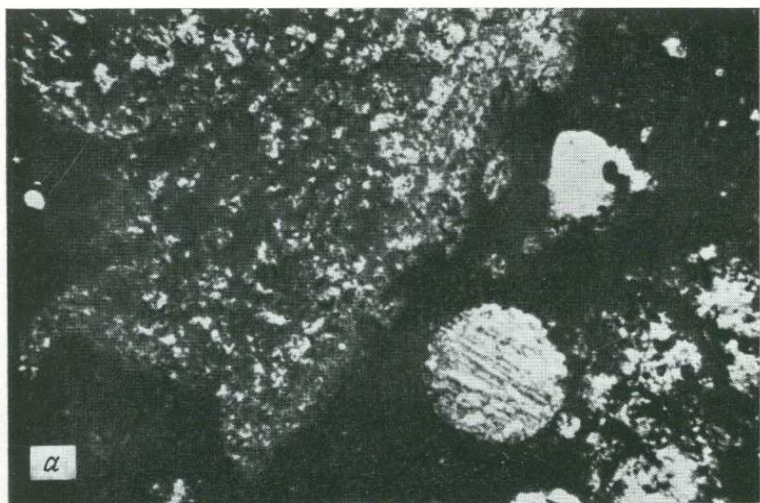


Фиг. 4. Сверхтонкий (~ 10 мкм) шлиф углистого хондрита Murchison (Австралия, тип II).

В основной массе метеорита видны многие черты ее строения, которые нельзя наблюдать в петрографических шлифах стандартной толщины (30 мкм). Следует обратить внимание на деформированные хондры и угловатые частицы. Длина поля зрения 2,8 мм при одном никеле. Шлиф предоставлен Г. Моурлэндом.

с низким содержанием углерода, которое достигает всего 0,27 вес. %.

К характерным особенностям углистых метеоритов типа II и III относится присутствие в них включений, агрегатов и хондроподобных тел с высоким содержанием кальция и алюминия. Такие включения впервые были обнаружены в 1961 г. в метеорите Штрокеем и др. [14], а впоследствии и другими исследователями. Однако их возможную роль и вероятное широкое распространение было трудно понять до тех пор, пока они не были зафиксированы в метеорите Pueblito de Allende, где само их существование несомненно; они имеют крупные размеры и встречаются в большом количестве. В работах Марвина и др. [15] и Кларка и др. [11] приведено описание минералогии и химизма кальций-алюминиевых включений из метеорита Pueblito de Allende. Минеральный состав этих включений изменчив, однако к числу главных фаз относятся мелилит или шпинель, диопсид и другие моноклинные пироксены, анортит, перовскит, энстатит, гроссуляр, нефелин, содалит, стекло,



Фиг. 5. Включения, богатые кальцием и алюминием, из метеорита Pueblito de Allende.

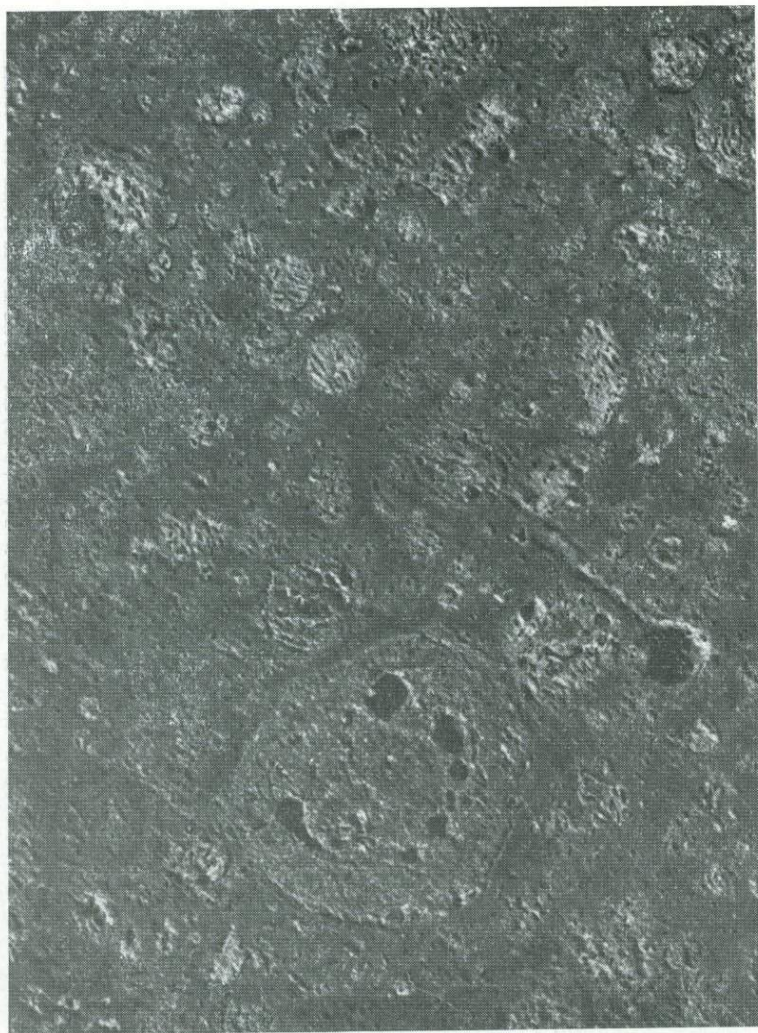
а. Вверху слева — включение неправильной формы, состоящее из меллита, анортита, шпинели и стекла. *б.* Внизу в центре — округлое включение, состоящее из стекла, диопсида, анортита и небольшого количества перовскита. Длина поля зрения примерно 3 мм.

богатое Ca и Al, и кордиерит (фиг. 5). Вполне возможно, что кальций-алюминиевые включения представляют собой высоко-температурные минеральные ассоциации и конденсируются из протопланетного облака. Интерпретация недавно выполненных изотопных анализов кислорода показала, что некоторые из таких включений могут содержать вещество, возраст которого превышает возраст Солнечной системы. Наиболее низкое отношение $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ в Солнечной системе ($0,69877 \pm 0,00002$) характеризует изотопный состав кальций-алюминиевых включений из метеорита Allende [16]. В настоящее время рассматриваемые включения являются объектом интенсивных исследований.

Другим открытием, сделанным в результате изучения метеорита Pueblito de Allende, было обнаружение пустот и пузырьков во многих хондрах (фиг. 6). В некоторых хондрах сферические пустоты имеют диаметр, равный $1/3$ диаметра хондры. Впоследствии хондры с пустотами были обнаружены в ряде других углистых метеоритов. Это наблюдение имеет большое значение для разработки некоторых моделей происхождения хондритов. В самом деле, совершенно очевидно, что метеорит Pueblito de Allende (и, вероятно, большинство остальных углистых хондритов) после образования хондр никогда не находился в глубинных зонах планетных тел, иначе высокое литостатическое давление неминуемо привело бы к обрушению пустот.

Как и в большинстве хондритов, в углистых хондритах содержатся включения или обломки метеоритов иных типов, а также обломки метеоритов того же самого типа, причем минеральный состав и(или) структура обломков весьма разнообразны (фиг. 7). Поиски подобных включений не были успешными, поскольку они связаны с необходимостью разрушать крупные образцы углистых хондритов, которые представляют собой большую редкость. Однако в метеорите Pueblito de Allende включения, представленные обломками различных типов углистых хондритов, встречаются довольно часто, а достаточное количество каменного материала позволило расколоть ряд крупных образцов и извлечь интересующие нас включения для анализа. Некоторые из включений принадлежат к углистым хондритам типа II (аналогичные наблюдения имеются в отношении метеорита Leoville, который так же, как и Pueblito de Allende, относится к типу III), причем показано, что различные темные включения характеризуются разным содержанием органических соединений и главных элементов и имеют различный минеральный состав.

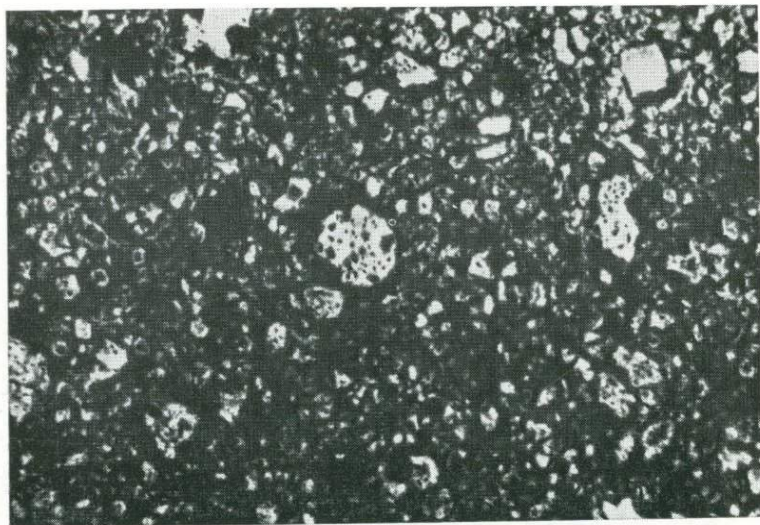
Определение органических соединений в углистых хондритах имеет длинную историю, однако точные и воспроизводимые



Фиг. 6. Пустоты с пузырьками в крупной хондре (в центре внизу) углистого хондрита Pueblito de Allende, наблюдаемой на поверхности распила.

Диаметр хондры примерно 5 мм.

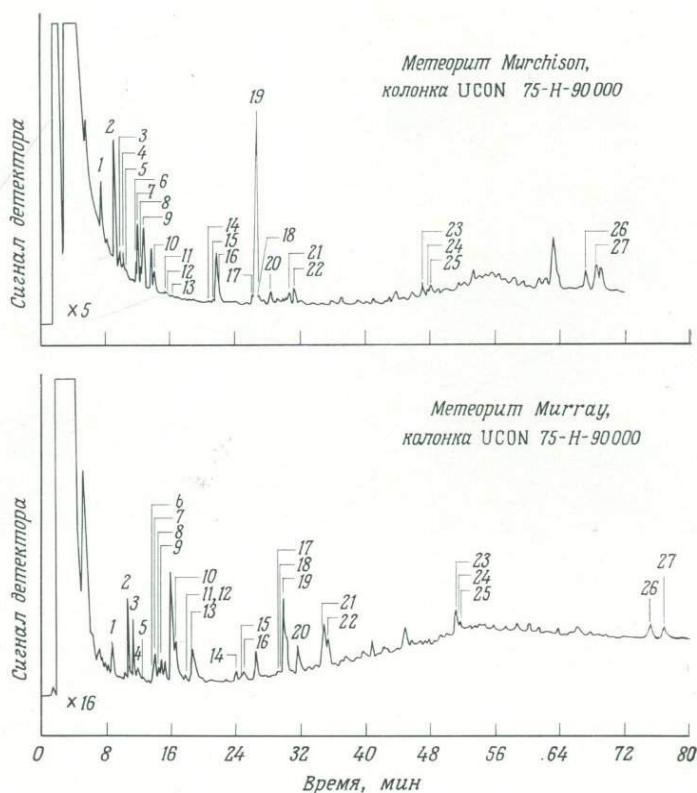
определения по существу отсутствовали до внедрения методов масс-спектрометрии органических соединений и газовой хроматографии. Значительная часть современных исследований углистых хондритов методами масс-спектрометрии направлена



Фиг. 7. Микрофотография обломочного включения, относимого к углистому хондриту типа II, в метеорите Pueblito de Allende (тип III).

Следует отметить, что размеры хондр намного меньше, чем во вмещающем метеорите, а минеральный состав большинства хондр более простой: чаще всего встречаются одиночные кристаллы или сростки нескольких кристаллов оливина. Аналогичные включения описаны в метеорите Leoville (тип III). Длина поля зрения примерно 3 мм.

на идентификацию, определение относительной распространенности и происхождения органических соединений, содержащихся в этих метеоритах. Такого рода информация *может* быть применена к проблеме происхождения жизни в Солнечной системе, однако эти анализы определенно свидетельствуют об абиогенном синтезе сложных углеродных соединений на ранних этапах истории Солнечной системы. Контаминация метеоритов земными органическими соединениями и организмами во время падений и после них ставит перед аналитиками трудно-разрешимую проблему. Очень часто литературные данные противоречивы как в отношении результатов анализа одного и того же образца, так и в их интерпретации. В большинстве углистых хондритов содержание органических соединений невелико, поэтому анализировать их трудно. Хотя было проанализировано небольшое число углистых хондритов непосредственно после падений, но даже в этих образцах обнаружено значительное разнообразие соединений углерода (фиг. 8). Обнаружены как алифатические, так и ароматические углеводороды, а в некоторых образцах определен ряд аминокислот (табл. VII). В настоящее время большинство исследователей



Фиг. 8. Газовые хроматограммы бутиловых эфиров аминокислот из углистых хондритов Murchison (вверху) и Murray (внизу).

1 — изовалин; 2 — α -аминоизомасляная кислота; 3 — D-валин; 4 — L-валин; 5 — N-метилаланин; 6 — D- α -аминомасляная кислота; 7 — D-аланин; 8 — L- α -аминомасляная кислота; 9 — L-аланин; 10 — N-метилглицин; 11 — N-этилглицин; 12 — D-норвалин; 13 — L-норвалин; 14 — D- β -аминоизомасляная кислота; 15 — L- β -аминоизомасляная кислота; 16 — β -аминомасляная кислота; 17 — D-пиперидиновая кислота; 18 — L-пиперидиновая кислота; 19 — глицин; 20 — β -аланин; 21 — D-пролин; 22 — L-пролин; 23 — γ -аминомасляная кислота; 24 — D-аспарагиновая кислота; 25 — L-аспарагиновая кислота; 26 — D-глутаминовая кислота; 27 — L-глутаминовая кислота. Заимствовано из Kvenvolden et al. (1971) *Advances in Organic Geochemistry*, p. 387—401, перепечатано с разрешения издательства «Пергамон Пресс».

приходят к общему выводу об абиогенном происхождении этих органических соединений, однако органическая химия ранних этапов развития Солнечной системы представляется гораздо более сложной, чем это ожидалось.

У нас нет ни точных наблюдений, ни фотографий падений углистых хондритов, которые позволили бы, хотя бы ориенти-

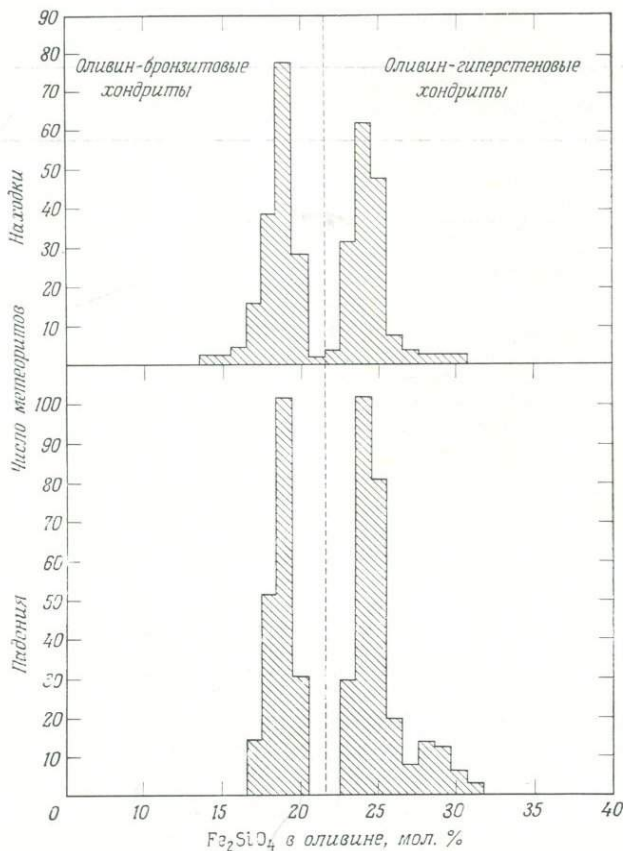
Таблица VII Углеводороды и аминокислоты, обнаруженные в метеорите Murchison¹

Типы углеводородов	Аминокислоты
Нормальные алканы	Глицин
Монометилловые алканы	Аланин
Диметилловые алканы	Валин
Алкильные циклогексаны	«Лейцин»
Прочие алкильные циклогексаны	Пролин
Полициклические алканы	Аспарагиновая
Олефины	Глютаминовая
Бензолы (и алкил-бензолы)	Саркозиновая
Бифениловые нафталины (и алкильные нафталины)	β -аланин
Антрацены (и алкил-антрацены)	N-метилаланин
Фенантрены (и алкил-денантрены)	N-этилаланин
Аценафтены	α -амино-N-масляная
Фторзамещенные алифатические соединения	α -амино-изомасляная
Пирены	β -амино-N-масляная
	β -амино-изомасляная
	α -амино-N-масляная
	Изовалин
	Норвалин
	Пипеколиновая

¹ Сводка составлена по данным анализов различных авторов. Список неполный, однако представляет состав главных компонентов [17].

ровочно, судить о месте(ах) их рождения в пределах Солнечной системы. Ученые предполагают, что они могут быть обломками комет или астероидов.

Оливин-гиперстеновые и оливин-бронзитовые хондриты. Эти хондриты относятся к наиболее часто встречающимся разновидностям каменных метеоритов, причем оба указанных типа метеоритов часто называют «обыкновенными хондритами». Главное отличие между оливин-бронзитовыми и оливин-гиперстеновыми хондритами заключается в разности валового содержания железа и его распределении между металлической и силикатной фазами. В оливин-гиперстеновых разновидностях валовое содержание железа и содержание металлической фазы меньше, чем в оливин-бронзитовых (см. табл. III и VIII). Различия в содержании металлической фазы настолько существенны, что диагностику обоих типов хондритов можно проводить с помощью визуальных подсчетов включений металла на поверхности распиленного образца. Содержание форстеритового и фаялитового компонентов в оливинах из обыкновенных хондритов изучалось на обширном материале Мейсоном [18] (фиг. 9). Состав этих метеоритов, очевидно, удовлетворяет правилам Прайора. Определение среднего состава оливина представляет



Фиг. 9. Гистограммы распределения составов оливина из 791 образца обыкновенных хондритов.

Очевидно, существуют две различные группы хондритов. Заимствовано из Мейсона [18]. Предоставлено Американским музеем естественной истории.

собой ценную информацию для классификации обыкновенных хондритов. Обычно эти данные легко получить с помощью рентгеновской порошковой валовой пробы метеорита. Кроме того, Ван Шмус и Вуд [9] использовали однородность состава оливина в качестве критерия для выделения петрографических типов в семействе хондритов, однако этот показатель необходимо определять специально, поскольку его трудно определить методом порошковых. Обычно для этого необходимо проанализировать на электронно-рентгеновском микроанализаторе большое количество проб как отдельных хондр, так и основной массы метеоритов.

По минеральному составу (модальные анализы) оливин-бронзитовые и оливин-гиперстеновые хондриты аналогичны, исключение составляет количество никелистого железа в металлической фазе. Мейсон [4] приводит модальные минералогические анализы обоих типов хондритов, которые воспроизведены в табл. VIII. Помимо минералов, указанных в таблице, в метео-

Таблица VIII Пределы колебаний модального минерального состава обыкновенных хондритов

Минерал	Оливин-гиперстеновые хондриты, об. %	Оливин-бронзитовые хондриты, об. %
Оливин	35—60	25—40
Ромбический пироксен ¹	25—35	20—35
Плагиоклаз	5—10	5—10
Никелистое железо	1—10	16—21
Троилит	~ 5	~ 5

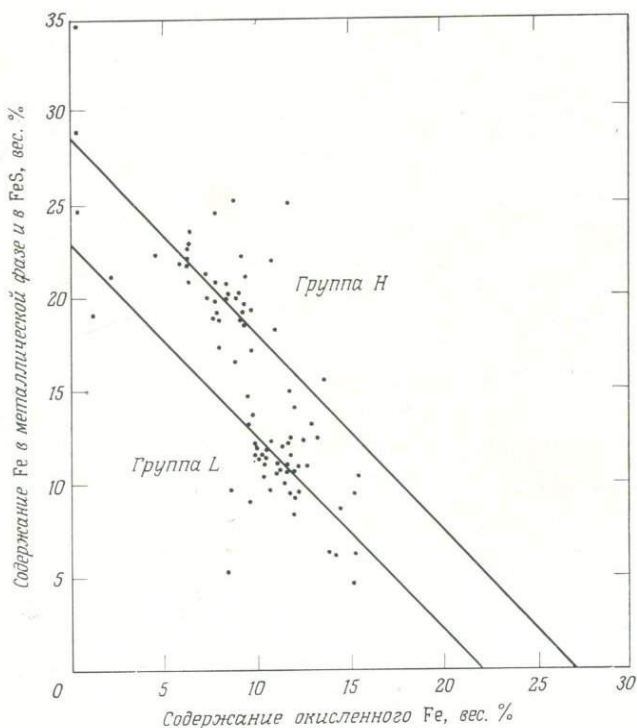
¹ Ромбический пироксен преимущественно представлен либо гиперстеном (> 20% FeSiO₃), либо бронзитом (10—20% FeSiO₃) в соответствии с названиями двух групп хондритов, однако принцип диагностики соответствует классификации, принятой в обычной петрографии, по которой бронзит содержит 12—30% FeSiO₃.

ритах обоих типов встречаются витлокит, хромит, апатит моноклинный пироксен и даже более редкие минералы.

Разделение выборки из 93 анализов каменных метеоритов «высшего качества» на группы Н и L (с высоким и низким содержанием железа), принятое Юри и Крейгом [8], было выполнено на основании соотношения окисленного железа и железа, содержащегося в металлической и сульфидной фазах (фиг. 10), и служит иллюстрацией принятого принципа разделения хондритов. Все оливин-гиперстеновые хондриты относятся к типу L, а бронзитовые — к типу Н. Генетический смысл подобной систематики не совсем понятен, но принцип выделения групп, по крайней мере частично, основан на генетических соотношениях.

Амфотериты (группа LL по Ван Шмусу и Вуду) выделяются рядом авторов в качестве особого типа обыкновенных хондритов, однако другие относят их к разновидности оливин-гиперстеновых хондритов (группа L). Эти метеориты являются наиболее окисленными среди обыкновенных хондритов¹ и в дан-

¹ Первоначально амфотериты были отнесены Прайором к ахондритам, однако Кваша обнаружила в них хондры (Chem. Erde, v. 19, p. 249—274, 1958). Впоследствии было показано, в основном благодаря исследованиям Кейла и Фредриксона (Jour. Geophys. Res., v. 69, p. 3487—3515, 1964), что амфотериты образуют группу, выделяющуюся по химическому составу.



Фиг. 10. Группы хондритов с высоким (H) и низким (L) содержанием железа по Юри и Крейгу [8], выделенные при графической интерпретации 93 анализов «высшего качества».

Двумя диагональными прямыми показано положение точек анализов при условии их полного подчинения правилам Прайора. По Мейсону [4], с изменениями.

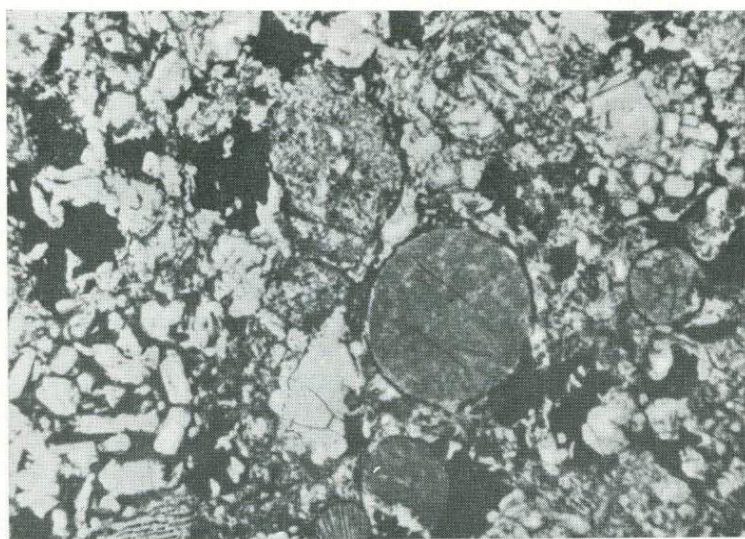
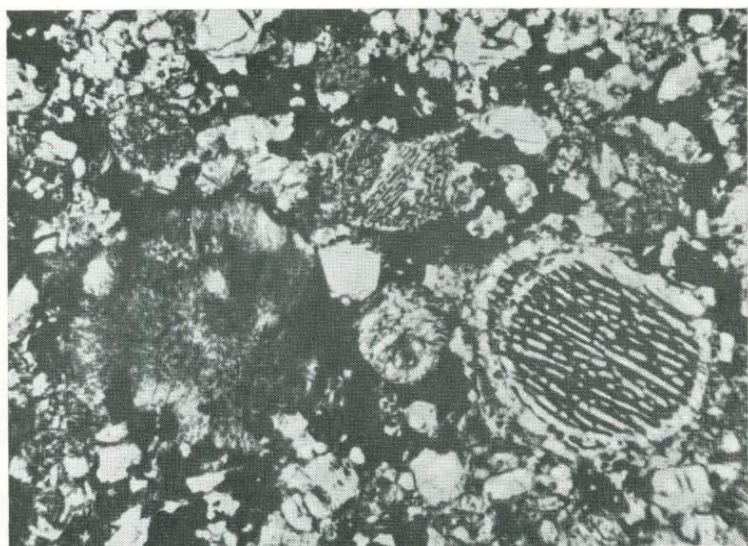
ной работе рассмотрены вместе с оливин-гиперстеновыми хондритами.

Хондритовая текстура большинства обыкновенных хондритов проявляется на трещиноватой поверхности. Никелистое железо и троилит наблюдаются в виде мелких зерен с металлическим блеском. Цвет свежих, не подвергшихся выветриванию метеоритов варьирует от светло-серого до черного. Однако по мере развития процесса выветривания образцы обычно темнеют и большинство коллекций содержит сильно выветрелые темно-бурые образцы. Удельный вес оливин-гиперстеновых хондритов колеблется от 3,4 до 3,6, а оливин-бронзитовых — от 3,6 до 3,9, что в основном отражает различия в валовом содержании железа и его металлической фазы.

Как и во всех типах хондритов, хондры крайне резко отличаются друг от друга по структуре, размерам и минеральному составу (фиг. 11). Тем не менее в минеральном составе хондр из обыкновенных хондритов главную роль играют оливин, ромбический пироксен и стекло. Во многих обыкновенных хондритах проявлены петрографические признаки ударных деформаций, которые наблюдаются либо во всем образце, либо в отдельных хондрах или включениях других пород (фиг. 12, см. также раздел «Ударные эффекты»). Считают, что значительная часть стекла и маскелинита, а также прожилки, обогащенные троилитом, представляют собой продукты инъекций ударного происхождения.

При диагностике петрографического типа (табл. IV) данного метеорита Ван Шмус и Вуд [9] придавали большое значение структуре хондр и основной массы. Несомненно, степень отличия хондр от основной массы обыкновенных хондритов весьма различна и выражается широким диапазоном изменения структуры (фиг. 13), причем интерпретация этого явления опирается на такие веские аргументы, как проявление прогрессивного метаморфизма или перекристаллизации или обоих процессов, что в свою очередь, по-видимому, обусловлено особенностями термической истории. Хондриты, в которых хондры резко выражены, а состав оливина характеризуется сравнительной неоднородностью, называют «неравновесными»; хондриты с плохо и едва различимыми хондрами, в которых состав оливина однороден, получили наименование «равновесных».

Энстатитовые хондриты. Метеорит Hvittis, падение которого было отмечено в 1901 г. в юго-западной Финляндии, был описан Боргстремом [19] и оказался первым метеоритом, сложенным преимущественно энстатитом, однако термин «энстатитовый хондрит» для описания такого класса каменных метеоритов был впервые введен Прайором [3]. Химизм и минералогия энстатитовых хондритов характеризуются следующими особенностями: практически отсутствует оливин, в небольших количествах содержится свободный кремнезем в виде кварца, тридимита или кристобалита, энстатит или протоэнстатит составляет примерно 55%, почти все железо входит в состав металлической фазы (никелистое железо), по сравнению с обыкновенными хондритами обогащены серой (т. е. сульфидами). Таких метеоритов насчитывается не более 20 образцов, причем они относятся к *сильно* восстановленным типам метеоритов. В самом деле, почти все железо восстановлено до металла, а в металлической фазе присутствует кремний. В значительном количестве обнаружены Ca, Sr и Mn в сульфидной форме [20]. Валовое содержание железа в метеоритах этой группы достигает более высоких значений, чем в любых других хондритах,



Фиг. 11. Две микрофотографии шлифов метеорита Faucett — типичного оливин-бронзитового хондрита.

Даже на очень небольшой площади видно, что хондры резко отличаются друг от друга по размерам, имеют различную распространенность и относятся ко многим разновидностям. Тонкозернистые серые хондры сложены в основном ортопироксенами. Большая часть остальных хондр представлена оливином и темным замутненным стеклом. Длина поля зрения 3 мм, при одном никеле.

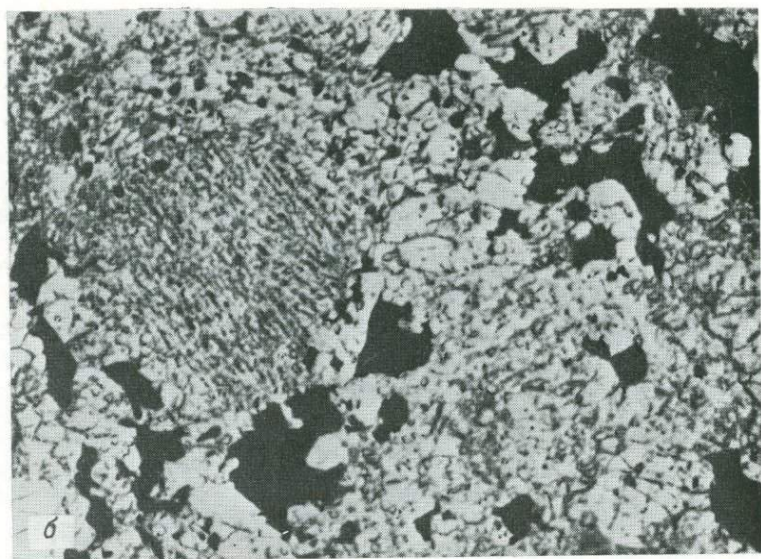
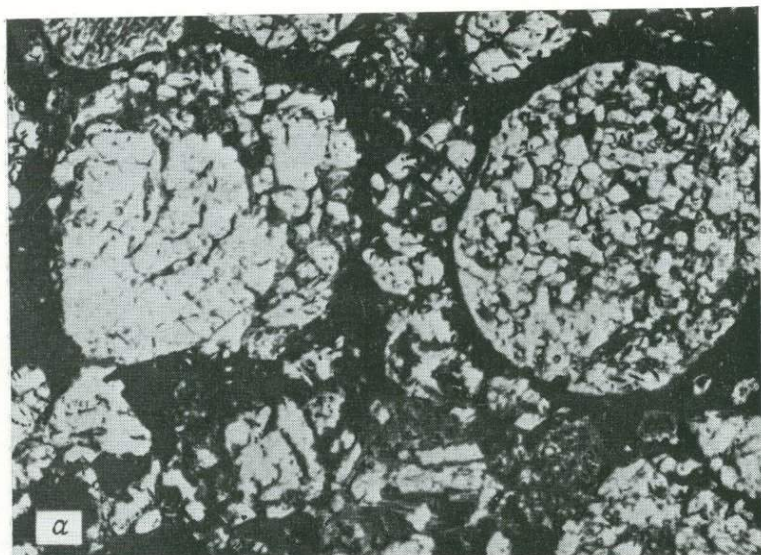


Фиг. 12. Оливин, подвергшийся крайне сильному ударному воздействию, в обыкновенном хондрите.

Резко проявлено волнистое погасание, характерны плоскости скольжения и дислокации. Такие обломки часто встречаются в большинстве хондритов. Длина поля зрения 1,4 мм, николи скрещены.

и обычно превышает 30%. Многие метеориты, которые по химическому составу относят к энстатитовым хондритам (группа E), содержат мало хондр или совсем не содержат. Цвет свежих энстатитовых хондритов варьирует от серого до почти черного. Удельный вес колеблется от 3,51 до 3,57, что хорошо коррелируется с валовым содержанием железа.

Исчерпывающая сводка по энстатитовым хондритам, включающая данные собственных исследований, была опубликована Мейсоном [21]. Он пришел к выводу, что энстатитовые хондриты составляют четко выделяющуюся группу хондритов со своими особенностями химизма и минералогии. Для этой группы не характерна однородность содержания железа, свойственная остальным типам хондритов, концентрация железа в них изменяется в интервале 20,7—35,0 вес.%. Согласно наблюдениям Мейсона, по мере уменьшения числа хондр и стирания различий между хондрами и основной массой происходит уменьшение содержания железа и увеличение размера зерен в раскристаллизованной части метеорита. Кроме того, в энстатитовых хондритах с высоким содержанием железа главной минеральной фазой является клиноэнстатит, а в образцах, бедных железом, — энстатит. Плаггиоклаз либо отсутствует, либо



Фиг. 13. Примеры резко выраженных хондр (а) в неравновесном хондрите Mezö Madaras и слаборазличимых хондр (б) в равновесном перекристаллизованном хондрите Tourinnes la Grosse.

При одном никеле, длина поля зрения примерно 3 мм.

появляется в крайне малых количествах в составе энстатитовых хондритов, обогащенных железом. Грант [22], проводивший тщательные исследования содержания свободного кремнезема в метеоритах, установил, что в противоположность остальным группам хондритов энстатитовые хондриты сравнительно часто содержат кварц, тридимит и кристобалит (фиг. 14, 15, табл. IX).

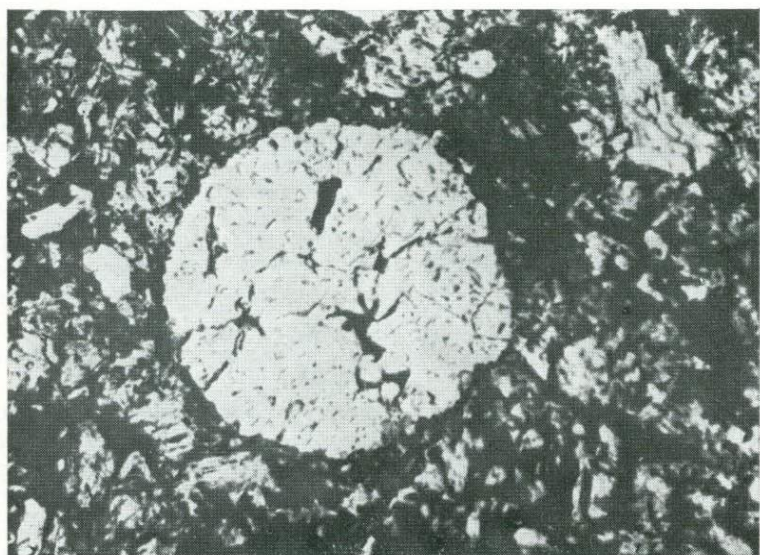
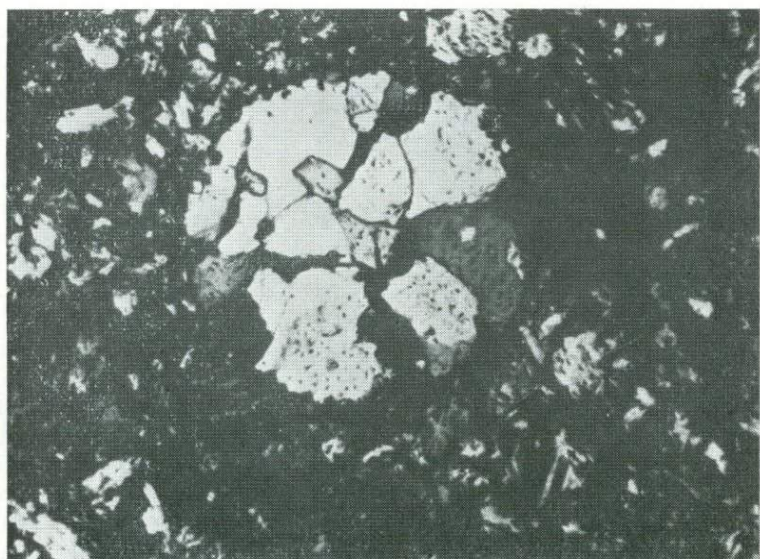
Наиболее крупный из энстатитовых хондритов, Аbee, был обнаружен в провинции Альберта в Канаде непосредственно к северу от Эдмонтона. Это падение представлено одним камнем весом 107 кг, что почти в четыре раза превышает вес самого значительного из известных до сих пор метеоритов этого типа — Индарх, СССР (фиг. 16).

Происхождение хондр. Ключ к пониманию происхождения хондритов могут дать расшифровка и познание процесса формирования хондр. На протяжении последних 100 лет на этот счет было выдвинуто много гипотез, причем некоторые из них явно противоречат современным фактическим данным. Здесь мы остановимся лишь на некоторых наиболее интересных идеях, плодотворных и оставивших заметный след в истории.

Кристаллизация сферолитоподобных хондр из гомогенных или почти гомогенных силикатных магм и расплавов предполагалась многими авторами. Бржезина [23] в 1885 г. предположил, что хондры представляют собой продукт быстрой вынужденной кристаллизации в расплавленной силикатной массе и формирование хондр происходит в результате магматической сегрегации особого типа. Та же идея с незначительными вариациями возрождена и поддержана Роем [24] и Рингвудом [25]. Рой полагает, что хондры — это продукт кристаллизации силикатного расплава, однако многие хондриты, сформированные при охлаждении такого расплава, впоследствии подверглись метаморфизму и деформациям. Рингвуд считает, что магма, кристаллизующаяся в виде сферолитов, затвердевает при температуре менее 1000 °С при высоких парциальных давлениях CO_2 и H_2O ; в этом случае в результате образуются хондритовые породы.

Мейсон [4, 26] выдвинул гипотезу о формировании хондр в процессе термического метаморфизма аморфной и(или) обогащенной серпентином основной массы углистых хондритов типа I при температуре около 400 °С.

Многие ученые считают, что хондры образовались в результате прямой конденсации из протопланетного облака, однако разработка физико-химической модели такого механизма встречает значительные трудности. Уипл [27] выдвинул представление о том, что хондры — это охлажденные капли силикатного расплава, появление которого вызвано электрическими разрядами в протопланетном пылевом облаке. Эта концепция воспри-

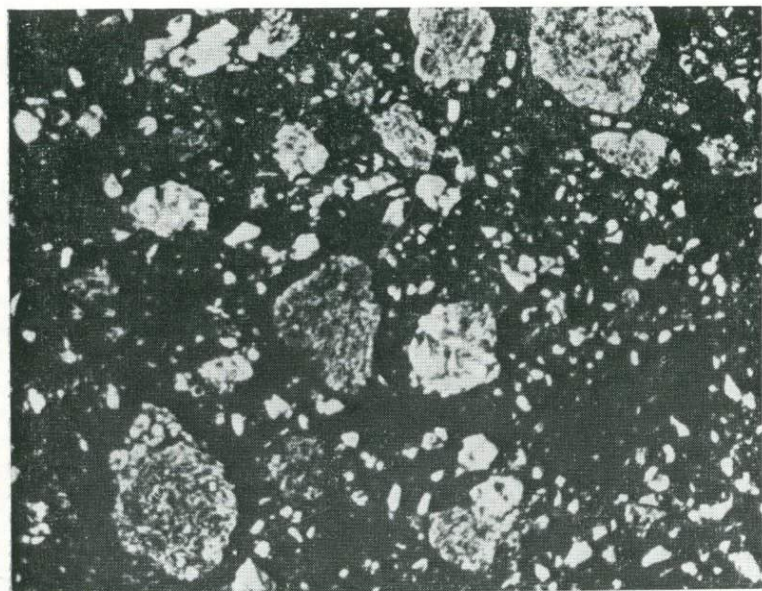


Фиг. 14. Кварцевые хондры в энстатитовом хондрите St. Mark.
Вверху — при одном николе; *внизу* — николи скрещены для показа поликристаллической текстуры хондры. Диаметр хондры примерно 0,2 мм. Предоставлено Р. Грантом.



Фиг. 15. Кристаллы кварца, выделенные из энстатитового хондрита St. Mark.

Следует отметить идиоморфизм большинства кристаллов, а некоторые из них огранены с обоих концов. Длина наиболее крупного кристалла примерно 0,06 мм. Предоставлено Р. Грантом.



Фиг. 16. Микрофотография шлифа энстатитового хондрита Индарх, СССР.

Непрозрачные области сложены в основном никелистым железом. При одном никеле, длина поля зрения примерно 3 мм.

Таблица IX Метеориты, содержащие свободный кремнезём¹

Название метеорита	Тип метеорита	Полиморфная модификация кремнезема
Abee, Альберта, Канада	Энстатитовый хондрит	Кварц, кристобалит
Atlanta, Луизиана, США	Энстатитовый хондрит	Тридимит
Barratta, Австралия	Гиперстеновый хондрит	Кварц
Bath, Южная Дакота, США	Бронзитовый хондрит	Кристобалит
Bishopville, Южная Каролина, США	Обрит	Тридимит
Cachari, Аргентина	Эвкрит	Тридимит
Carbo, Мексика	Октаэдрит	Кристобалит
Chaves, Португалия	Говардит	Тридимит
Clover Springs, Аризона, США	Мезосидерит	Тридимит
Crab Orchard Mtns, Теннесси, США	Мезосидерит	Тридимит
Daniel's Kuil, Южная Африка	Энстатитовый хондрит	Тридимит
Esterville, Айова, США	Мезосидерит	Тридимит
Frankfort, Алабама, США	Говардит	Тридимит
Hainholz, ФРГ	Мезосидерит	Тридимит
Homestead, Айова, США	Бронзитовый хондрит	Тридимит
Hvittis, Финляндия	Энстатитовый хондрит	Кристобалит
Индарх, СССР	Энстатитовый хондрит	Тридимит
Johnstown, Колорадо, США	Гиперстеновый хондрит	Тридимит
Juvinas, Франция	Эвкрит	Тридимит
Kendall County, Техас, США	Гексаэдрит	Тридимит
Khairpur, Пакистан	Энстатитовый хондрит	Тридимит
Mincy, Миссури, США	Мезосидерит	Тридимит
Moore County, Сев. Каролина, США	Эвкрит	Тридимит
Morristown, Теннесси, США	Мезосидерит	Тридимит
Pasamonte, Нью-Мексико, США	Эвкрит	Тридимит, кристобалит
Пилиствере, СССР	Энстатитовый хондрит	Тридимит
Sioux Country, Небраска, США	Говардит	Тридимит, кварц
Stannern, Чехословакия	Эвкрит	Кварц
Steinback, ФРГ	Сидерофир	Тридимит
St. Mark's, Южная Африка	Энстатитовый хондрит	Кварц
Toluca, Мексика	Октаэдрит	Кварц
Vaca Muerta, Чили	Мезосидерит	Тридимит

¹ Заимствовано у Гранта [22]. Находки свободного кремнезема описаны в ряде других метеоритов, однако во многих старых сообщениях речь идет о единичных зернах в минеральных фракциях, выделенных из метеоритов; эти зерна могут быть результатом контаминации. Известны упоминания о некоторых других энстатитовых хондритах, содержащих свободный кремнезём: Adhi Kot, Пакистан, Bethune, Колорадо, США Jajh deh Kot Lalu, Пакистан, Kota-Kota, Малави, Песьяное, СССР, Saint-Sauveur, Франция.

нимается многими исследователями метеоритов как вполне обоснованная теория.

Чермак [6] пришел к заключению, что хондры представляют собой округленные минеральные зерна и обломки пород. Однако формирование иных структурных типов хондр он объяснял отвердеванием силикатных капель и шариков. Юри и Крейг [8] предположили, что хондры являются продуктом охлаждения и кристаллизации капель силикатного расплава, возникающего в результате соударения двух астероидов, причем масса одного из этих астероидов намного больше массы второго. После соударения затвердевшие и частично затвердевшие капли могли падать на поверхность более крупного астероида. Недавние эксперименты по изучению кристаллизации расплавленных силикатных капель в условиях их переохлаждения показали, что можно воспроизвести структуры обычных хондр [28].

Кинг и др. [29] обнаружили хондры и хондроподобные тела в образцах лунных пород, доставленных экспедицией «Аполлон-14» (см. гл. 6), и указали на возможное значение этих находок для понимания происхождения хондритов. Вероятно, хондры лунных образцов сформировались под воздействием процессов, сопровождавших удар при падении крупного тела на поверхность Луны. К таким процессам может относиться, во-первых, кристаллизация силикатных капель и шариков, возникающих при ударном плавлении лунных пород, что по существу представляет собой вариант механизма, предложенного Юри и Крейгом, во-вторых, это процесс механического округления обломочных зерен, что является расширенным вариантом гипотезы Чермака, применявшего ее для объяснения происхождения хондр метеорита Soko-Banja.

Изучение петрографических особенностей, а главным образом структуры образцов «Аполлона-14», привело к представлению о возможности образования брекчий формации Фра-Мауро в результате остывания массы пород мощностью более 100 м. В образцах с «Аполлона-14» весьма четко проявлена последовательность перекристаллизации различных литологических типов пород (см. гл. 6). Отличия этих образцов от доставленных ранее экспедициями «Аполлон-11» и «Аполлон-12» обусловлены положением места посадки «Аполлона-14» в пределах пловы выбросов вокруг бассейна Моря Дождей. Поэтому весьма вероятно, что крупные ударные кратеры окаймлены мощными толщами выбросов, происхождение которых связано с базисной волной и отложением материала выбросов на поверхности Луны. Отложения такого типа могли формироваться при повышенных температурах (до 800 °С и более), а различия в скорости охлаждения отдельных порций остывающей массы

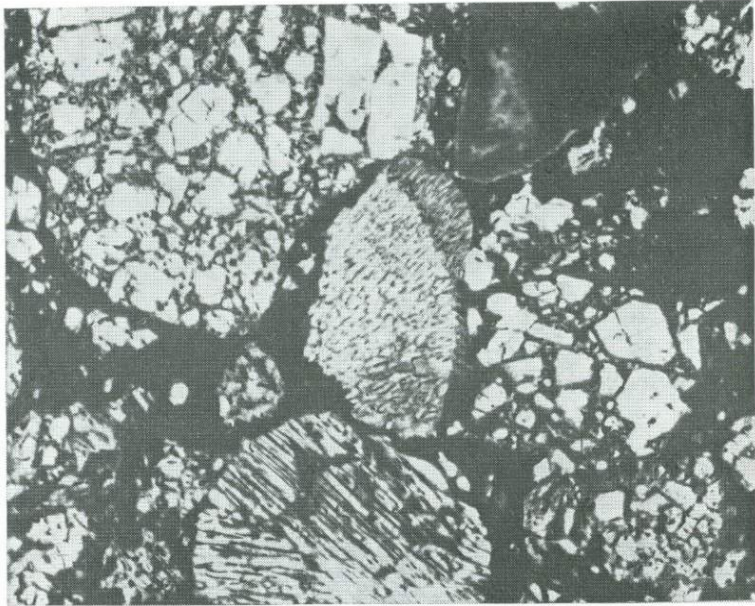


Фиг. 17. Схематическая диаграмма происхождения хондритов [29] и ее связь с классификацией петрографических типов хондритов по Ван Шмусу и Вуду.

Перепечатано из работы: Chondrules in Apollo 14 Samples and size analyses of Apollo 14 and 15 fines by E. A. King, Jr., J. C. Butler and M. F. Carman, с разрешения издательства Массачусетского технологического института, Кеймбридж, Массачусетс.

пород, по-видимому, определяли различия в структурах точно так же, как в земных туфах пепловых потоков. Такая обстановка на поверхности планеты может обеспечить температурный градиент, необходимый для формирования всех петрографических типов хондритов, выделенных Ван Шмусом и Вудом (фиг. 17). Действительно, при переохлаждении и кристаллизации жидких капель расплава, рассеянных на поверхности, стеклянные шарики в раскаленных отложениях могут подвергаться отжигу и девитрификации, а при перемещении обломочных частиц базисной волной создаются широкие возможности для округления и окатывания таких частиц.

Если в течение довольно длительного периода времени сохранялась достаточно высокая температура поверхностных отложений, то вокруг наиболее горячих обломков могли происходить процессы перекристаллизации, а частично и диффузии. Процессы перекристаллизации хондритов часто проявлены в образовании концентрических по отношению к хондрам текстур. Кроме того, во многих хондритах многочисленные петрографические критерии указывают на следы ударных процессов. Минералы, несущие такие следы, могут встречаться как во всем объеме метеорита, так и в отдельных хондрах



Фиг. 18. Микрофотография шлифа хондрита Mezö Madaras.

В центре поля зрения хорошо виден обломок хондры. Подобные фрагменты часто встречаются почти во всех типах хондритов. При одном никеле, длина поля зрения примерно 3 мм.

и обломках. Известно, что в большинстве метеоритов содержатся разные обломочные образования, деформированные хондры и обломки хондр (фиг. 18). Эти факты указывают на вероятность происхождения многих хондритов в результате многократных ударных и, возможно, некоторых других процессов.

АХОНДРИТЫ

Каменные метеориты, не содержащие хондр, довольно удачно названы ахондритами; сюда не относятся углистые хондриты типа I и некоторые энстатитовые хондриты, о чем говорилось выше. Обнаружено и исследовано всего около 70 ахондритов, причем большинство из них относится к падениям. Этот тип метеоритов с трудом поддается определению неспециалистами, и единственным ярким признаком служит черная стекловатая корка плавления на образцах свежих падений. Ахондриты классифицируются обычно на основе

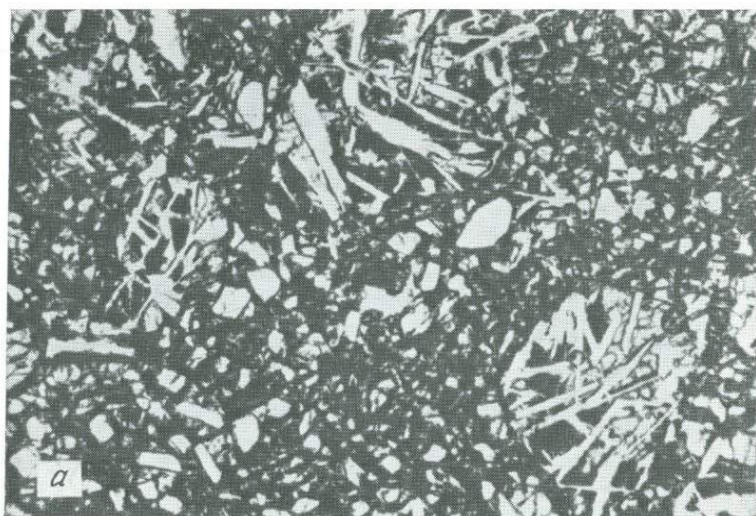
структурных, минералогических и химических критериев. Никелистое железо, как правило, не является их характерным компонентом, а в некоторых образцах вовсе отсутствует, кроме того, наблюдается тенденция к преобладанию в них более грубокристаллических структур, чем в остальных каменных метеоритах. В некоторых ахондритах наблюдаются структуры, аналогичные структурам обычных изверженных пород, но многие представлены брекчиями, содержащими угловатые обломки различного минерального состава и структуры. В некоторых брекчированных ахондритах находят угловатые обломки хондритов.

Прайор [3] разделил ахондриты на две группы на основании содержания кальция: бедные кальцием ахондриты (0—3 вес. % CaO) и богатые кальцием (5—25 вес. % CaO). Внутри каждой из этих главных групп Прайор выделяет более мелкие подразделения. Впоследствии его классификация была несколько видоизменена другими исследователями, однако в целом она остается неизменной. Эта классификация ахондритов приведена у Мейсона [4] и показана в табл. X.

Таблица X Классификация ахондритовых каменных метеоритов

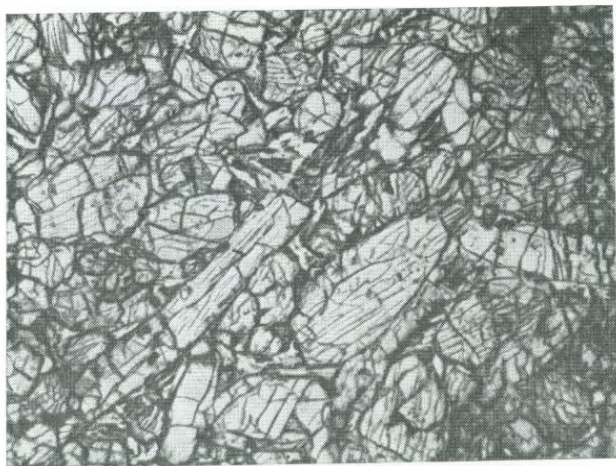
-
- | | |
|----|---|
| А. | Ахондриты, бедные кальцием |
| | 1. Энстатитовые ахондриты (обриты) |
| | 2. Гиперстеневые ахондриты (дпогениты) |
| | 3. Оливиновые ахондриты (шассиньиты) |
| | 4. Оливин-пизожонитовые ахондриты (урецлиты) |
| Б. | Ахондриты, богатые кальцием |
| | 1. Пироксен-плаггиоклазовые ахондриты (эвкриты и говардиты) |
| | 2. Авгитовые ахондриты (ангриты) |
| | 3. Диопсид-оливиновые ахондриты (наклиты) |
-

Уол [30] и Мичел [31] были первыми исследователями петрографии ахондритов, а Уол [32] позже обсудил некоторые общие положения петрографии и ряда особенностей брекчированных метеоритов. Многие отдельные описания и статьи относятся лишь к единичным или немногим образцам ахондритов. Обобщенное описание ахондритов выполнено Мейсоном [4]. Исчерпывающие исследования и обзор данных по эвкритам и говардитам имеются у Дюка и Силвера [34], которые обращают особое внимание на брекчиевидные текстуры многих образцов и предлагают классификацию эвкритов и говардитов (объединенных термином «базальтовые ахондриты»), основанную на их минералогии и структуре. Такая точка зрения, когда акцентировано внимание на различиях между мономиктовыми и полимиктовыми брекчиями, является широко распространенной.



Фиг. 19. Два поля зрения в шлифе эвкрита Pasamonte.

а. Общий вид обломочной структуры метеорита, в котором видны обломки с несомненной структурой изверженных пород. Следует обратить внимание на грубую сортировку и расслоенность материала. При одном никеле, длина поля зрения примерно 3 мм; б. Структура изверженной породы в обломке из метеорита Pasamonte; преобладают плагиоклаз, авгит и стекловатая основная масса. При одном никеле, длина поля зрения примерно 1,4 мм.

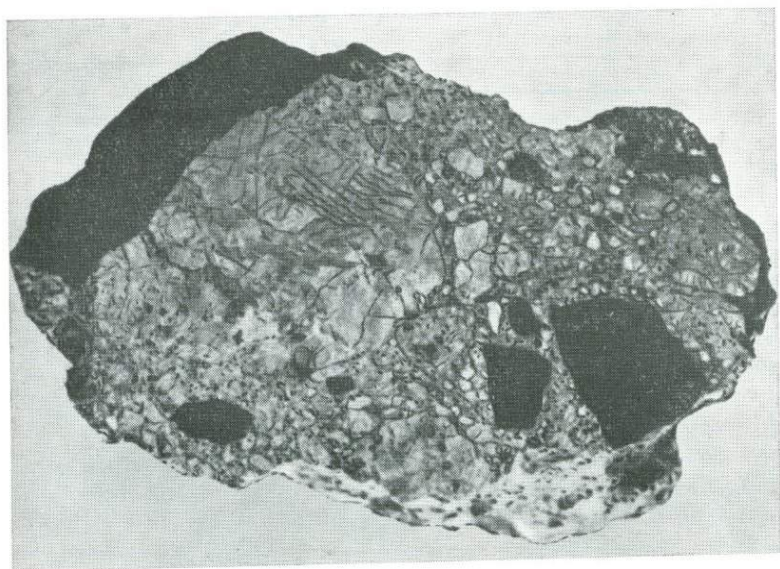


Фиг. 20. Микрофотография метеорита Nakhla — редкой разновидности богатого кальцием ахондрита.

Характерна гранулярная структура изверженных пород, многочисленные кристаллы оливина и диопсида. При одном никеле, длина поля зрения примерно 2,0 мм. Национальный музей США, образец USNM 426.

По числу образцов среди ахондритов преобладают разновидности, богатые кальцием, особенно эвкриты и говардиты, к которым принадлежат более 40 известных ахондритов (фиг. 19). Некоторые классы ахондритов представлены единственным образцом (ангриты и шассиньиты) или двумя (наклиты, фиг. 20). Известно всего около 10 обритов и столько же диогенитов. Некоторые из метеоритов, относящихся к названным группам, представляют интерес из-за содержащихся в них очень крупных кристаллов ромбических пироксенов, достигающих в длину нескольких сантиметров. Особое внимание привлек один из обритов, Рефа Blanca Springs, поскольку его падение хорошо наблюдалось [35]. Метеорит упал в 1946 г. в искусственный плавательный бассейн, который был образован при запруживании небольшого ручья вблизи центра крупного ранчо в западном Техасе. Было извлечено более 70 кг камней, а все явления, сопровождавшие падение метеорита в дневное время, детально задокументированы. Большой интерес представляет также метеорит Cumberland Falls — это брекчированный энстатитовый ахондрит, содержащий обломки темного хондрита в виде брекчии (фиг. 21).

Петрохимические особенности базальтовых ахондритов не раскрывают их взаимоотношений с остальными группами метеоритов, если не считать того, что силикатная составная



Фиг. 21. Обломок брекчированного энстатитового ахондрита Cumberland Falls.

На поверхности распила видны обломки крупных кристаллов энстатита и темные обломки хондритов. Длинная сторона образца составляет примерно 20 см. Национальный музей США, образец USNM 604, предоставлено Смитсоновским институтом.

часть некоторых мезосидеритов имеет одинаковый химический состав. Примеры химических анализов эвкритов и говардитов описаны в табл. XI. Следует подчеркнуть, что отбор предназначенных для химического анализа образцов брекчированных эвкритов и говардитов представляет собой весьма трудную задачу, так что публикуемые анализы могут лишь в первом приближении отражать валовый состав метеорита в целом.

Большинство исследований по проблеме происхождения ахондритов проведено на материале эвкритов и говардитов, поскольку остальные типы ахондритов исключительно редки. Структура многих отдельных обломков в составе брекчий в базальтовых ахондритах, особенно в эвкритах, аналогична структуре обычных земных изверженных пород, таких, как габбро, диабазы и базальты (фиг. 19). Во многих эвкритах содержатся обломки с офитовой и субофитовой структурой, а в ряде образцов отмечены зональные плагиоклазы и пироксены. Одно из отличий минерального состава базальтовых ахондритов и хондритов заключается в составе плагиоклаза: в первых он представлен преимущественно анортитом, а во вторых — олигоклазом. Это легко объяснить высоким содержа-

Таблица XI Анализы некоторых эвкритов и говардитов (в вес. %) ¹

	Говардиты ²		Эвкриты ³		Диапазон содержаний в эвкритах
	Юртук	Peter- sburg	Pasamonte	Juvinas	
SiO ₂	49,45	49,21	48,59	49,32	48,6—49,6
TiO ₂	—	—	0,65	0,68	0,4—1,0
Al ₂ O ₃	9,66	11,05	12,70	12,64	11,7—13,9
Fe ₂ O ₃	—	—	—	—	—
FeO	15,61	20,41	19,58	18,49	15,3—20,1
MgO	17,40	8,13	6,77	6,83	5,4—7,4
CaO	6,39	9,01	10,25	10,32	8,6—11,5
Na ₂ O	0,31	0,82	0,45	0,42	0,4—0,9
K ₂ O	—	—	0,05	0,05	0,04—0,22
Cr ₂ O ₃	0,04	0,42	0,33	0,30	0,06—0,9
MnO	0,72	—	0,56	0,53	0,3—0,8
P ₂ O ₅	0,01	—	0,10	0,09	0,09—0,16
Fe	—	—	—	0,04	0,00—0,05
FeS	—	0,16	0,06	0,53	0,03—0,57
H ₂ O ⁺	—	—	0,27	0,02	
H ₂ O ⁻	—	—	0,01	0,03	
Сумма	99,59	99,21	100,37	100,29	

¹ По Дюку и Силверу [34], с изменениями.

² Анализы заимствованы из Юри и Крейга [8].

³ Аналитик А. Мейнес.

нием кальция в богатых кальцием ахондритах. Структуры изверженных пород, наблюдающиеся во многих отдельных обломках в эвкритах, а также очень древний возраст этих метеоритов (4,5 млрд. лет), определение которого основано на интерпретации изотопных данных по ²⁰⁷Pb — ²⁰⁶Pb из троилита в метеорите Canyon Diablo [36] и других изотопных данных, привели Дюка и Силвера [34] к заключению, что магматические процессы происходили в Солнечной системе уже на самых ранних этапах ее развития. Однако не следует забывать, что некоторые эвкриты вполне могут представлять собой продукты кристаллизации ударных расплавов. Какие процессы приводят к брекчированию и возникновению как мономиктовых, так и полимиктовых брекчий, можно только предполагать. Однако наиболее вероятным кажется воздействие ударных эффектов, сопровождающих внедрение метеорита в реголит на поверхности какой-либо планеты или астероида. Петрографические критерии ударных процессов в большинстве эвкритов не очевидны, однако в некоторых эвкритах наблюдается диаплектовый маскелинит (см. стр. 161), который служит достоверным критерием ударных деформаций. В эвкрите Shergotty практически весь плагиоклаз превращен в маскелинит [37],

что указывает на очень высокую степень ударного метаморфизма (см. гл. 5, фиг. 6).

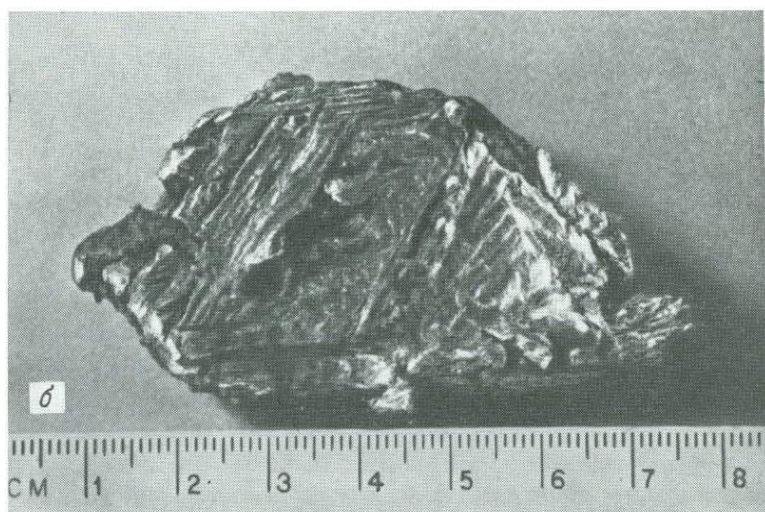
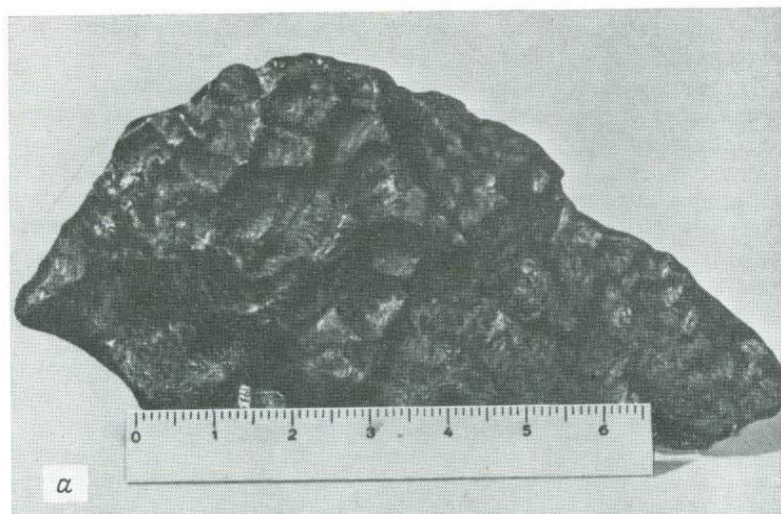
На основании древних возрастов кристаллизации базальтовых ахондритов, низких значений экспозиционного возраста по космическим лучам (от 2,8 до 6,0 млн. лет [34]), однородности химического состава и других соображений Дюк и Силвер [34] предположили, что вещество ахондритов имеет лунное происхождение и представляет собой вторичные выбросы при метеоритном ударе о поверхность Луны. Предполагалось, что говардиты могли быть обломками лунных материков, а эвкриты имеют «морское» происхождение. Эта концепция была широко распространена среди исследователей метеоритов, однако данные о составе лунных образцов, доставленных космическими кораблями «Аполлон», не подтверждают эту идею.

Каково бы ни было происхождение ахондритов или их отдельных классов, они представляют собой особую группу. Почти во всех представителях ее обнаруживаются существенные отличия по химизму и структуре от более обычных типов каменных метеоритов. Дальнейшие исследования ахондритов могут помочь в получении информации относительно ранних этапов образования Солнечной системы и происходивших в ней процессов.

ЖЕЛЕЗНЫЕ МЕТЕОРИТЫ

Введение. Куски метеоритного железа находят начиная с глубокой древности. Иногда их сохраняли из любопытства, но чаще обрабатывали или использовали тем или иным способом в качестве рабочего инструмента. Во многих музеях хранятся древние орудия труда, для изготовления которых, очевидно, применялось метеоритное железо. Естественно, метеоритное железо легко отличить от обычных земных пород (фиг. 22), следовательно, многие железные метеориты относятся к находкам. В самом деле, к этой категории принадлежит примерно 500 метеоритов, т. е. более 90% общего их числа. При распознавании железных метеоритов неспециалистами в современную эпоху единственная трудность — это спутать метеорит с широко распространенными отходами сталелитейного производства или иных отраслей индустрии.

Наиболее крупные по весу отдельные метеориты принадлежат к рассматриваемому в этом разделе типу, который является вторым по распространенности. Масса монолита выветрелого никелистого железа в железном метеорите Нова, юго-западная Африка, оценена приблизительно в 60 т, а в момент падения



Фиг. 22. Внешняя поверхность двух выветрелых железных метеоритов.

а. Кусок метеорита Henbury, Австралия, для которого характерен наиболее распространенный тип поверхности железных метеоритов. Масштаб в дюймах.

б. Обломок октаэдрита Carthage, в котором октаэдрическая структура выявилась в результате выветривания. Оба снимка предоставлены Университетом штата Аризона.

достигала, по-видимому, 100 т [39]. Немало железных метеоритов весом более 1 т сохраняется в музеях и других коллекциях. Несколько крупных железных метеоритов находится в коллекции Американского музея естественной истории, среди них выделяются три гренландских метеорита Cape York, наибольший из которых весит 31 т. Много железных метеоритов хранится в коллекции Горного института в Мехико, где собраны находки с территории Мексики. Некоторые из крупных железных метеоритов до сих пор лежат на месте их находки или вблизи от него, поскольку транспортировка из удаленных районов таких крупных масс затруднительна. Можно также предполагать, что многие из гигантских земных метеоритных структур являются результатом захвата крупных железных тел, но *не известен* ни один значительный ударный кратер, который мог бы сформироваться при падении каменного метеорита.

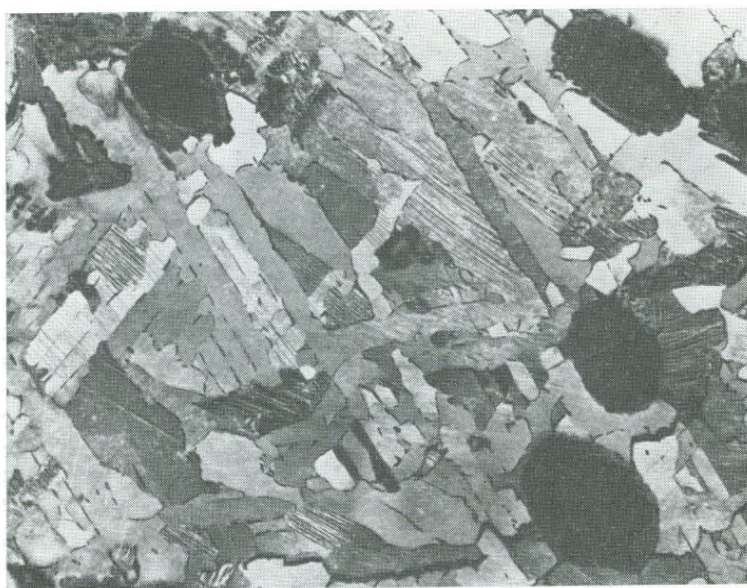
Железные метеориты сложены в основном двумя минералами: камаситом (α -железо, кубическая сингония, решетка объемноцентрированная) и тэнитом (γ -железо, кубическая сингония, гранецентрированная решетка). Однако в небольших количествах обычно содержатся и другие минералы: графит, шрейберзит, добреелит, когенит, хромит и троилит. Таким образом, помимо Fe и Ni в метеоритном железе обычно присутствуют такие элементы, как Co, S, P, Cu, Cr и C [40], но их общая концентрация редко превышает 2 вес. % (табл. XII). Троилит, графит и шрей-

Таблица XII Химический состав (главные элементы) некоторых железных метеоритов (в вес. %) ¹

	Гексаэдрит	Октаэдрит	Атаксит
	Coya Norte	Canyon Diablo	Tlacotepec
Ni	5,65	8,19	16,56
Co	0,40	0,44	0,69
P	0,29	0,34	0,04
C	0,004	0,026	0,004
S	0,032	0,009	0,004
Cu	0,014	0,028	0,001

¹ Анализы заимствованы у Мура и др. [40]. Практически весь остаток представлен железом.

берзит, как правило, образуют крупные, четко выраженные включения (фиг. 23) в никелистом железе, и действительное содержание S, P и C в некоторых метеоритах, вероятно, выше, чем по данным анализов, поскольку ряд исследователей при



Фиг. 23. Полированная и протравленная поверхность среднеструктурного октаэдрита Odessa.

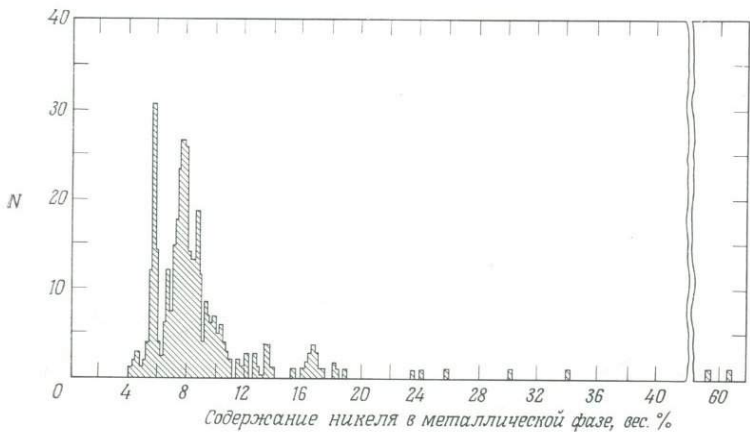
Видны видманштеттеновы фигуры, неймановы линии, а также включения. Последние представлены преимущественно графитом (цвет от темно-серого до черного) и троилитом (светло-серый). Вокруг включений развит шрейберзит, особенно крупные его скопления видны вокруг включения внизу справа. Длина поля зрения примерно 7 см.

отборе проб избегали использовать образцы, содержащие такие включения. В нескольких железных метеоритах обнаружены крупные включения силикатов, в которых иногда содержатся необычные минералы, например богатый калием полевой шпат [41]; в некоторых силикатных включениях зафиксированы хондры [42].

КЛАССИФИКАЦИЯ

Систематическое изучение железных метеоритов развивалось не так стремительно, как изучение каменных. Большинство ранних работ имеют сугубо описательный характер, а их обзор, снабженный прекрасными фотоснимками и систематизированным описанием металлографии¹ железных метеоритов, опубли-

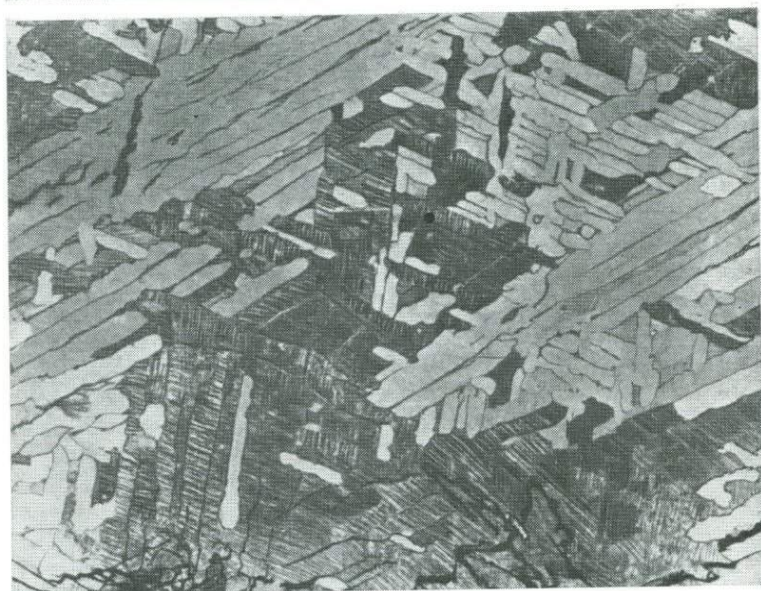
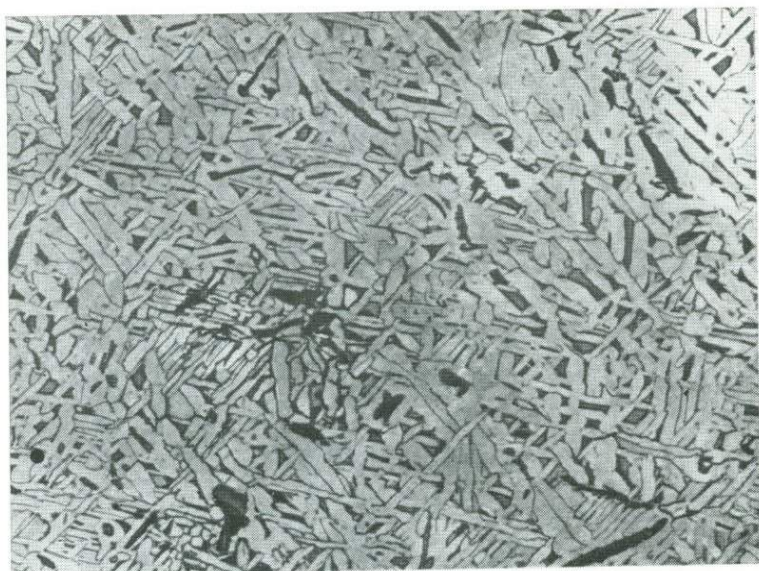
¹ При исследованиях петрографии и минералогии железных метеоритов в отраженном свете используют в равной мере термины «металлография» и «петрография».



Фиг. 24. Гистограмма распределения железных метеоритов (N) в зависимости от содержания никеля (вес %). По Явнелю (1958) и Мейсону [4].

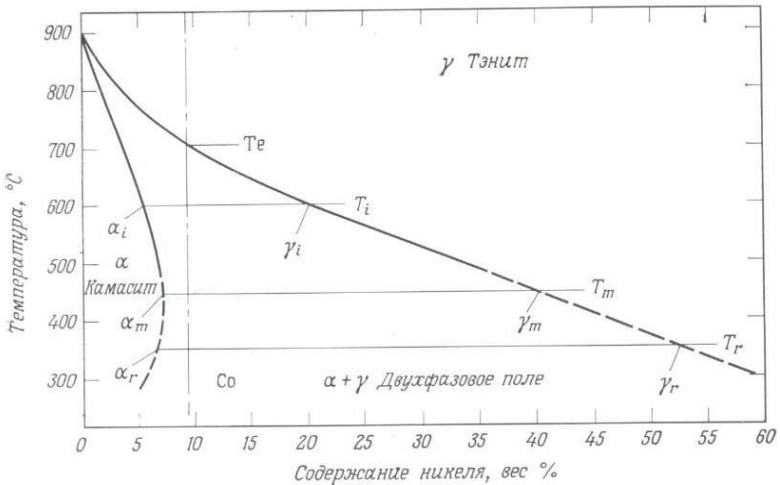
кован Перри [43]. Краткий обзор железных метеоритов и их свойств составлен также Мейсоном [4].

Общая классификация железных метеоритов базируется в основном на содержании в них никеля. Хотя большинство железных метеоритов характеризуется довольно узким диапазоном содержаний никеля, в целом этот интервал достаточно велик (фиг. 24). В железных метеоритах с содержанием никеля от 6 до 14% наблюдаются отчетливые пластинчатые выделения камасита (балки) и тэнита, названные видманштеттеновыми фигурами (фиг. 25). Балки, сложенные никелистым железом, параллельны октаэдрической плоскости $\{111\}$, а получаемая структурная картина зависит от ориентировки сечения образца [44]. Видманштеттеновы фигуры можно наблюдать только на полированной поверхности после слабого протравливания кислотами (обычно сильно разбавленным раствором азотной кислоты). Структура была впервые обнаружена в железном метеорите А. де Видманштеттеном из Вены в 1808 г. Эта структура служит надежным критерием распознавания большинства железных метеоритов. Несмотря на то что в сплавах земного происхождения такие структуры возникают в редких случаях, в железных метеоритах они присутствуют более чем в 80% образцов. Железные метеориты с октаэдрической ориентировкой балок камасита и тэнита называют октаэдритами. Существует тесная корреляция между шириной балок камасита и содержанием в них никеля: широкие балки отвечают низким содержаниям никеля, а узкие — высоким. В железных метеоритах, содержащих менее 6% никеля, не обнаруживаются видманштеттеновы фигуры; они представляют собой в сущности крупные монокри-



Фиг. 25. Видманштеттеновы фигуры в двух железных метеоритах.

Вверху — Turtle River, Миннесота, США; *внизу* — Chiquilco, Мексика; ширина отдельных балок камасита коррелируется с содержанием никеля в метеорите; широкие балки соответствуют уменьшению содержания никеля, а узкие — увеличению. Оба метеорита относятся к среднеструктурным октаэдрикам. Ширина поля зрения примерно 7 см.

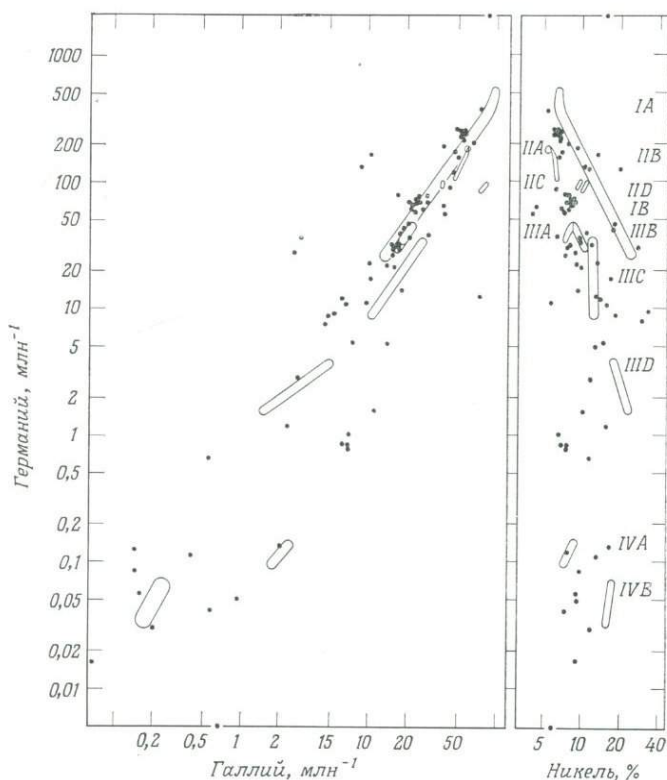


Фиг. 26. Фазовая диаграмма Fe — Ni.

Показаны поля устойчивости камасита (α — железо), тэнита (γ — железо) и двухфазовая область ($\alpha + \gamma$). Вертикальная штрихпунктирная линия соответствует остыванию расплава, содержащего 9 вес. % никеля. Ряд изотерм показывает равновесные составы сосуществующих фаз. Процесс переохлаждения приводит к изменению соотношений и составов присутствующих фаз настолько, что равновесное «правило рычага» не выполняется. Предоставлено Дж. Голдстейном.

сталлы камасита, хотя некоторые такие метеориты могут состоять из нескольких кристаллов. В метеоритах этого типа в камасите проявлена тенденция к спайности по кубу (гексаэдру), поэтому их именуют гексаэдритами. Между гексаэдритами и октаэдритами наблюдаются постепенные переходы, а образцы с промежуточной структурой относятся либо к весьма грубоструктурным октаэдритам, либо к зернистым гексаэдритам. Даже в пределах группы октаэдритов проявлена связь между шириной камаситовых балок и валовым содержанием никеля в метеорите. Если содержание никеля превышает примерно 14%, видманштеттеновы фигуры тонкоструктурных октаэдритов исчезают и можно наблюдать только тонкозернистые атакситовые прорастания тэнита и камасита¹. Однако, если содержание никеля очень велико (от 25 до 65%), атаксит почти наверняка сложен преимущественно тэнитом с мелкими включениями камасита и немногих других минералов. С помощью экспериментальной фазовой диаграммы железоникелевых сплавов (фиг. 26)

¹ В старых литературных источниках тонкие прорастания тэнита и камасита называли «плекситом» и считали его самостоятельной минеральной фазой. Такая номенклатура применяется до сих пор, поскольку это удобный термин для обозначения этих тонкозернистых прорастаний.



Фиг. 27. Диаграммы зависимости концентраций германия от концентраций галлия и никеля в железных метеоритах.

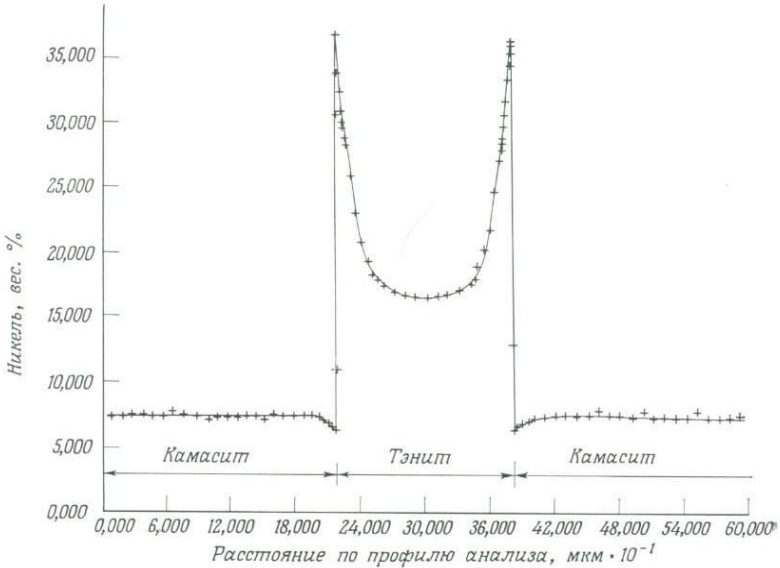
Замкнутыми контурами обозначены главные группы анализов (примерно 80% проанализированных железных метеоритов), а также показаны анализы отдельных метеоритов с «аномальными» концентрациями. На диаграмму нанесены анализы более 420 железных метеоритов. Предоставлено Дж. Уоссоном.

нетрудно объяснить основные соотношения фаз в железных метеоритах по крайней мере на качественном уровне [45].

Другой принцип классификации железных метеоритов с попыткой понять их генетические связи основан на различии в концентрациях двух элементов-примесей в железных метеоритах — галлия и германия [46]. Этот критерий пытался использовать Уоссон для выявления генетических связей между различными железными метеоритами и установления числа материнских тел (фиг. 27).

СКОРОСТЬ ОСТЫВАНИЯ

Многие исследования октаэдритов были направлены на оценку скорости их остывания по данным о распределении малых количеств никеля в минеральных фазах. С развитием методов электронно-рентгеновского микрозондирования было твердо установлено, что распределение никеля между тэнитом и камаситом и даже в отдельных кристаллах обеих минеральных фаз не является однородным. В тэните и плессите более высокие концентрации Ni приурочены к периферии кристаллов, а в камасите краевые зоны кристаллов на контакте с тэнитом или плесситом обеднены никелем (фиг. 28). Температуру нуклеации камасита и скорость остывания метеорита можно вычислить, если известны следующие параметры: а) валовое содержание никеля в метеорите, б) температурная зависимость коэффициентов диффузии никеля в камасите и тэните, в) размеры рассматриваемых кристаллов камасита и тэнита, г) распределение никеля в поперечном сечении кристаллов. Чем медленнее протекает охлаждение метеорита, тем большее количество никеля успевает диффундировать к центральной части кристалла тэнита, т. е. в ней происходит повышение конечной concentra-



Фиг. 28. Концентрация никеля в чередующихся полосах камасит — тэнит — камасит метеорита Grant.

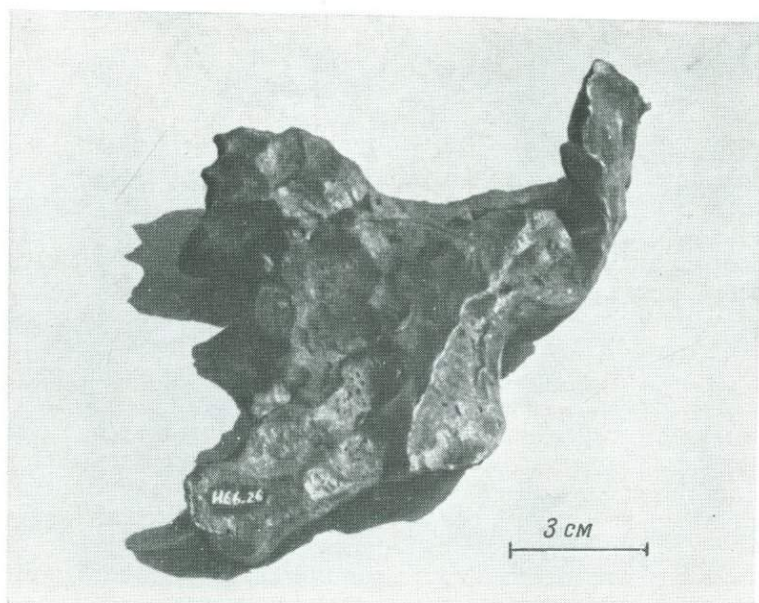
Следует обратить внимание на обеднение никелем на контакте камасита с тэнитом (эффект Агрелла) и «М-образное» распределение концентраций никеля в поперечном разрезе кристалла тэнита. Предоставлено Дж. Голдстейном.

ции никеля [47]. Скорость остывания железных метеоритов, вычисленная таким методом, равна для октаэдритов 1°C на каждые 100° за 1 млн. лет (примерно от 600°C до 400°C). При этом радиусы материнских тел октаэдритов должны быть сравнительно невелики и определяются величиной 50—200 км. Если эти расчеты и необходимые для них допущения правильны, то некоторые из астероидов можно считать гипотетическими материнскими телами определенных типов железных метеоритов. Тем не менее, описанному методу присуща некоторая неточность. Известная неопределенность обусловлена тем, что вместе с диффузией никеля в камасите и тэните происходит диффузия малых количеств азота, фосфора и углерода, а присутствие этих элементов в металлических системах подобно тому, как это наблюдается в железных метеоритах, может оказать значительное влияние на величину коэффициентов диффузии Ni. Поэтому требуются дополнительные экспериментальные данные. Кроме того, мы только предполагаем, что материнские тела октаэдритов состояли из никелистого железа. В действительности мы, конечно, не знаем этого, и вполне можно допустить, что внешняя оболочка материнского тела, т. е. его кора, состояла, например, из материала, обогащенного силикатами или вообще имела совершенно иное строение. Для того чтобы судить о вероятности происхождения некоторых железных метеоритов за счет астероидов, было бы очень полезно иметь фотообеспечение наблюдаемого падения октаэдрита, достаточное для того, чтобы вычислить его орбиту до точки вхождения в поле тяготения Земли.

УДАРНЫЕ ЭФФЕКТЫ

Неймановы линии представляют собой тонкие полоски никелистого железа, сдвойникового под действием механических процессов; они найдены во всех гексаэдритах и в камаситовых балках большинства октаэдритов. Плоскость двойникового в камасите совпадает с {112}, а в тэните неймановы линии обычно отсутствуют. По мнению Улига [48], эти двойниковые полоски, вероятно, появились в результате ударной механической деформации при температуре ниже 600°C .

Морфологические и минералогические доказательства ударных явлений в метеорите Canyon Diablo и других железных метеоритах были получены рядом исследователей [49]. Находка алмаза в железном метеорите Canyon Diablo привела к противоречивой интерпретации его генезиса: либо алмаз указывает на происхождение метеорита из глубоких недр (область высоких давлений) крупного планетного тела [50], либо алмазы



Фиг. 29. Шрапнелевидный обломок метеорита Henbury, Австралия, подвергшийся механическим деформациям.

Такие сильно деформированные обломки находят в связи с большинством известных ударных кратеров, сформированных при падениях железных метеоритов. Внутренняя кристаллическая структура таких обломков сильно искажена.

могли возникать в результате воздействия ударной волны при падении метеорита [51]. Последняя точка зрения сейчас общепринята. Действительно, кристаллографическое исследование алмаза, гексагональная модификация (лонсдэлит) которого легко может быть получена в экспериментальных условиях путем ударного воздействия, согласуется с находками алмазов и иными морфологическими критериями ударных процессов, проявленных в отдельных образцах.

Расширение линий на рентгеновской дифрактограмме камасита использовалось в качестве индикатора ударного метаморфизма, однако аналогичное изменение конфигурации линий может быть результатом простых механических деформаций и упругих напряжений [52]. Некоторые обломки железных метеоритов определенно подверглись сильным механическим деформациям (фиг. 29), причем на основе использования одних дифрактограмм часто трудно установить, в какой мере эти деформации вызваны ударно-взрывными процессами.

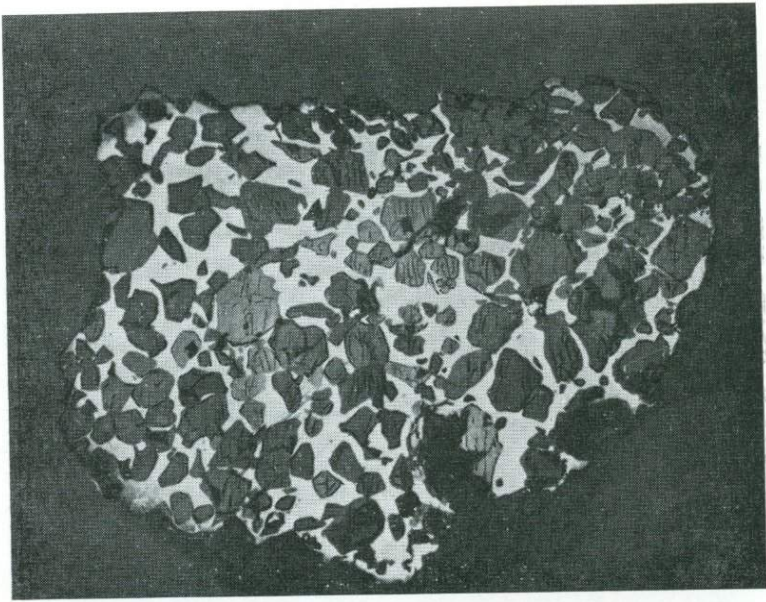
ЖЕЛЕЗОКАМЕННЫЕ МЕТЕОРИТЫ

ВВЕДЕНИЕ

В 1863 г. Маскеллини выделил железозакаменные метеориты в качестве отдельного класса метеоритов, что было принято широким кругом исследователей. Эта группа метеоритов определяется весьма нечетко, а отдельные члены ее имеют между собой мало общего, за исключением того, что все они сложены смесью металлических и силикатных фаз. Железокаменные метеориты составляют всего 4% от общего числа известных метеоритов [4]. Большинство железозакаменных метеоритов относится к двум группам: палласитам (оливин — металл) и мезосидеритам (оливин — бронзит — металл). Для того чтобы найти место в классификации для уникальных метеоритов, Мейсон предложил выделить сидерофиры, куда относится метеорит Steinback, состоящий из ортопироксена, подчиненного количества тридимита и основной массы никелистого железа, а также лодраниты для метеорита Lodran, представленного слабо сцементированным агрегатом примерно равных количеств оливина, ортопироксена и никелистого железа.

ПАЛЛАСИТЫ

Первый палласит был зарегистрирован П. Палласом в 1772 г., посчитавшим образец, доставленный в Санкт-Петербург в Академию наук, «необычным объектом». Позднее этот образец был изучен Хладни [53], который пришел к выводу о его внеземном происхождении. В настоящее время известно по меньшей мере 43 образца палласитов. По минеральному составу палласиты представляются довольно простыми объектами и сложены кристаллами оливина или их обломками или смесью тех и других в основной массе из никелистого железа. Бржезина [7] на основании морфологии кристаллов оливина (фиг. 30, 31) подразделил палласиты на четыре класса, однако эту классификацию обычно не применяют. Прайор [54] в 1916 г. показал, что палласиты подчиняются некоторым закономерностям, установленным им в отношении содержаний железа и никеля в минералах хондритов. В работе Ловеринга и др. [55] рассмотрен химический состав палласитов, дано описание структуры металлической фазы и приведена сводка всех предшествующих литературных данных по палласитам. В наиболее крупных выделениях металлической фазы во многих палласитах проявляются видманштеттеновы фигуры (фиг. 32). В работе Мейсона [56]



Фиг. 30. Полированный образец палласита Ollague, Боливия.

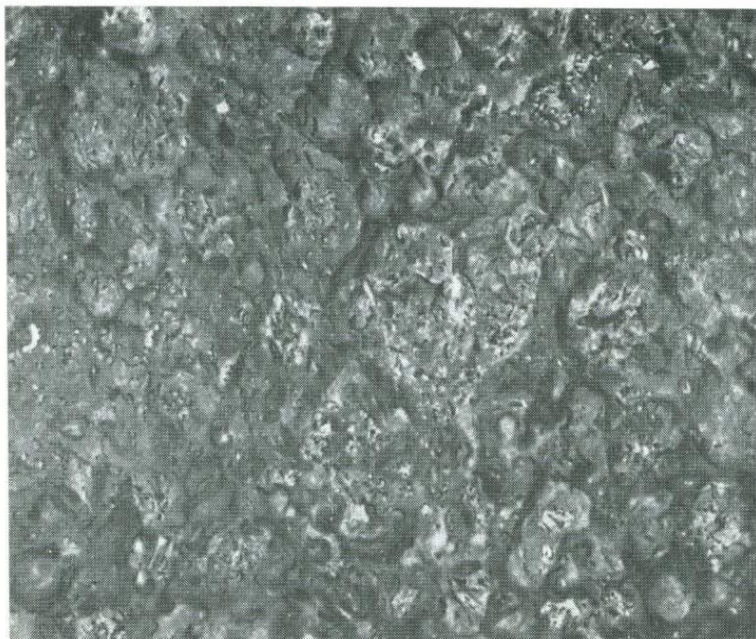
Следует отметить, что большинство зерен оливина имеет кристаллографическую огранку, а некоторые почти идиоморфны. В других палласитах оливин может иметь совершенно ксеноморфные очертания или присутствовать в виде обломков. Длина образца примерно 12 см, образец USNM 2190, Национальный музей США.

дан полный обзор литературы по палласитам и приведены различные иллюстрации, характеризующие главные структурные типы.

Никелистое железо в палласитах содержит примерно 8—15% Ni, так что вполне понятно, почему в наиболее круп-

Таблица XIII Результаты частного анализа никелистого железа из палласитов (по Ловрингу и др. [55])

Метеорит	Ni, вес. %	Co, вес. %	Cu, млн ⁻¹
Admire	12,45	0,50	233
Albin	10,43	0,57	223
Bendock	9,20	0,58	143
Brenham	10,98	0,60	168
Glorieta Mountain	11,79	0,54	217
Imilac	11,32	0,47	190
Newport	10,83	0,58	240
Springwater	13,16	0,60	174

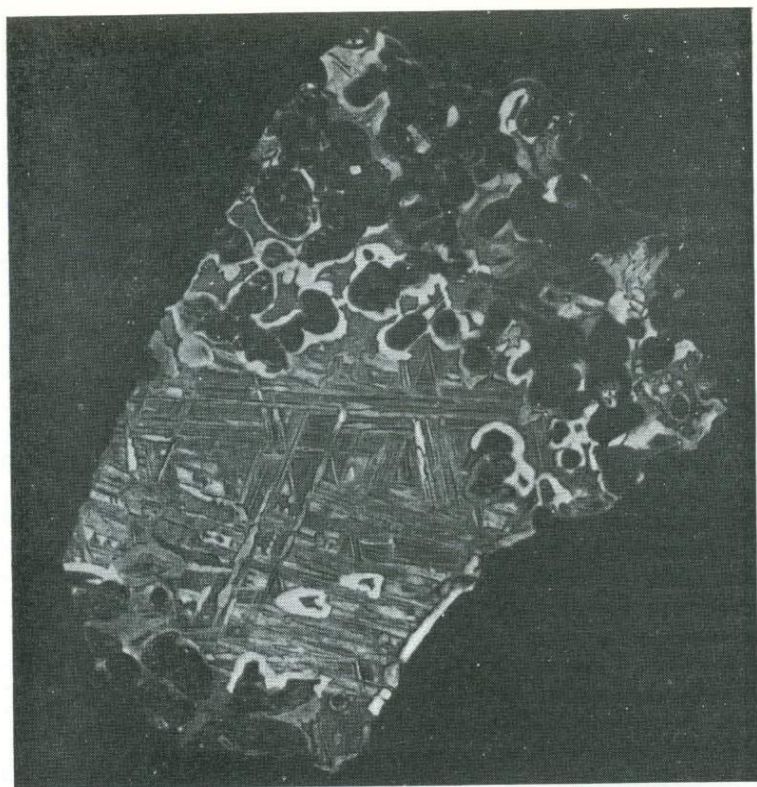


Фиг. 31. Выветрелая поверхность палласита Salta, Аргентина.

Резко выделяются зерна оливина с повышенным рельефом на фоне корродированного никелистого железа. Длина поля зрения примерно 5 см, образец USNM 1330, Национальный музей США.

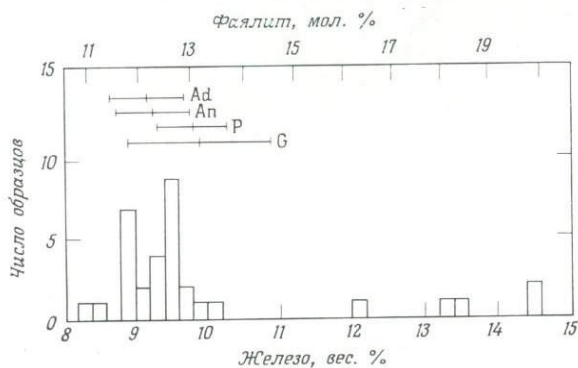
ных выделениях металла наблюдаются видманштеттеновы фигуры. Анализы никелистого железа из многих палласитов (табл. XIII) опубликованы Ловерингом и др. [55]. Обычно металлическая фаза напоминает металлическую фазу октаэдритов.

Недавно Бусек и Голдстейн [57] проанализировали оливины более чем из 40 известных палласитов. Они пришли к заключению, что в подавляющем большинстве палласитов кристаллы оливина однородны по составу и характеризуются бимодальным распределением фаялитового компонента с максимумами при Fa_{12} и $Fa_{18,5}$ (фиг. 33). Кроме того, оливины из палласитов обеднены кальцием и никелем по сравнению с земными образцами. Скорость остывания палласитов определялась по их металлической фазе с использованием той же методики, которая применялась для октаэдритов [57]. Согласно этим данным, остывание палласитов протекало медленнее, чем октаэдритов, что позволяет предполагать происхождение палласитов из более глубоких зон материнских тел, вероятно астероидов.



Фиг. 32. Полированный и протравленный аншлиф палласита Brenham.

В крупном выделении металлической фазы, свободной от кристаллов оливина, проявлены видманштеттеновы фигуры. Длина образца примерно 16 см. Предоставлено Смитсоновским институтом.



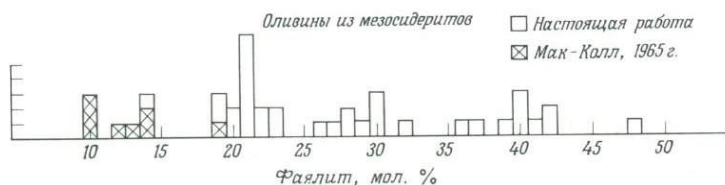
Фиг. 33. Гистограмма распределения составов оливина в палласитах.

В общем, колебания составов в оливинах незначительны; очевидно, характерно бимодальное распределение, правда, навески образцов невелики. Лишь в четырех палласитах в оливинах обнаруживаются вариации состава в одном образце: Ad — Admire, An — Anderson, G — Glorieta Mountain, P — Pogoque. Из работы Бусека и Голдстейна [57]; предоставлено Американским геологическим обществом.

МЕЗОСИДЕРИТЫ

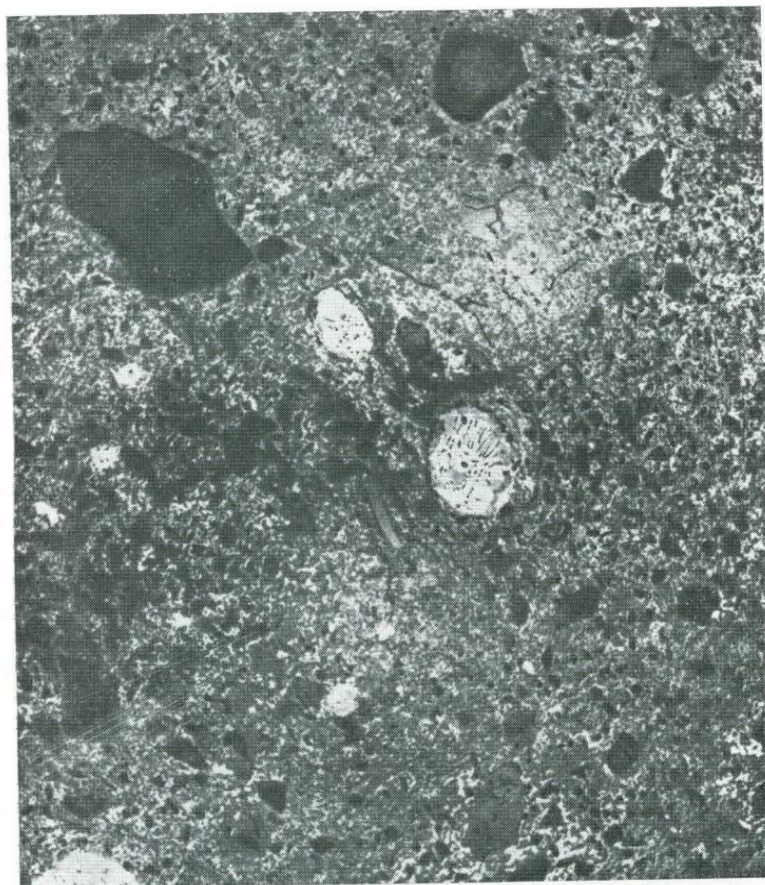
Известно лишь 25 мезосидеритов, причем по меньшей мере 7 из них принадлежат к наблюдавшимся падениям. Такая существенная относительная роль падений по сравнению с палласитами говорит о том, что и абсолютная распространенность мезосидеритов может быть более высокой. Термин «мезосидериты» был введен Бржезиной [7] для обозначения железокремнистых метеоритов как с оливином, так и с бронзитом, содержащимися в форме включений в металлической основной массе. В особую группу были выделены плагиоклазосодержащие железокремнистые метеориты того же состава, но впоследствии Прайор [3] отказался от такого подразделения. Прайор пришел к выводу, что мезосидериты представляют собой смесь палласитовой и эвкритовой магм приводит к образованию мезосидеритов. Впоследствии Ловеринг [58] вновь рассмотрел свойства мезосидеритов, сделал обзор литературных данных и пришел к заключению, что представления Прайора были по существу верными. Изотопные отношения кислорода в эвкрититах, говардитах и силикатной фазе мезосидеритов изучены Тэйлором и др. [59]; их результаты показали, что указанные классы метеоритов образуют группу, отличающуюся по химизму от хондритов. Дюк и Силвер [34] считают, что эвкриты, говардиты и мезосидериты на основании химизма, минералогических и структурных признаков можно рассматривать как генетически связанную группу. Позднее эти авторы выдвинули предположение о том, что мезосидериты могут являться обломками лунных пород, оговорив при этом, что не исключено их астероидальное происхождение.

Наиболее полное исследование мезосидеритов предпринял Пауэлл [60], который пришел к выводу о несостоятельности представлений о происхождении мезосидеритов в результате смешения палласитовой и ахондритовой магмы, несмотря на то что мезосидериты вместе с эвкрититами и говардитами,



Фиг. 34. Состав оливинов из мезосидеритов.

Следует отметить более широкие вариации составов по сравнению с палласитами (фиг. 33). Из работы Пауэлла [60]; перепечатано с разрешения издательства «Пергамон Пресс».



Фиг. 35. Полированный и протравленный штуф мезосидерита Mt. Padbury, Австралия.

Проявлена брекчированная структура силикатных минералов. Кроме того, в крупных выделениях металлической фазы наблюдается октаэдрическая структура. Ширина поля зрения примерно 15 см. Из коллекции Национального музея США.

вероятно, образуют генетически связанную группу. Такой вывод основан главным образом на данных о содержании никеля в металлической фазе мезосидеритов, которое обычно ниже 8,9%, в то время как в палласитах эта цифра в большинстве случаев превышает 9%; кроме того, составы оливина в палласитах и мезосидеритах также различны (фиг. 34). Пауэлл считает, что мезосидериты образовались в результате воздействия целого комплекса процессов, включая магматическую дифферен-

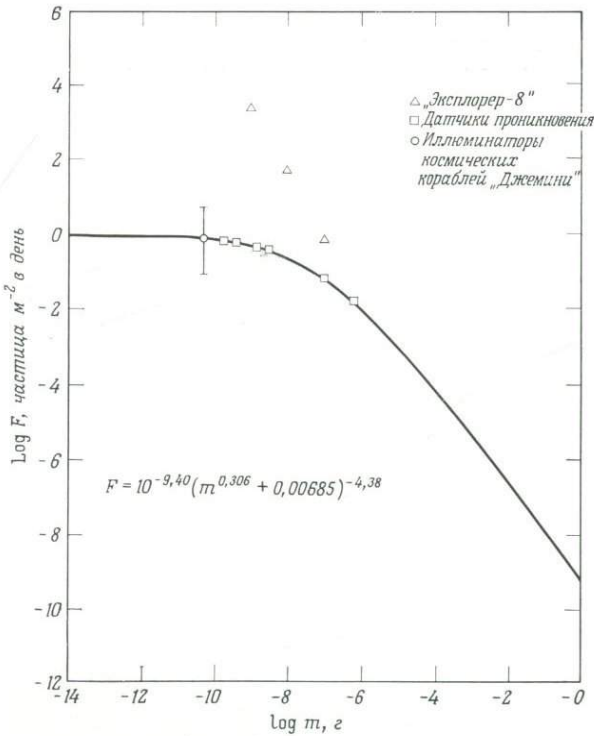
диацию, брекчирование, смешение металлической и силикатной фаз, захоронение и обособление метеоритного вещества, метаморфизм и отторжение от материнского тела. Предположение о процессах захоронения и обособления метеоритов основано преимущественно на вычислениях скорости остывания мезосидеритов, которая составляет $0,1^{\circ}\text{C}$ за миллион лет в интервале от 500 до 350°C , что представляет собой наиболее низкую цифру по сравнению с полученными для любой другой группы метеоритов. Во многих мезосидеритах содержится брекчированная силикатная фаза (фиг. 35). Процесс брекчирования мог быть результатом ударного метаморфизма, однако более определенные выводы в этом направлении делать еще рано.

МИКРОМЕТЕОРИТЫ

Этот термин применяли для обозначения различных видов частиц. Название «микрометеорит» или «микрометеороид» относили к мелким частицам, снесенным с поверхности более крупных метеорных тел при абляции, к межзвездной и межпланетной космической пыли, первичному метеоритному материалу в виде мелких частиц (из разных возможных источников), а также к частицам иного происхождения. Продукты вторичной конденсации и ударного плавления вещества, которые иногда накапливаются вокруг ряда земных ударных кратеров [61], некоторые исследователи также называют «микрометеоритами».

Наличие аномалий в составе космогенных изотопов дало возможность выявить взвешенные компоненты в составе пылевых частиц из кернов глубоководных морских осадков [62] и во льдах полярных шапок [63], однако преобладающая часть такой пыли, по-видимому, является продуктами абляции (капельками) макрометеоритов и (или) пылевыми частицами таких метеоритов.

Попытки сбора первичных микрометеоритов непосредственно с помощью воздушных фильтров и приборов, установленных на ракетах с суборбитальной траекторией, были практически безуспешными. Трудной задачей является преодоление контаминации этих образцов многочисленными мелкими частицами разнообразного происхождения. При полетах высотных самолетов по траектории падения наблюдавшихся крупных метеорных тел были собраны частицы, рассматриваемые как результат абляции более крупного метеорного тела [64]. На иллюминаторах и различных деталях космических аппаратов иногда наблюдаются микрометеороидные ударные кратеры. Были выполнены анализы остаточных отложений вокруг таких кратеров, однако обнадеживающих результатов не получено. Околозем-



Фиг. 36. График зависимости интенсивности кумулятивного потока ($\log F$) от массы метеороидов ($\log m$).

По данным Зука и др. [65]. При построении кривой кумулятивные данные, полученные с помощью акустического детектора, не использовались. Предоставлено Зуком.

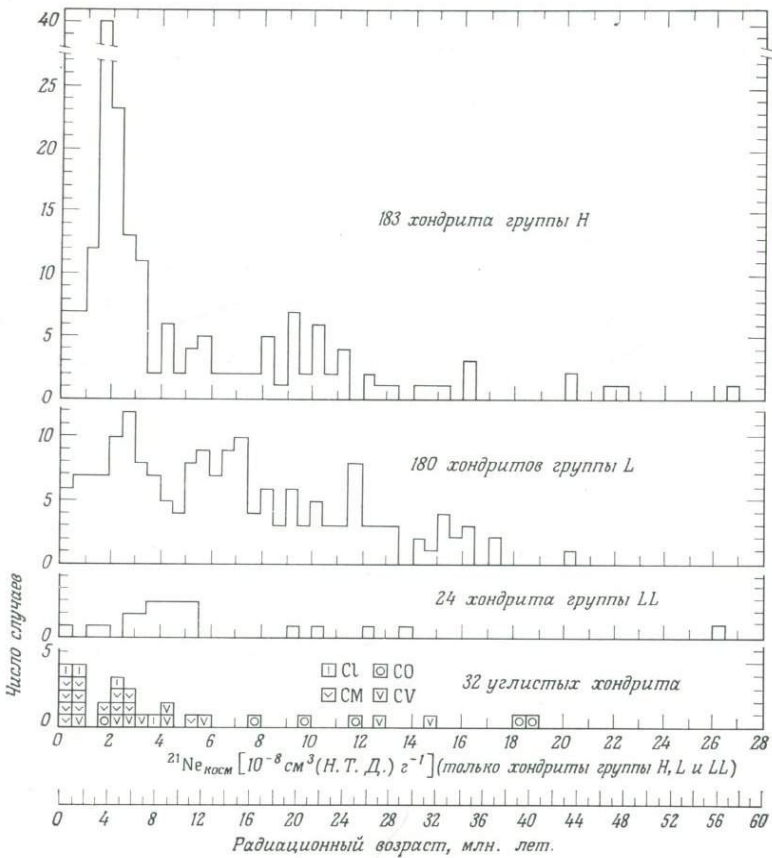
ная микрометеоритная обстановка (распределение интенсивности потока по массам) представляет предмет многих исследований и экспериментов с помощью космических средств. Данные такого рода суммированы в работе Зука и др. [65]; обобщенная кривая распределения масс в зависимости от интенсивности потока приведена на фиг. 36. Среди многочисленных источников первичных микрометеороидов могут быть астероиды, кометная пыль и вторичные выбросы лунной пыли. Для решения этих вопросов о происхождении микрометеороидов с помощью их сбора и анализа, по-видимому, потребуется время по крайней мере до тех пор, пока не будут установлены коллекторы с обширной поверхностью на аппаратах, осуществляющих длительные космические полеты по околоземным орбитам.

ПРОИСХОЖДЕНИЕ МЕТЕОРИТОВ

ВОЗРАСТ

Очевидно, возраст метеоритов всех классов очень древний и составляет приблизительно $4,6 \cdot 10^9$ лет, т. е. отвечает принятому в настоящее время возрасту Солнечной системы. В самом деле, современная оценка последнего основана на изотопном определении возраста свинцовым методом по троилиту, выделенному из железных метеоритов [36].

Интерпретация возрастов образования метеоритов осуществляется по данным анализов различного типа. Обычно для таких определений используют рубидий-стронциевый, калий-аргоновый, аргоновый ($^{39}\text{Ar} - ^{40}\text{Ar}$) и уран-торий-гелиевый методы. Однако при нахождении «возраста формирования» метеоритов необходимо учесть неизбежные ограничения, присущие каждому из применяемых методов датирования. Эти ограничения обусловлены в основном большей или меньшей степенью зависимости определяемого возраста от явлений теплового метаморфизма. Такие процессы обычно приводят к тому, что получаемый возраст оказывается более молодым, чем истинный возраст формирования. Тем не менее всегда существует вероятность того, что полученная цифра представляет собой а) истинный возраст формирования (охлаждения) метеорита; б) более молодой возраст, фиксирующий время протекания важного события в тепловой или метаморфической истории метеорита (например, остаточная температура при ударе, сопровождающем соударение с другим телом); в) промежуточную величину в интервале между событиями «а» и «б». Кроме того, метеориты, относящиеся к породам обломочного типа, например хондриты и брекчированные ахондриты, почти наверняка содержат отдельные обломки и частицы различного возраста, более древнего по отношению ко времени формирования метеорита как твердого тела. Следовательно, существует дополнительная возможность ошибки при определении абсолютного возраста метеоритов. Однако, несмотря на все эти возможные осложнения, результаты рубидий-стронциевых определений возрастов хондритов и ахондритов группируются вокруг числа $4,6 \cdot 10^9$ лет [66]. Калий-аргоновые возрасты обычно несколько моложе, однако эти данные соответствуют незначительной потере радиогенного аргона [34]. Многие исследователи выделяют отдельные метеориты или подгруппы метеоритов с аномально юными возрастными метаморфизма [67], однако в большинстве случаев эти величины коррелируются с петрографическими свидетельствами ударных процессов или иными аномальными свойствами.



Фиг. 37. Гистограмма распределения радиационных возрастов хондритов.

По данным Мазора и др. [69]; перепечатано с разрешения издательства «Пергамон Пресс».

По-видимому, некоторые из базальтовых ахондритов кристаллизовались несколько позднее, возможно в интервале $(200-400) \cdot 10^6$ лет [68]. Такие данные, полученные для метеоритов с магматическими структурами, привели некоторых исследователей к выводу о том, что процесс генерации магм происходил уже на ранних этапах истории Солнечной системы. Однако всегда остается вероятность принадлежности всех или некоторых ахондритов со структурой изверженных пород к продуктам кристаллизации ударных расплавов, поэтому они могут и не представлять собой первичные магмы.

Радиационные возрасты большинства каменных метеоритов составляют всего несколько десятков миллионов лет и даже меньше, их вариации находятся в интервале от неизмеримо малых величин (возможно, они были надежно экранированы) до $2,2 \cdot 10^8$ лет. Радиационные возрасты большей части каменных метеоритов менее 40 млн. лет [69] (фиг. 37), что существенно меньше среднего радиационного возраста железных метеоритов [70]. На гистограмме распределения радиационных возрастов каменных метеоритов проявлены моды (фиг. 37); возможно, подобная тенденция присуща и железным метеоритам. Такие моды могут указывать на столкновения или ударные явления, приведшие к обращению большого количества обломков по орбитам, пересекающим орбиту Земли, или же на разрушение более крупных небесных тел, уже двигавшихся по таким орбитам.

ОРБИТЫ

Точные вычисления орбит, по которым метеориты двигались до их вхождения в поле тяготения Земли, стали возможны благодаря достаточно качественным фотографиям двух падений каменных метеоритов. Один из них, Příbram, упал в Чехословакии в 1959 г. и был сфотографирован одновременно в двух различных пунктах наблюдений [71]. Другой метеорит, Lost City, упал на территории штата Оклахома в пределах Прерийной сети [72] 3 января 1970 г. (фиг. 1), поэтому фотообеспечение падения было отличным. Помимо этого, имеются фотографии многих метеоров, однако их обломки не найдены. Упомянутые наблюдения и вычисления практически однозначно свидетельствуют о движении метеоритов по эллиптическим орбитам. Подобные орбиты слабо наклонены относительно плоскости эклиптики, причем афелий многих из этих орбит приходится на район «пояса астероидов» между Марсом и Юпитером [73]. Это представляет собой веский аргумент в пользу того, что пояс астероидов является источником по крайней мере некоторых метеоритов, которые под возмущающим воздействием Юпитера перешли на орбиты, пересекающиеся с земной. Альтернативным выводом служит отнесение метеоритов к выбросам с астероидов типа Аполлон или короткопериодических комет. Ла Пас [74] считает, что метеорные тела обращаются по гиперболическим орбитам, а поэтому представлены веществом, не принадлежащим к Солнечной системе. Однако последующие, более тщательные наблюдения над метеорами показали несправедливость такого вывода и в настоящее время отсутствуют свидетельства существования первичных метеоров, движущихся по гиперболическим орбитам.

В работе Арнольда [75] опубликована модель, основанная на методе Монте-Карло, дающем возможность определить материнское тело, частью которого является данный метеорит, если условия его падения точно охарактеризованы количественно. Этот метод применялся и усовершенствовался рядом других исследователей, и на основании имеющихся в настоящее время данных уже можно выделить разнообразные группы астероидов, являющихся наиболее вероятными источниками метеоритов.

Вещество некоторых метеоритов, по-видимому, принадлежит к вторичным выбросам с Луны. Скорость, которую должно иметь тело, чтобы покинуть поверхность Луны, невелика (в среднем примерно 2,3 км/с), поэтому при ударе первичных метеоритов о лунную поверхность некоторые выбросы при кратерообразовании могут приобрести такое ускорение, что этот материал будет удален с Луны, но останется в пределах системы Земля — Луна. Большая часть вещества захватывается Землей в качестве метеоритов. Предположение о таком механизме наряду с основательными аргументами химического характера привело Юри [77] к заключению о принадлежности многих каменных метеоритов ко вторичным лунным выбросам. О'Киф и др. [78] считают, что тектиты представляют собой вещество лунной поверхности, расплавленное в результате метеоритной бомбардировки. Теперь, когда стало возможно прямое исследование лунных образцов, выяснилось, что обе эти гипотезы не соответствуют действительности. Тем не менее такой механизм в принципе возможен, и если считать, что наши метеоритные коллекции достаточно полны, в некоторых из них, вероятно, можно обнаружить образцы лунного происхождения. Однако на практике до сих пор ни один из известных метеоритов пока не может быть отнесен к обломкам лунных пород.

Таким образом, мы располагаем доказательствами весьма вероятной принадлежности некоторых метеоритов к обломкам астероидов; кроме того, существуют правдоподобные механизмы формирования метеоритов, однако примеры реализации этих механизмов отсутствуют. Неизвестно также, следует ли связывать происхождение каких-либо метеоритов с кометами. До сих пор не обнаружены обломки после выпадений ежегодных метеорных дождей, связанных с кометами. Эти метеоры в большинстве случаев очень малы и, по-видимому, представляют собой хрупкие тела, однако заманчиво предположить, что внутри кометы могут находиться более крупные каменные тела. Если это так, то где-либо в метеоритных коллекциях вполне могут встретиться обломки кометного вещества, хотя подобные поиски пока не привели к положительным результатам.

Метеориты — это бесценные образцы вещества нашей Солнечной системы из тех ее районов, многие из которых останутся

недоступными в обозримом будущем как для пилотируемых полетов, так и для автоматических космических средств. Наблюдаемое в настоящее время сокращение программ, предусматривающих доставку внеземных образцов, вероятно, приведет в ближайшие годы к более интенсивному, чем в прошлом, исследованию метеоритов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Ball R. S.*, Speculations on the source of meteorites, *Nature*, 19, p. 493—495, 1879.
2. *Mason B.*, The mineralogy of meteorites, *Meteoritics*, 7, No. 3, p. 309—326, 1972.
3. *Prior G. T.*, The classification of meteorites, *Mineralog. Mag.*, 19, p. 51—63, 1920.
4. *Mason B.*, *Meteorites*, Wiley, New York and London, 274 p., 1962.
5. *Rose G.*, Beschreibung und eintheilung der meteoriten auf grund der sammlung im mineralogischen Museum zu Berlin, *Physik. Abhandl. Akas. Wiss.*, Berlin, p. 23—161, 1863.
6. *Tschermak G.*, Beitrag zur classification der meteoriten, *Sitzber. Akad. Wiss. Wein, Math.-naturw. Kl., Abt. I*, 88, p. 347—371, 1883 и другие статьи.
7. *Brezina A.*, The arrangement of collections of meteorites, *Proc. Am. Philos. Soc.*, 43, p. 211—247, 1904.
8. *Urey H. C., Craig H.*, The composition of the stone meteorites and the origin of the meteorites, *Geochim. et Cosmochim. Acta*, 4, p. 36—82, 1953.
9. *Van Schmus W. R., Wood J. A.*, A chemical-petrologic classification for the chondritic meteorites, *Geochim. et Cosmochim. Acta*, 31, p. 747—765, 1967.
10. *Wood J. A.*, Metamorphism in chondrites, *Geochim. et Cosmochim. Acta*, 26, p. 739—749, 1962.
11. *King E. A., Jr., Schonfeld E., Richardson K. A., Eldridge J. S.*, Meteorite fall at Pueblito de Allende, Chihuahua, Mexico: Preliminary information, *Science*, 163, p. 928—929, 1969, см. также *Clarke R. S., Jr., Jarosewich E., Mason B., Nelen J., Gomez M., Hyde J. R.*, The Allende, Mexico, meteorite shower, *Smithson. Contr. Earth Sci.*, No. 5, Feb. 1971, 53 p. 1970.
12. *Folinsbee R. E., Douglas J. A. V., Maxwell J. A.*, Revelstoke, a new Type I carbonaceous chondrite, *Geochim. et Cosmochim. Acta*, 31, p. 1625—1635, 1967.
13. *Wiik H. B.*, The chemical composition of some stony meteorites, *Geochim. et Cosmochim. Acta*, 9, p. 279—289, 1956. См. также *Van Schmus W. R., Hayes J. M.*, Chemical petrographic correlations among carbonaceous chondrites, *Geochim. et Cosmochim. Acta*, 38, p. 47—64, 1974.
14. *Sztrokay K. L., Tolnay V., Földvari-Vogl. M.*, Mineralogical and chemical properties of the carbonaceous meteorite from Kaba, Hungary, *Acta Geologica*, 7, p. 57—103, 1961.
15. *Marvin U. B., Wood J. A., Dickey J. S., Jr.*, Ca-Al rich phases in the Allende Meteorite, *Earth and Planetary Sci. Letters*, 7, p. 346—350, 1970.
16. *Gray C. M., Papanastassiou D. A., Wasserburg G. J.*, The identification of early condensates from the Solar Nebula, *Icarus*, 20, No. 2, p. 213—239, 1973.

17. *Oro J.*, Extraterrestrial organic analyses, *Space Life Sci.*, 3, p. 507—550, 1972. См. также *Lawless J. G.*, Amino acids in the Murchison meteorite, *Geochim. et Cosmochim. Acta*, 37, p. 2207—2212, 1973.
18. *Mason B.*, Olivine composition in chondrites, *Geochim. et Cosmochim. Acta*, 27, p. 1011—1023, 1963; также *Mason B.*, The classification of chondritic meteorites, *Am. Mus. Nat. Hist.*, *Novitates*, No. 2085, 20 p., 1962. См. также ссылку № 2 в списке литературы к гл. 3.
19. *Borgström L. H.*, Die Meteoriten von Hvittis und Marjalahti, *Bull. Comm. Geol. Finlande*, 14, p. 1—80, 1903.
20. *Ringwood A. E.*, Silicon in the metal phase of enstatite chondrites and some geochemical implications, *Geochim. et Cosmochim. Acta*, 25, p. 1—13, 1961; см. также *Ringwood A. E.*, Chemical and genetic relationships among meteorites, *Geochim. et Cosmochim. Acta*, 24, p. 159—197, 1961.
21. *Mason B.*, The enstatite chondrites, *Geochim. et Cosmochim. Acta*, 30, p. 23—39, 1966.
22. *Grant R. W.*, The occurrence of silica minerals in meteorites, Ph. D. Thesis, Harvard Univ., 150 p., 1967.
23. *Brezina A.*, Die Meteoritensammlung des k.k. mineralogischen Hofkabinettes in Wien, *Jahrb. k.k. Geol. Reichsanstalt*, 35, p. 151—276, 1885.
24. *Roy S. K.*, The problems of the origin and structure of chondrules in stony meteorites, *Fieldiana, Geol.*, 10, p. 383—396, 1957. Это великолепный обзор предшествующих гипотез происхождения хондр.
25. *Ringwood A. E.*, On the chemical evolution and densities of the planets, *Geochim. et Cosmochim. Acta*, 15, p. 257—283, 1959. См. также *Ringwood A. E.*, Chemical and genetic relationships among meteorites, *Geochim. et Cosmochim. Acta*, 24, p. 159—197, 1961.
26. *Mason B.*, The origin of meteorites, *Jour. Geophys. Res.*, 65, p. 2965—2970, 1960. См. также ссылку № 18.
27. *Whipple F. L.*, Chondrules: Suggestion concerning the origin, *Science*, 153, p. 54—56, 1966. Кроме того, *Cameron A. G. W.*, The accumulation of chondritic material, *Earth and Planet. Sci. Letters*, 1, p. 93—96, 1966.
28. *Nelson L. S.*, *Blander M.*, *Skaggs S. R.*, *Keil K.*, Use of a CO₂ laser to prepare chondrule-like spherules from supercooled molten oxide and silicate droplets, *Earth and Planet. Sci. Letters*, 41, p. 338—344, 1972. См. также *Englund E. J.*, Experimental studies of the origin and thermal metamorphism of chondrules in chondritic meteorites, Master's Thesis, Univ. of Vermont, 33 p. plus appendices, Feb., 1969.
29. *King E. A., Jr.*, *Carman M. F.*, *Butler J. C.*, Chondrules in Apollo 14 samples: Implications for the origin of chondritic meteorites, *Science*, 175, p. 55—56, 1972; кроме того, *King E. A.*, *Butler J. C.*, *Carman M. F.*, Chondrules in Apollo 14 samples and size analyses of Apollo 14 and 15 fines, *Proc. Third Lunar Sci. Conf.*, *Geochim. et Cosmochim. Acta*, Supp. 3, 1, *E. A. King, Jr., ed.*, p. 673—686, 1972.
30. *Wahl W.*, Die enstatitaugit, *Tschermak's mineral., petrogr. Mitt.*, 26, p. 1—131, 1907.
31. *Michel H.*, Die Feldspate der Meteoriten, *Tschermak's mineral. petrogr. Mitt.*, 31, p. 563—658, 1912.
32. *Wahl W.*, The brecciated stony meteorites and meteorites containing foreign fragments, *Geochim. et Cosmochim. Acta*, 2, p. 91—117, 1952.
33. *Moore C. B.*, The petrochemistry of the achondrites, in *Researches in Meteorites*, C. B. Moore, ed., Wiley, New York, p. 164—178, 1962.
34. *Duke M. B.*, *Silver L. T.*, Petrology of eucrites, howardites and mesosiderites, *Geochim. et Cosmochim. Acta*, 31, p. 1637—1665, 1967.
35. *Lonsdale J. T.*, The Peña Blanca Spring Meteorite, Brewster County, Texas, *Am. Mineralogist*, 32, p. 354—364, 1947.

36. *Patterson C.*, Age of meteorites and the Earth, *Geochim. et Cosmochim. Acta*, **10**, p. 230—237, 1956.
37. *Duke M. B.*, The Shergotty Meteorite: Magmatic and shock metamorphism features, *Am. Geophys. Union, Transactions*, **47**, p. 481, abstract, 1966. См. также *Milton D. J.*, *DeCarli P. S.*, Maskelynite: Formation by explosive shock, *Science*, **140**, p. 670—671, 1963.
38. *Hintenberger H.*, *König H.*, *Schultz L.*, *Wänke H.*, Radiogene, spallogene und primordiale Edelgase in Steinmeteoriten, *Zeit. Naturforsch.*, **19a**, p. 327—341, 1964. Кроме того, *Megrue G. H.*, Rare-gas chronology of calcium-rich achondrites, *Jour. Geophys. Res.*, **71**, p. 4021—4027, 1966.
39. *Gordon S. G.*, The Grootfontein, Southwest Africa, meteoritic iron, *Acad. Nat. Sci. Phila., Proc.*, **83**, 251—255, 1931.
40. Примеры анализов железных метеоритов см. в работе *Moore C. B.*, *Lewis C. F.*, *Nava D.*, Superior analyses of iron meteorites, *Meteorite Res.*, Symp. 1968, *Proc.*, p. 738—748, 1969. Кроме того, *Lewis C. F.*, *Moore C. B.*, Chemical analyses of thirty-eight iron meteorites, *Meteoritic*, **6**, No. 3, p. 195—205, 1971.
41. *Wasserburg G. J.*, *Sanz H. G.*, *Bence A. E.*, Potassium-feldspar phenocrysts in the surface of Colomera, an iron meteorite, *Science*, **161**, p. 684—687, 1968.
42. *Olsen E.*, *Jarosewich E.*, Chondrules: First occurrence in an iron meteorite, *Science*, **174**, p. 583—585, 1971. См. также *Bunch T. E.*, *Keil K.*, *Olsen E.*, Mineralogy and petrology of silicate inclusions in iron meteorites, *Contrib. Mineral. Petrol.*, **25**, p. 297—340, 1969.
43. *Perry S. H.*, The metallography of meteoritic iron, *U. S. Natl. Mus., Bull.*, **184**, 206 p., 1944.
44. Данный факт отмечался с давних пор, однако полное исследование проблемы можно найти в работе *Buchwald V. F.*, The austenite-ferrite transformation: Tables relating the Widmanstätten angles in iron meteorites to the plane section, Center for Meteorite Studies, Ariz. State Univ., Publ. No. 7, May, 1968, 13 p., plus tables, 1968.
45. *Uhlig H. H.*, Contribution of metallurgy to the study of meteorites, Part I — Structure of metallic meteorites, their composition and the effect of pressure, *Geochim. et Cosmochim. Acta*, **6**, p. 282—301, 1954. См. также *Goldstein J. I.*, *Ogilvie R. E.*, Fe-Ni Phase Diagram, NASA Pub. X-640-65-117, Goddard Space Flight Center, Greenbelt, Md., March, 1965, 10 p., 1965.
46. *Goldberg E.*, *Uchiyama A.*, *Brown H.*, The distribution of nickel, cobalt, gallium, palladium and gold in iron meteorites, *Geochim. et Cosmochim. Acta*, **2**, p. 1—25, 1951; *Wasson J. T.*, Parent body models for the formation of iron meteorites, *Proc. 24th, Int. Geol. Cong., Montreal*, sec. 15, p. 161—168, 1972; *Wasson J. T.*, The chemical classification of iron meteorites — IV. Irons with Ge concentrations greater than 190 ppm and other meteorites associated with group 1, *Icarus*, **12**, p. 407—423, 1970. См. также *Wasson J. T.*, The chemical classification of iron meteorites, 1, A study of iron meteorites with low concentrations of gallium and germanium, *Geochim. et Cosmochim. Acta*, **31**, p. 161—180, 1967; кроме того, ряд других статей, опубликованных в тот же период в основном в журналах *Geochim. et Cosmochim. Acta* and *Jour. Geophys. Res.*
47. *Goldstein J. I.*, *Short J. M.*, The iron meteorites, their thermal history and parent bodies, *Geochim. et Cosmochim. Acta*, **31**, 1733—1770, 1967. См. также *Wood J. A.*, The cooling rates and parent planets of several iron meteorites, *Icarus*, **3**, p. 429—459, 1964. Кроме того, *Goldstein J.*, *Ogilvie R. E.*, The growth of the Widmanstätten pattern in metallic meteorites, *Geochim. et Cosmochim. Acta*, **29**, p. 893—920, 1965.

48. *Uhlig H. H.*, Contribution of metallurgy to the origin of meteorites, Part II — The significance of Neumann bands in meteorites, *Geochim. et Cosmochim. Acta*, **7**, p. 34—42, 1955.
49. *Heymann D.*, *Lipschutz M. E.*, *Nielson B.*, *Anders E.*, Canyon Diablo meteorite: Metallographic and mass spectrometric study of 56 fragments, *Jour. Geophys. Res.*, **71**, p. 619—641, 1966; *Lipschutz M. E.*, *Jaeger R. R.*, X-ray diffraction study of minerals from shocked iron meteorites, *Science*, **152**, p. 1055—1057, 1966; *Jaeger R. R.*, *Lipschutz M. E.*, X-ray diffraction study of kamacite from iron meteorites, *Geochim. et Cosmochim. Acta*, **32** p. 773—779, 1968.
50. *Carter N. L.*, *Kennedy G. C.*, Origin of diamonds in the Canyon Diablo and Novo Urei meteorites, *Jour. Geophys. Res.*, **69**, p. 2403—2421, 1964. Кроме того, *Carter N. L.*, *Kennedy G. C.*, Origin of diamonds in the Canyon Diablo and Novo Urei Meteorites — a reply, *Jour. Geophys. Res.*, **71**, p. 663—672, 1966.
51. *Anders E.*, *Lipschutz M. E.*, Critique of paper by *N. L. Carter*, *G. C. Kennedy*, «Origin of diamonds in the Canyon Diablo and Novo Urei meteorites», *Jour. Geophys. Res.*, **71**, p. 643—661, 1966. Кроме того, *Anders E.*, *Lipschutz M. E.*, Reply, *Jour. Geophys. Res.*, **71**, p. 673—674, 1966.
52. *Comerford M. F.*, Meteorites: An X-ray analysis of deformed kamacite, *Jour. Geophys. Res.*, **74**, p. 6675—6678, 1969.
53. *Chladni E. F. F.*, Über den Ursprung der von Pallas gefundenen und anderer Eisenmassen, и Über einiger damit in Verbindung stehende Naturscheinungen, *Riga, J. F. Hardknoch*, 63 p., 1794.
54. *Prior G. T.*, On the genetic relationship and classification of meteorites, *Mineralog. Mag.*, **238**, p. 56—60, 1916.
55. *Lovering J. F.*, *Nichiporuk W.*, *Chodos A.*, *Brown H.*, The distribution of gallium, germanium, cobalt, chromium, and copper in iron and stony-iron meteorites in relation to nickel content and structure, *Geochim. et Cosmochim. Acta*, **11**, p. 263—278, 1957.
56. *Mason B.*, The pallasites, *Am. Mus. Nat. Hist.*, *Novitates*, No. 2163, 19 p., 1963.
57. *Buseck P. R.*, *Goldstein J. I.*, Olivine compositions and cooling rates of pallasitic meteorites, *Geol. Soc. Amer.*, *Bull.*, **80**, p. 2141—2158, 1969. См. также *Buseck P. R.*, *Goldstein J. I.*, Pallasitic meteorites: Implications regarding the deep structure of asteroids, *Science*, **159**, p. 300—302, 1968.
58. *Lovering J. F.*, The evolution of the meteorites — evidence for the co-existence of chondritic, achondritic, and iron meteorites in a typical parent meteorite body, in *Researches on Meteorites*, *C. B. Moore*, ed., Wiley, New York, p. 179—198, 1962.
59. *Taylor H. P.*, *Duke M. B.*, *Silver L. T.*, *Spstein S.*, Oxygen isotope studies of stone meteorites, *Geochim. et Cosmochim. Acta*, **29**, p. 498—512, 1965.
60. *Powell B. N.*, Petrology and chemistry of mesosiderites I, Textures and composition of nickel-iron, *Geochim. et Cosmochim. Acta*, **33**, p. 789—810, 1969. Кроме того, *Powell B. N.*, Petrology and chemistry of mesosiderites II, Silicate textures and compositions and metal-silicate relationships, *Geochim. et Cosmochim. Acta*, **35**, p. 5—34, 1971.
61. *Hodge P. W.*, *Wright F. W.*, Meteoritic spherules in the soil surrounding terrestrial impact craters, *Nature*, **225**, p. 717—718, 1970.
62. *Merrihue C.*, Rare gas evidence for cosmic dust in modern Pacific red clay, *New York Acad. Sci.*, *Annals*, **119**, p. 351—367, 1964. См. также *Tilles D.*, Anomalous argon isotope ratios in particles from Greenland ice and Pacific Ocean sediments, *Am. Geophys. Union, Trans.*, **46**, p. 117, abstract, 1964.

63. *Fireman E. L.*, Evidence for extraterrestrial particles in polar ice, Meteor Orbits and Dust, Proc. Symp. 1965, *G. S. Hawkins*, ed., NASA SP-135, SCA, II, p. 373—379, 1967, кроме того, 11, *Smithson. Contr. Astrophys.*
64. *Carr M. H.*, Atmospheric Collection of debris from the Revelstoke and Allende fireballs, *Geochim. et Cosmochim. Acta*, 34, p. 689—700, 1970.
65. *Zook H. A.*, *Flaherty R. E.*, *Kessler D. J.*, Meteoroid impacts on the Gemini windows, *Planet. Space Sci.*, 18, p. 953—964, 1970. См. также *Kerridge J. F.*, Micrometeorite environment at the Earth's orbit, *Nature*, 228, p. 616—619, 1970.
66. *Golopan K.*, *Wetherill G. W.*, Rubidium-strontium age of amphoterite (LL) chondrites, *Jour. Geophys. Res.*, 74, p. 4349—4358, 1969; Rubidium-strontium studies on enstatite chondrites: whole meteorite and mineral isochrons, *Jour. Geophys. Res.*, 75, p. 3457—3467, 1970; Rubidium-strontium studies on black hypersthene chondrites: Effects of shock and reheating, *Jour. Geophys. Res.*, 76, 8484—8492, 1971; кроме того, *Kaushal S. K.*, *Wetherill G. W.*, Rb⁸⁷ — Sr⁸⁷ age of bronzite (H group) chondrites, *Jour. Geophys. Res.*, 74, p. 2717—2726, 1969; Rubidium-87 — Strontium-87 age of carbonaceous chondrites, *Jour. Geophys. Res.*, 75, p. 463—468, 1970.
67. Например, см. *Heymann D.*, The origin of hypersthene chondrites: ages and shock effects of black chondrites, *Icarus*, 6, p. 189—224, 1967.
68. *Hoehenberg C. M.*, *Munk M. N.*, *Reynolds J. H.*, Spallation and Fissionogenic Xenon and Krypton from stepwise heating of the Pasamonte Achondrite; находка вымершего изотопа ²⁴⁴Pu в метеоритах; относительные возрасты хондритов и ахондритов: *Jour. Geophys. Res.*, 72, p. 3139—3177, 1967.
69. *Mazor E.*, *Heymann D.*, *Anders E.*, Noble gases in carbonaceous chondrites, *Geochim. et Cosmochim. Acta*, 34, p. 781—824, 1970.
70. *Voshage H.*, Bestrahlungsalter und Herkunft der Eisenmeteorite. *Zeit. Naturforsch.*, 22a, p. 477—506, 1967.
71. *Ceplecha Z.*, Multiple fall of Příbram meteorites photographed, *Astron. Inst. Czech.*, Bull., 12, p. 21—47, 1961.
72. *McCrosky R. E.*, *Boeschstein H.*, The Prairie Meteorite Network, *Smith. Astrophys. Obs.*, Spec. Rept., No. 173, 23 p., 1965.
73. *McCrosky R. E.*, *Posen A.*, *Schwartz G.*, *Shao C. Y.*, The Lost City Meteorite: Its recovery and a comparison with other fireballs, *Smith. Astrophys. Obs.*, Spec. Rept., No. 336, 41 p., 1971.
74. *LaPaz L.*, The effects of meteorites upon the Earth (including its inhabitants, atmosphere, and satellites), *Adv. Geophys.*, 4, p. 217—350, 1958.
75. *Arnold J. R.*, The origin of meteorites as small bodies, II, The model, *Astrophys. Jour.*, 141, p. 1536—1547, 1965.
76. *Wetherill G. W.*, Dynamical studies of asteroidal and cometary orbits and their relation to the origin of meteorites, in *Origin and Distribution of the Elements*; *L. H. Ahrens*, ed., Pergamon Press, Oxford, p. 423—443, 1968. Кроме того, *Wetherill G. W.*, Relationships between orbits and sources of chondritic meteorites, in *Meteorite Research*; *P. M. Millman*, ed., D. Reidel, Dordrecht, Chap. 48, p. 573—589, 1969.
77. *Urey H. C.*, Meteorites and the Moon, *Science*, 147, p. 1262—1265, 1965. Кроме того, *Urey H. C.*, Primary and secondary objects, *Jour. Geophys. Res.*, 64, p. 1721—1737, 1959.
78. *O'Keefe J. A.*, The origin of tektites, *Tech. Note D—490*, NASA, 26 p., 1960 и статьи, опубликованные позднее.

РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА ПО ОБЩИМ ВОПРОСАМ

79. *Mason B.*, Meteorites, Wiley, New York and London, 274 p., 1962. Исчерпывающая сводка по метеоритам.
80. *Wood J.*, Meteorites and the Origin of Planets, McGraw-Hill, Earth and Planetary Sci. Ser., 117 p., 1968.
81. *Wasson J. T.*, Meteorites; Classification and Properties, 10, Rocks and Minerals, Springer-Verlag, New York, Heidelberg, Berlin, 316 p., 1974. Современная сводка по метеоритам, выполненная с акцентом на их химический состав, содержит отличный классификационный каталог метеоритов.
82. *Hey M. H.*, Catalogue of Meteorites, third revised and enlarged edition, British Museum, Pub. No. 464, 637 p., 1966.
83. *Tschermak G.*, The Microscopic Properties of Meteorites, 1885, перевод немецкого оригинала см. в Smithsonian Contr. to Astrophys., Smithsonian Astrophys. Obs., 4, No. 6, 239 p. Прекрасные микрофотографии и описания каменных метеоритов.

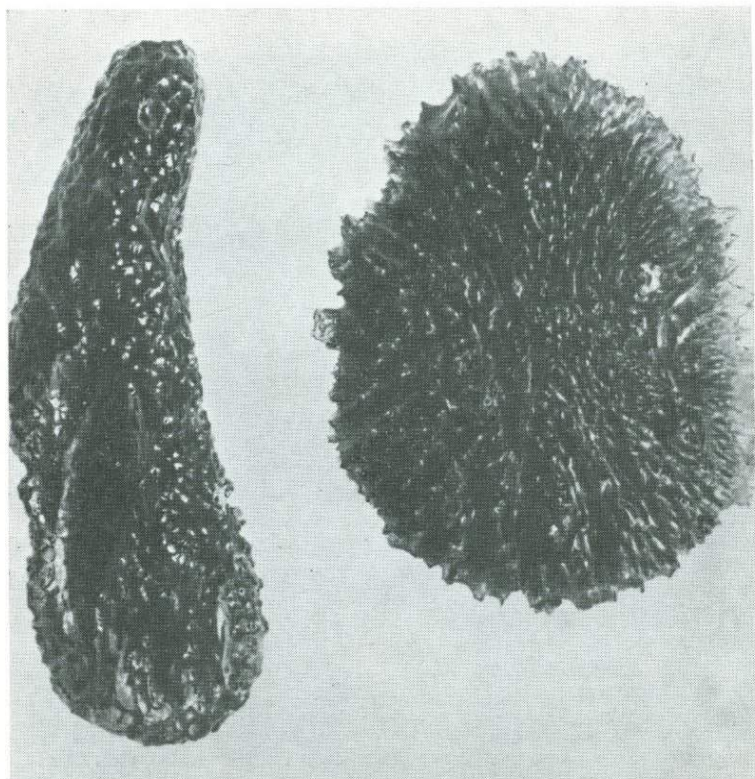
Каждому, кто имел дело с тектитами, они, вероятно, представляются наиболее безнадежно загадочными среди всех камней, когда-либо найденных на Земле.

Г. Фол, 1966 г.

2. ТЕКТИТЫ

ВВЕДЕНИЕ

Происхождение тектитов относится к одной из наиболее оживленно обсуждаемых научных проблем на протяжении последних более чем тридцати лет. Впервые внимание международной науки к тектитам привлек Ф. Е. Зюсс в 1900 г., который и ввел термин «тектиты» от греческого «τηκτός», что означает «расплавленный» или «расплавившийся» [1]. После изучения чехословацких тектитов (фиг. 1) и составления полной сводки предшествующей литературы Зюсс пришел к выводу, что тектиты представляют собой стекловатую разновидность метеоритов. В 1933 г. Л. Дж. Спенсер предположил, что тектиты — это импактные стекла, образованные при плавлении пород на земной поверхности под воздействием тепла, выделяемого при метеоритном ударе [2]. Это заключение базировалось на сходстве тектитов со стеклами ударного происхождения в метеоритных кратерах Хенбюри (Австралия) и Вабар (Саудовская Аравия). Барнс [3] привлек внимание современных исследователей Западного полушария к проблеме тектитов после выполненного им описания первого североамериканского тектита Grimes County, штат Техас (фиг. 2), и исчерпывающего обзора предыдущих исследований. В своей статье в 1939 г. Барнс заключает, что тектиты представляют собой разновидность фильгуритов (продуктов плавления при ударе молнии), однако подчеркивает, что предыдущую гипотезу Спенсера нельзя просто отвергать [4]. Впоследствии Барнс стал активным защитником земного ударного происхождения тектитов.

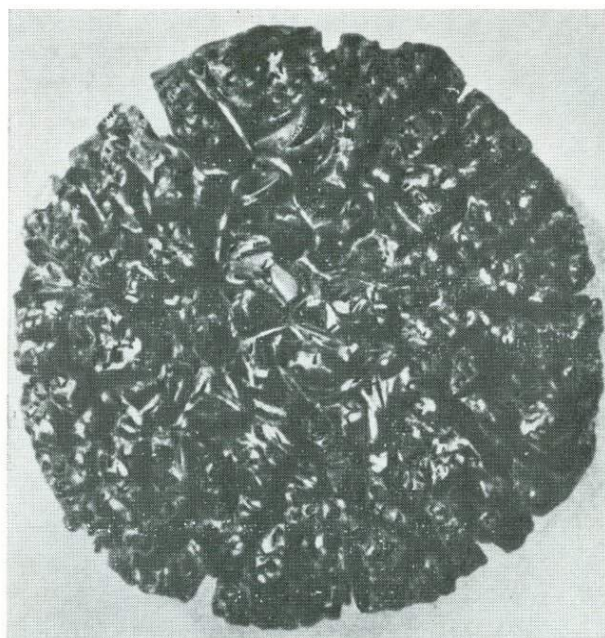


Фиг. 1. Молдавиты (тектиты из южной части Чехословакии).

Справа — дискообразный прозрачный образец зеленого цвета; *слева* — изогнутый каплевидный прозрачный тектит темно-зеленого цвета. Тонкая скульптура поверхности обусловлена травлением почвенными кислотами и подземными водами. Длина каплевидного образца примерно 6 см.

МЕСТОНАХОЖДЕНИЕ, ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ И ФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА

В настоящее время тектиты известны в основном в четырех районах и объединяются в группы, как показано в табл. I. Тектиты представляют собой стекла с высоким содержанием кремнезема (табл. II) и редкими включениями минералов. По форме они нередко напоминают абрадированные гальки, переносимые потоком совместно с другим обломочным материа-



Фиг. 2. Крупный бедиазит (из Бедиаза, Техас).

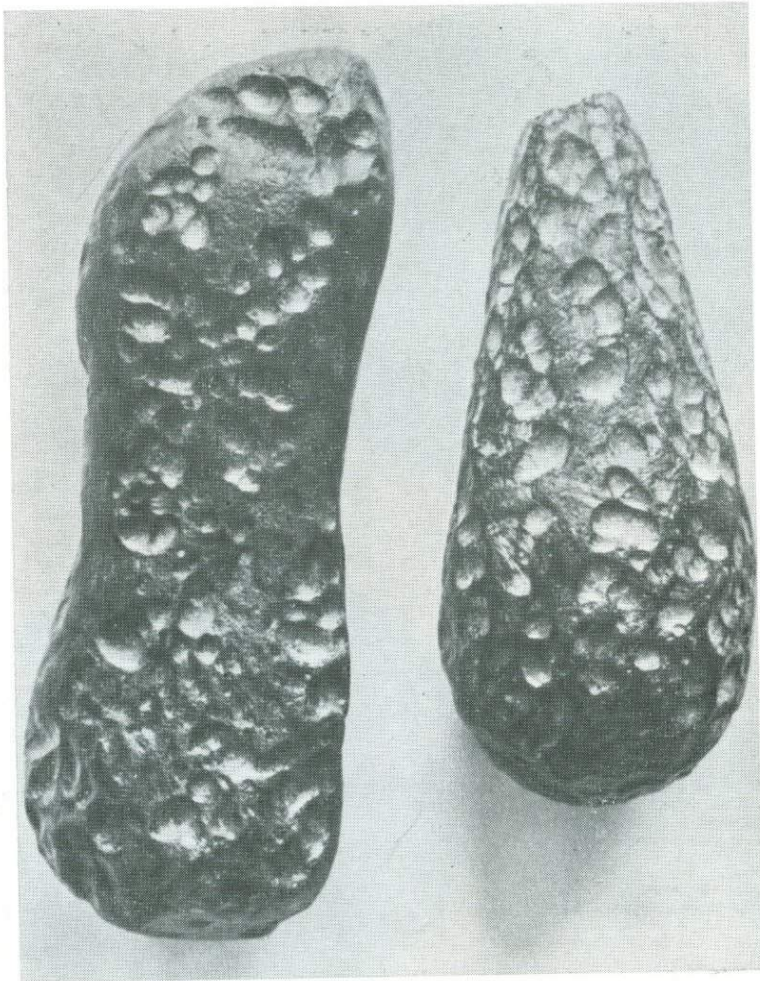
Диаметр образца примерно 5,5 см. Стекло имеет темный цвет, в утолщенных участках почти непрозрачно.

Таблица I Четыре основные группы тектитов

Название ¹	Местонахождение	К-Аг-возраст, млн. лет	Примерное число образцов ²
Австралиты	Австралия, Филиппины, о. Биллитон, Индо- китай, Таиланд, Су- матра и другие районы Юго-Восточной Азии	$0,7 \pm 0,1$	$n \cdot 10^5$
Тектиты Берега Слоновой Кости	Берег Слоновой Кости	$1,3 \pm 0,2$	$n \cdot 10^2$
Молдавиты	Чехословакия	$15 \pm 0,5$	$n \cdot 10^4$
Тектиты Север- ной Америки	США (шт. Техас, шт. Джорджия, о-в Мар- тас-Виньярд)	34 ± 1	$n \cdot 10^4$

¹ Помимо четырех главных групповых названий, многие группы тектитов имеют местные названия по району их находки, например: бедиазиты (Техас), индо-шиниты, биллитониты, филиппиниты и т. д.

² Число образцов, хранящихся в составе коллекций; несомненно, что общее число тектитов каждой из групп намного больше.



Фиг. 3. Индошниты.

Имеют гантелеобразную и слезовидную струйчатую форму, сложены темно-бурым, почти непрозрачным стеклом. Примерная длина «гантели» 10 см.

лом, или имеют струйчатую форму (фиг. 3). Размеры тектитов варьируют от менее чем 0,01 мм в диаметре (микротектиты) до крупных тел весом более 10 кг. Некоторые из австралийских образцов, называемых «пуговицами», имеют удивительно хорошо сохранившуюся форму со скульптурой, обусловленной аэродинамическими явлениями (фиг. 4), которую интерпретируют как



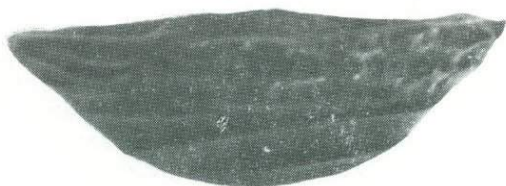
a

Фиг. 4. Австралиты.

Имеют форму «пуговиц», обусловленную аэродинамическим скульптурированием и абляцией при прохождении с высокой скоростью сквозь атмосферу; *a* — передняя поверхность; *b* — задняя поверхность; *в* — вид сбоку, диаметр образца 25 мм; найден приблизительно в 13 км к северу от Принстауна, (Виктория, Австралия);



b



в



a



b

a — тектит, найденный в 10 км к востоку от Порт-Кэмпбелла, Виктория; передняя поверхность; *b* — задняя поверхность; *c* — вид сбоку, диаметр 26,1 мм, предоставлен Дж. Бейкером. В сильном пучке проходящего света образец имеет светло-бурый, а в отраженном свете — черный цвет.



c

Таблица II Примеры химического состава тектитов (главные элементы, вес. %)

Оксиды	Австралиты ¹	Бедиазиты ²	Молдавиты ³	Тектиты Берега Слоновой Кости ⁴
SiO ₂	73,45	76,37	80,07	71,05
TiO ₂	0,70	0,76	0,80	0,70
Al ₂ O ₃	11,53	13,78	10,56	14,60
MgO	2,05	0,63	1,46	3,29
CaO	3,50	0,65	1,87	1,67
Na ₂ O	1,28	1,54	0,51	1,71
K ₂ O	2,28	2,08	2,95	1,53
FeO	4,54	3,81	2,29	5,51
P ₂ O ₅	—	0,04	—	—
Fe ₂ O ₃	—	0,19	0,15	0,18
MnO	—	0,04	0,11	0,08

¹ Среднее из 17 анализов австралитов по Тэйлору [11].

² Среднее из 21 анализа бедиазитов; аналитики Куттитта и Каррон в работе Chao E.C.T., The petrographic and chemical characteristics of tektites: in Tektites, J. O'Keefe, ed., Univ. of Chicago Press, Chap. 3, p. 51-94, 1963.

³ Среднее из 8 анализов по Чжао и др. Там же.

⁴ Среднее из 3 анализов по Варнсу [3].

результат двух этапов плавления: а) начальное плавление, в результате которого превращается в стекло исходная порода; б) повторное плавление, когда образуется слой, имеющий флюидальную текстуру и такие морфологические детали, как кольцеобразные волны на лобовой поверхности, возникающие при абляции в процессе прохождения сквозь земную атмосферу с космической скоростью. Изложенная интерпретация и результаты экспериментальных исследований, при которых удалось воспроизвести формы, близкие к «пуговицам», широко применяются в работах Чэпмена и его сотрудников [5].

ПРОИСХОЖДЕНИЕ

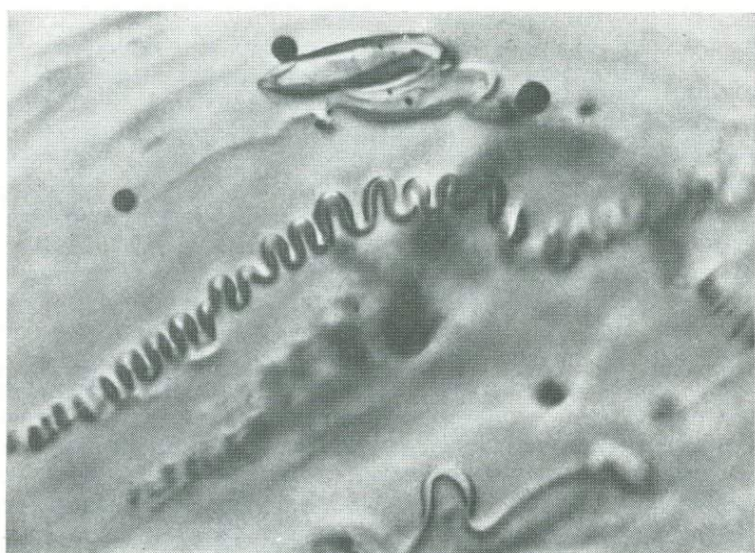
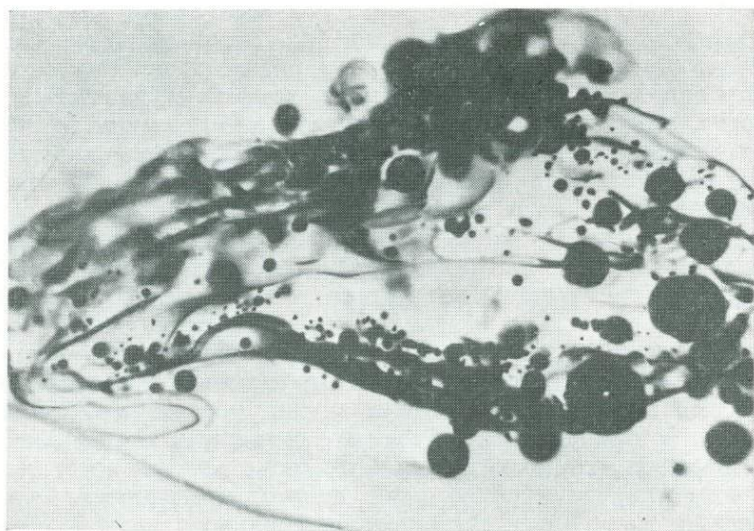
На основании аэродинамических критериев Чэпмен пришел к выводу об *исключительно* лунном происхождении тектитов. В дальнейшем он дополнил аргументацию ссылкой на характер распределения австралийских разновидностей тектитов, согласно которой некоторые из этих тектитов могут быть отнесены только к продуктам выбросов из лунного кратера Тихо. Основываясь на теоретических предпосылках и данных о химическом составе, гипотезу лунного происхождения тектитов активно поддерживает О'Киф [6].

Ряд наблюдений позволил выдвинуть наиболее общепринятую гипотезу о том, что тектиты представляют собой разновид-

ность импактных стекол. Вальтером был обнаружен коэсит в тектитах Юго-Восточной Азии [7]. На поверхности Земли коэсит образуется только в ударных кратерах, поэтому находка этого минерала позволяет связывать тектиты с ударными явлениями, при которых развиваются высокие давления. В тектитах Северной Америки установлен бадделейт (высокотемпературная модификация ZrO_2) [8]. Известно, что бадделейт является продуктом ударного метаморфизма циркона ($ZrSiO_4$), и его находка вместе с ранее установленным лешательеритом [3] (фиг. 5) служит показателем крайне высоких температур метаморфизма тектитов. Обнаружение железоникелевых шариков в тектитах Филиппин [9], так же как и найденные ранее Спенсером частицы металлов, позволило установить связь тектитов с метеоритным веществом. Все эти наблюдения в совокупности с общей петрографией тектитов служат убедительным доказательством принадлежности тектитов к импактным стеклам [10].

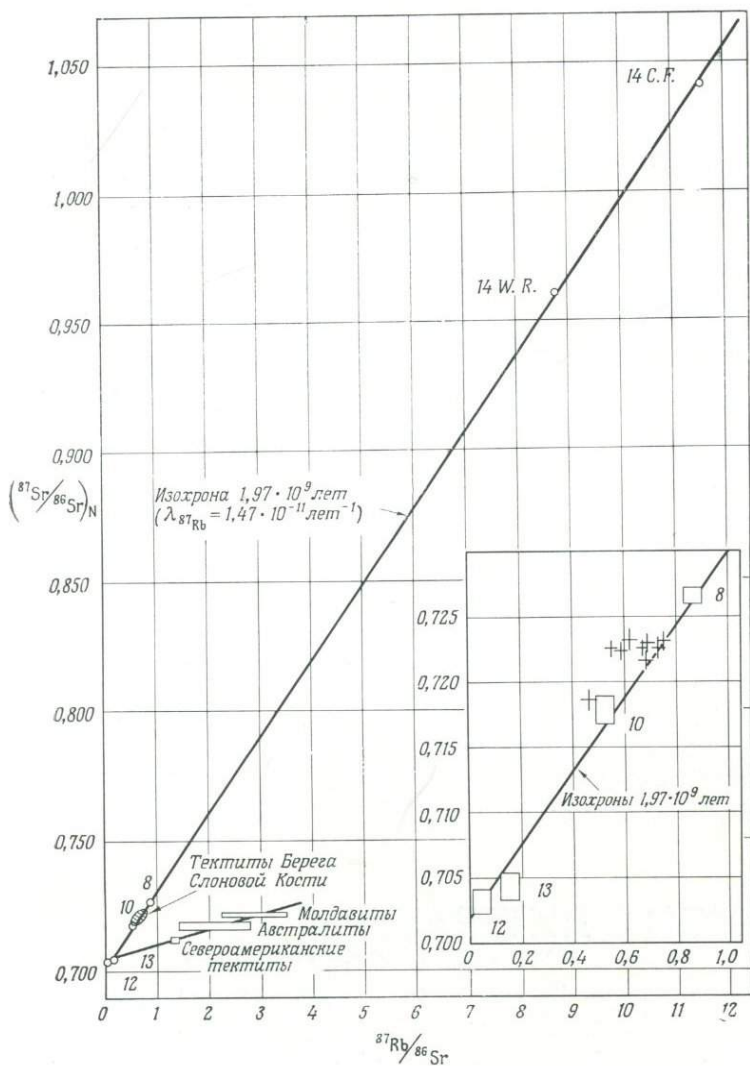
Известно, что по химическому составу тектиты чрезвычайно сходны с породами земной коры, например с гранитами и терригенными осадками, не считая второстепенных различий. Железо в тектитах почти полностью восстановлено до двухвалентного, а в 1000 раз меньше, чем в любых земных породах и стеклах того же состава, содержание воды свидетельствует об исключительно сухих условиях. Хорошо известны многочисленные черты сходства тектитов и земных пород по составу как главных породобразующих, так и второстепенных элементов, а также по изотопным отношениям [11]. Однако вплоть до лета 1969 г. химический состав лунных пород был практически неизвестен и не было возможности провести детальный химический анализ лунных образцов и сопоставить их с тектитами.

В кульминационный период споров о происхождении тектитов в двух основных районах их распространения были обнаружены два крупных ударных кратера. К ударным кратерам стали относить кратер Рис, расположенный в южной части ФРГ, диаметр которого достигает 24 км (см. стр. 131). Этот кратер расположен всего в 300 км от ближайшего пункта нахождения молдавтитов в южной части Чехословакии. Помимо этого, кратер Босумтви (иногда называемый Ашанти) на территории Ганы, представляющий собой круговую структуру, заполненную водой, с диаметром 11 км и расположенный на расстоянии примерно 300 км от района распространения тектитов Берега Слоновой Кости, также стали рассматривать как крупную ударную структуру. Определения абсолютного возраста импактных стекол из этих двух кратеров [12] калий-аргоновым методом показали, что возраст кратеров аналогичен возрасту близлежащих тектитов. Это положение позволяет предполагать, что тектиты являются импактными стеклами из описанных кратеров, однако оставляет



Фиг. 5. Включения лешательерита (кремнеземистого стекла) в тектите из Каунти, Джорджия, США.

Вверху — зерно лешательерита неправильной формы с многочисленными пузырьками в краевой части зерна; *внизу* — синусоидальное выделение лешательерита, ориентированное параллельно структуре течения. Во всех тектитах включения лешательерита довольно многочисленны. Длина поля зрения приблизительно 2 мм при одном никеле.



Фиг. 6. Стронций-рубидиевая изохрона для тектитов Берега Слоновой Кости и пород кратера Босумтви (указаны номера образцов).

Видно, что и те и другие породы располагаются на одной изохроне, если в процессе плавления происходит слабое улетучивание Rb по сравнению со Sr. Предоставлено К. Шнетцлером [13]; авторские права 1966 г. Американской ассоциации содействия научному прогрессу.

место и для других, менее достоверных гипотез. Отношение Sr/Rb и изотопный состав стронция в стеклах кратера Босумтви и тектитах Берега Слоновой Кости изучали Шнетцлер и др. [13] (фиг. 6). Они пришли к выводу, что «имеющиеся в настоящее время факты позволяют предполагать, что тектиты Берега Слоновой Кости, скорее всего, представляют собой продукты плавления пород при образовании ударного метеоритного кратера Босумтви». Эта статья почти не оставила сомнений у большинства ученых в том, что тектиты в действительности относятся к *земным* импактным стеклам [10]. Последовавшие вслед за этим прямые исследования лунной поверхности в ходе эксперимента по обратному рассеянию альфа-частиц, проведенного аппаратами «Сервейор», а затем доставка и анализ лунных образцов с помощью космических кораблей «Аполлон» и автоматических станций серии «Луна» показали, что лунные породы не могут играть роль исходного материала для образования тектитов.

Несмотря на то, что в настоящее время, по-видимому, установлено место происхождения тектитов, на многие из вопросов ответить еще нельзя, или же они затронуты в самых общих чертах. Прежде всего это механизм, по которому тектиты покидают пределы земной атмосферы в процессе первичного плавления и выброса из земного кратера, причем по крайней мере некоторые из тектитов приобретают форму «пуговицы» или иную аэродинамически скульптурированную форму. Кроме того, неизвестна природа тел, при ударе которых о поверхность Земли возникают тектиты. Подобные тела, возможно, относятся к кометам [14], астероидам или и тем и другим, причем особенно загадочным является то, что до сих пор не обнаружен крупный ударный кратер в ассоциации с наиболее крупным и молодым районом рассеяния, т. е. на территории Австралии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Suess F. E.*, Über die Herkunft der Moldavite aus dem Weltraume, Akad. Wiss. Wien Sitzungsber. Anzeiger., No. 24, p. 2, 1898; Die Herkunft der Moldavite und verwandter Gläser, K. geol. Reichsanstalt, Wien Jahrb., Band 50, Heft 2, p. 193, 1900 и более поздние статьи.
2. *Spencer L. J.*, Origin of tektites, Nature, 131, p. 117—118, 876, 1933.
3. *Barnes V. E.*, North American tektites, Univ. of Texas Publ. 3945, pt. 2, p. 477—583, 1939. Впервые тектиты были диагностированы стратиграфом и палеонтологом Штенцелем совместно с сотрудниками Бюро геологии полезных ископаемых при Университете штата Техас.
4. Несколькими годами позже Барнс пришел к заключению, что тектиты представляют собой результат воздействия крупных ударных метеоритных явлений, это в целом согласуется с гипотезой Спенсера. См. *Barnes V. E.*, Tektites, Sci. Am., 205, No. 5, p. 58, 1961.

5. *Chapman D. R., Larson H. K.*, The lunar origin of tektites, Tech. Note D—1556, NASA, Feb., 1963, 66 p., 1963 и другие статьи.
6. *O'Keefe J. A.*, The origin of tektites, Tech. Note D—490, NASA, 26 p., 1960 и более поздние статьи.
7. *Walter L. W.*, Coesite discovered in tektites, *Science*, **147**, p. 1029—1032, 1965.
8. *Clarke R. S., Jr., Wosinski J. F.*, The ZrO₂ inclusion in the Martha's Vineyard tektite: Prog. with Abstr., Sec. Int'l. Tektite Symp., Pittsburg, Pa., p. 27, title, 1963; *King E. A., Jr.*, Baddeleyite inclusion in a Georgia tektite, *Am. Geophys. Union, Trans.*, **47**, No. 1, p. 145, abstract, 1966.
9. *Chao E. C. T., Adler I., Dwornik E. J., Littler J.*, Metallic spherules in tektites from Isabela, Philippine Islands, *Science*, **135**, p. 97, 1962. Интересно отметить, что, несмотря на близкое сходство этих шариков с шариками, изученными теми же авторами в земных импактных стеклах, *Чжао и др.* констатируют: «...Мы отдаем предпочтение лунному или внеземному их происхождению, которое защищается предыдущими исследователями...»
10. *King E. A., Jr.*, Recent information on the origin of tektites: Shock Metamorphism of Natural Materials, *B. M. French, N. M. Short*, eds., Mono Book Corp., Baltimore, Md., 1968, p. 626, abstract, 1968. См. также *Faul H.*, Tektites are terrestrial, *Science*, **152**, p. 1341—1345, 1966.
11. *Taylor S. R.*, The chemical composition of australites, *Geochim. et Cosmochim. Acta*, **26**, p. 685, 1962; *King E. A., Jr.*, Possible relation of tuff in the Jackson Group (Eocene) to bediasites, *Nature*, **196**, No. 4854, p. 569, 1962; *Tilles D.*, Stable silicon isotope ratios in tektites, *Geochim. et Cosmochim. Acta*, **28**, p. 1015, 1964 и многие другие работы.
12. *Gentner W., Lippolt H. J., Müller O.*, Kalium-Argon-Alter des Bosumtwi-Kraters in Ghana und die chemische Beschaffenheit seiner Gläser, Max-Planck-Institut für Kernphysik, Heidelberg, 1963/V/6, 7 p., 1963; *Zeitschr. Naturforschung*, **19a**, No. 1, p. 150—153, 1963 и другие статьи сотрудников гейдельбергской группы.
13. *Schnetzler C. C., Pinson W. H., Hurley P. M.*, Rubidium-Strontium age of the Bosumtwi Crater Area, Ghana, compared with the age of the Ivory Coast tektites, *Science*, **151**, p. 817, 1966.
14. *Urey H. C.*, Cometary collisions and tektites, *Nature*, **197**, No. 4864, p. 228, 1963.

РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА ПО ОБЩИМ ВОПРОСАМ

15. Tektites, *V. E. Barnes, M. A. Barnes*, eds., Benchmark Papers in Geology; Dowden, Hutchinson and Ross, Stroudsburg, Pa., 445 p., 1973.
16. *Faul H.*, Tektites are terrestrial, *Science*, **152**, p. 1341, 1966.
17. *Barnes V. E.*, Tektites, *Sci. Am.*, **205**, No. 5, p. 58, 1961.
18. Tektites, *John O'Keefe*, ed., Univ. of Chicago Press, Chicago, 228 p., 1963.

Кратеры представляют собой определяющие топографические элементы на поверхности планет во внутренней области Солнечной системы.

А. Воронов, 1972 г.

3. Кратеры

ВВЕДЕНИЕ

Кратеры относятся к наиболее существенным и широко распространенным топографическим элементам на поверхности планет и их спутников. Возможно, кратеры в изобилии встречаются на поверхности многих астероидов и метеороидов, однако таких наблюдений пока в нашем распоряжении нет; исключение представляют данные о спутниках Марса, которые могут быть отнесены к захваченным этой планетой астероидам.

На крупных планетных телах, достигающих и превосходящих размеры Луны, кратеры могут возникать в результате самых разнообразных процессов, включая вулканизм, ударные и провальные явления, вторичные ударные процессы, наконец, обрушение. Наибольшую роль среди этих процессов играют два: ударные и вулканические. Образование кратеров, связанных с вулканическими извержениями, таких, как кальдеры, маары и вершинные кратеры шлаковых конусов, хорошо описаны в классической геологической литературе [1, 2, 3] и в настоящей книге не рассматриваются. Вулканические кратеры обнаружены на Луне и Марсе (иллюстрации и освещение материала приведены в гл. 6 и 7).

На мелких планетных телах, т. е. астероидах и спутниках, размеры которых слишком малы для образования (в настоящем или прошлом) активных недр, где экзотермическая радиоактивность обеспечивает повышение температуры, достаточное для генерации магм, вулканические кратеры, очевидно, отсутствуют.

Однако все небесные тела Солнечной системы обязательно подвергаются соударениям с метеорными телами, астероидами и кометами, так что следует ожидать повсеместного образования кратеров на каменных и металлических поверхностях любых тел Солнечной системы.

УДАРНЫЕ КРАТЕРЫ

МЕХАНИЗМ КРАТЕРООБРАЗОВАНИЯ

Большинство явлений, сопровождающих удар метеороида или иного высокоскоростного тела, протекает в течение столь краткого промежутка времени, что их изучение представляет собой трудную задачу. Кроме того, энергия взаимодействия ударяющего тела и мишени достаточно велика. Многие метеороиды, астероиды и кометы движутся в пределах Солнечной системы с огромной скоростью. Например, крупные метеороиды могут входить в поле тяготения Земли со скоростью, величина которой варьирует примерно от 11 км/с до 72 км/с. Из простого уравнения кинетической энергии, $E = \frac{1}{2}mv^2$, где E — кинетическая энергия, m — масса, v — скорость, с очевидностью следует, что при высокоскоростном ударе тела, обладающего даже сравнительно небольшой массой, выделяется весьма значительное количество энергии. Например, для образования Аризонского метеоритного кратера потребовалась энергия, количество которой оценивают в $6 \cdot 10^{22}$ эргов¹ [4], а при образовании кратера Моря Дождей на Луне суммарная энергия превышала $1 \cdot 10^{32}$ эргов. Для оценки количества энергии, затраченной на образование некоторых ударных кратеров, полезно использовать аналогию с кратерами атомных взрывов на полигоне Комиссии по атомной энергии в штате Невада (фиг. 1), особенно в связи с тем, что ряд таких взрывных кратеров имеет примерно те же размеры, что и природные ударные кратеры. Поскольку при ядерных взрывах производится их всестороннее изучение и документирование, хорошо известно общее количество энергии, выделяющееся при использовании соответствующих устройств.

Ударные явления при испытаниях реактивных снарядов использовались для изучения ударных кратеров с диаметрами от нескольких футов до десятков футов [5]. Для исследования ударных явлений, вызванных очень мелкими телами, приме-

¹ Различные оценки варьируют примерно от $3,3 \cdot 10^{21}$ до $2,7 \cdot 10^{24}$ эргов; более подробное обсуждение см. в работе R. B. Baldwin. The measure of the moon: Univ. of Chicago Press, Chicago, p. 178, 1963.



Фиг. 1. Кратер Седан на перспективном аэрофотоснимке.

Диаметр кратера 390 м, глубина 98 м. Кратер образовался в аллювиальных отложениях 6 июля 1962 г. на полигоне Комиссии по атомной энергии (Невада) в результате взрыва термоядерного устройства мощностью 100 килотонн, погруженного на глубину 194 м от дневной поверхности. Следует отметить бугристую поверхность выбросов, непосредственно окружающих кратер, а также грубоструктурные лучи и группы побочных кратеров. Предоставлено Комиссией по атомной энергии США.

няются многочисленные лабораторные методы [6], в том числе легкогазовые пушки, ускорители Ван-де-Граафа и устройства типа дальнобойных винтовок. Лучшие из этих методов способны воспроизвести удар со скоростью до 30 км/с, но в большинстве случаев с достоверностью достигаются скорости от 10 до 15 км/с. Однако даже при таких условиях перечисленные методы применяют как наиболее полезные для понимания основных явлений, связанных с высокоскоростным ударом. При изучении природных ударных процессов обычно наблюдается лишь кратер, объем и размеры которого могут дать оценку общего количества энергии, высвобождаемой при ударе, однако как скорость движения, так и масса метеороида остаются неизвестными.

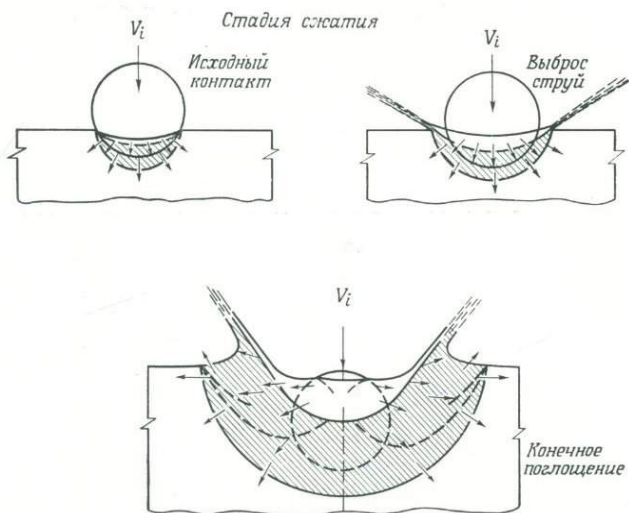
Последовательность событий при ударе. История развития экспериментальных кратеров, образованных при высокоскоростном ударе, изучалась с помощью сверхскоростной киносъемки и специальной аппаратуры. Голт с сотрудниками [7] выделяет три стадии формирования природных ударных крате-

ров из соображений подобия, а также по результатам экспериментов с высокоскоростными ударами, выполненных преимущественно с помощью частиц, которые разгонялись легкогазовой пушкой (табл. I).

Таблица I Последовательность событий при образовании ударного кратера [7]

1. Стадия сжатия	Перенос кинетической энергии ударяющего тела на мишень и возникновение интенсивных ударных волн
а. Исходный контакт	
б. Выброс струй	
в. Конечное поглощение	
2. Стадия экскавации	Процесс кратерообразования как проявление воздействия ударных волн и сопутствующих им волн разрежения
а. Радиальное распространение	
б. Боковое растекание	
в. Выброс	
3. Вторичное изменение	Потенциально возможные изменения после формирования кратера, не связанные с ударными волнами
а. Оползание	
б. Изостатическое выравнивание	
в. Эрозия и заполнение	

Стадия сжатия начинается с момента контакта ударника с поверхностью мишени. Происходит мгновенное образование ударных волн как в мишени, так и в ударнике. Распространение ударных волн в мишени происходит по почти полусферическому фронту в радиальном направлении от точки контакта с ударником, причем в материале мишени, подвергнутом сжатию в течение некоторой доли секунды, развиваются давления до нескольких мегабар. Даже несмотря на то, что сверхвысокие давления поддерживаются в течение очень короткого промежутка времени, этого достаточно для коренного изменения состояния вещества мишени. В теле ударника точно так же возникает ударная волна, распространение которой следует вектору первоначальной скорости тела; тем не менее тело начинает деформироваться, затем разрушаться, а при большинстве высокоскоростных ударов происходит его быстрое испарение. В момент удара в результате сложного взаимодействия ударных волн со свободной поверхностью ударяющего тела вслед за ударными волнами возникают волны разрежения. Первое появление таких волн отмечено явлением так называемого выброса струй [8], когда происходит гидродинамический выброс высокоскоростных частиц с поверхности взаимодействия мишени и ударника. В состав выбросов входят расплавленные и раскаленные добела обломки материала мишени и ударника, а также ионизированный газ. Скорость выброса материала в этом процессе в несколько раз превышает начальную скорость ударника [7]. Описываемая

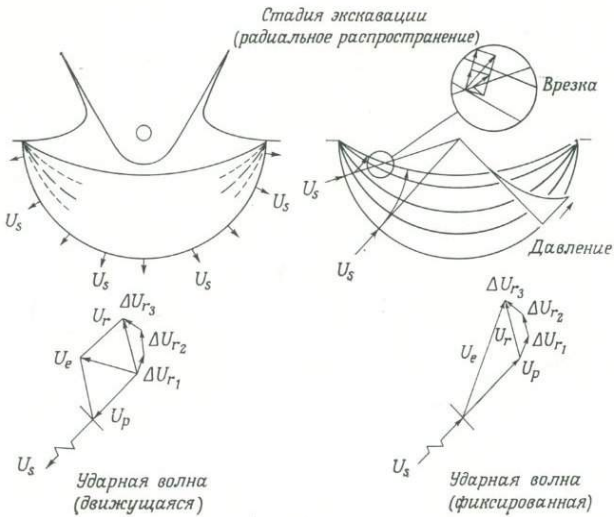


Фиг. 2. Схематическое изображение ударного явления, связанного со стадией сжатия при кратерообразовании.

По данным Голта и др. [7]. Предоставлено фирмой «Моно Бук Корпорейшн», Балтимор, Мэриленд, США.

рядом ученых «ударная световая вспышка» [9] связана с началом процесса выброса струй. Стадия сжатия заканчивается, когда происходит отражение ударной волны от тыловой стороны ударника. К этому времени он уже сильно деформирован, так же как и кратер, образовавшийся в материале мишени (фиг. 2).

В *стадию экскавации* наблюдается выброс наибольших количеств материала из начавшего развиваться кратера, причем он происходит в условиях сравнительно низких ориентированных давлений в диапазоне средних и низких скоростей выброса. Происходит радиальное распространение фронта ударной волны и сжатия материала во все стороны от точки удара, что приводит к распределению кинетической энергии ударника по быстро возрастающему объему и массе мишени. Следовательно, наблюдается исключительно быстрое убывание максимального давления во все стороны от точки удара (фиг. 3). Ударная волна приводит в движение материал мишени, который первоначально расположен параллельно фронту этой волны, но затем быстро становится параллельным стенке развивающегося кратера. Это обуславливает боковое растекание материала выбросов в зоне, прилегающей к валу кратера, причем из его центральной части материал почти или совсем не выносятся (фиг. 4, 5). На ранней



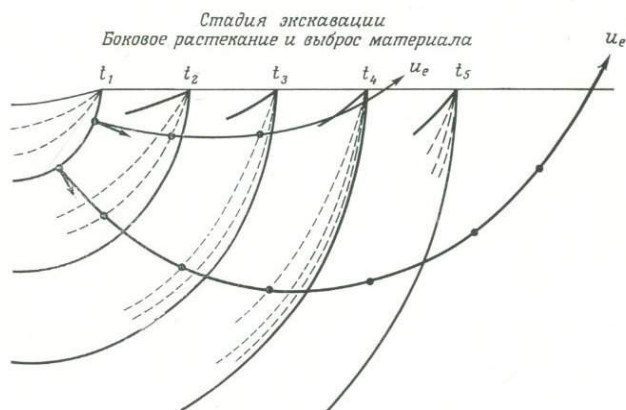
Фиг. 3. Схематическое изображение радиального распространения материала за фронтом ударной волны, вызванной высокоскоростным ударом.

По данным Голта и др. [7]. Предоставлено фирмой «Моно Бук Корпорейшн», Балтимор, Мэриленд, США.

стадии кратерообразования наблюдается заметная тенденция к распространению выброса вещества под очень острыми углами; на более поздних стадиях углы увеличиваются, что выражается в возрастании глубины кратера и крутизны его стенок. Кратер принимает свою окончательную форму, хотя часть выброшенного материала продолжает двигаться по баллистическим траекториям. Некоторая часть выбросов имеет очень крутые траектории и впоследствии падает обратно в кратер, формируя слой рыхлых обломочных отложений. Некоторые из этих частиц даже соскальзывают в глубь кратера по его стенкам.

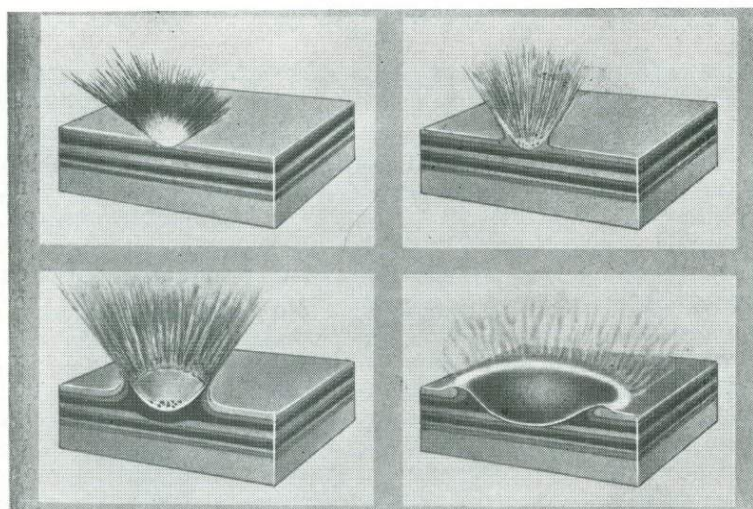
Стадия вторичного изменения охватывает перемены в морфологии кратера после его формирования. Эрозия и заполнение являются главными процессами такого типа на Земле, Луне, Марсе и, вероятно, на поверхности большинства иных планет. Лишь очень молодые кратеры, например Аризонский метеоритный кратер, не обнаруживают признаков воздействия упомянутых процессов. Морфология очень древних кратеров может подвергнуться коренной переработке, например, к этому типу относятся ударные кратеры Канадского щита.

Оползание кратерного вала и стенок обычно наблюдается на крупных кратерах [10], особенно на тех, диаметр которых превышает 10 км. Хотя отношение глубины кратера к его диа-



Фиг. 4. Схематическое изображение бокового растекания и выброса материала из ударного кратера.

По данным Голта и др. [7]. Предоставлено фирмой «Моно Бук Корпорейшн», Балтимор, Мэриленд, США.



Фиг. 5. Схема развития высокоскоростного ударного кратера (четыре этапа) на стадиях сжатия и экскавации.

По данным Голта и др. [7]. Предоставлено фирмой «Моно Бук Корпорейшн», Балтимор, Мэриленд, США.

метру на свежих кратерах составляет 1 : 5 или 1 : 6, оползневые процессы, возникающие вскоре после формирования кратера, могут существенно изменить эти соотношения до 1 : 8 или 1 : 7. Террасы, так часто наблюдаемые на стенках крупных лунных кратеров, почти наверняка возникли в результате оползневых явлений.

Центральные горки представляют собой опрокинутые и перевернутые блоки пород, которые, очевидно, были оторваны от дна кратера на заключительных стадиях кратерообразования или вскоре после завершения этого процесса. Формирование центральных горок, по-видимому, является следствием неупругой отдачи пород, расположенных ниже дна кратера, и происходит непосредственно вслед за прохождением фронта ударной волны и резким сжатием пород, подстилающих днище кратера. Центральные горки изредка наблюдаются в малых кратерах, однако, по-видимому, всегда они образуются в ударных кратерах, диаметр которых превышает 10 км. Кроме того, в качестве возможной причины возникновения центральных горок рассматривают воздействие ударных волн, отраженных от глубинных слоев пород, и изменение скорости волн на поверхностях раздела.

Несомненно, большую роль во вторичном изменении крупных кратеров играет изостатическое выравнивание. Происходит постепенное поднятие пород, залегающих в центральной части и на самых больших глубинах кратера, и это может привести к дополнительным структурным осложнениям в его строении. В результате наблюдаемое отношение глубины кратера к диаметру достигает 1 : 20 или еще меньше.

Ударный кратер может подвергнуться существенному изменению при воздействии любого обычного геологического процесса, например трещинной тектоники, вулканизма или оледенения, хотя, разумеется, эти процессы не связаны специфически с одним только присутствием кратера. *Возможным исключением* является вулканизм. Вокруг многих земных ударных кратеров залегают отложения туфовых выбросов, которые фактически описывались как свиты вулканических пород до тех пор, пока не были обнаружены ударные эффекты. На днищах ряда земных ударных кратеров, как, например, Маникуган, выявлены породы, представляющие собой ударные расплавы, происхождение которых, очевидно, связано с близповерхностными породами. Однако некоторые предполагали, что при ударных явлениях крупного масштаба может начаться плавление уже нагретых пород в недрах планеты. Несомненно, вследствие таких событий могут возникать трещины на поверхности планеты или в ее коре, что, по-видимому, приводит к понижению давления в нагретых подповерхностных породах. Такие трещины в этом случае начинают играть роль каналов, по которым может под-

ниматься магма, однако до настоящего времени неясно, способен ли гигантский ударный процесс привести к повышению температуры участка планетарной коры до величины, достаточной для частичного плавления существенных количеств вещества недр. Изложенную версию необходимо тщательно проанализировать. Недавно считали хорошим тоном теоретизировать по поводу происхождения лавовых потоков, заполняющих лунные морские бассейны. Однако теперь выясняется, что промежуток времени, прошедший между гигантским ударом, вызвавшим образование морских бассейнов, и началом излияния самых верхних лавовых потоков в пределах этих бассейнов, слишком велик, для того чтобы образование этих магм можно было считать непосредственным результатом самого ударного явления. Так или иначе, возраст первых лавовых потоков, излившихся в пределы бассейнов сразу после их формирования, остается неизвестным.

Уравнение Рэнкина — Гюгио. Теоретические исследования ударных волн ведут свое начало с середины прошлого века, начиная с работ Стокса [11] и Рэнкина [12], которые разработали основные концепции и магматические модели, не устаревшие до настоящего времени. Экспериментальные исследования ударных явлений на основании уравнений Рэнкина — Гюгио начались намного позднее в связи с прикладными задачами в области промышленности и военного дела [13]. Первоклассная сводка, в которой освещены развитие теории ударных волн, эксперимент и воздействие ударных процессов на породы и минералы, опубликована Штёффлером [14].

Если свободной поверхности твердого тела придано ускорение под влиянием ударяющего тела или волн сжатия, сопровождающих взрыв, то по этому телу начинает распространяться волновой фронт направленного давления, движущийся со сверхзвуковой скоростью. Рост давления приводит к уменьшению сжимаемости твердого тела, крутизна волны направленного давления возрастает, и она превращается в ударную волну (или «фронт ударной волны» [14]). За ударной волной моментально следует волна разрежения, которая распространяется со скоростью, превышающей скорость фронта ударной волны. Эта ситуация является следствием того факта, что позади фронта ударной волны частицы обладают положительной скоростью, величина которой выше скорости звука в сжатом твердом теле. Поэтому волна разрежения постепенно настигает ударную волну и экстремальное давление уменьшается. В результате происходит быстрое выполаживание ударной волны в направлении от пункта ее зарождения.

Ниже приводится вывод условий Рэнкина — Гюгио, заимствованный из сводки Штёффлера [14], причем принято, что

при прохождении ударных волн в твердом теле последнее в условиях сжатия проявляет гидродинамическое поведение. В качестве второго допущения принято, что в направлении поперек фронта ударной волны соблюдается принцип сохранения количества движения, массы и энергии.

Рассмотрим плоскую ударную волну, распространяющуюся со скоростью U в твердом теле, которое из состояния покоя разгоняется до скорости слагающих его частиц u , причем его начальная плотность ρ_0 , давление P_0 и внутренняя энергия E_0 возрастают соответственно до величин ρ_1 , P_1 , E_1 . По закону сохранения массы получим

$$\rho_0 U = \rho_1 (U - u). \quad (a)$$

По закону сохранения количества движения получим

$$P_1 - P_0 = \rho_0 U u. \quad (b)$$

Закон сохранения энергии можно выразить в форме

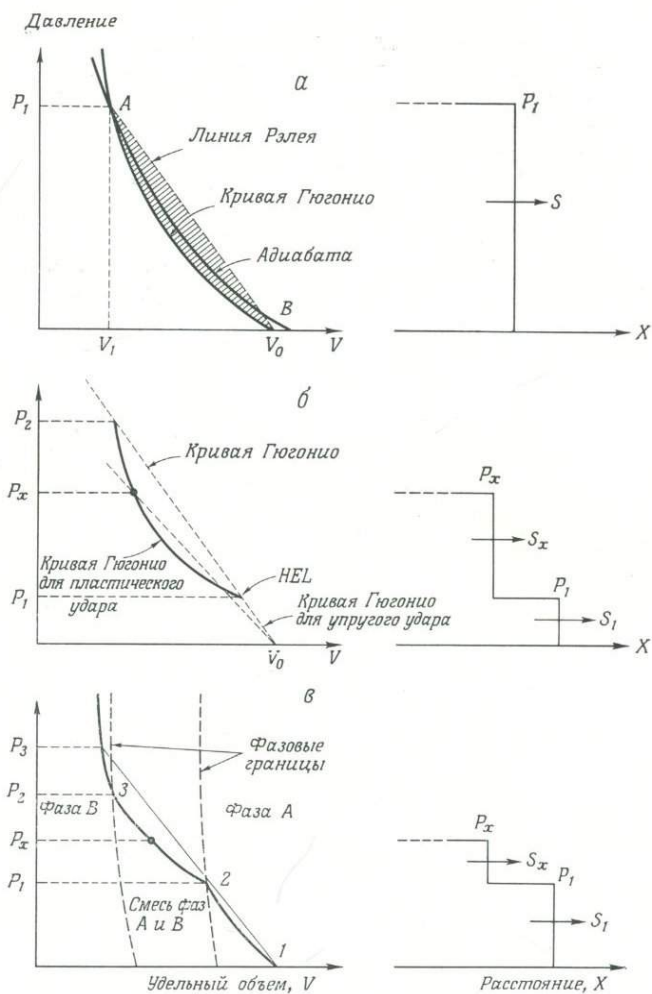
$$P_1 u = \frac{1}{2} \rho_0 U u^2 + \rho_0 U (E_1 - E_0). \quad (c)$$

Исключим величины U и u с помощью комбинирования уравнений (a) и (b):

$$E_1 - E_0 = \frac{1}{2} (P_1 + P_0) (V_0 - V_1), \quad (z)$$

где V — удельный объем $1/\rho$. Это уравнение названо условием Рэнкина — Гюгонно и описывает положение области, где параметры ударного процесса, которые могут возникнуть в твердом теле при прохождении ударных волн, равны P_1 , V_1 , E_1 , если его исходные параметры равны соответственно P_0 , V_0 , E_0 . Для более детального и строгого вывода указанных соотношений необходимо обратиться к работам Дюваля и Фоулса [15] и Мак-Куина и др. [16].

Стадия сжатия при ударе относится к неизоэнтропийным процессам, в то время как адиабатическое расширение вещества мишени, вызванное волной разрежения, является изоэнтропийным процессом. Поэтому распространение ударной волны в материале твердого тела приводит к возрастанию энтропии. Если условие Рэнкина — Гюгонно представлено на диаграмме $P - V$, то результирующую кривую называют «кривой Гюгонно» (фиг. 6). Очевидно, что при ударных явлениях производится определенное количество необратимой работы, а большая ее часть представлена теплом, выделившимся после удара. Таким образом, процессы плавления и испарения, явно происходящие



Фиг. 6. Обобщенные кривые Гюгонио [14].

а. Слева — кривая Гюгонио и адиабата расширения при ударе для состояния А (с параметрами P_1, V_1) в гидродинамических условиях; справа — профиль ударной волны единичного импульса с амплитудой P_1 . б. Слева — кривая Гюгонио, характеризующая твердые тела с динамическим пределом упругости; справа — профиль двух ударных волн с изменением состояния материала; упругая волна с амплитудой P_1 предшествует пластической ударной волне с амплитудой P_x ; S_1 — упругий удар; S_x — пластический удар. в. Слева — кривая Гюгонио, характеризующая твердые тела с экзотермическим фазовым переходом; справа — профиль двух ударных волн с фазовым переходом; первая ударная волна с амплитудой P_1 , вторая ударная волна фазового перехода с амплитудой P_x ; S_1 — пластический удар; S_x — удар, вызванный фазовым переходом.

при ударе в материале мишени, легко объяснить с помощью кривой Гюгонио. Эти изменения состояния вещества мишени описаны в главе, посвященной ударному метаморфизму.

С целью аппроксимации кривых Гюгонио, полученных для многих материалов, используют упрощенное уравнение [16], в которое входит только одна пара переменных: скорость ударной волны (Us) и скорость частицы (Up). Уравнение аппроксимируется линейным, если в него ввести выражение скорости слабых волн (C_0 — гидродинамическая скорость звука) и энтропии (S) в следующей форме:

$$Us = C_0 + SUP. \quad (d)$$

Материалы, свойства которых отклоняются от такой линейной зависимости, обычно содержат крупные полости или обладают высокой пористостью, и в них распространяются только упругие колебания с большой длиной волны, а также происходят фазовые переходы.

Преобладающая часть сильно разогретого материала мишени выбрасывается из кратера и быстро охлаждается. Каварретта и др. [17] предложили уравнение для описания времени, необходимого для охлаждения волокнистых выбросов при ударном процессе:

$$t = \frac{mc_p\alpha}{S\sigma} \left(\frac{1}{T_2^3} - \frac{1}{T_1^3} \right), \quad (e)$$

где m — масса волокна, S — площадь его поверхности, c_p — теплоемкость материала выбросов, α — непрозрачность, σ — постоянная Стефана, T_1 и T_2 — соответственно начальная и конечная температуры.

Распределение энергии. С практической точки зрения явления высокоскоростного удара представляют собой взрывы. Большая часть энергии взрыва расходуется на возмущение и отрыв частиц в таком объеме, который в конечном счете становится объемом образовавшегося кратера. Однако наблюдаются и некоторые иные явления, на которые расходуется существенная часть энергии взрыва.

Разрушение ударяющего тела представляет собой одно из наиболее впечатляющих явлений, которые сопровождают высокоскоростной удар.

В большинстве случаев ударяющее тело разрушается настолько, что сохраняются лишь мелкие обломки сравнительно неизменного материала, представляющие крайне малую долю от общей массы тела. Например, масса метеорита, падение которого вызвало образование Аризонского метеоритного крате-

ра, оценивается примерно в 100—300 тыс. т.¹ никелистого железа, однако масса крупных железных обломков, обнаруженных в самом кратере и на прилегающей равнине, составляет всего несколько десятков тонн [18]. Удивительно, что все-таки сохранились хоть *какие-то* крупные обломки. Эти куски, вероятно, были оторваны от тыловой части метеорного тела ударной волной при столкновении или содраны с поверхности тела непосредственно перед падением на Землю под действием атмосферного давления. Однако многие тысячи тонн метеоритного вещества находят в виде мелких шариков никелистого железа и окислов железа, их диаметр, как правило, равен 0,1—0,3 мм, и распространены они на равнинах, окружающих кратер [19]. Вероятно, эти мельчайшие шарики представляют собой расплавленное, испарившееся при ударе и снова конденсированное вещество метеорита. Минимальную энергию, необходимую для испарения метеорита при ударе, можно было бы вычислить точно, если бы была известна его масса. Энергия испарения ударяющего тела составляет лишь незначительную часть суммарной энергии, выделившейся при ударе, даже в том случае, если оценки размеров тела сильно завышены.

Высокоскоростной удар может сопровождаться яркой вспышкой. Такое явление наблюдалось и во время экспериментальных взрывов; вероятно, оно обусловлено ионизацией газов в момент удара, равно как и появлением выбросов светящегося расплавленного материала на поверхности раздела между мишенью и ударяющим телом. Вспышка протекает в исключительно короткий промежуток времени (как и подразумевается словом «вспышка»).

Количество тепла, выделяющегося при ударе, довольно велико, но его происхождение связано с рядом источников. Мгновенное сжатие приводит к возрастанию температуры мишени и ударяющего тела, однако в действительности лишь незначительная часть выбросов из ударного кратера находится в расплавленном состоянии. По-видимому, материал, выброшенный при крупных земных ударных процессах, в большинстве случаев не нагревается до сколько-нибудь значительного уровня.

Энергетический баланс ударных процессов плохо известен и заслуживает того, чтобы для изучения его был значительно увеличен объем экспериментальных исследований [20]. Истинная картина распределения энергии удара, вероятно, является функцией скорости и массы ударяющего тела, состава и физического состояния мишени и этого тела, их относительной плотности и вязкости, а также зависит от многих иных параметров.

¹ Широкий интервал оценки связан с тем, что скорость тела в момент удара также остается неизвестной величиной.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *MacDonald G. A.*, Volcanoes, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N. J., 510 p., 1972.
2. *Bullard F. M.*, Volcanoes: in history, in theory, in eruption, Univ. of Texas Press, Austin, Tex., 441 p., 1962.
3. *Jaggard T. A.*, Origin and development of craters, Geol. Soc. Am. Mem. 21, 508 p., 1947.
4. *Shoemaker E. M.*, Impact mechanics at Meteor Crater, Arizona, in *The Solar System*, 4, The moon, meteorites and comets; *B. M. Middlehurst, G. P. Kuiper*, eds., Univ. Chicago Press, Chicago, p. 301—336, 1963.
5. *Moore H. J.*, Craters produced by missile impacts, Jour. Geophys. Res., 76, p. 5750—5755, 1971.
6. *Cable A. J.*, Hypervelocity accelerators, in *High-Velocity Impact Phenomena*; *R. Kinslow*, ed., Academic Press, New York, p. 1—21, 1970.
7. *Gault D. E., Quaide W. L., Oberbeck V. R.*, Impact cratering mechanics and structures, in *Shock Metamorphism of Natural Materials*; *B. M. French, N. M. Short*, eds., Mono Book Corp., Baltimore, Md., p. 87—99, 1968.
8. *Gault D. E., Shoemaker E. M., Moore H. J.*, Spray ejected from the lunar surface by meteoroid impact, NASA Pub., TN D-4767, 39 p., 1963.
9. *Gehring J. W., Charters A. C., Warnica R. L.*, Meteoroid impact on the lunar surface, in *The Lunar Surface Layer*; *J. W. Salisbury, P. E. Glaser*, eds., Academic Press, New York, p. 215—264, 1964.
10. *Quaide W. L., Gault D. E., Schmidt R. A.*, Gravitational effects on lunar impact structures, *Annals N. Y. Acad. Sci.*, 123, p. 563—572, 1965.
11. *Stokes G. G.*, On a difficulty in the theory of sound, *Phil. Mag.*, Ser. 3, 33, p. 349—356, 1848.
12. *Rankine W. J. M.*, On the theory of waves of finite disturbance, *Trans. Roy. Soc.*, London, 160, p. 277—288, 1870.
13. *Schall R.*, 1944, cited by *W. Döring, H. Schardin*, Hydro- and Aerodynamics, Fiat review of German Science, 1939—1946, 1948.
14. *Stöffler D.*, Deformation and transformation of rock-forming minerals by natural and experimental shock processes, I, Behavior of minerals under shock compression, *Fortschr. Mineral.*, 49, p. 50—113, 1972.
15. *Duval G. E., Fowles C. R.*, Shock waves, in *High pressure physics and chemistry*; *R. S. Bradley*, ed., Academic Press, New York, 2, p. 209—291, 1963.
16. *McQueen R. G., Marsh S. P., Taylor J. W., Fritz J. N., Carter W. J.*, The equation of state of solids from shock wave studies, in *High Velocity Impact Phenomena*; *R. Kinslow*, ed., Academic Press, New York, p. 293—417, 1970.
17. *Cavarretta G., Coradini A., Funicello R., Fulchignoni M., Taddeucci A., Trigila R.*, Glassy particles in Apollo 14 soil 14163, 88, Peculiarities and genetic considerations, in *Proc. Third Lunar Sci. Conf.*, 1; *E. A. King, Jr.*, ed., *Geochim. et Cosmochim. Acta*, Suppl. 3, MIT Press, Cambridge, Mass., p. 1085—1094, 1972.
18. *Mason B.*, Meteorites, Wiley, New York, 228 p., 1962.
19. *Nininger H. H.*, Condensation globules at Meteor Crater, *Science*, 113, p. 755—756, 1951. Кроне роро, *Baldwin R. B.*, The Measure of the Moon, Univ. of Chicago Press, Chicago, p. 14—16, 1963; *Rinehart J. S.*, A soil survey around the Barringer Crater, *Sky and Telescope*, 16, p. 8, 1957. Кроне роро, *Blau P. J., Axon H. J., Goldstein J. I.*, Investigation of the Canyon Diablo metallic spheroids and their

- relationship to the breakup of the Canyon Diablo Meteorite, *Jour. Geophys. Res.*, 78, p. 363—374, 1973.
20. Pond R. B., Glass C. M., Metallurgical observations and energy partitioning, in *High-Velocity Impact Phenomena*; R. Kinslow, ed., Academic Press, New York, p. 419—461, 1970.

РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА ПО ОБЩИМ ВОПРОСАМ

21. Kinslow R., ed., *High-Velocity Impact Phenomena*, Academic Press, New York, 579 p., 1970.
22. Gault D. E., Quaide W. L., Oberbeck V. R., Impact cratering mechanics and structures, in *Shock Metamorphism of Natural Materials*; B. M. French, N. M. Short, eds., Mono Book Corp., Baltimore, Md., p. 87—99, 1968.
23. Shoemaker E. M., Impact mechanics at Meteor Crater, Arizona, in *The Solar System*, 4, The moon, meteorites and comets; B. M. Middlehurst, G. P. Kuiper, eds., Univ. Chicago Press, Chicago, p. 301—336, 1963.

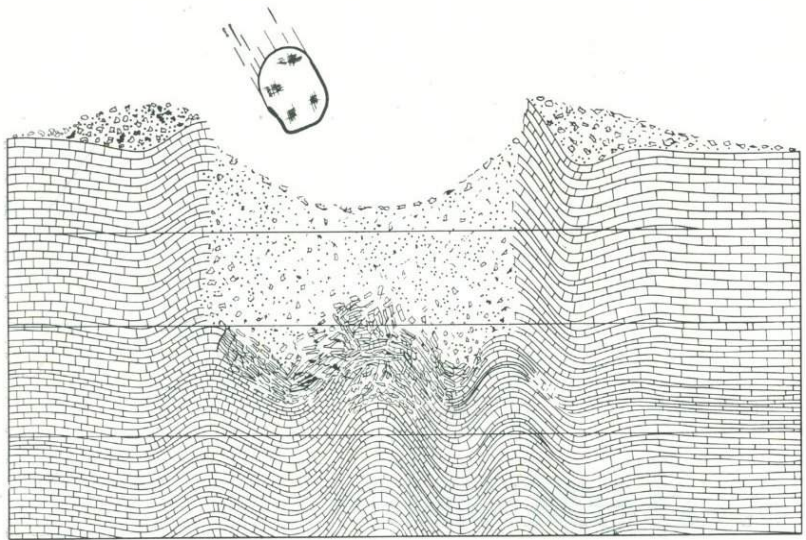
Кинетическая энергия большой массы железа, движущейся с высокой скоростью, внезапно переходит в тепло, при этом значительная часть метеорита, а также участка земной коры испаряется, в результате чего происходит сильнейший газовый взрыв, формирующий кратер....

Л. Дж. Спенсер, 1937 г.

4. Земные ударные кратеры

ВВЕДЕНИЕ

Научная общественность не спешила принимать идею о признании ударных явлений в качестве важных и распространенных геологических процессов на поверхности Земли. Даже в 1953 г. некоторые ученые [1] возражали против ударного происхождения Аризонского метеоритного кратера. Бучер [2], Снайдер и Гердеман [3], Кюрри [4] и другие затратили немало красноречия, чтобы объяснить происхождение подобных специфических структур иными процессами, такими, как «криптовзрывы», однако, если такие взрывы на самом деле и существуют, о них нет никаких сведений. Противоположная аргументация в поддержку ударного происхождения кратеров с анализом ошибок, связанных с выдвиганием «криптовулканических» и «криптовзрывных» гипотез, была убедительно изложена Дицем [5] и Френчем [6]. Задолго до этого некоторые авторы, например Спенсер и Дэли, рассматривали происхождение и крупных структур, и мелких кратеров как результат ударного воздействия метеороидов или астероидов [7, 8, 9]. Два исследователя еще в 1938 г. [8] даже сделали попытку проследить теоретически образование структур, могущих возникнуть в слоистых породах в связи с падением крупного метеорита (фиг. 1).



Фиг. 1. Гипотетический разрез ударного метеоритного кратера в горизонтально залегающих слоистых осадочных породах.

По данным Буна и Олбриттона, 1937 г., перепечатано с разрешения издательства «Саутерн Методист Юниверсити Пресс».

За последние 20 лет число хорошо задокументированных ударных кратеров на поверхности Земли резко увеличилось, причем ежегодно сообщается о новых ударных кратерах. Систематические поиски кратеров в пустынных районах и на древних цитах, проводимые с помощью тщательного анализа аэрофотоснимков, привели к обнаружению десятков новых ударных кратеров, существование которых впоследствии подтвердилось при полевых исследованиях и изучении образцов. Повторные исследования и петрографическое изучение ряда структур, которым приписывали взрывной вулканический генезис, позволили получить доказательства проявления ударного метаморфизма и вскрыли наличие образований, присущих ударным кратерам. В настоящее время число ударных кратеров на поверхности Земли по оценкам разных авторов варьирует от 50 до 120 [6, 10, 11]. В табл. I приведены названия большинства земных кратеров или структур, ударное происхождение которых в настоящее время не вызывает сомнения, хотя однозначные критерии ударного метаморфизма установлены не во всех случаях. Ниже описаны лишь *немногие* примеры ударных кратеров, наиболее типичных по форме, структуре и деформации окружающих пород.

Таблица I Известные и предполагаемые земные ударные кратеры и структуры [76]

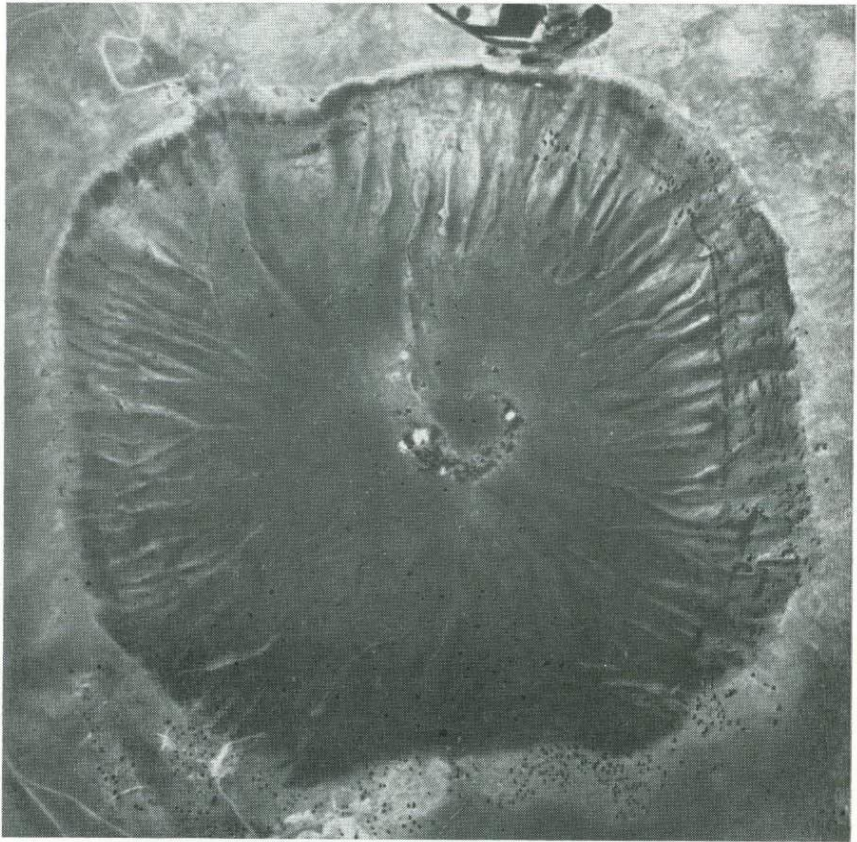
Название	Местонахождение	Диаметр, ¹ км
Аризонский метеоритный кратер, США	35°02' с. ш. 111°01' з. д.	1220 м
Боксхол, Северная территория, Австралия	22°37' ю. ш. 135°12' в. д.	175 м
Босумтви, Гана	06°32' с. ш. 001°23' з. д.	10,5
Брент, Онтарио, Канада	46°05' с. ш. 078°29' з. д.	4
Бабар, Саудовская Аравия	21°30' с. ш. 050°28' в. д.	90 м
Ванапитеи, Онтарио, Канада	46°44' с. ш. 080°44' з. д.	8,5
Вест-Хок, оз., Манитоба, Канада	49°46' с. ш. 095°11' з. д.	2,7
Вредефорт, ЮАР	27°00' ю. ш. 027°30' в. д.	100
Вулф-Крик, Западная Австралия	19°18' ю. ш. 127°47' в. д.	850 м
Госсес-Блафф, Северная территория, Австралия	23°48' ю. ш. 132°18' в. д.	22
Далгаранга, Западная Австралия	27°45' ю. ш. 117°05' в. д.	21 м
Декагурвилл, Миссури, США	37°45' с. ш. 092°43' з. д.	6
Деллен, Швеция	61°50' с. ш. 016°45' в. д.	12
Дип-Бей, Саскачеван, Канада	56°24' с. ш. 102°59' з. д.	9
Каалиярви, Эстония, СССР	58°24' с. ш. 022°40' в. д.	110 м
Кампо-дель-Киело, Аргентина	27°28' ю. ш. 061°30' з. д.	70 м
Карсуалл, Саскачеван, Канада	58°27' с. ш. 109°30' з. д.	30
Кентленд, Индиана, США	40°45' с. ш. 087°24' з. д.	6
Кёфелс, Австрия	47°13' с. ш. 014°58' в. д.	5
Клироутер, оз., восточный кратер, Квебек, Канада	56°05' с. ш. 074°07' з. д.	15
Клироутер, оз., западный кратер, Квебек, Канада	56°13' с. ш. 074°30' з. д.	30
Крукед-Крик, Миссури, США	37°50' с. ш. 091°23' з. д.	5
Лак-Кютюр, Квебек, Канада	60°08' с. ш. 075°18' з. д.	10
Лапшярви, Финляндия	63°10' с. ш. 023°40' в. д.	10
Ливерпуль, Северная территория, Австралия	12°24' ю. ш. 134°03' в. д.	1,6
Маникуаган, Квебек, Канада	51°23' с. ш. 068°42' з. д.	65
Мидлсборо, Кентукки, США	36°37' с. ш. 083°44' з. д.	7
Миен, оз., Швеция	56°25' с. ш. 014°55' в. д.	5
Мистастин, Лабрадор, Канада	55°53' с. ш. 063°18' з. д.	20
Монтурагуи, Чили	23°56' ю. ш. 068°17' з. д.	0,48
Мэнсон, Айова, США	42°35' с. ш. 094°31' з. д.	30

Название	Местонахождение	Диаметр, ¹ км
Николсон, Северо-Западные территории, Канада	62°40' с. ш. 102°41' з. д.	12,5
Нью-Квебек, Квебек, Канада	61°17' с. ш. 073°40' з. д.	3,2
Одесса, шт. Техас, США	31°48' с. ш. 102°30' з. д.	168 м
Пайлот, оз., Северо-Западные территории, Канада	60°17' с. ш. 111°01' з. д.	5
Рис, ФРГ	48°53' с. ш. 010°37' в. д.	24
Рошешуар, Франция	45°50' с. ш. 000°56' в. д.	15
Садбери, Онтарио, Канада	46°36' с. ш. 081°41' з. д.	100
Сент-Мартин, Манитоба, Канада	51°17' с. ш. 098°33' з. д.	24
Серпент-Маунд, Огайо, США	39°02' с. ш. 083°25' з. д.	6,4
Силджан, Швеция	61°05' с. ш. 015°00' в. д.	45
Сихотэ-Алинь, Приморье, СССР	46°07' с. ш. 134°40' в. д.	26,5 м
Стин-Ривер, Альберта, Канада	59°31' с. ш. 117°38' з. д.	25
Стренгуэйс, Северная территория, Австралия	15°12' ю. ш. 133°35' в. д.	16
Сьерра-Мадера, шт. Техас, США	30°36' с. ш. 102°55' з. д.	13
Тенумер, Мавритания	22°55' с. ш. 010°24' з. д.	1,8
Уэлс-Крик, Теннесси, США	36°23' с. ш. 087°40' з. д.	14
Уэллул, Мавритания	20°15' с. ш. 012°41' з. д.	250 м
Флинн-Крик, Теннесси, США	36°16' с. ш. 085°37' з. д.	3,6
Хенбери, Северная территория, Австралия	24°34' ю. ш. 133°10' в. д.	150 м
Холлефорд, Онтарио, Канада	44°28' с. ш. 076°38' з. д.	2
Хэвиленд, Канзас, США	37°37' с. ш. 099°05' з. д.	11
Шарлевой, Квебек, Канада	47°32' с. ш. 070°18' з. д.	35
Штейнхейм, ФРГ	48°02' с. ш. 010°04' в. д.	3

¹ Если в районе найдено несколько кратеров, то указан диаметр наибольшего из них.

АРИЗОНСКИЙ МЕТЕОРИТНЫЙ КРАТЕР

Эта структура относится к самым молодым природным высокоскоростным ударным кратерам, известным на поверхности Земли (фиг. 2), и представляет собой один из наиболее полно изученных объектов. Кратер расположен в северной Аризоне,



Фиг. 2. Аризонский метеоритный кратер, плановый аэрофотоснимок.

Кратер не имеет круглых очертаний, а представляет собой квадрат с закругленными углами, что определяется ранее существовавшей системой трещин во вмещающих осадочных породах. Светлые пятна на дне кратера представляют собой отвалы шахт и шурфов, пройденных для поиска погребенных масс никелистого железа. Поперечник кратера примерно 1220 м, глубина почти 180 м. Предоставлено Университетом штата Аризона.

примерно в 35 км западнее города Уинслоу, южнее междуштатной автострады № 40 и шоссе № 66. В более старых литературных источниках употребляются другие названия этого кратера: Кэньон-Дьябло, Кун-Бютт, Маунд, Кун-Маунтин и Барринджер. Аризонский метеоритный кратер достигает глубины 180 м, а его диаметр составляет приблизительно 1220 м. Он образовался в пологозалегающих пермских и триасовых породах южной части плато Колорадо, причем деформации, обусловленные ударным процессом, вполне очевидны и легко выявляются

при картировании [13]. Однако даже в отношении этого кратера большая доля дискуссии касалась именно его происхождения.

Впервые на этот кратер обратили внимание в 1891 г. Г. Гилберт и М. Бейкер [14], когда они опубликовали свои предварительные наблюдения, связанные с кратером и сопутствующим метеоритным железом. Они пришли к выводу о формировании кратера в связи с падением крупного метеорита. Затем в 1891 и 1892 гг. с целью ознакомиться со значительными концентрациями железных метеоритов район посетил хорошо известный минералог и естествоиспытатель из Филадельфии А. Фут [15]. Он отметил, что значительная масса метеоритного железа обнаруживается вокруг возвышенности, в центре которой находится обширная впадина. Фут безуспешно пытался найти вулканический материал, но в результате не смог объяснить природу «этого удивительного геологического феномена». Несколькими годами позднее Гилберт *изменил* свою точку зрения и стал поддерживать гипотезу о происхождении кратера в результате взрывного действия паров вулканического происхождения [16]. В течение многих лет эта дискуссия почти не снабжалась новыми фактами, до тех пор пока Д. Барринджер с сотрудниками [17] не предприняли попытки изучить возможность промышленного освоения кратера. При этом были получены убедительные доказательства происхождения кратера в результате удара и взрыва крупного железного метеорита. Ударное происхождение кратера еще недавно оспаривалось некоторыми исследователями [1], однако в целом сомнений на этот счет уже не существует.

Необычный характер трещиноватости и метаморфизма в образцах песчаников Коконино в Аризонском метеоритном кратере был описан Мерриллом [18], причем подобные явления многократно наблюдались в других ударных кратерах (см. гл. 5). В Аризонском кратере Чжао с сотрудниками [19] впервые обнаружил природные выделения коэсита и стишовита. Таким образом, Аризонский кратер представляет собой не только отличный пример ударного кратера, но и сыграл значительную роль в развитии современных представлений о механизме удара и структурах, проявленных в ударных образованиях [13].

Аризонский кратер не имеет абсолютно круглой формы, в плане он скорее напоминает квадрат. Шумейкер объясняет такие контуры существованием двух крупных систем сбросов и трещин в подстилающих породах [13]. Вокруг кратера расположен заметный вал, возвышающийся над окружающей равниной на 30—60 м (фиг. 3), кроме того, хорошо сохранились остатки обширного покрова выбросов. Некоторые выбросы до



Фиг. 3. Вид на приподнятый северный кратерный вал Аризонского метеоритного кратера.

Фотография сделана с расстояния 2 км от кратера. Низкое строение, видимое на северо-восточной стороне вала, представляет собой туристский центр и музей.



Фиг. 4. Схематическая диаграмма, показывающая перевернутое залегание слоев в разрезе кратерного вала Аризонского метеоритного кратера.

Подобные структуры наряду с пологими надвигами, антиклинальными поднятиями кратерного вала, вертикальными и слабопрокинутыми слоями пород являются обычными элементами структуры валов хорошо сохранившихся ударных кратеров.

сих пор еще можно закартировать вдали от кратерного вала на расстоянии, равном диаметру кратера (фиг. 2).

Одним из важнейших структурных соотношений, наблюдаемых местами в пределах кратерного вала, является обратное залегание слоев. Таким образом, небольшие участки стратиграфического разреза кратерного вала находятся в запрокинутом залегании (фиг. 4) в виде «перевернутого блина». На дне кратера и в пределах кратерного вала было пробурено немало буровых скважин и пройдено несколько шахт в тщетных попытках обнаружить крупное тело, сложенное никелистым железом; благодаря этому основной геологический разрез кратера вскрыт довольно хорошо. Однако в большинстве случаев при производстве вскрышных работ и бурении скважин документация велась плохо, поэтому немало ценной информации в настоящее время утрачено. Небольшие карьерные выемки в выбросах на южной и юго-западной сторонах кратера вскрыли представительный разрез выбросов вблизи вала кратера.

На первый взгляд строение выбросов кажется хаотичным, но на самом деле они удивительно упорядочены. Среди них выделяют отложения базисной волны, баллистические выбросы и обратные выпадения. Эти выбросы крайне слабо сортированы, содержат много пылевых частиц наряду с глыбами, достигающими 30 м в диаметре. В распределении выбросов легко усматривается обратный порядок слоев пород, в которых образовался кратер. Темно-красные породы формации Моенкопи, которые представляли собой самые верхние слои в стратиграфическом разрезе в момент метеоритного удара, принадлежат к выбросам, наиболее удаленным от кратерного вала. При приближении к кратеру обломочные отложения Моенкопи перекрываются выбросами, состоящими из обломков известняков формации Кайбеб, которые в свою очередь перекрываются выбросами песчаников Коконино в непосредственной близости от кратерного вала. Выбросы содержат много мелких обломков метеоритного тела, однако железо, как правило, полностью окислено. Хотя в большинстве случаев выбросы не несут каких-либо следов удара или метаморфизма, в них содержатся многочисленные обломки расплавленных и частично расплавленных пород, обломки со следами скалывания и с корочками стекла.

Возраст Аризонского метеоритного кратера точно не установлен, но, очевидно, он относится к молодым образованиям. Дно кратера частично выполнено четвертичными и современными отложениями плейсасов и озер, а плейстоценовый делювий закрывает самую нижнюю часть стенок кратера [13]. У местных индейцев существуют предания о возникновении кратера, однако похоже, что они ведут свое происхождение не от очевидцев. Под отложениями выбросов не удалось обнаружить каких-либо

органических остатков, которые могли бы стать отличным материалом для определения возраста радиоуглеродным методом по ^{14}C . Возраст кратера по оценкам варьирует в диапазоне 20 000—40 000 лет.

Интересно отметить, что в Аризонском метеоритном кратере очень редко встречаются конусы разрушения, хотя литологический состав некоторых подстилающих пород, очевидно, весьма благоприятствует их формированию.

Большую дискуссию вызвал вопрос о направлении траектории падения метеорита [13, 20, 21]. Большая часть споров касается симметрии кратера, распределения выбросов и обломков железа, однако имеющиеся факты не дают однозначного ответа. Оценки массы ударяющегося тела, состоящего из никелистого железа, варьируют в пределах от 30 тыс. до более чем 200 тыс. т.

Аризонский метеоритный кратер легко доступен, и за небольшую плату его можно посетить. В северной части кратерного вала расположен частный музей, а для спуска на дно кратера и обхода его по кратерному валу можно воспользоваться тропинками. Мы должны быть обязаны «Барринджер крейтер компани», благодаря деятельности которой наиболее сохранившийся из всех земных ударных кратеров легко доступен как для ученых и студентов, так и для туристов.

КРАТЕРЫ ОДЕССА, ТЕХАС, США

В 1921 г. С. Мак-Кинни нашел кусок железа весом 2,7 кг на гребне, окружающем крупную пологую депрессию близ города Одессы в штате Техас. Впоследствии этот образец был идентифицирован как железный метеорит, а депрессия оказалась крупнейшим из пяти (как минимум) метеоритных кратеров этого района. Наиболее крупный из них (фиг. 5) имеет поперечник 170 м, а его максимальная глубина составляет в настоящее время примерно 5 м [23]. Поперечник следующего по размерам кратера достигает приблизительно 21 м, а остальные кратеры значительно меньше.

В середине 20-х годов геолог из Университета штата Техас Селлардс начал полевые исследования в районе этих кратеров. Селлардс не спешил с признанием метеоритного происхождения кратеров, однако в конечном итоге опубликовал материалы по кратерам и метеоритам, в том числе и структурный геологический разрез главного кратера [24, 25]. Основной целью работ в районе кратеров были обнаружение обломков метеорита



Фиг. 5. Аэрофотоснимок кратера Одесса, выполненный Отто Роучем в 1934 г.

Диаметр кратера, замеренный по его валу, составляет примерно 168 м. Предоставлено Нининджером.

и подготовка экспонатов для выставки в Техасском мемориальном музее в Остине.

Кратеры Одесса посетил Барринджер и сравнил наиболее крупный из них с Аризонским метеоритным кратером [26]. Нининджер впервые побывал на кратерах в 1932 г., а в 1933 г. он провел исследование района кратеров с помощью намагниченного маятника и магнитного плуга и обнаружил более 1000 мелких метеоритных обломков.

Метеорит был описан Меррилом в 1922 г.; оказалось, что он относится к грубозернистым октаэдритам, *очень* похожим на образцы из Аризонского кратера. Впоследствии было установлено, что образцы из обоих кратеров настолько близки по химическому и петрографическому составу, что Нининджер предположил существование связи между двумя метеоритными ударами ¹.

Главный кратер в районе Одессы имеет вал, который возвышается над окружающей равниной в среднем на 2 м, а максимальная его высота больше 3,6 м [23]. Селлардс и Эванс [25] указывают, что первоначальная глубина кратера могла составлять более 25 м от уровня местности. Вмещающие породы представлены полого залегающими меловыми известняками и песчаниками. Однако вокруг кратерного вала залегание пород нарушено, а угол их падения в направлении от кратера достигает 60°. Слои породы из центральной части кратера были вытолкнуты

¹ Позднее Нининджер отказался от этой идеи. С помощью детальных химических анализов были установлены различия в составе этих двух железных метеоритов.

и приподняты таким образом, что образовалась кольцевая антиклиналь. На разрезе, построенном Селлардсом [24], видно, что в пределах одного участка современного кратерного вала кольцевая антиклиналь слегка запрокинута и осложнена взбросом.

Масса железного метеорита, образовавшего главный кратер, оценивается в 315 т [21]. Однако масса обломков, собранных в пределах всей группы кратеров, несравнимо меньше и вряд ли превышает одну тонну.

Эванс продолжал работу на кратерах с перерывами вплоть до 1961 г. [27] и опубликовал ряд новых карт и обзоров, однако по петрографии ударно-метаморфизованных пород и по импактиту было сделано очень мало. Основной кратер Одесса достаточно хорошо обнажен, и несмотря на то, что Селлардсом и Эвансом были пройдены несколько канав и ряд других горных выработок, кратеры Одесса, очевидно, нуждаются в повторных исследованиях в свете современных представлений об ударном метаморфизме и механике кратерообразования.

КРАТЕР ХЭВИЛЕНД, КАНЗАС

Между 1885 и 1900 гг. на ферме вблизи Хэвиленда, Канзас, было собрано много палласитов. В 1925 г. на ферму приехал Нининджер в надежде отыскать пропущенный при поисках образец хорошо известного метеорита Vrenham. Внимание Нининджера привлекла небольшая бессточная впадина (на местном жаргоне «лежбище буйволов»). Эта впадина имела слабо приподнятый кольцевой вал, почти полностью уничтоженный при возделывании пшеницы. После нескольких лет тяжбы с владельцами этих земель Нининджер в 1933 г. получил разрешение провести горные работы на «лежбище буйволов» в кооперации с Музеем естественной истории штата Колорадо. После этого из небольшого метеоритного кратера удалось извлечь многочисленные обломки метеорита, самые крупные из них достигали по весу 40 кг; кроме того, было найдено много окисленных и выветрелых мелких обломков [28]. Наиболее крупные образцы залегают на глубине 3,3 м.

Эта структура не принадлежит к типу взрывных кратеров, подобных Аризонскому или большому кратеру Одесса; скорость метеорита в момент падения была намного меньше. Масса метеорита была достаточно мала, и трение, возникшее при прохождении сквозь атмосферу, привело к существенному уменьшению его скорости. Такие низкоскоростные кратеры называют «воронками проникновения». Рассматриваемая воронка имеет длину 17 м и ширину 11 м.

Многочисленные кратеры описанного типа встречены в районе Кампо-дель-Киело в Аргентине, где с ними связано большое количество крупных глыб никелистого железа [29], при этом лишь некоторые из наиболее крупных кратеров можно считать взрывными или кратерами промежуточного типа.

Падение Сихотэ-Алиньского метеорита 12 февраля 1947 г. [30] на западном склоне одноименного хребта в СССР наблюдалось сотнями очевидцев. Крупный метеорит, состоящий из никелистого железа, разрушился в атмосфере Земли, а его обломки образовали многочисленные воронки диаметром до 26,5 м.

Многочисленные примеры таких мелких ударных кратеров и воронок можно найти в литературе [3, 21].

КАНАДСКИЕ КРАТЕРЫ

В течение последних 20 лет на территории Канады было обнаружено много крупных ударных структур и эродированных кратеров (фиг. 6,7) в основном благодаря программе исследований, проводимых Обсерваторией в Оттаве, а также в ходе работ Департамента энергетических и сырьевых ресурсов. Обоснование ударного происхождения кратера Нью-Квебек (который также называют кратером Чабб или Унгава) в работе Мина в 1950 г. [32] и кратера Brent в работе Миллмана и др. в 1951 г. [33] побудило Билса с коллегами [34] начать систематическое изучение аэрофотоснимков для выявления кольцевых структур, окруженных приподнятыми валами. Основное внимание уделялось древним породам Канадского щита. Многие из обнаруженных структур принадлежат к сравнительно малодоступным объектам, однако в результате осуществления четкой программы геофизической разведки, картирования, бурения и исследования образцов были получены эффективные результаты. Денс и его сотрудники особенно целеустремленно работали над установлением происхождения предполагаемых кратерных структур, проводя многочисленные полевые структурные съемки и изучая образцы из этих районов [35].

Среди канадских кратеров и структур, ударное происхождение которых доказано или предполагается с большой долей вероятности, следует выделить: Нью-Квебек, Brent (фиг. 8), Холлефорд (фиг. 9), Дип-Бэй (фиг. 10 и 11), Карсуэлл, западный и восточный кратеры Клируотер (фиг. 12), Уэст-Хок-Лейк (фиг. 13), Маникуаган (фиг. 7), структура Садбери (фиг. 7), озеро Кутюр (фиг. 14), Пайлот-Лейк и озеро Николсон (фиг. 7, табл. II). Поперечное сечение этих структур варьирует пример-

Таблица II Вероятные метеоритные кратеры и ударные структуры Канады на 1972 г.¹

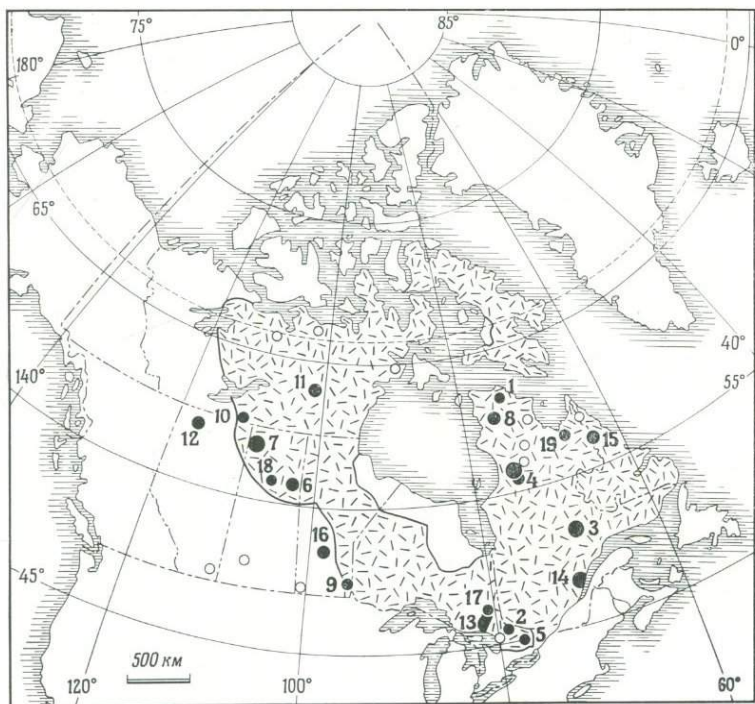
Название	Цифровое обозначение на карте, фиг. 6	Диаметр, км	Возраст, млн. лет	Год открытия структуры
Кратер Нью-Квебек	1	3	< 1	1950
Брент	2	4	450±40	1951
Озеро Маникуаган	3	65	210±4	1954
Озеро Клируотер (западный)	4	25	285±30	1955
Озеро Клируотер (восточный)	4	14,5	285±30	1955
Холлефорд	5	2	550±50	1955
Дип-Бэй	6	9	100±50	1956
Озеро Карсуэлл	7	30	485±50	1960
Озеро Кутюр	8	10	300±150	1959
Уэст-Хок-Лейк	9	3	150±50	1962
Пайлот-Лейк	10	5	300±150	1965
Озеро Николсон	11	12,5	300±150	1965
Стин-Ривер	12	13,5	97±7	1965
Структура Садбери	13	100	1700±200	1966
Озеро Шарлевой	14	35	350±25	1966
Озеро Мистастин	15	20	202±25	1966
Озеро Сент-Мартин	16	24	225±25	1969
Озеро Уанапитеи	17	8,5	300±150	1969
Гоу-Лейк	18	5	150	1972 ²
Лак-Ла-Муанери	19	8	150	1972 ²

¹ Сводка выполнена отделом физики Земли Департамента энергетических и сырьевых ресурсов, Оттава, Канада.

² Установлено Денсом [76] после составления табл. I.

но от 2 км до более чем 65 км, метеоритное происхождение структур устанавливается главным образом по петрографическим критериям и основано на следах проявления ударного метаморфизма в шлифах пород из поверхностных обнажений или керн буровых скважин. Дополнительные доказательства дают результаты обработки данных полевых исследований и геофизической разведки. Многие крупные кольцевые структуры на территории Канады *могут* принадлежать к остаточным формам ударных кратеров, однако определенные доказательства на этот счет отсутствуют.

Древний возраст канадских кратеров создает трудности при распознавании их происхождения. Многие из кратеров в результате длительных геологических процессов заполнились осадками, некоторые были вовлечены в процесс регионального метаморфизма, а большинство существенно изменили свою морфологию под воздействием континентальных ледников. Большинство кратеров не моложе палеозойского или докем-

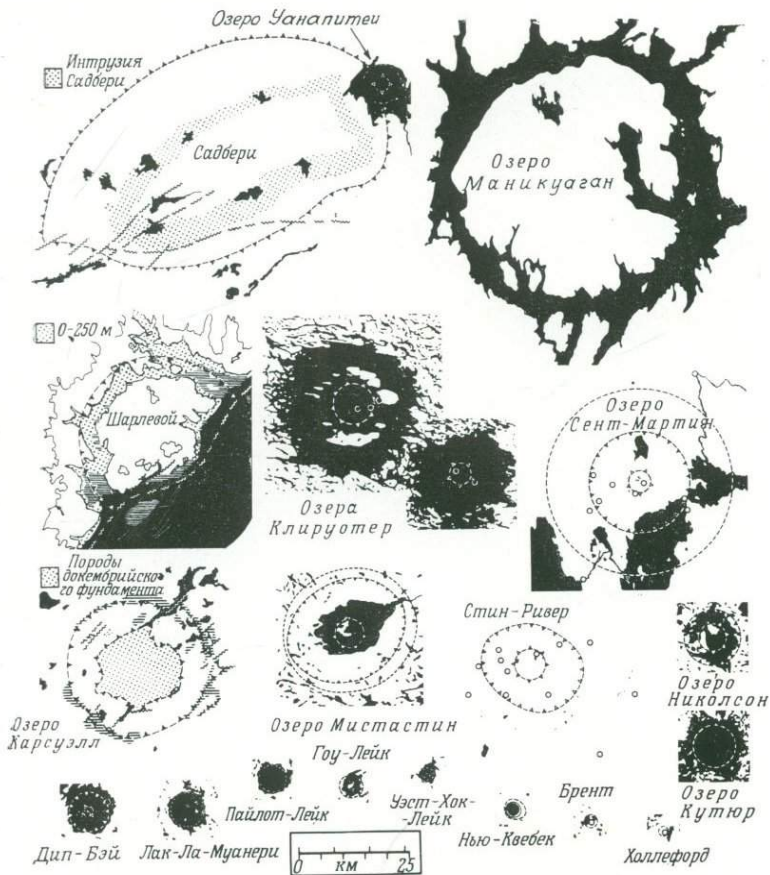


Фиг. 6. Расположение установленных ударных кратеров (черные кружки) и многочисленных предполагаемых ударных структур (светлые кружки) на территории Канады.

Наименования кратеров и их приблизительный возраст показаны в табл. II; на фиг. 7 видны их относительные размеры и приблизительные контуры. Следует отметить высокую плотность кратеров в пределах древнего Канадского щита (штриховой крап). Предоставлено отделом физики Земли Департамента энергетических и сырьевых ресурсов, Оттава, Канада.

брийского возраста. Такие кратеры имеют чересчур древний возраст, чтобы можно было надеяться на находки в них выветренных частиц метеоритного железа или иного метеоритного материала.

Одна из канадских ударных структур, Садбери, Онтарио, заслуживает специального обсуждения не только из-за ее огромных размеров (диаметр первоначального кратера достигает 50 км), но и потому, что с ней связаны богатейшие залежи металлических руд. Начиная с 1883 г., когда это месторождение было открыто, стоимость никеля, железа, меди и других тяжелых металлов, добытых на этом месторождении, составила несколько миллиардов долларов.



Фиг. 7. Относительные размеры и очертания 20 выявленных канадских ударных структур.

Местоположение см. на фиг. 6, дополнительная информация в табл. II. Предоставлено отделом физики Земли Департамента энергетических и сырьевых ресурсов, Оттава, Канада.

Дип [36] впервые предположил, что структура Садбери имеет метеоритное астероидальное ударное происхождение. Эту точку зрения поддержал Брэй [37], который пришел к заключению, что распределение и ориентировка конусов разрушения (гл. 5) в пределах структуры Садбери совместима с ее ударным происхождением¹. Конусы разрушения особенно четко выра-

¹ Брэй не был вполне убежден в том, что структура Садбери имеет ударное происхождение, он считал, что окончательное суждение можно будет вынести лишь после подбора дополнительных доказательств.



Фиг. 8. Ударная структура Brent, Канада.

Обнаружена в 1951 г. Диаметр структуры примерно 4 км. Предоставлено отделом физики Земли Департамента энергетических и сырьевых ресурсов, Оттава, Канада.

жены и имеют крупные размеры в кварцитах формации Миссиссаги к югу и юго-западу от структуры Садбери (гл. 5, фиг. 11) [38].

Ряд петрографических критериев ударного метаморфизма выявлен Френчем [39] при изучении шлифов пород из формации Онапинг (называемой также «Туфы» или «Туфобрекчии Онапинг»). К числу таких критериев относятся проявления сложных ударных плоскостей (стр. 161), иногда с признаками частичной закалки в зернах кварца и полевого шпата, содержащихся в виде включений в обломочных частицах, необычно интенсивная деформация включений гранитов, обломки кристаллических пород со стеклообразной оторочкой, а также ударные стекла. Следует подчеркнуть, что ударные плоскости приурочены, как правило, к таким кристаллографическим направлениям, которые характерны для других ударных структур. Френч пришел к выводу, что формация Онапинг представлена отложениями спекшихся продуктов обратных выпадений после удара, происшедшего 1,7 млрд. лет назад.



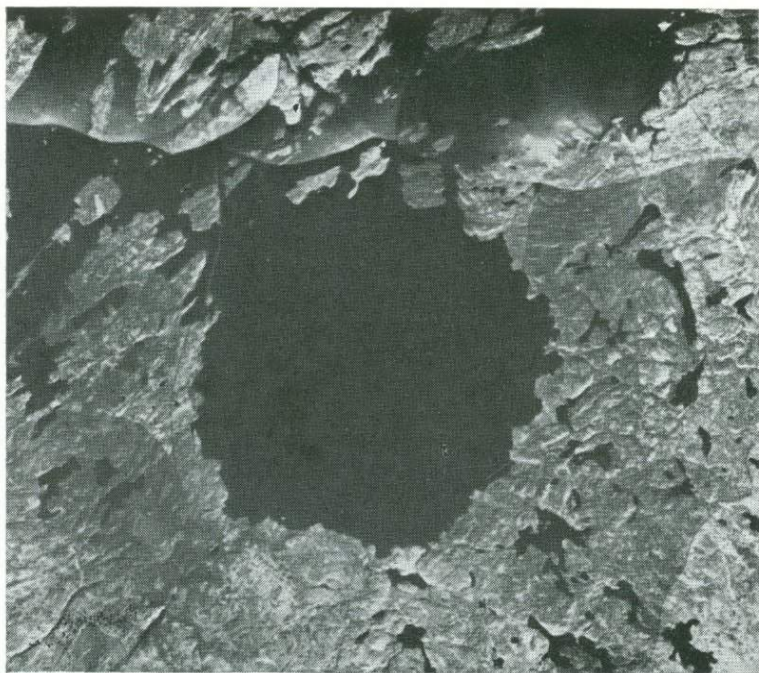
Фиг. 9. Ударная структура Холлефорд, Канада.

Кратер заполнен отложениями более молодых осадочных пород. Предоставлено отделом физики Земли Департамента энергетических и сырьевых ресурсов, Оттава, Канада.



Фиг. 10. Перспективный аэрофотоснимок кратера Дип-Бэй, вид с юга.

Предоставлено отделом физики Земли Департамента энергетических и сырьевых ресурсов, Оттава, Канада.



Фиг. 11. Плановая фотосхема кратера Дип-Бэй, Канада.

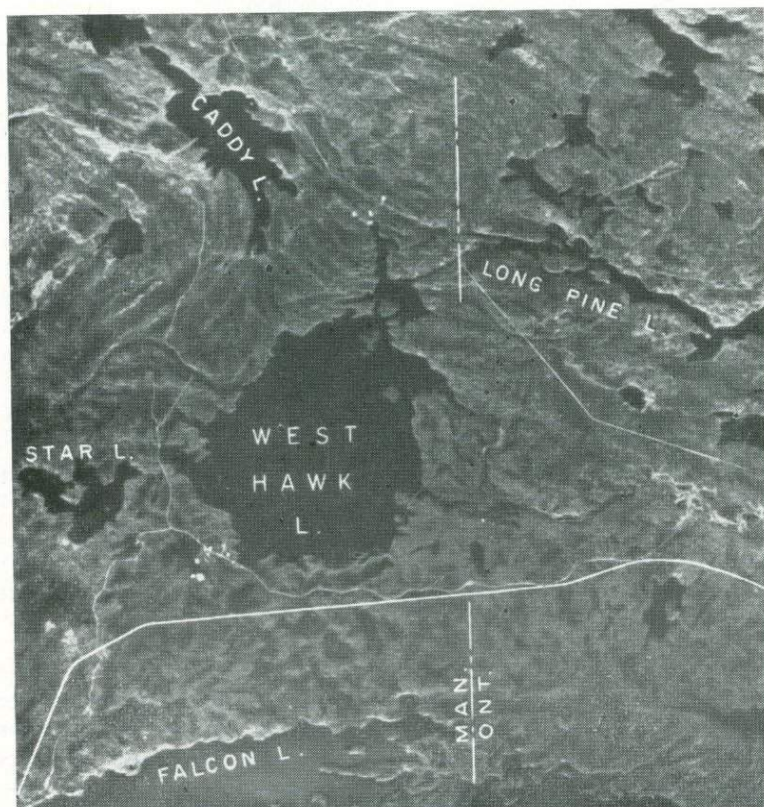
Диаметр структуры примерно 9 км. Резкие границы фототона и освещенности представляют собой края отдельных снимков. Предоставлено отделом физики Земли Департамента энергетических и сырьевых ресурсов, Оттава, Канада.



Фиг. 12. Плановая фотосхема озер Клируотер (Канада).

Возрасты обеих структур совпадают в пределах ошибки определения; кратеры, очевидно, возникли одновременно, вероятно, в результате распада крупного метеоритного тела при переходе предела Роша. Наиболее крупная структура имеет диаметр примерно 25 км. Предоставлено отделом физики Земли Департамента энергетических и сырьевых ресурсов, Оттава, Канада.

Диц высказал предположение о том, что ударяющее тело, сложенное металлами, может служить источником образования рудных месторождений, особенно если учесть, что последние содержат столько же никеля, сколько его находят в железных метеоритах обычных типов. Однако эта гипотеза не находит подтверждения ни в результатах полевых наблюдений, ни при сопоставлении изотопного состава рудных тел и метеоритного вещества. Кроме того, трудно объяснить причину накопления в этих рудах высоких концентраций меди и серы, которые в тех же концентрациях не обнаружены ни в одной из известных разновидностей метеоритов.



Фиг. 13. Плановый аэрофотоснимок ударной структуры Уэст-Хок-Лейк, Канада.

Диаметр этого кратера составляет всего около 3 км. Предоставлено отделом физики Земли Департамента энергетических и сырьевых ресурсов, Оттава, Канада.



Фиг. 14. Ударная структура озера Кутюр, Канада, на плановой фотосхеме.

Диаметр структуры составляет приблизительно 10 км. Предоставлено отделом физики Земли Департамента энергетических и сырьевых ресурсов, Оттава, Канада.

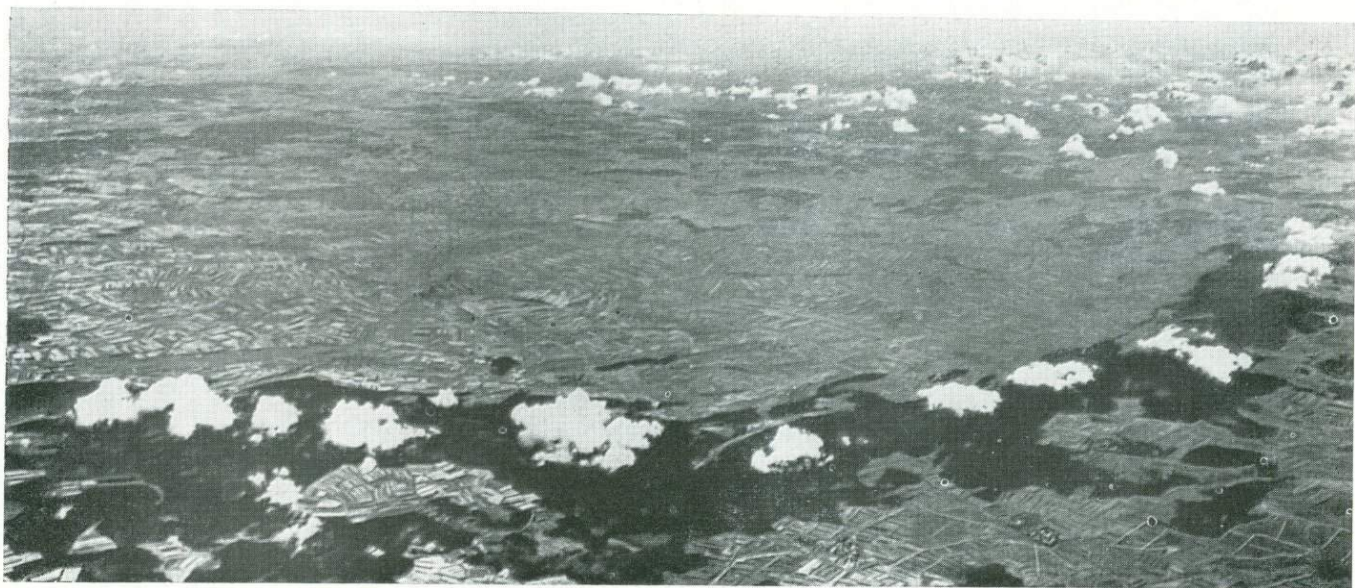
Современная морфология структуры Садбери обусловлена процессами деформации и метаморфизма, последовавшими вслед за ударным событием. Если учесть эти изменения, то первоначальная форма структуры должна была иметь более круглые очертания. По оценке Дица первичный кратер имел примерно круговую форму, его диаметр составлял около 50 км, глубина достигала 3 км, а причиной образования послужил взрыв с энергией около $3 \cdot 10^{29}$ эргов. Такие размеры кратера и такой масштаб события мог быть результатом падения небольшого астероида или кометы.

РИС-КЕССЕЛЬ, БАСЕЙН ШТЕЙНХЕЙМ И КУПОЛ ШТОПФЕНХЕЙМ (ФРГ)

Рис-Кессель (кратер Рис) представляет собой ударную структуру с поперечником 24 км, расположенную в южной части ФРГ (фиг. 15). В пределах структуры находится старинный город Нордлинген. Происхождение кратера традиционно связывали с вулканическим или «криптовзрывным» процессом [40], а аргументы в пользу его ударного происхождения по существу совпадали с теми, которые выдвигались при обсуждении Аризонского метеоритного кратера.

Впервые гипотеза об ударном происхождении структуры Рис была выдвинута Вернером [41] в 1904 г. Его статья открыла длительную дискуссию, продолжавшуюся с 1900 по 1970 г., когда общее число статей по кратеру достигло 100, причем обсуждались вопросы происхождения структуры, связанные с ней «туфы» и т. д. В результате детальных минералого-петрографических исследований в породах из района Рис были обнаружены минералы, образующиеся при высоких давлениях (коэсит и стишовит), и проявления ударного метаморфизма [45]. Эти данные вместе с результатами геофизических исследований [46] после пересмотра геологических взаимоотношений пород в поле не оставили никаких сомнений относительно ударной природы кратера. В породах кратера Рис были обнаружены практически все признаки, указывающие на проявление ударного метаморфизма. Возраст структуры Рис определяется примерно в 15 млн. лет, что, по-видимому, совпадает с возрастом чехословацких тектитов (молдавитов), и это позволило Гентнеру и др. [47] предположить, что кратер Рис является источником молдавитов.

Отложения обратных выпадений хорошо обнажены в карьере Оттинг и во многих других пунктах как внутри кратера, так и за его пределами. Четко выделяются зоны перекристаллизованных и не перекристаллизованных отложений. Такую брекчию называют зювитом. В зювитах содержатся как ударно-метаморфизованные обломки пород (см. гл. 5, фиг. 10), так и стекловидные включения. Многие из подобных включений представляют собой бомбы, скульптурированные при аэродинамическом падении, их называют фладенами (die Fladen по-немецки олады). Зювиты получили общее признание в качестве петрологического термина. Из зювитов сложен собор в Нордлингене, поэтому есть возможность наблюдать прекрасно выявленную струк-



Фиг. 15. Перспективный аэрофотоснимок кратера Рис, ФРГ.

Наибольшее скопление зданий, видимое на снимке,— старинный город Нордлинген. Кратерный вал порос лесами, занимающими возвышенные участки, поэтому хорошо виден на снимке. (С разрешения «Лютбильд Альбрехт Брюлер», Штутгарт, ФРГ.)

туру брекчий. Недостаточно опытный наблюдатель эти зювиты может принять за вулканические туфы, однако при детальном исследовании видно, что структуры этих пород совершенно непохожи на туфы пепловых потоков.

Бассейн Штейнхейм расположен примерно в 30 км юго-западнее кратера Рис, вблизи деревни Хайденхейм, но он представляет собой значительно более мелкую структуру, диаметр его равен всего нескольким километрам. Среди юрских известняков в пределах этой структуры обнаружены многочисленные конусы разрушения и крупные брекчии, возраст кратера, по-видимому, аналогичен возрасту кратера Рис. Доказательства ударного происхождения бассейна Штейнхейм суммированы в работе фон Энгельгардта и др. [48].

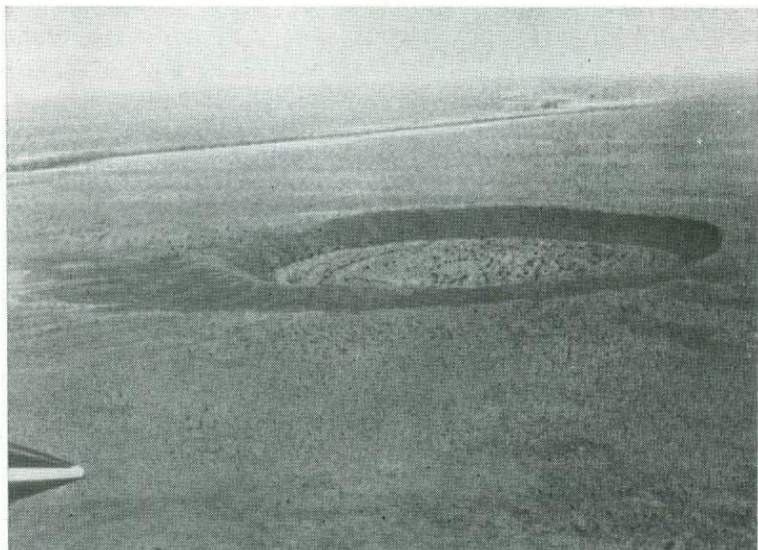
Купол Штопфенхейм — это почти круговая структура, расположенная примерно в 20 км к северо-востоку от кратера Рис. Она представляет собой приподнятый участок, сложенный мезозойскими осадочными породами, нарушенными радиально расположенными разрывными трещинами, и имеет диаметр около 9 км. Происхождение объекта рассматривали как «криптовулканическое» по аналогии с «вулканической» структурой Рис, согласно работе Пикара [49]. Однако эта структура по указанию М. Блоха привлекла внимание Гейдельбергской исследовательской группы. Проведенные исследования привели к выявлению следов ударного метаморфизма в зернах кварца, выделенных из пород купола Штопфенхейм, так что, по всей видимости, структура также относится к ударным образованиям [50].

Все три описанные структуры расположены на одной прямой, по-видимому, одновозрастны, возможно, между ними имеется генетическая связь [50]. Предложена модель, согласно которой все три объекта представляют собой следы одновременного падения крупного тела, расколовшегося на три части при приближении к Земле под воздействием приливных сил. Количественное описание такого механизма предложено Секигути, а также Аггарвалом и Обербеком [51].

АВСТРАЛИЙСКИЕ КРАТЕРЫ

КРАТЕР ВУЛФ-КРИК

Кратер Вулф-Крик (фиг. 16) расположен в одном из удаленных районов Западной Австралии. Он находится примерно в 117 км южнее города Холс-Крик и представляет собой труднодоступный пункт. Кратер обнаружили с самолета еще



Фиг. 16. Кратер Вулф-Крик, Западная Австралия.

Фотография с низко летящего самолета. Отложения покрова выбросов расположены явно асимметрично. Поперечник кратера, измеренный по его валу, составляет примерно 884 м. Предоставлено Тэйлором.

в 1937 г., однако лишь в 1948 г. его посетила австралийская экспедиция и собрала большое количество окисленных обломков метеоритов [52]. Эти обломки особенно часто встречаются в пределах юго-западной части кратерного вала. В 1953 г. до кратера с трудом добрался Кессиди, но его поиски неокисленного метеоритного железа были безуспешными, хотя окисленного материала было собрано более 630 кг [53].

Кратер Вулф-Крик имеет слегка вытянутую форму, его поперечник в направлении с юга на север имеет длину 945 м, а с запада на восток — 838 м. Кратерный вал заметно возвышается над окружающей местностью, примерно на 25—33 м, а по отношению к дну кратера его превышение составляет 55 м [54]. Возраст кратера точно не установлен, но по оценкам он образовался в плейстоцене — голоцене [55]. Вмещающие породы преимущественно представлены кварцитами предположительно докембрийского возраста. На кратерном валу и за его пределами обнаружены многочисленные крупные глыбы и блоки пород из кратера. Совершенно ясно, что Вулф-Крик относится к метеоритным взрывным кратерам. Однако уже в 1965 г. Мак-Колл [56] пришел к выводу, что имеющиеся фактические данные соответ-

ствуют гипотезе «криповулканического» происхождения. Необходимо детальное картирование и петрографическое изучение этого кратера.

КРАТЕР БОКСХОЛ

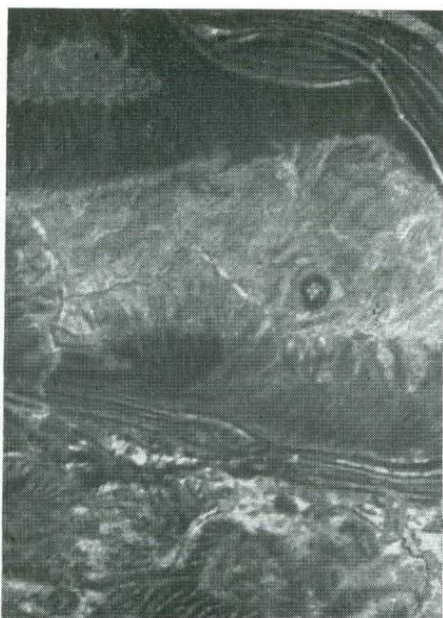
Кратер Боксхол обнаружен в 1937 г. [57], он расположен вблизи Боксхол-Стейшен в Центральной Австралии. В самом кратере и вокруг него найдено много железных метеоритов, в том числе один весом 82 кг, а также выветрелые и окисленные метеоритные обломки. В плане кратер представляет собой правильный круг с диаметром 166 м, измеренным по кратерному валу, последний приподнят над дном кратера на 14 м на северной и на 6 м на южной стороне [54]. Метеориты аналогичны обнаруженным в кратере Хенбери и принадлежат к среднезернистым октаэдритам. Возраст кратера не установлен, ударно-метаморфизованные породы в его пределах также не описаны.

КРАТЕР ДАЛГАРАНГА

В районе Далгаранга-Стейшен (Западная Австралия) в 1923 г. Уиллард обнаружил небольшой кратер, расположенный примерно в 25 км к северо-востоку от горы Далгаранга. Этот кратер вместе с описанием сопутствующих метеоритов упомянут со ссылкой на Уилларда в обзорной работе Симпсона [58], изданной в 1938 г. и посвященной метеоритам Западной Австралии. В 1959 г. на кратере побывали Нининджер и Хасс, которым удалось собрать много мелких обломков метеоритного вещества (самый крупный весит 57 г), а также образцы окисленных метеоритов. Диаметр кратера составляет всего 21 м, а глубина его — примерно 3,2 м [59], что напоминает некоторые из мелких кратеров района Одессы. Во многих мелких образцах метеоритного вещества наблюдаются признаки ударного метаморфизма. Упавшее тело представляло собой либо мезосидерит, либо железный метеорит с многочисленными включениями силикатов и сульфидов. Возраст кратера не определяется, согласно оценкам Нининджера и Хасса, он, по-видимому, образовался 25 000 лет назад.

ГОССЕС-БЛАФФ

Госсес-Блафф представляет собой приподнятую структуру грубо округлой формы, расположенную на равнине Миссионери между горными хребтами Мак-Доннелл и Джеймс, примерно в 160 км к западу от Элис-Спрингс (фиг. 17, 18). По структуре этот объект напоминает слабодиформированный кратер, однако

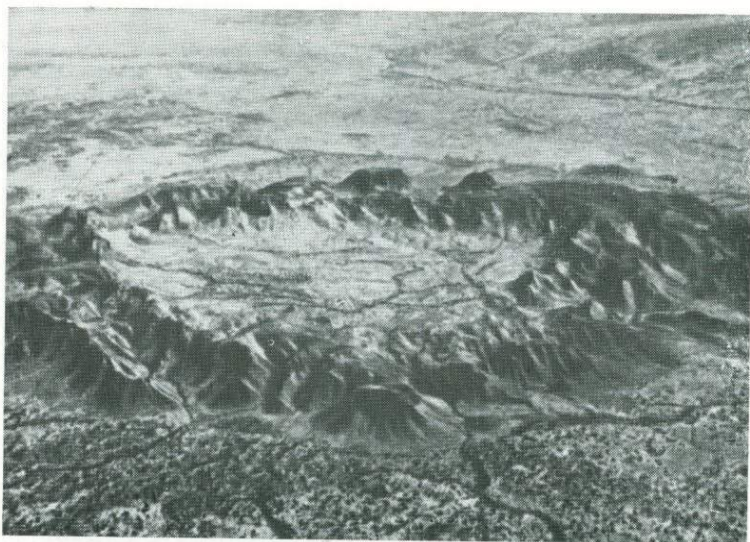


Фиг. 17. Фотография ударной структуры Госсес-Блафф, сделанная при орбитальном полете вокруг Земли экипажем космического корабля «Джемини-V».

Часть фотоснимка НАСА S-65-45 568. Предоставлено НАСА, Центром космических полетов им. Джонсона.

такое впечатление может быть обманчивым и обусловленным литологией пород этого района и сравнительно молодыми эрозийными процессами. Происхождение структуры Госсес-Блафф связывали как с «криповулканизмом», так и с деятельностью «грязевого вулкана», интрузией изверженных пород и соляной диапировой тектоникой [60, 61]. Однако в последнее время ряд ученых пришли к выводу об ударном происхождении этого крупного кратера.

Сводка данных о происхождении структуры Госсес-Блафф и новые данные о результатах бурения и картирования района были опубликованы Куком [62]. Он пришел к выводу, что в настоящее время больше оснований допускать ударное происхождение кратера, а не эндогенное. Приводятся сведения о широко развитых и четко выраженных конусах разрушения, часто встречающемся стекловатом веществе и брекчиях, а также



Фиг. 18. Аэрофотоснимок кольцеобразной центральной возвышенной зоны ударной структуры Госсес-Блафф.

Истинный поперечник первичного кратера был гораздо больше и, вероятно, достигал 20 км. Фотография К. Завартко, предоставлено П. Бреттом.

о проявлениях деформаций и трещиноватости в кварцевых зернах пород, развитых в пределах данной структуры.

Результаты обширных полевых работ, включавших сейсмометрическую и гравиметрическую разведки и петрографическое изучение отобранных образцов, изложены в статье Милтона и др. [63]. Были произведены замеры ориентировки конусов разрушения с целью реконструкции их первичного положения. Авторы этой работы считают, что фокус вершин и осей конусов находится не более чем в 600 м ниже поверхности, существовавшей до падения метеорита, хотя положение этой поверхности по разным стратиграфическим горизонтам определяется неоднозначно. Однако такое положение фокуса могло быть связано с тем, что поверхность фронта распространяющейся ударной волны несколько отличалась от полусферической. Практически все замеры ориентировки конусов разрушения, выполненные цитируемыми авторами, указывают на положение фокуса близ центра структуры.

Милтон и др. описывают ряд образцов расплавленных брекчий и пород с очевидными признаками ударного метаморфизма. Обнаружены многочисленные случаи проявления ударных пло-

скостей в отдельных зернах кварца, ориентированных параллельно $\{10\bar{1}1\}$, $\{0001\}$ и $\{10\bar{1}3\}$. Кроме того, встречаются брекчии, состоящие из ошлакованных при ударном плавлении обломков, чрезвычайно сходных с широкоизвестными зювитами кратера Рис. Подобные брекчии, а также разрез горных пород, в которых различные стадии ударного метаморфизма связаны постепенными переходами, особенно хорошо обнажены на горе Пирокласт, которая имеет высоту 40 м и расположена в 5 км к югу от центра кратера. Эта зювитоподобная брекчия, по-видимому, входит в состав материала обратных выпадений при кратерообразовании.

Вероятно, возвышенная часть описанной структуры представляет собой лишь центральное поднятие гораздо более крупного глубоко эродированного кратера. По оценке Милтона и других, диаметр первичного кратера составлял 20 км. Возраст кратера, измеренный как калий-аргоновым, так и методом треков [63], равен приблизительно 130 млн. лет (самое начало мелового периода).

КРАТЕРЫ ХЕНБЕРИ

Группа не менее чем из 13 кратеров в пределах Северной территории Австралии была обнаружена близ Хенбери в 1931 г. и начала фигурировать в научной литературе начиная с 1932 г., когда впервые были описаны эти кратеры и ассоциирующие с ними железные метеориты [64, 65, 66]. Олдерман [67] изложил результаты первой научной экспедиции на кратеры Хенбери и дал описание кратеров и метеоритов. Более того, он сопоставил эти кратеры с Аризонским метеоритным кратером.

Магнитометрическая разведка 12 кратеров из рассматриваемой группы была осуществлена Рейнером [68], который не обнаружил каких-либо существенных магнитных аномалий, связанных с тем или иным кратером. Рейнер пришел к выводу о происхождении кратеров в результате взрывного ударного явления, поскольку не было найдено признаков существования крупных погребенных масс никелистого железа. Ходж опубликовал обзор всех исследований кратеров Хенбери вплоть до 1965 г. и выполнил хорошо иллюстрированное описание кратеров, включающее ряд аэрофотоснимков с низколетящего самолета (фиг. 19); кроме того, он дал описание ранее неизвестного кратера, связанного с группой Хенбери [69].

В настоящее время эти объекты изучаются главным образом Милтоном [70], который начал полевые работы в 1963 г. Милтон закартировал целый ряд кратеров и обнаружил луч выбросов



Фиг. 19. Аэрофотоснимок наиболее крупного кратера Хенбери, Австралия.

Кратеры пронумерованы согласно идентификация Олдермена в 1932 г. Крупнейший из кратеров этой группы имеет поперечник примерно 154 м, измеренный по кратерному валу. Предоставлено П. Ходжем.

грубо петлевидной формы¹ в связи с одним из мелких кратеров. Одной из наиболее интересных находок была узкая, целиком сохранившаяся стенка между двумя близко расположенными кратерами. Аналогичные наблюдения на поверхности Луны интерпретируются как показатель вулканического (кратер обрушения) происхождения одного или обоих кратеров, поскольку при других вариантах их генезиса узкая перегородка между ними не сохранилась бы.

Средний диаметр крупнейшего из кратеров группы Хенбери составляет около 145 м, и вместе с тремя другими крупными кратерами (наименьший из них с диаметром 70 м) он стал объектом исследований Милтона. Одной из главных целей этой работы является установление таких особенностей строения стенок

¹ Петлевидные лучи давно наблюдались на поверхности Луны, где они ассоциируются с яркими сравнительно молодыми лучевыми кратерами, такими, как Коперник. Однако до работы Милтона такие структуры ни разу не отмечались в связи с земными ударными кратерами.

и вала кратера, которые могут быть присущи исключительно ударным кратерам. После детального картирования стенок и валов кратеров среди типичных структурных форм были выделены тангенциальные складки (слои опрокинуты в направлении от кратера), складки скалывания (образованные при смещениях ориентированных параллельно стенкам кратера), перевернутые складки скольжения, надвиговые чешуи, а также складки различных типов, органиченные сбросами. Многие из этих тектонических форм наблюдались в других ударных кратерах, но никогда еще такие разнообразные морфологические типы не были приурочены к одной структуре.

Многочисленные анализы широко распространенных стекловатых импактитов, ассоциирующихся с наиболее крупными кратерами, выполнены Тэйлором [71], который показал, что по химическому составу они мало отличаются от неизмененных первичных пород в районе кратера.

АРАВИЙСКИЕ КРАТЕРЫ

Кратеры Вабар в Саудовской Аравии были обнаружены Филби [72] в 1932 г., который вел поиски исчезнувшего города Вабар¹. Филби приехал в этот район с целью найти глыбу железа «размером с верблюда». Однако ему удалось найти лишь мелкие кусочки, которые он отправил в Англию для исследования. Происхождение этих кратеров никогда не подвергалось сомнениям. Спенсер [7] быстро подтвердил ударное происхождение этих структур и провел изучение стекловидных импактитов, в изобилии встречающихся в районе. Он пришел к выводу, что крупный кратер Вабар (там, несомненно, есть два, а возможно, и три кратера), достигающий в поперечнике около 100 м, представляет собой взрывной кратер, а не является результатом собственно ударного процесса. Впоследствии Спенсер [73] писал:

«Кинетическая энергия крупной массы железа (никелистого железа), движущейся с высокой скоростью, внезапно переходит в тепло, при этом значительная часть метеоритного тела, а также участка земной коры испаряется, в результате чего происходит сильнейший газовый взрыв, формирующий кратер и разрушающий остатки метеорита. Такой взрывной кратер будет иметь круглые очертания независимо от угла падения ударяющего тела. Материалы, собранные на кратерах Вабар, позволяют получить самые яркие доказательства преобладания крайне высоких температур при формировании кра-

¹ Арабы называют эти кратеры Эль-Хадида, под таким названием они фигурируют в некоторых научных работах.

теров. Песок пустыни был не только расплавлен с образованием кремнеземистых стекол, но доведен до кипения (точка кипения около 3500 °С) и испарения. Метеоритное железо также в основном испарилось, а впоследствии происходила его конденсация в форме мельчайших капелек. В пузырьчатом кремнеземистом стекле сохранились мелкие шарики, сложенные никелистым железом, по составу аналогичные метеоритному веществу. Иногда количество таких шариков достигает примерно двух миллионов в кубическом сантиметре стекла. Для шариков характерна незамутненная и совершенно гладкая (как полированная) поверхность, что позволяет предполагать высокое разрежение земной атмосферы в сфере действия газового взрыва».

Приведенный отрывок представляет собой первое классическое качественное определение основных явлений, связанных с падением на Землю крупного метеорита.

Аравийские кратеры частично перекрыты песчаными наносами (фиг. 20) и плохо обнажены. В действительности вещество мишени и при метеоритном ударе вполне могло быть представлено слабо консолидированным песком. Тем не менее у наиболее



Фиг. 20. Аэрофотоснимок крупнейшего из кратеров Вабар, Саудовская Аравия.

Видны кратерный вал с глыбовой структурой и песчаные наносы, перекрывающие часть кратера. Диаметр кратера составляет примерно 100 м. Предоставлено «Арабиан Америген Ойл Компани».



Фиг. 21. Снимок участка наиболее крупного из кратеров Вабар, Саудовская Аравия.

Виден кратерный вал, сложенный выброшенными глыбами и спекшимися при ударе светлыми песчаниками и имеющий блоковую структуру. Предоставлено В. Барисом.

крупного кратера прослежен вал глыбового строения (фиг. 21), это показывает, что сцементированные породы, залегавшие в нескольких метрах или в десятках метров ниже поверхности, были разрушены и выброшены из кратера или что рыхлые пески подверглись ударной литификации [74].

Как внутри кратера, так и за его пределами встречаются многочисленные мелкие свежие и выветрелые обломки никелистого железа. Наряду с этим недавно был найден свежий металлический обломок весом свыше 2180 кг [75]. Эта находка вполне может быть крупным железным метеоритом, называемым Эль-Хадида, о котором слышал Филби, но ко времени его путешествия метеорит мог быть засыпан движущимися песками. Метеорит относится к среднезернистым октаэдритам, и во многих его осколках при петрографическом изучении обнаруживаются признаки ударных деформаций, как это часто наблюдается в Аризонском метеоритном кратере и других районах падения железных метеоритов.

Несмотря на то что кратеры Вабар расположены в удаленном районе пустыни Руб-эль-Хали (необитаемая площадь), в последние годы их нередко посещают геофизические партии, ведущие поиски нефти. Кратеры представляют собой один из немногочисленных ориентиров данного района.

КРИТЕРИИ РАСПОЗНАВАНИЯ УДАРНЫХ СТРУКТУР

Идентификация очень молодых ударных структур и кратеров не представляет больших трудностей, поскольку с ними связаны обломки метеоритов, однозначно интерпретируемые проявления ударного метаморфизма и взрывных процессов. Однако распознавание древних и сильно деформированных кратеров может быть более трудной задачей. Именно это составляло особую трудность при изучении многих древних кратеров Канадского щита. Наиболее употребительные критерии идентификации кратеров недавно были суммированы в работе Денса (табл. III) [76].

Совершенно очевидно, что многие из земных ударных кратеров до сих пор не распознаны геологами. Несомненно, что в ближайшие десятилетия появится немало новых примеров ударных кратеров, в особенности в районах, где обнажаются древнейшие породы.

Таблица III Критерии распознавания земных ударных кратеров [76]

Критерий	Характеристика	Примеры
1. Присутствие метеоритов	Очень редки; присутствуют в выбросах молодых кратеров	Барринджер, ¹ Хен-бери
2. Круглая форма в плане	Вблизи центра имеют отчетливые круглые очертания	Брент
	По периферии форма изменена под влиянием:	
	а) ранее существовавших структур	
	б) эрозии, слабой и умеренной	Нью-Квебек, Дип-Бэй, Уэст-Хок-Лейк
	Маскируются следующими факторами:	
	а) интенсивная эрозия	Озеро Николсон, Деллен-Лейк
	б) позднейшие наносы	Холлефорд, оз. Сент-Мартин
	в) позднейшие тектонические процессы	Шарлевой, Садбери
3. Строение кратерного вала	Приподнятый вал с опрокинутым залеганием слагающих его пород четко проявлен только в молодых простых кратерах	
	В сложных кратерах вал преобразован в одну из следующих форм:	

Продолжение табл. III

Критерий	Характеристика	Примеры
4. Строение центральной части кратера	1) слабовыраженное поднятие 2) зона нарушений 3) периферический трог	Дип-Бэй Рис Маникуаган
	В простых кратерах — вадина, заполненная брекчией. В сложных кратерах — центральное поднятие либо: 1) одиночная горка 2) кольцевая структура	Барринджер, Брент Штейнхейм Госсес-Блафф, Западный кратер озера Клируотер
5. Гравитационная аномалия	Обычно отрицательная. Иногда увеличивается в результате заполнения кратера осадками Наиболее четко проявлена в кратерах средних размеров. В крупных сложных кратерах маскируется следующими факторами: а) центральным поднятием, сложенным породами с высоким удельным весом б) эрозией в) региональными вариациями гравитации	Дип-Бэй, озеро Уанапитей Западный кратер озера Клируотер Озеро Николсон Карсуэлл, Маникуаган
6. Магнитное поле	Изменчиво, обычно поглощается региональным магнитным полем	Кратеры озера Клируотер, Дип-Бэй, Брент
	Отчетливые аномалии могут наблюдаться над зювитами и скоплениями переплавленных пород	Рис
7. Скорости сейсмических волн	В породах кратеров отмечены более низкие скорости сейсмических волн, чем во вмещающих породах	Дип-Бэй, Брент
	Центральная часть кратеров в стратифицированных породах имеет хаотическую структуру	Госсес-Блафф, Сьерра-Мадера
8. Брекчирование	Наблюдается в образцах, взятых на поверхности и в кернах скважин. Породы кратерного вала в основном представлены мономиктовой брекчией, перекрытой перемешанными выбросами, если они сохранились	Брент, Рис

Продолжение табл. III

Критерий	Характеристика	Примеры
9. Ударный метаморфизм	Внутри кратера перемешанные брекчии переслаиваются со скоплениями переплавленных пород	Западный кратер озера Клируотер, Брент, Уэст-Хок-Лейк
	Вмещающие породы в пределах центрального поднятия пересекаются псевдотахилитами и жилами, сложенными перемешанной брекчией и переплавленными породами	Вредефорт, Маникуаган
9. Ударный метаморфизм	Основной критерий высокоскоростного удара. К проявлениям ударного метаморфизма принадлежат: конусы разрушения, плоскостные элементы в минералах, стекловатое твердое состояние, наличие высокобарных минеральных фаз, сложные процессы плавления с образованием перемешанных брекчий, стекол, резервуаров и покровов переплавленных пород	Барринджер, Рис, Брент, Клируотер, Шарлевой
	Эти признаки обнаруживаются в брекчиях выбросов или в вмещающих породах, подстилающих центральную зону кратера. В пределах кратерного вала не встречены	Маникуаган, Садбери
	Маскируются процессами закалки, гидротермальными изменениями (цеолитизация и т. п.) и наложенным региональным метаморфизмом	

¹ Имеется в виду Аризонский метеоритный кратер. — Прим. перев.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Hager D., Crater Mound (Meteor Crater), Arizona, a Geologic Feature, Bull., Am. Assoc. Petrol. Geol., 37, p. 821—857, 1953.
- Bucher W. H., Cryptoexplosion structures caused from without or from within the earth? («astroblesms» or «geoblesms?»), Am. Jour. Sci., 261, p. 597—649, 1963.

3. *Snyder F. G., Gerdemann P. E.*, Explosive igneous activity along an Illinois-Missouri-Kansas axis, *Am. Jour. Sci.*, **263**, p. 465—493, 1965.
4. *Currie K. L.*, Analogues of lunar craters on the Canadian shield, *Annals, N. Y. Acad. Sci.*, **123**, p. 915—940. См. также *Currie K. L.*, A note on shock metamorphism in the Carswell circular structure, Saskatchewan, Canada, in *Shock Metamorphism of Natural Materials*, *French B. M., Short N. M.*, eds., Mono Book Corp., Baltimore, Md., p. 379—381, 1968.
5. *Dietz R. S.*, Cryptoexplosion structures: a discussion, *Am. Jour. Sci.*, **261**, p. 650—664, 1963.
6. *French B. M.*, Shock metamorphism as a geological process, in *Shock Metamorphism of Natural Materials*, *French B. M., Short N. M.*, eds., Mono Book Corp., Baltimore, Md., p. 1—17, 1968.
7. *Spencer L. J.*, Meteorite craters, *Nature*, **129**, p. 781—784, 1932.
8. *Boon J. D., Albritton C. C., Jr.*, Established and supposed examples of meteoritic craters and structures, *Field and Laboratory*, **6**, No. 2, p. 44—56, 1938. См. также более ранние статьи в журнале *Field and Laboratory*.
9. *Daly R. A.*, The Vredefort ring-structure of South Africa, *Jour. Geol.*, **55**, p. 125—145, 1947.
10. *Short N. M.*, A worldwide inventory of features characteristic of rocks associated with presumed meteorite impact structures, in *Shock Metamorphism of Natural Materials*, *French B. M., Short N. M.*, eds., Mono Book Corp., Baltimore, Md., p. 255—266, 1968.
11. *Freeberg J. H.*, Terrestrial impact structures — a bibliography, *U. S. Geol. Survey, Bull.* 1220, 91 p., 1966; кроме того, *Terrestrial impact structures — a bibliography 1965—1968*, *U.S. Geol. Survey, Bull.* 1320, 39 p., 1969.
12. *McKee E. D.*, Stratigraphy and history of the Moenkopi Formation of Triassic Age, *Geol. Soc. Am., Memoir* 61, 133 p., 1954. См. также более ранние статьи этого автора.
13. *Shoemaker E. M.*, Impact mechanics at Meteor Crater, Arizona, in *The Solar System, IV, The Moon, Meteorites and Comets*, *Middlehurst B. M., Kuiper G. P.*, eds., The Univ. of Chicago Press, Chicago, p. 301—336, 1963.
14. *Gilbert G. K., Baker M.*, A meteoric crater, *Astron. Soc. Pacific Pub.*, **4**, No. 21, p. 37, 1891.
15. *Foote A. E.*, Geologic Features of the Meteoritic locality in Arizona, *Acad. Nat. Sci. Phila., Proc.*, **43**, p. 407, 1891; кроме того, *Foote A. E.*, A new locality for meteoritic iron with a preliminary notice of the discovery of diamonds in the iron, *Proc. Am. Assoc. Adv. Sci.*, **40**, p. 279—283, 1892.
16. *Gilbert G. K.*, Presidential Address, *Geol. Soc. Wash.*, March, 1896, см. также *Science, N. S.*, **3**, p. 1—13, 1896.
17. *Barringer D. M.*, Coon Mountain and its Crater, *Acad. Nat. Sci. Phila., Proc.*, **57**, p. 861—886, 1905; см. также более поздние статьи, например: *Barringer D. M.*, Exploration at Meteor Crater, *Eng. Mining Jour. Press*, **121**, No. 2, p. 59, No. 11, p. 450—451, 1926.
18. *Merrill G. P.*, On a peculiar form of metamorphism in siliceous sandstone, *Proc. U.S. Natl. Mus.*, **32**, p. 547—551, 1907.
19. *Chao E. C. T., Shoemaker E. M., Madsen B. M.*, First natural occurrence of coesite, *Science*, **132**, p. 220, 1960. Кроме того, *Chao E. C. T., Fahey J. J., Littler J., Milton D. J.*, Stishovite, SiO₂, a very high pressure mineral from Meteor Crater, Arizona, *Jour. Geophys. Res.*, **67**, p. 419—421, 1962.
20. *Rinehart J. S.*, A soil survey around the Barringer Crater, *Sky and Teles.*, **16**, No. 8, p. 366—369, 1957.
21. *Baldwin R. B.*, The measure of the Moon, *Univ. of Chicago Press, Chicago*, 488 p., 1963.

22. *Bjork R. L.*, Analysis of the formation of Meteor Crater, Arizona, a preliminary report, Jour. Geophys. Res., **66**, p. 3379—3387, 1961.
23. *Monnig O. E.*, *Brown R.*, The Odessa, Texas Meteorite Crater, Pop. Astron., **43**, p. 34—37, 1935.
24. *Sellards E. H.*, *Evans G.*, Statement of progress of investigation at Odessa Meteor Craters, Univ. of Texas, Bur. Eco. Geol., Sept. 1, 1941, 12 p., 1941.
25. *Sellards E. H.*, *Evans G.*, Odessa Meteor Craters, views in Texas Memorial Museum, Mus. Notes, **6**, p. 13, July, 1944.
26. *Barringer D. M., Jr.*, A new meteor crater, Acad. Nat. Sci. Phila., Proc., **80**, p. 307—311, 1928.
27. *Evans G. L.*, Investigations at the Odessa meteor craters, in Proc. Geophys. Lab./Lawrence Rad. Lab. Cratering Symp., Wash., D. C., March, 1961; Univ. Cal., Livermore, Rad. Lab. Rept. UCRL-6438, pt. 1, paper D, 11 p. (Rept. for AEC).
28. *Nininger H. H.*, *Figgins J. D.*, The excavation of a meteorite crater near Haviland, Kansas, Am. Jour. Sci., **28**, p. 312—313, abstract, 1934. См. также Proceedings of the Colorado Museum of Natural History, **7**, No. 3; **12**, p. 13—14.
29. *Spencer L. J.*, Meteorite craters as topographical features of the Earth's surface, Geog. Jour., **81**, p. 227—248, 1933. Детальное исследование этих кратеров приведено в статье: *Renard M. L.*, *Cassidy W. A.*, Entry trajectory and orbital calculations for the Crater 9 meteorite, Campo del Cielo, Argentina, Jour. Geophys. Lab./Lawrence Rad. Lab. Cratering Symp., Wash., D.C., March, 1961, 1971.
30. *Krinov E. L.*, Tunguska and Sikhote-Alin meteorites, in The Solar System IV, The Moon, Meteorites and Comets, *Middlehurst B. M.*, *Kuiper G. P.*, eds., Univ. of Chicago Press, Chicago, p. 208—234, 1963.
31. *Krinov E. L.*, Meteorite craters on the Earth's surface, in The Solar System IV, The Moon, Meteorites and Comets, *Middlehurst B. M.*, *Kuiper G. P.*, eds., Univ. of Chicago Press, Chicago, p. 183—207, 1963.
32. *Meen V. B.*, Chubb Crater, Ungava, Quebec, Jour. Roy. Astron. Soc. Canada, **44**, p. 169—180, 1950.
33. *Millman P. M.*, *Liberty B. A.*, *Clark J. F.*, *Willmore P. L.*, *Innes M. J. S.*, The Brent Crater, Pub. Dominion Obs., **24**, No. 1, p. 1—43, 1960.
34. *Beals C. S.*, *Innes M. J. S.*, *Rottenberg J. A.*, Fossil meteorite crater in The Solar System IV, The Moon, Meteorites and Comets, *Middlehurst B. M.*, *Kuiper G. P.*, eds., Univ. of Chicago Press, Chicago, p. 235—284, 1963.
35. *Dence M. R.*, The extraterrestrial origin of Canadian craters, Ann. New York Acad. Sci., **123**, p. 941—969, 1965 (перепечатано в Dominion Obs., Contributions, **6**, No. 11). Кроме того, *Dence M. R.*, *Innes M. J. S.*, *Robertson P. B.*, Recent geological and geophysical studies of Canadian craters, in Shock Metamorphism of Natural Materials, *French B. M.*, *Short N. M.*, eds., Mono Book Corp., Baltimore, Md., p. 339—362, 1968 и другие многочисленные статьи.
36. *Dietz R. S.*, Sudbury structure as an astrobleme, Am. Geophys. Union, Trans., **43**, No. 4, p. 445—446, abstract, 1962; кроме того, *Dietz R. S.*, Sudbury structure as an astrobleme, Jour. Geol., **72**, No. 4, p. 412—434, 1964.
37. *Bray J. G.* and geological staff, Shatter cones at Sudbury, Jour. Geol., **74**, No. 2, p. 243—245, 1966.
38. *Dietz R. S.*, *Butler L. W.*, Shatter-cone orientation at Sudbury, Canada, Nature, **204**, No. 4955, p. 280—281, 1964. Кроме того, *Dietz R. S.*, Shatter cones in cryptoexplosion structures, in Shock Metamorphism of Natural Materials, *French B. M.*, *Short N. M.*, eds., Mono Book Corp., Baltimore, Md., p. 267—285, 1968.

39. *French B. M.*, Sudbury structure, Ontario — some petrographic evidence for origin by meteorite impact, *Science*, 156, No. 3778, p. 1094—1098, 1967; несколько более расширенный вариант этой статьи опубликован в NASA, Goddard Space Flight Center, Pub. X-641-67-67, February, 1967, 56 p., 1967.
40. *Gümbel C. W.*, Über den Riesvulkan und über vulkanisch Erhscheinungen im Riesessel, *Akad. Wiss. München Sitzungsber.*, Abt. 1, p. 153—200, 1870.
41. *Werner E.*, Das Ries in der schwäbisch-fränkischen Alb, *Blätter der Schwab.*, Albvereins, 16, p. 153—167, 1904.
42. *Kranz W.*, Vulkanexplosionen, Sprengtechnik, praktische Geologie und Ballistik, *Deutsche Geol. Gesell. Zeitschr.*, 80, p. 257—307, 1928. См. также другие работы этого автора, опубликованные с 1911 по 1952 гг.
43. *Ahrens W.*, Die Tuffe des Nördlinger Rieses und ihre Bedeutung für das Gesamtproblem, *Deutsche Geol. Gesell. Zeitschr.*, 81, p. 94—99, 1929.
44. *Seeman R.*, Versuch einer vorwiegend tektonischem Erklärung des Nördlinger Rieses, *Neues Jahrb. Mineral. Geol. and Paläo.*, Beilage-Bank 81, Abt. B, No. 1, p. 70—166, No. 2, p. 169—214, 1939.
45. *Shoemaker E. M.*, *Chao E. C. T.*, New evidence for the impact origin of the Ries basin, Bavaria, Germany, *Jour. Geophys. Res.*, 66, p. 3371—3378, 1961; кроме того, *Engelhardt W. V.*, *Stöffler D.*, Stages of shock metamorphism in crystalline rocks of the Ries Basin, Germany, in *Shock Metamorphism of Natural Materials*, *French B. M.*, *Short N. M.*, eds., Mono Book Corp., Baltimore, Md., p. 159—168, 1968 и другие многочисленные статьи фон Энгельгардта, его учеников и коллег из Тюбингенского университета.
46. *Kahle H.-G.*, Abschätzung der Störungsmasse in Nördlinger Ries, *Zeitschr. für Geophys.*, Band 35, p. 317—345, 1969, кроме того, Deutung der Schwereanomalien in Nördlinger Ries, *Zeitschr. für Geophys.*, Band 36, p. 601—606, 1970 и более ранние статьи Юнга и др.
47. *Gentner W.*, *Lippolt H. J.*, *Schaeffer O. A.*, Argonbestimmung am Kaliummineralien, XI — Die Kalium—Argon—Alter des Gläser der Nördlinger Rieses und der böhmisch-mährischen Tektite, *Geochim. et Cosmochim. Acta*, 27, No. 2, p. 191—200, 1963.
48. *Engelhardt W. V.*, *Bertsch W.*, *Stöffler D.*, *Groschopf P.*, *Reiff W.*, Anzeichen für den meteoritischen Ursprung des Beckens von Steinheim, *Naturwissenschaften*, 54, No. 8, p. 198—199, 1967. См. также *Groschopf P.*, *Reiff W.*, Ergebnisse neuerer Untersuchungen in Steinheimer Becken, *Ver. Vaterländ. Naturkunde Württemberg Jahreshfte*, 121, p. 155—168, 1966.
49. *Picard L.*, Die Frankische Alb von Weissenburg i.B. und Umgebung, Dissertation, Univ. of Freiburg, Germany, 1923.
50. *Storzer D.*, *Gentner W.*, *Steinbrunn F.*, Stopfenheim Kuppel, Ries Kessel and Steinheim Basin, A triplet cratering event, *Earth Planet. Sci. Letters*, 13, No. 1, p. 76—78, 1971.
51. *Sekiguchi N.*, On the fission of a solid body under the influence of tidal forces; with application to the problem of twin craters on the moon, *The Moon*, 1, p. 429—439, 1970; *Aggarwal H. A.*, *Oberbeck V. R.*, Roche limit of a solid body, *Astrophys. Jour.*, 191, p. 577—588, 1974.
52. *Reeves F.*, *Chalmers R. O.*, Wolf Creek crater, *Austral. Jour. Sci.*, 11, p. 154—156, 1949.
53. *Cassidy W. A.*, The Wolf Creek, Western Australia, meteorite crater (CN—1278,192), *Meteoritics*, 1, No. 2, p. 197—199, 1954.
54. *Cassidy W. A.*, Descriptions and topographic maps of the Wolf Creek and Boxhole Craters, Australia, in *Shock Metamorphism of Natural Materials*, *French B. M.*, *Short N. M.*, eds., Mono Book Corp., Baltimore, Md., p. 623, abstract, 1968.

55. *Guppy D. J., Matheson R. S.*, Wolf Creek meteorite crater, Western Australia, *Jour. Geol.*, **58**, p. 30—36, 1950.
56. *McCall G. J. H.*, Possible meteorite craters — Wolf Creek, Australia, *Annals, New York Acad. Sci.*, **123**, art. 2, p. 970—998, 1965.
57. *Madigan C. T.*, The Boxhole crater and the Huckitta meteorite (central Australia), *Roy. Soc. South Austral., Trans. and Proc.*, **61**, p. 187—190, 1937. См. также *Modigan C. T.*, The Bohxole meteoritic iron, central Australia, *Min. Mag.*, **25**, No. 168, p. 481—486, 1940.
58. *Simpson E. S.*, Some new and little-known meteorites found in Western Australia, *Min. Mag.*, **25**, No. 163, p. 157—171, 1938.
59. *Nininger H. H., Huss G. I.*, The unique meteorite crater at Dalgarranga, Western Australia, *Min. Mag.*, **32**, No. 251, p. 619—639, 1960.
60. *McNaughton D. A., Quinlan T., Hopkins R. M., Wells A. T.*, Evolution of salt anticlines and salt in the Amadeus Basin, Central Australia, *Geol. Soc. Am. Spec. Paper* 88, p. 229—247, 1968.
61. *Ranneft T. S. M.*, Gosses Bluff, Central Australia, as fossil mud volcano, *Am. Assoc. Petrol. Geol., Bull.*, **54**, p. 417—427, 1970.
62. *Cook P. J.*, The Gosses Bluff cryptoexplosion structure, *Jour. Geol.*, **76**, No. 2, p. 123—139, 1968.
63. *Milton D. J., Barlow B. C., Brett R., Brown A. R., Glikson A. Y., Manwaring E. A., Moss F. J., Sedmik E. C. E., Van Son J., Young G. A.*, Gosses Bluff impact structure, Australia, *Science*, **175**, p. 1199—1207, 1972.
64. *Alderman A. R.*, The Henbury (central Australia) meteoritic iron, *South Austral. Mus. Res.*, **4**, No. 4, p. 555—563, 1932.
65. *Spencer L. J.*, Meteoric iron and silica-glass from the meteorite craters of Henbury (Central Australia) and Wabar (Arabia), with chemical analysis by M. H. Hey, *Mineralog., Mag.*, **23**, No. 142, p. 387—404, 1932.
66. *Bartrum C. O.*, The meteorite craters at Henbury, central Australia, *Brit. Astron. Assoc. Jour.*, **41**, No. 4, p. 263—264, 1932.
67. *Alderman A. R.*, The meteorite craters at Henbury, central Australia, with addendum by L. J. Spencer, *Mineralog. Mag.*, **23**, No. 136, p. 19—32, 1932.
68. *Rayner J. M.*, Examination of the Henbury meteorite craters by the methods of applied geophysics, *Austral. and New Zeal. Assoc. Adv. Sci., Rept.*, **24**, p. 72—78, 1939.
69. *Hodge P. W.*, The Henbury Meteorite Craters, *Smithsonian Contr. to Astrophysics*, **8**, No. 8, p. 199—202, 1965. См. также *Hodge P. W., Wright F. W.*, Meteoritic particles in the soil surrounding the Henbury Meteorite Craters, *Jour. Geophys. Res.*, **76**, No. 17, p. 3880—3895, 1971.
70. *Milton D. J.*, Structural geology of the Henbury meteorite craters, Northern Territory, Australia, *U.S. Geol. Survey, Prof. Paper* 599-C, p. C1-C17, 1968. См. также *Milton D. J., Michel F. C.*, Structure of a ray crater at Henbury, Northern Territory, Australia, *U.S. Geol. Survey, Prof. Paper* 525-C, p. C5-C11, 1965.
71. *Taylor S. R.*, Australites, Henbury impact glass and subgreywacke — a comparison of the abundances of 51 elements, *Geochim. et Cosmochim. Acta*, **30**, No. 11, p. 1121—1136, 1966; см. также *Taylor S. R.*, Composition of meteorite impact glass across the Henbury strewnfield, *Geochim. et Cosmochim. Acta*, **31**, No. 6, p. 961—968, 1967.
72. *Philby H. St. J.*, Wabar craters, *Nature*, **129**, p. 932, 1932.
73. *Spencer L. J.*, Meteorites and the craters on the Moon, *Nature*, **139**, p. 655—657, 1937.
74. *Short N. M.*, Shock-lithification of unconsolidated rock materials, *Science*, **154**, No. 3748, p. 382—384, 1966. См. также обложку этого выпуска журнала.

75. *Abercrombie T. J.*, Saudi Arabia, beyond the sands of Mecca, *Natl. Geog.*, **129**, No. 1, p. 1—53, 1966; см. фотографию на стр. 35.
76. *Dence M. R.*, The nature and significance of terrestrial impact structures. *Proc. 24th Internat. Geol. Cong., Montreal, Sec. 15*, p. 77—89, 1972.

РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА ПО ОБЩИМ ВОПРОСАМ

77. *Krinov E. L.*, Meteorite craters on the Earth's surface, in *The Solar System*, *Middlehurst B. M., Kuiper G. P.*, eds., IV, *The Moon, Meteorites and Comets*, Univ. of Chicago Press, Chicago, p. 183—207, 1963.
78. *Baldwin R. B.*, Modern terrestrial meteoritic craters, in *The Measure of the Moon*, Univ. of Chicago Press, Chicago, Chaps. 2, 3 and 4, p. 6—105, 1963.
79. *Dence M. R.*, The nature and significance of terrestrial impact structures *Proc. 24th Internat. Geol. Cong., Montreal, Sec. 15*, p. 77—89, 1972

Природный ударный метаморфизм происходит при почти мгновенном переносе кинетической энергии метеорита во вмещающие породы интенсивными ударными волнами. Такой процесс совсем не похож на обычный геологический метаморфизм, причем для его познания необходимо мыслить категориями не миллионов лет, а микросекунд.

Б. Френч, 1966 г.

5. Ударный метаморфизм

ВВЕДЕНИЕ

Высокоскоростные удары при падении крупных метеоритов, астероидов и комет обычно обуславливают существенные метаморфические изменения как пород, ранее находившихся в объеме, занимаемом образовавшимся кратером, так и окружающих пород. Эти явления впервые были обнаружены Мерриллом [1] в 1907 г., который тщательно описал проявления необычного метаморфизма в породах Аризонского метеоритного кратера. Исследования многих геологов на протяжении последних 20 лет были направлены на изучение воздействия ударных волн на породы и минералы. Главной целью этих работ было установление минералогических, петрологических и полевых критериев распознавания ударных кратеров, ударно-метаморфизованных пород и древних ударных кратеров на поверхности Земли.

Программа «Аполлон» послужила сильнейшим стимулом для координации этих мало связанных между собой исследований. Оказалось общепризнанным, что некоторая, возможно очень существенная, часть лунных образцов представлена ударно-метаморфизованными породами. Такие метаморфические изменения могут создать определенные трудности при проведении обычных петрографических, минералогических и геохимических наблюдений и при их интерпретации, поскольку история разви-

тия и геологические процессы на Луне оказываются замаскированными. После того как президент США объявил, что высадка на Луне и доставка с нее образцов к 1970 г. составляют национальную цель, исследования в рассматриваемой области стали проводиться с особой энергией, и в течение короткого промежутка времени практически в совершенно новой области был получен большой объем важных данных [2]. Постепенно для идентификации ударного метаморфизма удалось выявить ряд в той или иной степени достоверных критериев.

МИНЕРАЛОГИЧЕСКИЕ И ПЕТРОГРАФИЧЕСКИЕ КРИТЕРИИ

Наиболее полезными минералого-петрографическими критериями ударного метаморфизма могут служить те из них, которые применимы к обычным типам горных пород и обычным породообразующим минералам. Ниже перечислены петрографические индикаторы ударных процессов, которые легче всего обнаружить в наиболее сильно ударно-метаморфизованных горных породах.

КОЭСИТ

Козсит представляет собой плотную полиморфную модификацию кремнезема, образующуюся при высоких давлениях, которая впервые была синтезирована Коэсом в 1953 г. [3]. Эта фаза не была известна в природных условиях. Нининджер первым предположил, что если коэсит и встречается где-либо на поверхности Земли, то его можно обнаружить в Аризонском метеоритном кратере [4], поскольку при метеоритном ударе в окружающих породах, богатых кремнеземом, возникают высокие давления. В 1960 г. при изучении образцов ударно-метаморфизованных песчаников Коконино из Аризонского кратера Чжао с сотрудниками [5] впервые обнаружили природный коэсит. Впоследствии коэсит был обнаружен в других ударных кратерах, таких, как Рис и кратеры Вабар. Ударные кратеры до сих пор остаются единственными природными местами находок коэсита.

Козсит обычно развивается в виде мелких зерен в других фазах кремнезема, входящих в состав ударно-метаморфизованных пород (фиг. 1). При нагревании в течение короткого про-



Фиг. 1. Коэсит в виде волокнистых и гроздевидных выделений по трещинкам в кварце в ударно-метаморфизованной породе из кратера Рис, ФРГ.

При одном никеле, длина поля зрения примерно 500 мкм. Предоставлено Д. Штофлером.

межутка времени коэсит легко превращается в тридимит или кристобалит. Иногда в глубокометаморфизованных при ударе породах, в которых первоначально мог образоваться коэсит, содержатся только высокотемпературные модификации кремнезема, поскольку остаточные температуры этих пород превышали несколько сот градусов. Коэсит очень трудно найти с помощью петрографических методов, даже если заранее известно, что он может присутствовать в породе в существенном количестве, поскольку кристаллизуется он в форме мельчайших зерен. Однако на рентгеновской дифрактограмме коэсита проявлены два резких пика, которые позволяют легко диагностировать коэсит и в том случае, если его содержание в образце невелико (табл. I). В некоторых образцах ударно-метаморфизованных песчаников Коконино из Аризонского метеоритного кратера коэсит встречается в количестве, достаточном для его диагностики по дифрактограмме валовой пробы песчаников. Чаще всего, прежде чем попытаться установить коэсит в удар-

Таблица I Сопоставление физических и оптических свойств коэсита и стишовита¹

	Удельный вес	Оптический характер	Показатель преломления	Интенсивные дифракционные рентгеновские пики, Å
Коэсит	2,93	Двуосный (+)	1,59—1,61	$d = 3,09; 3,44$
Стишовит	4,35	Одноосный (+)	1,79—1,83	$d = 2,96; 1,53$

¹ По Фронделу (1962) в кн Dana's System of Mineralogy, 7-th ed., III, Silica Minerals, Wiley, N-Y, 334 p.

но-метаморфизованной породе, необходимы его концентрирование или сепарация от других минеральных фаз. Для этого наиболее успешно применяют два метода: а) обработка плавиковой кислотой отсепарированных на ситах и тонкоизмельченных образцов [6] и б) центрифугирование отсепарированных на ситах и измельченных образцов в жидкостях подходящей плотности.

Методика обработки плавиковой кислотой легко осваивается и особенно удобна для работы с кварцевыми песчаниками или другими породами, богатыми кварцем. Метод основан на пониженной растворимости коэсита в HF, благодаря чему он концентрируется в остатке после растворения пробы. Однако в породах, богатых глиноземом, при растворении их в HF могут образоваться фторалюмотригидрат и другие алюмофторидные соединения, дающие на дифрактограммах пики, которые при недостаточно тщательном анализе можно принять за пики коэсита (такие случаи были). Большинство алюмофторидных соединений растворимо в воде, и тщательное промывание остатка перед рентгеновским анализом является решением проблемы.

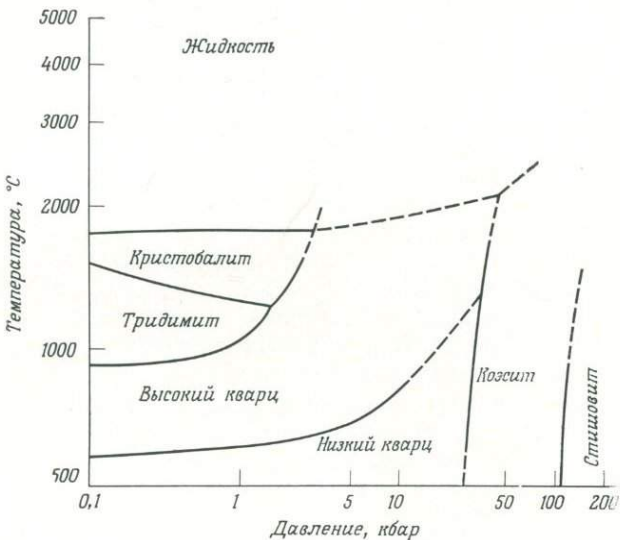
Методика центрифугирования заключается в том, что тонкоизмельченный и отсепарированный на ситах образец помещают в пробирку со смесью ацетона и бромформа, удельный вес которых несколько меньше, чем у коэсита. После нескольких минут центрифугирования коэсит (если он присутствует) и, возможно, некоторые другие минералы с большим удельным весом осаждаются на дне пробирки. Кварц, полевые шпаты, стекло и другие менее плотные фазы остаются в верхней части пробирки.

Диагностику коэсита в остаточном материале, полученном любым из этих двух способов, проводят стандартным рентгеновским или оптическим методом или их комбинацией (табл. I).

Присутствие коэсита рассматривают в качестве достоверного критерия ударного метаморфизма, так как в природе коэсит встречается почти исключительно в ударно-метаморфизованных породах¹.

СТИШОВИТ

Стишовит представляет собой еще более плотную полиморфную модификацию кремнезема и встречается в природе *исключительно* в ударно-метаморфизованных породах. В 1952 г. Томпсон предсказал существование полиморфной модификации кремнезема, в которой атомы кремния находятся в октаэдрической координации по отношению к кислороду, а в дальнейшем он же высказал предположение, что такая минеральная фаза будет иметь кристаллическую структуру рутила [7]. Позднее предсказанный минерал был синтезирован Стишовым и Поповой [8] в виде кристаллов длиной до 0,5 мм при давлениях 160 000—180 000 кг/см² и температуре 1200—1400° С. Стишовит представляет собой стабильную фазу кремнезема при давлениях, превышающих 100 кбар (фиг. 2). В ударно-метаморфизованных



Фиг. 2. Фазовая диаграмма кремнезема.

Показана часть полей устойчивости коэсита и стишовита. (Из кн. Э. Элерса «Интерпретация фазовых диаграмм в геологии», изд-во «Мир», 1975.)

¹ Известно единственное исключение в виде включения коэсита в одном из алмазов.

породах стишовит встречен в основном в виде мельчайших зерен в ассоциации с коэситом и другими фазами кремнезема. Первая находка стишовита в природе относится к 1962 г., когда он был обнаружен Чжао с сотрудниками в ударно-метаморфизованных песчаниках Коконино из Аризонского метеоритного кратера. Концентрирование стишовита из образцов ударно-метаморфизованных пород проводится теми же методами, что и коэсита; стишовит легко диагностируется на рентгеновской дифрактограмме и по другим свойствам (табл. I), даже если он находится в смеси с коэситом. Стишовит превращается в кристобалит при нагревании всего на несколько сот градусов, поэтому он, вероятно, отсутствует в некоторых ударно-метаморфизованных породах, первоначально содержавших стишовит, но претерпевших сильное нагревание при ударе.

Наличие стишовита является надежным критерием ударного метаморфизма.

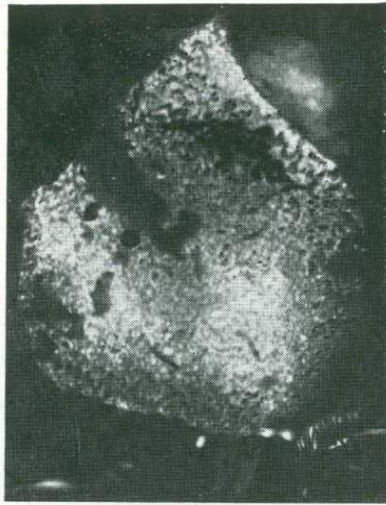
БАДДЕЛЕИТ

Бадделейт представляет собой моноклинную двуокись циркония, которая обычно образуется в ударных стеклах при термическом разложении циркона по реакции



Эль Горези описал бадделейт из многих районов развития ударных кратеров после того, как этот минерал был обнаружен в образцах из кратеров Рис и Ауэллул [9]. Уверенно диагностируется бадделейт в тектитовых стеклах (стр. 94). Бадделейт может встречаться в форме неправильных скоплений округлых зерен с высокой отражательной способностью в ассоциации с аморфным кремнеземом, но чаще всего он сохраняет идиоморфную форму кристаллов циркона и находится совместно с кремнеземом (фиг. 3). Подобные включения в ударных стеклах обычно очень мелкие, и для того, чтобы обнаружить бадделейт, целесообразно сначала просмотреть серию аншлифов цирконсодержащих пород, расплавленных при ударе. Бадделейт, образующийся при разложении циркона, никогда не отмечался в земных эффузивных или интрузивных породах. Однако изредка этот минерал встречается в полостях земных вулканических пород и в некоторых иных геологических условиях. Бадделейт диагностирован в ряде лунных образцов, где он обычно ассоциируется с ильменитом и ульвошинелью.

По данным экспериментальных исследований, разложение циркона с образованием бадделейта и кремнезема происходит при давлении 1 атм и очень высоких температурах. В простой



Фиг. 3. Бадделейт, образовавшийся при разложении циркона в двух ударных стеклах.

Вверху — неполное превращение циркона в бадделейт + кремнезем, кратер Рис, ФРГ; увеличение 600; *внизу* — зерно, сложенное гроздевидными выделениями шариков бадделейта и кремнеземом, сохранившее первоначальную форму зерна циркона, кратер Ауэллул; увеличение 600. Предоставлено А. Эль Горези.

системе ZrO_2-SiO_2 оценка температурного интервала, в котором наблюдается термическое разложение циркона, дает величины от 1720° до 1900° С [10]. Пока нет никаких экспериментальных данных о температурах рассматриваемой реакции при высоких давлениях в более сложных многокомпонентных системах.

Находки бадделейта в форме продуктов разложения циркона в составе стекловатых пород рассматривают в качестве достоверного индикатора очень высоких температур и ударного метаморфизма.

Бадделейт в качестве продукта разложения циркона может быть встречен в фульгуритах, но пока сообщений об этом не было. Такая находка внесла бы некоторую путаницу, поскольку по морфологии и местонахождению фульгуриты, представляющие собой остеклованные корочки и полые трубчатые тела, трудно принять за переплавленные или стекловатые породы, образованные в результате ударного процесса.

ЛЕШАТЕЛЬЕРИТ

Лешательерит представляет собой стекло, по составу соответствующее кремнезему. Он встречается в природе во многих импактитах [11] и часто отмечается в тектитах (стр. 91) и фуль-



Фиг. 4. Стекло Ливийской пустыни (лешательерит), Ливийская пустыня Африки.

Крупная галька, ограниченная и отшлифованная переносимыми ветром песчинками; галька полупрозрачная, зеленовато-желтого цвета. Диаметр монеты около 2 см. Предоставлено В. Барнсом.

гуритах. Лешательерит легко определить по очень низкому показателю преломления (приблизительно 1,46) и химическому составу.

При температуре земной поверхности и атмосферном давлении лешательерит существует в качестве метастабильной фазы (фиг. 2) и чаще всего образуется в процессе быстрого плавления и охлаждения ранее существовавших фаз кремнезема. В однокомпонентной системе (SiO_2) температура образования лешательерита должна быть выше 1710°C . Однако в многокомпонентных системах, например в обычных кварцсодержащих породах, температура плавления кремнезема может быть несколько ниже приведенной величины. Во всяком случае, температура, при которой расплавится кварц, должна быть выше температур, обычно достигаемых в близповерхностных магматических и вулканических процессах.

Одним из наиболее хорошо известных районов распространения крупных глыб лешательерита являются Ливийская пустыня и отдельные районы пустыни в Западном Египте, где в нескольких пунктах встречаются куски лешательерита весом до килограмма (фиг. 4). Эти «стекла Ливийской пустыни», по-видимому, относятся к импактитам, однако однозначные доказательства в настоящее время отсутствуют.

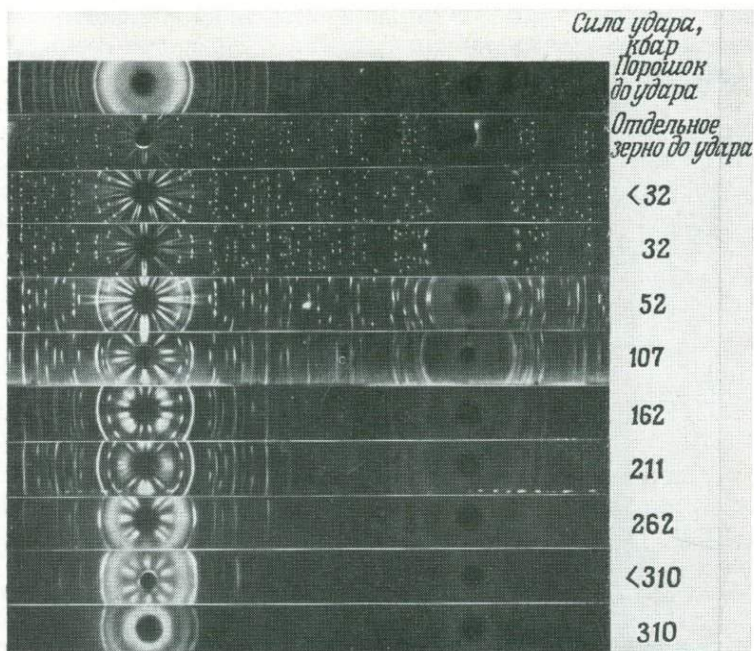
Присутствие лешательерита в стекловатых расплавленных породах относят к надежным критериям ударного метаморфизма, если не считать возможного нахождения лешательерита в фульгуритах. Как указано выше, фульгуриты обычно легко диагностируются по их морфологии и местонахождению.

ДРУГИЕ МИНЕРАЛЫ

В качестве возможных индикаторов ударной истории помимо рассмотренных выше можно использовать и некоторые другие минералы, но только при условии, что они либо образуют своеобразные структуры во вмещающих стеклах, либо при разложении идиоморфных кристаллов какой-либо минеральной фазы дают две или более новые фазы. Присутствие того или иного минерала как такового еще не является критерием ударного метаморфизма. Формы выделения таких минералов в большинстве случаев указывают лишь на высокую температуру кристаллизации и быстрое охлаждение. Некоторые специфические структуры могут указывать на восстановление в области субсолидуса. К минералам, проявляющим подобные свойства, относятся ильменит, рутил, гематит, магнетит, халькопирит, шпинель и псевдобрукит [12].

ДЕФЕКТЫ КРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ

Рассматриваемый тип дефектов кристаллической структуры субмикроскопического масштаба характеризует многие минералы, подвергшиеся удару при высоких давлениях. Это явление отчетливо наблюдается на рентгеновских дифрактограммах неподвижного *монокристалла* в некоторых минералах из пород, подвергшихся сильному ударному воздействию (фиг. 5). Уширение линий и «астеризм» пятен на дифрактограмме указывают на слабовыраженный мозаичный характер кристаллической структуры [13] или на ее превращение в систему почти параллельных доменов, первоначально представляющую собой структуру монокристалла с дальним порядком. Этот эффект обнаружен в структурах всех основных породообразующих минералов.



Фиг. 5. Рентгеновские дифрактограммы, на которых проявлены «астеризм» и расширение линий кварца, вызванные ударными явлениями различной интенсивности.

Справа — величины в килобарах с точностью $\pm 5\%$.
 Направление распространения ударных волн перпендикулярно $\{0001\}$. Предоставлено Ф. Херцем.

Обычно одновременно с ним наблюдается четко выраженное волнистое погасание при скрещенных николях. Однако в минералах, в которых волнистое погасание вызвано обычными тектоническими стрессами, дефектные структуры описанного типа не возникают.

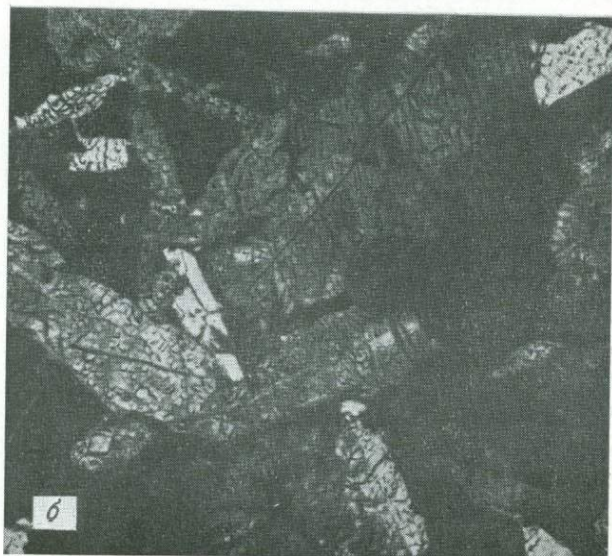
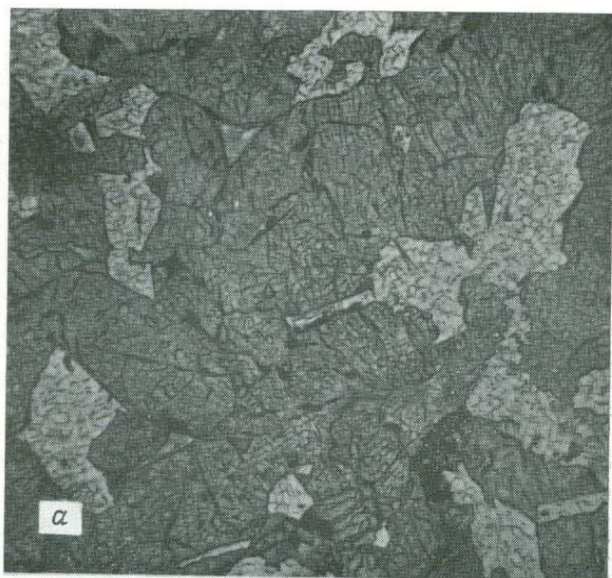
ДИАПЛЕКТОВЫЕ СТЕКЛА

Ударные волны, сопровождающие метеоритный удар, нередко приводят к превращению кварца и полевого шпата в аморфные фазы. Этот процесс представляет собой изменение состояния твердой фазы при сравнительно низких температурах. Подобное явление удалось воспроизвести экспериментальным путем при ядерных взрывах и в лабораторных условиях [14]. Термин «диаплектовый» происходит от греческого *diaplesso*, что означает разрушение при ударе, и был впервые предложен фон Энгельгардтом и Штоффлером [15], которые дали описание таких типов стекол из ударно-метаморфизованных пород кратера Рис. Диаплектовые стекла обычно можно отличить от обычных по следующим признакам: отсутствие пустот и структуры течения, более высокие показатели преломления и плотности по сравнению с обычным стеклом аналогичного химического состава [16], наличие включений коэсита и стишовита в кварцевых стеклах и идиоморфизм ранее существовавшей кристаллической фазы, формы которой обычно сохраняются (фиг. 6). Диаплектовые стекла, в которых унаследована форма ранее существовавших кристаллических фаз, называются тетоморфными [17]. В скрещенных николях диаплектовые стекла изотропны, на их рентгеновских дифрактограммах четкие линии не заметны, виден только один широкий пик, характерный для большинства стекол.

Присутствие диаплектового стекла или тетоморфных образований в кремнеземистом или полевошпатовом стекле (тетоморфное или диаплектовое плагиоклазовое стекло называют *маскелинитом*) служит надежным критерием ударного процесса. Такие стекла находят только в ударно-метаморфизованных породах.

УДАРНЫЕ ПЛОСКОСТИ

Ударные плоскости, имеющие разные названия, например «плоскостные элементы», «ударные ламели» (*planar features, planar elements, shock lamellae*), обнаружены в кварце, полевых шпатах и других порообразующих минералах из многих



Фиг. 6. Тетоморфный маскеллинит (плагиоклазовое стекло) в эвкрите Shergotty.

Светлый прозрачный плагиоклаз после ударного явления превратился в изотропное стекло: *a* — при одном николе, *б* — при скрещенных николях. Ширина поля зрения примерно 1,5 мм. Образец USNM 321, Национальный музей США.



Фиг. 7. Многочисленные ударные плоскости в кварцевых зернах из ударно-метаморфизованных пород ударной структуры озера Мистастин.

Подобные ударные плоскости с большой достоверностью указывают на проявление ударного метаморфизма. При одном никеле, петрографический шлиф нормальной толщины, длинная сторона поля зрения примерно 0,5 мм. Предоставлено М. Денсом.

ударных структур и кратеров. Их легко наблюдать с помощью оптического микроскопа при средних увеличениях. Впервые внимание научной общественности к ударным плоскостям привлек Мак-Интайр [18], который описал их в породах из района озера Клируотер, Квебек, Канада.

В одном кристаллическом зерне может возникнуть не единственная система ударных плоскостей, иногда число таких систем доходит до восьми. Многочисленные системы ударных плоскостей были получены в кварцсодержащих породах при экспериментах с ударной нагрузкой и при ядерных взрывах. Шорт [19] впервые предположил, что множественные системы ударных плоскостей могут служить критерием ударных процессов. Ударные плоскости в большинстве случаев ориентированы согласно обычным кристаллографическим направлениям. Например, обычно в ударно-метаморфизованном кварце наблюдается ориентировка ударных плоскостей по $\{10\bar{1}3\}$, $\{1011\}$, $\{11\bar{2}2\}$, $\{0001\}$ и $\{1010\}$. В ударно-метаморфизованном плагиоклазе наиболее часто проявлена ориентировка по $\{001\}$, $\{010\}$, $\{100\}$, $\{1\bar{2}0\}$, $\{012\}$ и $\{130\}$.

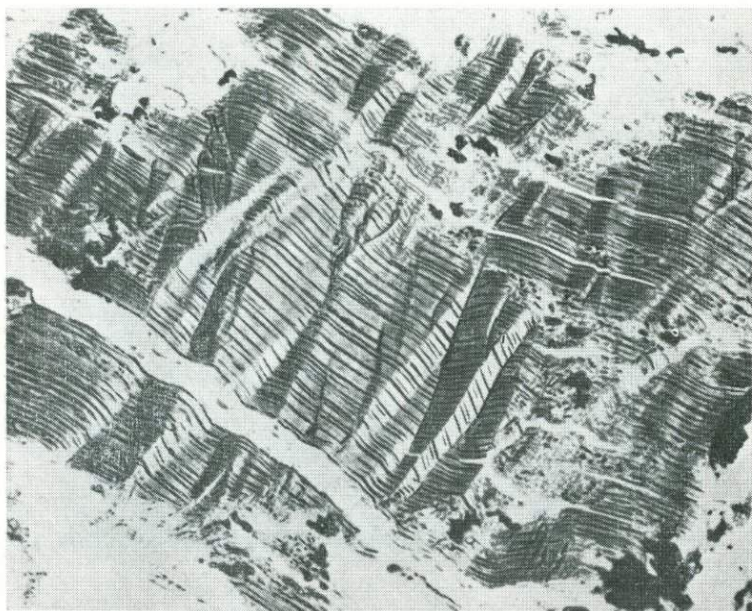
Ударные плоскости интерпретируются как микротрещины, залеченные микротрещины, плоскости скольжения, двойнико-

вые полосы, плоскости кливажа, однако большинство исследователей считают, что ударные плоскости — это, как правило, стекло, имеющее меньшую плотность, чем вмещающая фаза.

Безусловно, не все ударные плоскости, наблюдающиеся в земных кварцах, полевых шпатах и других породообразующих минералах, являются результатом ударного метаморфизма. Этот критерий следует применять с *осторожностью*. Однако если обнаруженные множественные системы ударных плоскостей по внешнему виду аналогичны воспроизведенным на фиг. 7 или в работе Шорта [20] и если в этих же породах найдены какие-либо другие минералого-петрографические критерии ударного метаморфизма, тогда проявление последнего следует считать весьма вероятным.

ПОЛОСЫ ИЗЛОМА

В биотитах из пород, залегающих в районе ударных кратеров, полосы излома наблюдались неоднократно (фиг. 8) [21],



Фиг. 8. Полосы излома в биотите из ударно-метаморфизованных гранито-гнейсов кратера Рис, ФРГ.

При одном никеле длина поля зрения составляет примерно 0,5 мм.

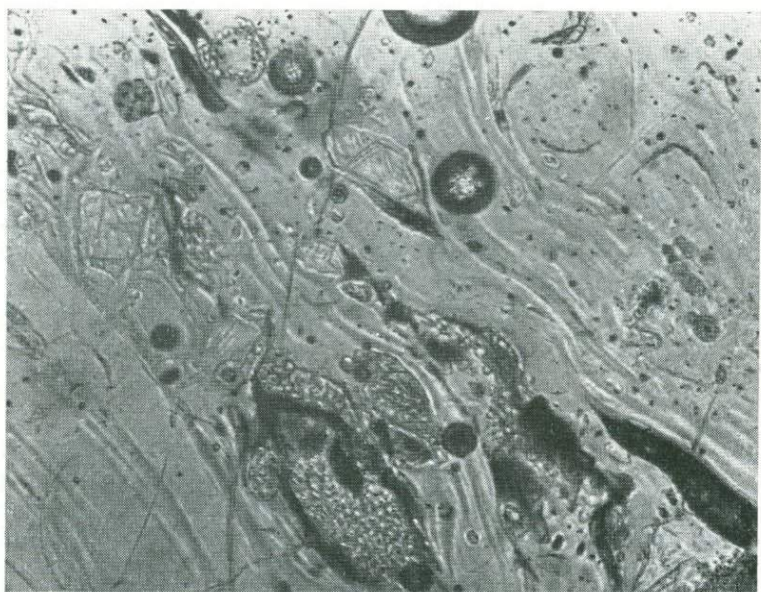
однако подобный тип деформации может возникнуть также и под влиянием тектонических сил. Некоторые исследователи полагают, что полосы излома ударного происхождения можно определить по их кристаллографической ориентировке и величине углов между смежными сегментами [22]. Однако сами по себе полосы излома обычно не считаются надежным критерием ударного метаморфизма. Полосы излома в биотитах наблюдались в породах после ядерных взрывов на полигоне Комиссии по атомной энергии в штате Невада. Полосы излома, как правило, возникают в биотитсодержащих породах, богатых кварцем и полевым шпатом, там, где в этих минералах проявлены ударные плоскости.

ВОЛНИСТОЕ ПОГАСАНИЕ

Это явление крайне часто наблюдается во многих ударно-метаморфизованных породах и минеральных зернах. Однако само по себе такое свойство не может служить критерием ударного метаморфизма. В земных породах волнистое погасание нередко возникает в результате действия тектонических сил. Волнистое погасание следует рассматривать вместе с другими структурными и минералогическими критериями: если оно проявлено исключительно четко или имеется другая информация о возможном ударном происхождении пород, следует подвергнуть отдельные минеральные зерна рентгенометрическому анализу с целью обнаружения уширения или астеризма линий на дифрактограмме (стр. 160).

ПЛАВЛЕННЫЕ СТЕКЛОВАТЫЕ ПОРОДЫ

Плавленные стекловатые породы, или импактиты [41], распознаются на основании присутствия в них включений минералов, неоднородности текстуры и по общепетрографическим признакам. Стекла могут содержать коэсит, бадделеит, лешательерит или включения других диагностических минералов; обычно встречаются шпиры с сильно извилистыми очертаниями или структурой течения; нередко наблюдаются в основном сферические или несколько удлиненные пустоты (фиг. 9). В некоторых минеральных зернах включений могут быть проявлены ударные плоскости и обильные микротрещины, четкое волнистое погасание. Импактиты редко содержат кристаллиты и микролиты, столь распространенные в обычных вулканических стеклах, не подвергавшихся закалке в нижней зоне раскаленных обратных выпадений или отложений базисной волны.



Фиг. 9. Ударные стекла из кратера Рис, ФРГ.

Следует отметить многочисленные включения минералов, а также четко выраженные штрихи и сферические пустоты. Длина поля зрения примерно 750 мкм. Предоставлено Д. Штоффлером.

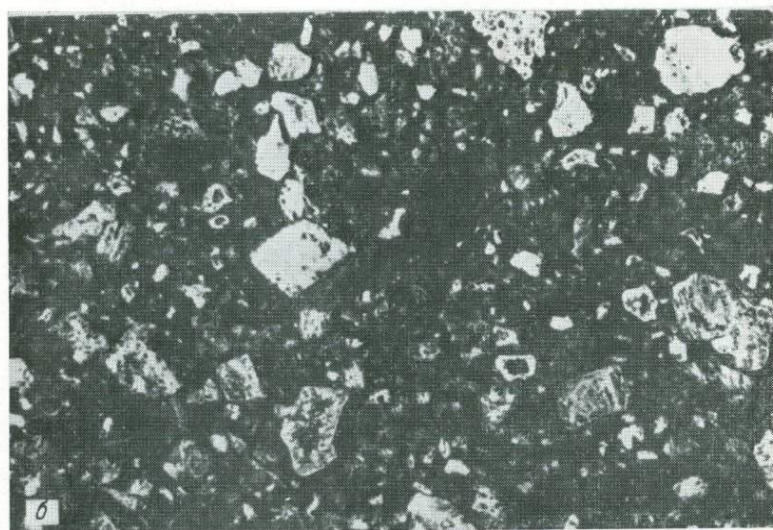
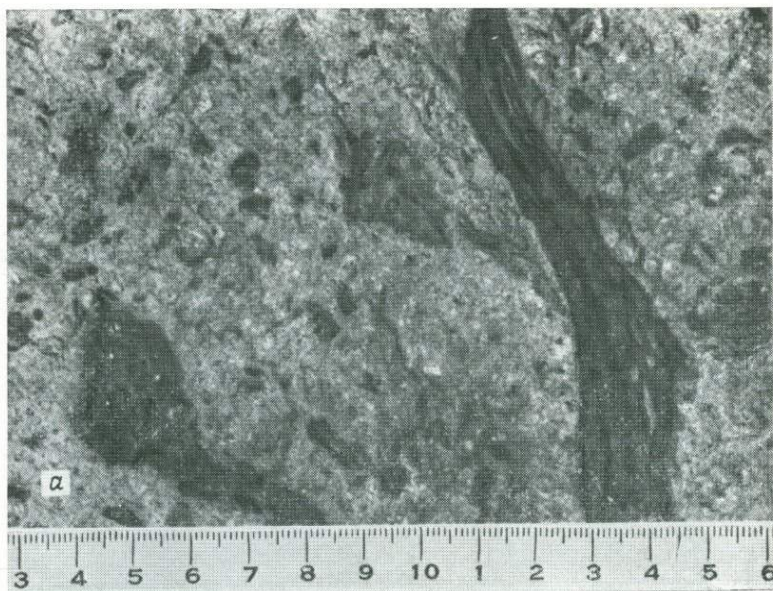
Наиболее надежным диагностическим признаком импактитов является присутствие многочисленных мельчайших железоникелевых шариков, представляющих собой продукты повторной конденсации вещества ударяющего тела. Однако по этому критерию вряд ли можно диагностировать ударные стекла кометного происхождения или импактиты, сформировавшиеся при падении каменного метеорита. Как и в случае ряда других геологических явлений, к незаменимым критериям диагностики импактитов относится их геологическое положение. В простейшем случае стекла, определенно, ассоциируют с кратерами, содержащими многочисленные фрагменты метеорита, как, например, Аризонский метеоритный кратер или кратеры Вабар в Саудовской Аравии. Однако довольно затруднительно диагностировать ударное стекло, присутствующее в плохо обнаженных жилах вблизи гипотетической ударной структуры или в отдельной изолированной глыбе на земной поверхности. Редко встречающиеся стекла изверженных пород, фульгуриты и синтетические стекла могут иметь некоторые из перечисленных петрографических признаков. К особой разновидности плавленых стекловатых пород принадлежат тектиты (см. гл. 2).

БРЕКЧИИ

С хорошо сохранившимися ударными кратерами ассоциируются большие объемы брекчий, которые могут заполнять кратер; они входят в состав обратных выпадений, отложений базисной волны или ударных выбросов. Брекции относятся к хаотическим образованиям и содержат обломки различного состава, беспорядочно перемешанные в зависимости от разнообразия литологического состава пород мишени.

Отложения базисной волны и ударные выбросы образуют покровные отложения, которые занимают значительную площадь, в них наблюдается тенденция к остеклованию и спеканию, проявленная в разной степени, в связи с чем с поверхности они очень напоминают туфы пепловых потоков. Однако при детальном рассмотрении оказывается, что структура брекчий резко отличается от структуры вулканических туфов (фиг. 10). В ударных брекчиях нередко встречаются многочисленные стекловатые импактиты, образовавшиеся в результате полного или частичного плавления. Кроме того, во многих отдельных обломках пород и минеральных зернах фиксируются петрографические и минералогические признаки сильнейших ударных процессов.

Если размеры кратера, являющегося источником брекчий, велики, то отдельные обломки в составе брекчий могут дости-



Фиг. 10.

а. Ударная брекчия (зювит) из кратера Рис, ФРГ, отобранная из карьеров Оттинге. В поле зрения естественная поверхность, образованная по трещине.

Темные фрагменты представлены ударным стеклом (частично имеют блиноподобную форму — фладен), основная масса состоит из тонкообломочного материала горных пород, минералов и стекла. Именно из таких пород, принадлежащих к отложениям обратных выпадений в кратер Рис, построен собор в г. Нордлингене. Масштаб в сантиметрах; в отраженном свете.

б. Полированный образец туфа Оуанинг из структуры Садбери, Онтарио, Канада. Следует отметить разнообразные обломки пород и минералов и интенсивное спекание в стекловатой основной массе. Длина поля зрения примерно 8 см; отраженный свет.

гать внушительных размеров. Например, в Аризонском метеоритном кратере, который принадлежит к сравнительно небольшим, в брекчии его кратерного вала встречаются глыбы размером до 30 м в поперечнике. Блоки крупных размеров, как правило, располагаются внутри кратера вдоль его стенок или в непосредственной близости к кратеру. Однако в таких случаях ударное происхождение структуры и брекчий обычно уже не вызывает сомнений.

Некоторые из вулканических «жерловых агломератов» могут иметь структуру, аналогичную встреченной в ударных брекчиях. Конечно, в этих случаях обломки минералов со следами ударных дефектов не встречаются.

Если кратер подвергся сильной эрозии или даже эродирован полностью, то единственный тип брекчий, который можно обнаружить, — это псевдотахилиты. Последние представляют собой темную стекловатую породу, содержащую многочисленные обломки, и залегают в виде жил и даек, пересекающих породы, в непосредственной близости от района кратерообразования (например, структура Вредефорт в Африке). Во включениях обломков пород и минеральных зернах в псевдотахилитах можно обнаружить признаки ударных явлений, однако термическая закалка, обусловленная влиянием вмещающей расплавленной породы, формирующей основную массу псевдотахилита при его охлаждении, может привести к исчезновению или ослаблению следов ударных процессов. Многие из псевдотахилитов, часто встречающихся в районах развития докембрийских пород, возможно, имеют ударное происхождение, однако определенные доказательства этого отсутствуют.

СТРУКТУРНЫЕ КРИТЕРИИ

КОНУСЫ РАЗРУШЕНИЯ

Прохождение ударных волн в некоторых типах горных пород приводит к возникновению конусов разрушения — легко распознаваемых структур, которые, очевидно, могут служить критерием ударных процессов. Размеры таких конусов разрушения варьируют от более чем 15 м в длину до менее чем 1 см. Конусы разрушения описаны во многих земных ударных кратерах, в том числе на структуре Садбери (фиг. 14), в бассейнах Рис и Штейнхейм, в районах Сьерра-Мадера, Флинн-Крик, Госсес-Блафф и во многих других. Диц был первым, кто предложил использовать факт нахождения и ориентировки конусов разрушения в качестве индикаторов ударного процесса [23].



Фиг. 11. Крупные конусы разрушения в кварцитах формации Миссиссаги на южном берегу озера Келли, к юго-западу от структуры Садбери.

Оси конусов почти параллельны слоистости круто падающих пород. Если мысленно повернуть слой так, чтобы они заняли свое первоначальное горизонтальное положение, то вершины и оси конусов будут приблизительно ориентированы к центру структуры Садбери. Длина геологического молотка на переднем плане 41 см. Предоставлено Б. Френчем.

Экспериментальные исследования ударных волн позволили получить конусы разрушения как в природных, так и в искусственных материалах, а грубо оформленные конусы могут образоваться в забое шпуров при взрывных работах на карьерах, рудниках и строительстве дорог.

Истинные конусы разрушения легко диагностировать по их правильной конической форме и ветвящейся штриховке на поверхности конуса, которая приобретает вид «конского хвоста» от вершины конуса к его краям. Конусы разрушения наблюдались во многих разновидностях горных пород, в том числе в известняках, доломитах, кварцитах, гнейсах и сланцах.

Во многих ударных структурах конусы разрушения встречаются в изобилии, причем замеры их ориентировки с поправками на перемещение блоков пород после формирования в них конусов показывают, что конусы своими вершинами направлены к центру структуры. Вероятно, вершины повернуты навстречу направлению распространения фронта ударной волны, т. е.,

иными словами, на действительный центр падения ударяющего тела. Конусы разрушения в глубоко эродированных структурах могут быть ориентированы не только на ее центр, но и вверх (например, Госсес-Блафф). Здесь ориентировка конусов разрушения может быть использована для оценки глубины эрозии после кратерообразования.

Остальные структурные критерии распознавания ударных образований связаны с чертами геологического строения кратеров, а не с такими признаками, которые проявляются в отдельном штуде или на отдельном обнажении горных пород (см. гл. 4).

ИНТЕРПРЕТАЦИЯ ИСТОРИИ УДАРНЫХ ПРОЦЕССОВ

Если не считать попыток установления самого факта проявления ударных процессов в отдельном образце, то целью большинства исследований является расшифровка тепловой и барической истории отдельных образцов. Петрологические и минералогические критерии для различных давлений и температур были выявлены путем сопоставления результатов экспериментального изучения ударных процессов с воздействием ядерных взрывов на горные породы. Термобарическая история отдельного ударно-метаморфизованного природного образца лишь редко может быть расшифрована с достаточной детальностью, однако *можно* некоторые предельные величины определить. Интерпретация истории одного образца находится в зависимости от исключительной сложности петрографии и минералогии горных пород и от неопределенного количества частично изолированных элементарных объемов, каждый из которых характеризуется присущей ему физико-химической средой. По-видимому, необходимо знать пространственные соотношения рассматриваемого образца со средой кратерообразования и посткратерными отложениями, т. е. необходимы достоверные полевые данные.

Однако если оказывается возможной расшифровка какой-либо стадии в термобарической истории образца, то это можно использовать для установления его «доударного» минералогическо-петрографического и даже химического состава. Например, если определить максимальную температуру разогрева образца ударного стекла, то можно попытаться надлежащим образом провести реконструкцию химического состава первичной породы,

учитывая результат испарения щелочей. Этот аспект проблемы оказался весьма важным при изучении и интерпретации состава лунных образцов. Изучение ряда образцов из одной серии выбросов или из других стратиграфических комплексов в ударном кратере или вокруг него позволяет прийти к определенным выводам относительно температуры формирования или способа образования изучаемых отложений.

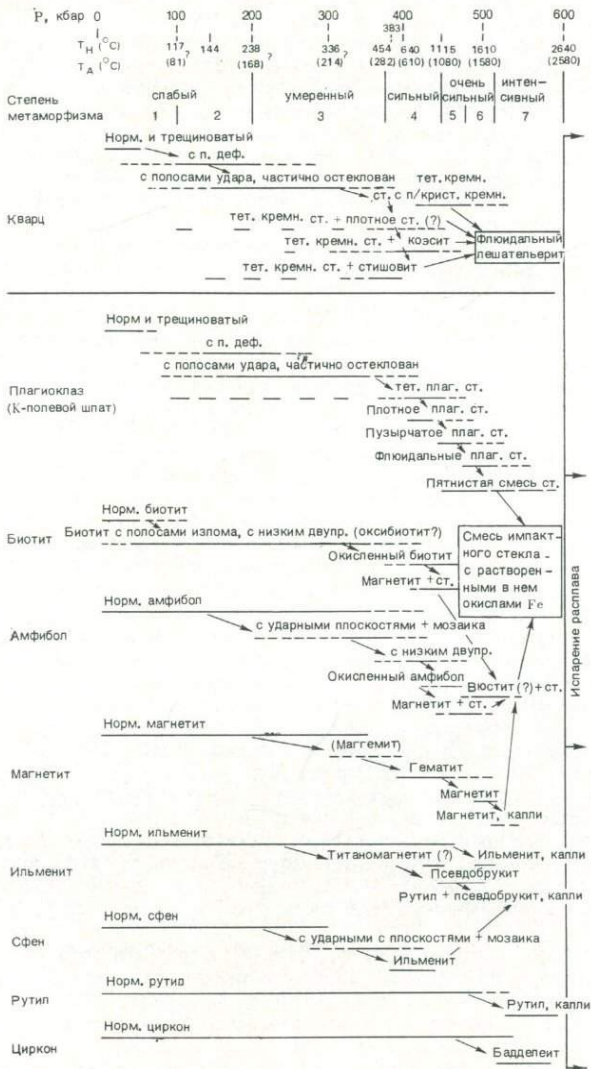
Известны две заслуживающие внимания попытки систематизации и осмысления информации об ударном метаморфизме [15, 24]. Такие системы классификации (табл. II, III) в лучшем

Таблица II Классификация стадий ударного метаморфизма [15]

Давление, кбар	Стадии ударного метаморфизма	Характер деформаций и фазовые переходы	Остаточная температура, °С
~ 100	Стадия I	Образование трещин Пластические деформации (диаплектовый кварц и полевошпат)	~100
250—300	Стадия II	Фазовые переходы (диаплектовые кварцевые и полевошпатовые стекла, высокобарные фазы SiO ₂)	200—300
500—550	Стадия III	Частичное плавление (нормальные кварцевые и полевошпатовые стекла, высокобарные фазы SiO ₂)	1200—1500
600—650	Стадия IV	Плавление всех главных породообразующих минералов (неоднородные расплавы пород, плоские бомбы—фладени).	2000—3000
~ 1000		Испарение	~ 5000

случае являются полуколичественными, однако в большинстве случаев их можно использовать в качестве ключа для установления относительной степени проявления ударного метаморфизма конкретного образца.

Таблица III Классификация ударно-метаморфизованных пород и ударных дефектов



Примечание. T_H — максимальная температура позади ударной волны, связанной с данным сжатием; T_A — остаточная температура после отступления ударного фронта от данной температуры Гюгонио. Сокращения: двупр. — дупреломление; п. деф. — полосы деформации; ст. — стекло; норм. — нормальный; плаг. — плагиоклазовое; кремн. — кремнеземное; тет. — тетоморфный; п/крист. — перекристаллизованный. Заимствовано из [24].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Merrill G. P.*, On a peculiar form of metamorphism in siliceous sandstone Proc. U.S. Natl. Mus., **32**, p. 547—551, 1907.
2. Например, см. Shock Metamorphism of Natural Materials, *French B. M.*, *Short N. M.*, eds., Mono Book Corp., Baltimore, Md., 644 p., 1968. Эта книга представляет собой Труды конференции, проведенной НАСА в центре космических полетов им. Годдарда в апреле 1966.
3. *Coes L., Jr.*, A new dense silica, Science, **118**, p. 131—132, 1953.
4. *Nininger H. H.*, Arizona's Meteorite Crater, Am. Meteorite Mus., Sedona, Ariz. 232 p., 1956. См. сноску на стр. 50, кроме того, стр. 154.
5. *Chao E. C. T.*, *Shoemaker E. M.*, *Madsen B. M.*, First natural occurrence of coesite, Science, **132**, p. 220, 1960.
6. *Fahey J. J.*, Recovery of coesite and stishovite from Coconino sandstone of Meteor Crater, Ariz., Am. Mineralogist, **49**, p. 1643—1647, 1964.
7. *Birch F.*, Elasticity and constitution of the Earth's interior, Jour. Geophys. Res., **57**, p. 234, 1952.
8. *Стушов С. М.*, *Попова С. В.*, Новая плотная модификация кремнезема, Геохимия, № 10, стр. 837—839, 1961.
9. *El Goresy A.*, Baddeleyite and its significance in impact glass, Jour. Geophys. Res., **70**, p. 3453—3456, 1965.
10. См. *Kirby D.*, Pure oxide refractories, Metallurgica, **30**, p. 65, 1944; кроме того, Phase Diagrams for Ceramics, compiled by *Levin E. M.*, *Robbins C. R.*, *McMurdie H. F.*, The American Ceramic Society, Figs. 361 and 362, p. 141, 1964.
11. Термин «импактит» впервые был предложен Штенцелем (см. *Barnes V. E.*, North American tektites, Univ. of Texas, Bur. Eco. Geo. Pub. 3945, pt. 2, p. 558, 1939) для определения стекловатых пород, по происхождению относимых к «брызгам» из метеоритных ударных кратеров. В настоящее время этот термин обычно применяют для обозначения всех пород, которые подверглись частичному или полному плавлению при высокоскоростных ударах любого типа.
12. Исчерпывающее, хорошо иллюстрированное исследование непрозрачных минералов, деформирующихся при ударе, см. в работах: *El Goresy A.*, The opaque minerals in impactite glasses, in Shock Metamorphism of Natural Materials, *French B. M.*, *Short N. M.*, eds., Mono Book Corp., Baltimore, Md., p. 531—553, 1968.
13. *Dachille F.*, *Gigly P.*, *Simons P. Y.*, Experimental and analytical studies of crystalline damage useful for the recognition of impact structures, in Shock Metamorphism of Natural Materials, *French B. M.*, *Short N. M.*, eds., Mono Book Corp., Baltimore, Md., p. 555—569, 1968; см. также *Lipschutz M. E.*, *Jaeger R. R.*, X-ray diffraction study of minerals from shocked iron meteorites, Science, **152**, p. 1055—1057, 1966.
14. *Milton D. J.*, *De Carli P. S.*, Maskelynite: formation by explosive shock, Science, **140**, p. 670, 1963; см. также *Wackertlie J.*, Shock wave compression of quartz, Jour. Appl. Phys., **33**, p. 922, 1962; *De Carli P. S.*, *Jamieson J. C.*, Formation of an amorphous form of quartz under shock conditions, Jour. Chem. Phys., **31**, p. 1675, 1959.
15. *Engelhardt W. v.*, *Stöffler D.*, Stages of shock metamorphism in crystalline rocks of the Ries Basin, Germany, in Shock Metamorphism of Natural Materials, *French B. M.*, *Short N. M.*, eds., Mono Book Corp., Baltimore, Md., p. 159—168, 1968.
16. Пример описания поведения стекла при воздействии ударной волны см. в *Arndt J.*, *Hornemann U.*, *Müller W. F.*, Shock wave densification of silica glass, Phys. Chem. Glasses, **12**, p. 1—7, 1971.

17. *Chao E. C. T.*, Impact metamorphism, in *Researches in Geochem.*, *Abelson P. H.*, ed., Wiley, New York, 2, p. 204—233, 1967.
18. *McIntyre D. B.*, Impact metamorphism at Clearwater Lakes, Quebec, *Jour. Geophys. Res.*, 67, p. 1647, abstract, 1962.
19. *Short N. M.*, Effects of shock pressures from a nuclear explosion on mechanical and optical properties of granodiorite, *Jour. Geophys. Res.*, 71, p. 1195—1215, 1966.
20. *Short N. M.*, *Bunch T. E.*, A worldwide inventory of features characteristic of rocks associated with presumed meteorite impact structures, in *Shock Metamorphism of Natural Materials*, *French B. M.*, *Short N. M.*, eds., Mono Book Corp., Baltimore, Md., p. 255—266, 1968.
21. *Stöffler D.*, Zones of impact metamorphism in the crystalline rocks of the Nördlinger Ries crater, *Contr. Mineral. and Petrol.*, 12, p. 15—24, 1966; см. также *Chao E. C. T.*, Shock effects of certain rock-forming minerals; *Science*, 156, p. 192—202, 1967; *Bunch T. E.*, Some characteristics of selected minerals from craters, in *Shock Metamorphism of Natural Materials*, *French B. M.*, *Short N. M.*, eds., Mono Book Corp., Baltimore, Md., p. 413—432, 1968.
22. *Hörz F.*, Static and dynamic origin of kink bands in micas, *Jour. Geophys. Res.*, 75, p. 965—977, 1970. Более полное исследование см. в *Schneider H.*, Deformation und umwandlung von biotiten aus gesteinen des Nördlinger Rieskraters durch stosswellenmetamorphose, unpubl. doctoral disser., Mineral. and Petrol., Inst., Univ. Tübingen, Germany, 1971.
23. *Dietz R. S.*, Meteorite impact suggested by orientation of shatter cones at the Kentland, Indiana disturbance, *Science*, 105, p. 42—43, 1947; кроме того, *Dietz R. S.*, Meteorite impact suggested by shatter cones in rock, *Science*, 131, p. 1781—1784, 1960 и другие многочисленные статьи этого автора.
24. *Chao E. C. T.*, Pressure and temperature histories of impact metamorphosed rocks — based on petrographic observations, in *Shock Metamorphism of Natural Materials*, *French B. M.*, *Short N. M.*, eds., Mono Book Corp., Baltimore, Md., p. 135—158, 1968.

РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА ПО ОБЩИМ ВОПРОСАМ

25. *Shock Metamorphism of Natural Materials*, *French B. M.*, *Short N. M.*, eds., Mono Book Corp., Baltimore, Md., 644 p., 1968.
26. *Stöffler D.*, Deformation and transformation of rock-forming minerals by natural and experimental shock processes, I, Behavior of minerals under shock compressions, *Fortschr. Mineral.*, 49, p. 50—113, 1972.
27. *Meteorite Impact and Volcanism*, *Hörz F.*, ed., proceedings of a conference at the Lunar Science Institute, Oct., 1970, *Jour. Geophys. Res.*, 76, p. 5381—5798, 1970.

Нам, в самом деле, повезло, что одно из наиболее интересных небесных тел во всей Солнечной системе является нашим ближайшим соседом в космосе.

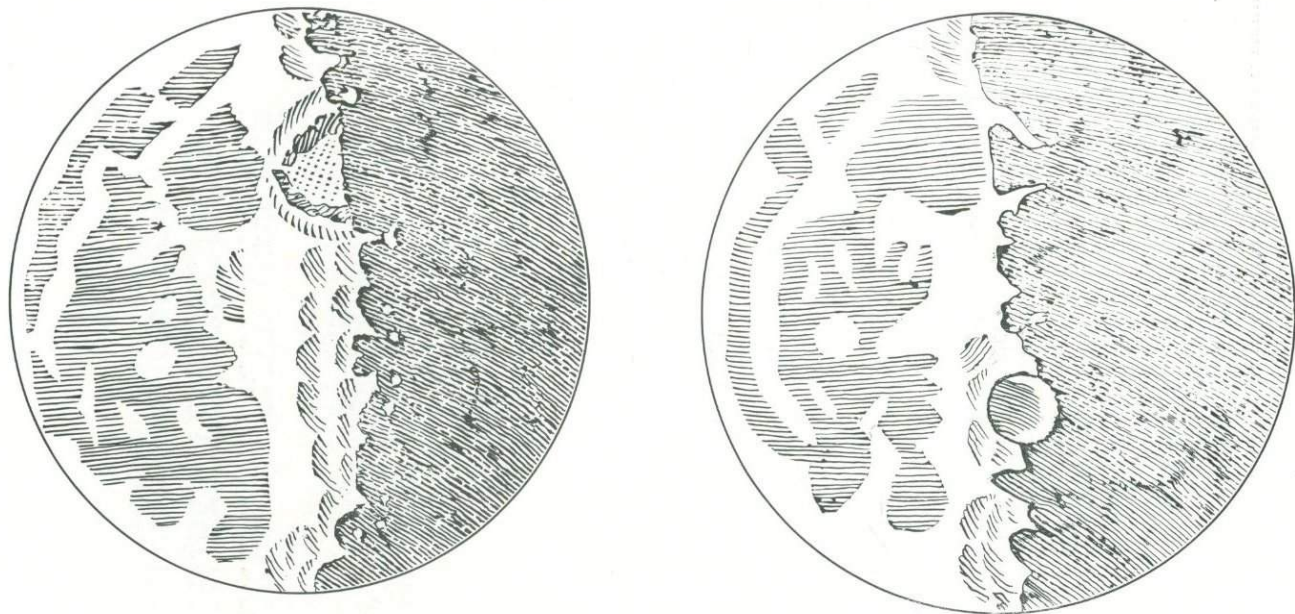
Г. Юри, 1967 г.

6. Луна

ВВЕДЕНИЕ

Многие поколения людей на протяжении тысячелетий придавали Луне религиозный или поэтический смысл. Луну имели возможность созерцать миллиарды не искушенных в науке наблюдателей, причем преимущественно вдвоем, но научные и систематические наблюдения Луны имеют не столь уж давнюю историю. Изучение относительного движения Луны сыграло свою роль в формировании представлений о строении Солнечной системы и движении планет, привлекая внимание Гераклида, Аристарха, Птолемея, Коперника, Браге, Кеплера и многих менее известных ученых [1]. Леонардо да Винчи правильно предполагал, что появление слабого свечения части лунного диска, видимого только в новолуние (пепельный свет), обусловлено отражением солнечного света от Земли [2]. Тем не менее эволюция научных знаний о свойствах лунной поверхности была медленной вплоть до 1609 г. В этом году Галилей построил астрономический телескоп и начал серьезные наблюдения Луны и деталей ее поверхности; его первые наблюдения и рисунки (фиг. 1) опубликованы в виде небольшой статьи в 1610 г. в Падуе¹. Он увидел четко выделяющиеся светлые и темные участки на лунной поверхности и пришел к выводу, что они соответствуют земным континентам и морям. Кроме того, он точно нанес на схему и описал большое количество крупных круговых впадин (кратеров) и пришел к выводу, что они принадлежат к преобладающим топографическим элементам поверх-

¹ Название работы Галилея «Nuncius Sidereus», что означает «Звездный вестник».



Фиг. 1. Два рисунка Луны, сделанные Галилеем и опубликованные в 1610 г.

Несмотря на то что Галилей выделил кратеры в качестве доминирующей формы рельефа на лунной поверхности, на его рисунках не обозначен ряд крупных и легко наблюдаемых объектов, например кратеры Коперник и Тихо. Сравните с фотографией Луны в полнолуние, полученной с помощью наземных телескопов, на фиг. 15. Предоставлено Коллекцией Антони Михаэлиса.

ности Луны. Количество астрономических телескопов и масштабы их использования все увеличивались вместе с размерами, сложностью и качеством этих инструментов. В течение последующих 100 лет астрономы опубликовали *много* карт и рисунков Луны.

Где-то в начале нынешнего столетия астрономы стали считать самым уважаемым занятием изучение более удаленных объектов, а наблюдения Луны стали проводиться в основном любителями и малоквалифицированными специалистами. Наше счастье, что такие профессиональные астрономы, как Кёйпер, Дольфус, Эпик и Коппал, продолжали связывать свои научные интересы с Луной и планетами. В противном случае сумма информации, которой мы располагали перед началом исследования и наблюдения Луны с помощью автоматических межпланетных станций и пилотируемых полетов по программе «Аполлон», была бы на редкость скудной.

Расстояние от Земли до Луны варьирует от 356 410 до 406 697 км, диаметр Луны составляет приблизительно 3474 км, а период вращения вокруг собственной оси равен периоду ее обращения вокруг Земли. Последний факт привел к тому, что Луна постоянно обращена к Земле одной и той же стороной. Луна испытывает некоторые незначительные колебания при вращении вокруг своей оси (либрация), что приводит к незначительным изменениям площади видимого диска. По селенографической долготе либрация составляет 7° , но по широте — всего около 1° . Атмосфера на Луне практически отсутствует; в самом деле, общее давление атмосферы вблизи лунной поверхности соответствует «высокому» вакууму и составляет примерно 10^{-13} торр или менее. Масса Луны значительно меньше массы Земли, поэтому ее гравитационная постоянная составляет $\frac{1}{6}$ от земной. Температура лунной поверхности варьирует от примерно -158°C до более чем 130°C .

ИЗОБРАЖЕНИЯ, ПОЛУЧЕННЫЕ С ПОМОЩЬЮ ТЕЛЕСКОПОВ И КОСМИЧЕСКИХ СРЕДСТВ

ИСТОРИЯ

Кратеры на Луне наблюдались в течение сотен лет, однако по поводу их происхождения велись острые дискуссии. В 1893 г. Гилберт [3] выдвинул теорию ударного кратерообра-

зования для объяснения происхождения лунных кратеров, в том числе концепцию образования Моря Дождей в результате крупного ударного события¹. В 1924 г. Гиффорд [4] провел сравнение лунных кратеров с Аризонским метеоритным кратером и пришел к выводу о происхождении первых в результате взрывов, вызванных падением крупных метеоритов. Он объяснял происхождение центральных горок в некоторых лунных кратерах также механизмом удара и привел расчеты энергетического баланса при образовании крупных кратеров. Хотя некоторые из этих расчетов в свете позднейших данных оказались неверными, работа Гиффорда была передовой и большинство ее выводов оказалось правильным. Совершенно другие результаты были получены Мохоровичичем [5] в 1928 г., который допускал взрывную природу лунных кратеров, однако считал, что они возникают в результате гигантских вулканических взрывов. Были даже осуществлены эксперименты, чтобы показать аналогию лучей и полос, исходящих из многих лунных кратеров, с аналогичными формами, возникающими при небольших взрывах в цементном порошке. Аналогичные эксперименты провел Вегенер, причем цементный порошок мелкими порциями выбрасывался на плоскую поверхность того же материала [6]. Автор пришел к выводу, что лунные кратеры являются просто результатом метеоритных ударов. Вегенер гораздо больше известен своими работами и гипотезами дрейфа континентов, многие из которых только сейчас получают общее признание среди ученых.

Впервые принципы стратиграфического деления, которые можно было бы использовать при составлении геологических карт Луны, были сформулированы Барреллом [7], однако он, по-видимому, не смог найти им конкретного применения. В исключительно прозорливой работе Спенсера [8] утверждается, что лунные кратеры являются продуктами метеоритных ударов, и проводится сопоставление вещества морей с грандиозными базальтовыми потоками плато реки Колумбия, США, и траппами Деканского плоскогорья. Мнение Спенсера, что лунные моря заполнены мафическими породами лавовых потоков, не вызывало возражений вплоть до самого недавнего времени, буквально до высадки на Луну, осуществленной по программе «Аполлон». Шумейкер отстаивал ударное происхождение большинства лунных кратеров, а противоположную концепцию (вулканическое происхождение) искусно развивал Дж. Грин, опираясь в основном на земные аналоги лунных

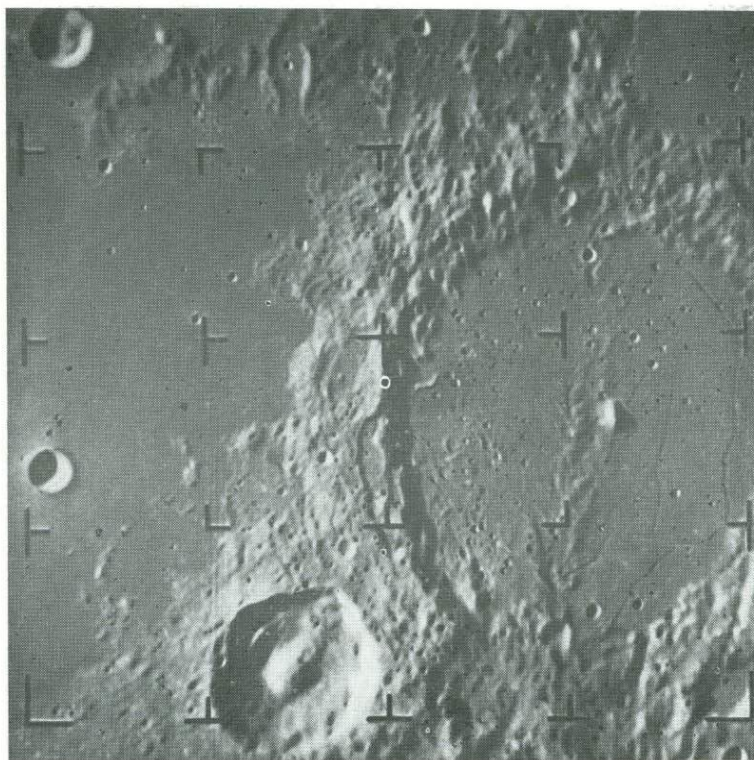
¹ Интересно сопоставить эту раннюю работу Гилберта с более поздней, в которой он *отрицает* происхождение Аризонского кратера в результате метеоритного удара (стр. 116).

структур. Все эти аргументы суммированы в работе Болдуина [9], который прибавил свои собственные выводы и интерпретацию, но в основном поддерживал гипотезу ударного происхождения. Аналогичные обобщающие работы, также содержащие оригинальные разработки и выводы, опубликованы Филдером [10] и другими исследователями.

Принципиальные различия между сравнительно пониженными, гладкими, слабо кратерированными участками с низким альбедо, представляющими лунные моря, и более возвышенными, расчлененными, сильно кратерированными районами с высоким альбедо, принадлежащими к лунным материкам (континентам), отмечались практически всеми исследователями. Однако физико-химические обоснования, лежащие в основе этих различий, служат предметом многих умозрительных построений [9].

СОСТАВЛЕНИЕ ГЕОЛОГИЧЕСКИХ КАРТ

Крупным шагом в познании Луны еще до начала прямого исследования в ходе пилотируемых полетов явилось составление геологических карт видимой стороны нашего спутника, предпринятое в основном силами Геологической службы США. Попытки разработать стратиграфию Луны на современном уровне и закартировать ее поверхность были осуществлены специалистом по аэрогеологии Хакманом [11]. Позднее он стал работать совместно с Шумейкером [12], который значительно развил и представления, и принципы, сформулированные в первых работах, и предложил новую интерпретацию. Ассигнования в рамках НАСА привели к резкому усилению работ по геологическому картированию Луны, оно было организовано и направлялось Шумейкером при участии большого числа исследователей. Вместе с успехами систематического картирования росло понимание стратиграфии Луны. Состояние знаний в этой области по итогам телескопических наблюдений лунной поверхности суммировано в работе Вильгельмса [13], где детально изложены принципы и методы лунного геологического картирования. Помимо наблюдений, выполненных с помощью наземных телескопов, впоследствии появилась возможность использовать для картирования изображения лунной поверхности высокого разрешения, полученные с помощью космических аппаратов серий «Рейнджер», «Сервейор» и «Орбитер» (например, фиг. 2—6). Эти полеты сыграли важную роль при выборе вероятных мест посадки для лунных экспедиций по программе «Аполлон», а также предоставили намного более детальную информацию о лунной поверхности, чем та, которую можно



Фиг. 2. Телевизионное изображение, полученное «Рейнджером-9» 24 марта 1964 г. с расстояния примерно 400 км от лунной поверхности, за 2 мин 50 с до жесткой посадки.

Размер участка 174×194 км. Хорошо видны борозды, кратеры с темными галло, а также центральный хребет и центральная горка на дне кратера Альфонс. Следует отметить ровную поверхность окраины Моря Облаков в левой части снимка. Предоставлено НАСА, Лабораторией реактивного движения.

было бы собрать с помощью наземных средств. Особенно эффективной для получения детальных изображений значительной части поверхности Луны была программа «Лунар Орбитер»¹. В настоящее время опубликовано немного работ, в которых стратиграфия видимой стороны Луны освещается хотя бы в одном, но достаточно общем аспекте; в то же время имеется

¹ Следует подчеркнуть, что большое число этих снимков до сих пор не подверглось полной обработке и не использовано для геологических целей, т. к. число снимков и районов съемки очень велико.

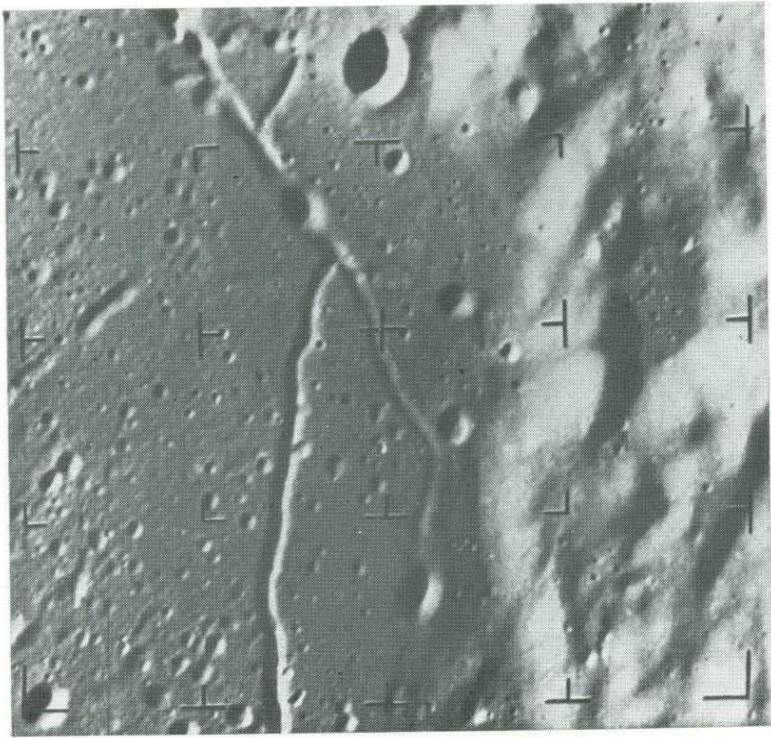


Фиг. 3. Телевизионное крупномасштабное изображение лунной поверхности, полученное «Рейнджером-9» за 39 с до жесткой посадки.

Видны центральная горка, центральный хребт и северо-восточная часть дна кратера Альфонс. Последние снимки, переданные «Рейнджером-9», позволили различить кратеры с диаметром менее 1 м. Размеры участка 42×45 км. Предоставлено НАСА, Лабораторией реактивного движения.

много снимков обратной стороны, и эту ситуацию необходимо учитывать как ученым, так и студентам. При составлении наиболее современных геологических карт и проведении соответствующих исследований использовали крупномасштабные фотографии, полученные с помощью ряда разнообразных камер, работавших на окололунных орбитах во время экспедиций по программе «Аполлон» (фиг. 7, 8) [14].

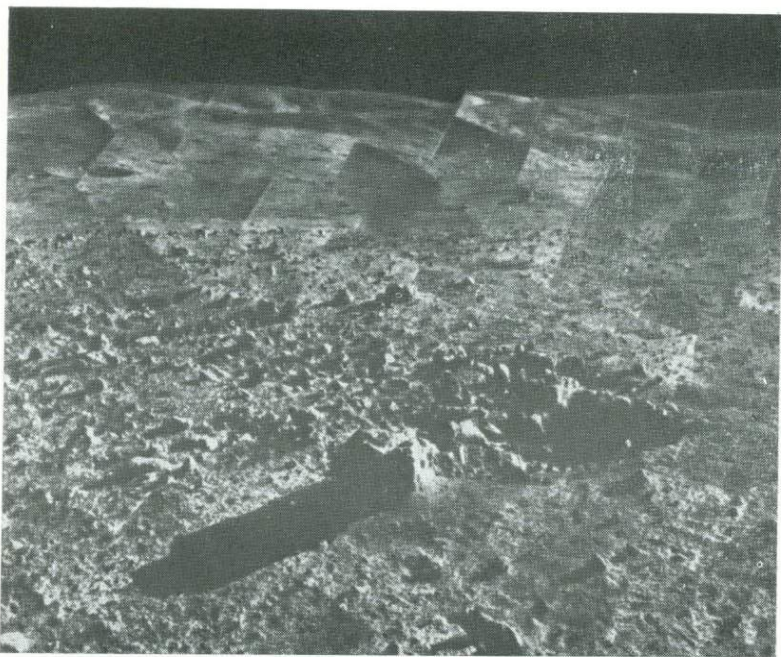
Главный из итогов наблюдений, который позволяет использовать крупномасштабные снимки для геологических целей, заключается в том, что каждый из круговых морских бассейнов видимой стороны Луны ассоциируется с рядом концентриче-



Фиг. 4. Телевизионное изображение, полученное «Рейнджером-9», за 1 мин 12 с до жесткой посадки на дне кратера Альфонс.

Борозды и кратеры с темными гадо (по-видимому, мелкие пирокластические конусы) в северо-восточной части дна кратера видны так же четко, как и участок эродированной восточной стенки кратера. Размеры участка $28,3 \times 33,3$ км. Предоставлено НАСА, Лабораторией реактивного движения.

ских уступов, радиальных трещин и обширных полей выбросов. Относительный возраст морских бассейнов можно вывести на основании наложений или пересечений с другими элементами поверхности (фиг. 9). Предполагается, что эти структурные элементы и отложения выбросов образовались примерно одновременно с бассейнами в результате крупного ударного события; на лунной поверхности сформировались трещины, а в процессы кратерообразования были вовлечены грандиозные объемы лунных пород в форме широко распространенных отложений выбросов и обратных выпадений. При более детальном исследовании аналогичные наблюдения могут быть подтверждены практически по отношению ко всем лунным кратерам и всем

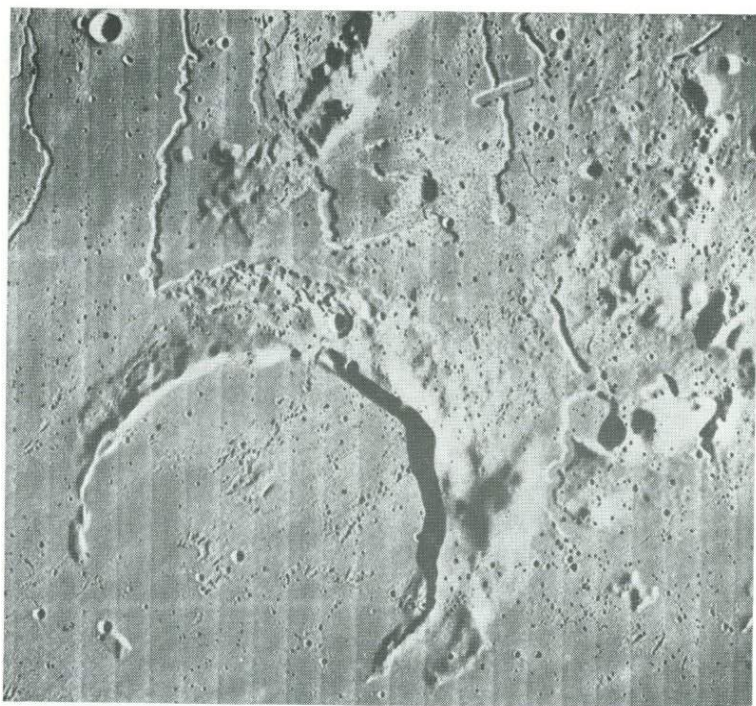


Фиг. 5. Проекция на сферу мозаики фототелевизионных изображений, переданных «Сервейором-7», совершившим посадку примерно в 29 км севернее кратера Тихо в южной материковой области.

Место посадки расположено на выбросах из кратера Тихо, вокруг которого интенсивно развита система лучей. Небольшой кратер на переднем плане имеет диаметр примерно 2 м и, по-видимому, образовался при ударе глыбы вторичных выбросов из какого-либо близлежащего кратера. Разрушенные фрагменты этой глыбы разбросаны вокруг кратера и в близлежащих окрестностях. В центральной части мозаики расстояние до горизонта составляет около 13 км. Предоставлено НАСА, Лабораторией реактивного движения.

районам. Относительный возраст устанавливается путем простого наблюдения над характером пересечения одной структуры или элемента другими. Тем не менее морские бассейны и связанные с ними выбросы представляются основными реперами в построении лунной стратиграфии.

Геологические комплексы, выделяемые на картах Луны, картировались на основании различий структуры поверхности, альbedo, окраски, относительного возраста и стратиграфического положения (там, где это было возможно). Кроме того, некоторые определения стратиграфических комплексов содержат малодоказательные, если не умозрительные, допущения или выводы о формировании или отложении тех или иных геологических формаций. Строго говоря, карты, построенные



Фиг. 6. Пример изображения, полученного космическим аппаратом серии «Лунар Орбитер».

Частично заполненный кратер Принц с исключительно сильно развитой системой извилистых риллей. Следует отметить также многочисленные вторичные кратеры и их скопления на поверхности моря. Изображение, переданное космическим аппаратом «Лунар Орбитер-5», предоставлено НАСА, Исследовательским центром Лэнгли.

на подобных принципах, не являются геологическими картами в земном понимании, когда на них выделяют подразделения с бесспорно различным литологическим составом. Однако можно вполне допустить, что образования, принадлежащие к одному и тому же стратиграфическому комплексу и имеющие один и тот же внешний вид, вероятно, имеют достаточно близкий литологический состав и иные свойства на всей площади, где они развиты. К этим свойствам, по-видимому, относятся структура, состав, минералогия, время отложения, история формирования структур или сочетание этих факторов. Как бы то ни было, трудно себе представить, как можно улучшить метод геологического картирования Луны при существующей скудности данных, поэтому многие карты построены лишь по мате-



Фиг. 7. Фотоснимок, выполненный камерой «Хассельблад» экипажем космического корабля «Аполлон-8».

Видны детали морфологии кратеров, борозды и грабены в пределах кратера Гоклений и вокруг него. Кратер расположен в восточной половине видимой стороны Луны с примерными координатами 45° в. д., 10° ю. ш. (север вверху снимка), диаметр его примерно 65 км. Предоставлено НАСА, Центром космических полетов им. Джонсона.

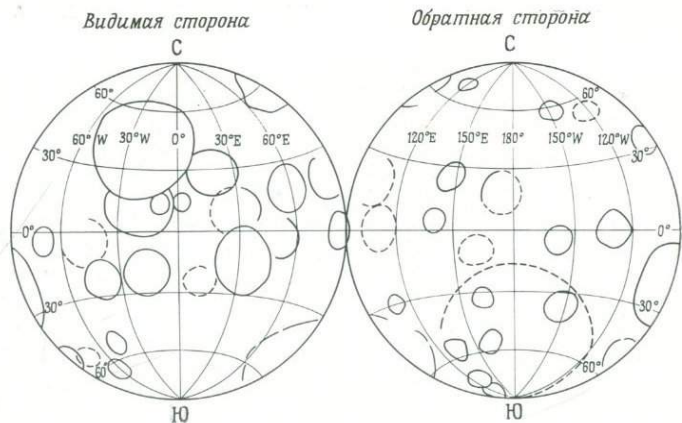
риалам телескопических наблюдений и снимков с космических аппаратов (фиг. 10). Что бы собой ни представляли закартированные стратиграфические комплексы, хочется надеяться, что образцы, отобранные в качестве характерных для выделенного на карте комплекса, будут в той или иной мере достаточно представительны и для всей площади развития такого стратиграфического комплекса. Сводная геологическая карта видимой стороны Луны была составлена Вильгельмсом и Мак-Коули как обычная геологическая карта (фиг. 11) [15]. Несмотря на то что при составлении большинства лунных геологических карт



Фиг. 8. Фотоснимок лунной поверхности, выполненный переносной камерой «Хассельблад» экипажем космического корабля «Аполлон-12», в центральной части видимой стороны Луны.

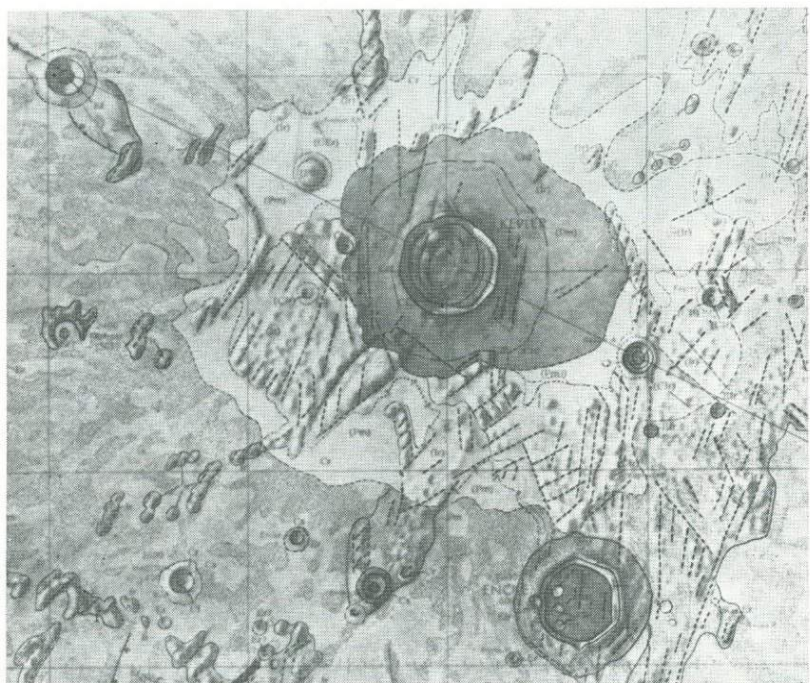
Цепочка вторичных кратеров, на переднем плане борозда Дэви. Два кратера на заднем плане и имеют поразительно разный возраст. Кратер слева (малый) сравнительно свежий и молодой, хотя выбросы и лучевые системы вокруг кратера едва заметны. Более древний (крупный) кратер имеет гораздо меньшую величину отношения глубины кратера к диаметру, гораздо более размытые контуры и разрушенный вал. Вид с юго-запада. Предоставлено НАСА, Центром космических полетов им. Джонсона.

не имелось данных, полученных непосредственно с поверхности Луны, допущения и интерпретации в основном разработаны с учетом крупномасштабной информации. Однако место посадки «Аполлона-16» выбиралось, по крайней мере частично, на основании таких геологических интерпретаций, которые, как выяснилось впоследствии, оказались не соответствующими действительности.

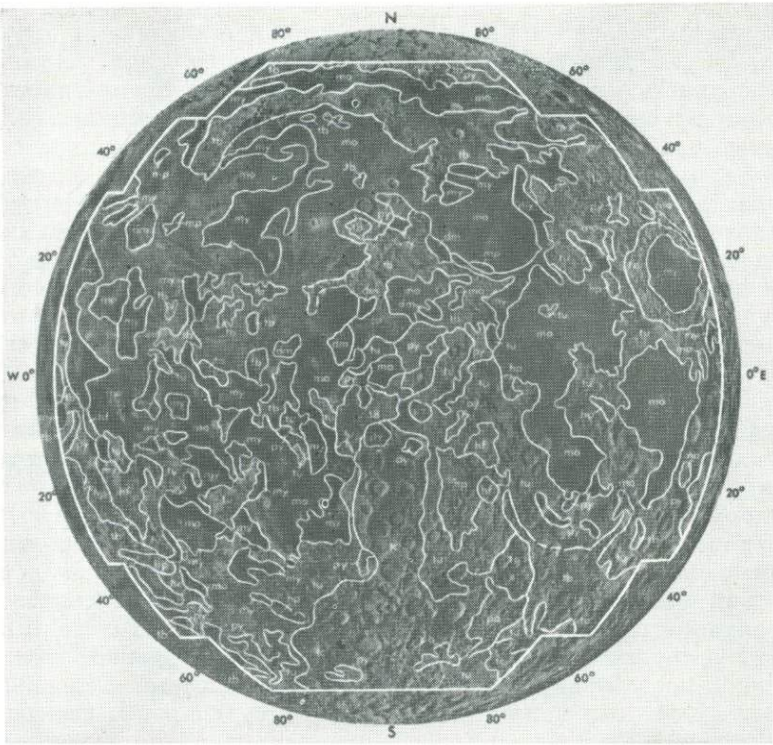


Фиг. 9. Крупные кольцевые и многокольцевые лунные бассейны.

Кружками обозначены главные кольца бассейнов. Покровы выбросов и структуры, связанные с этими бассейнами, составляют основу лунной стратиграфии. (Составили Д. Вильгельме, К. Хауорд, Д. Стюарт-Александр, В. Люччитта и М. Уэст, Геологическая служба США.)



Фиг. 10. Часть района кратера Кеплер на карте Луны, составленной Хакманом [41].



Фиг. 11. Геологические провинции видимой стороны Луны.

dm — темные покровы; *tr* — морские плато; *ty* — молодые моря; *to* — древние моря; *py* — молодые равнины; *po* — древние равнины; *hf* — холмистая и бороздчатая поверхность; *hp* — холмистая и ямчатая поверхность; *tb* — отложения выбросов из молодых бассейнов; *tu* — отложения нерасчлененные; *te* — интенсивно кратерированные поверхности. Сплошными линиями показаны границы провинций, пунктиром — там, где они скрыты под молодыми (незакартированными) отложениями. По Мак-Коули и Вильгельмсу [15]. Предоставлено издательством «Академик Пресс».

ПРИРОДА ЛУННОЙ ПОВЕРХНОСТИ

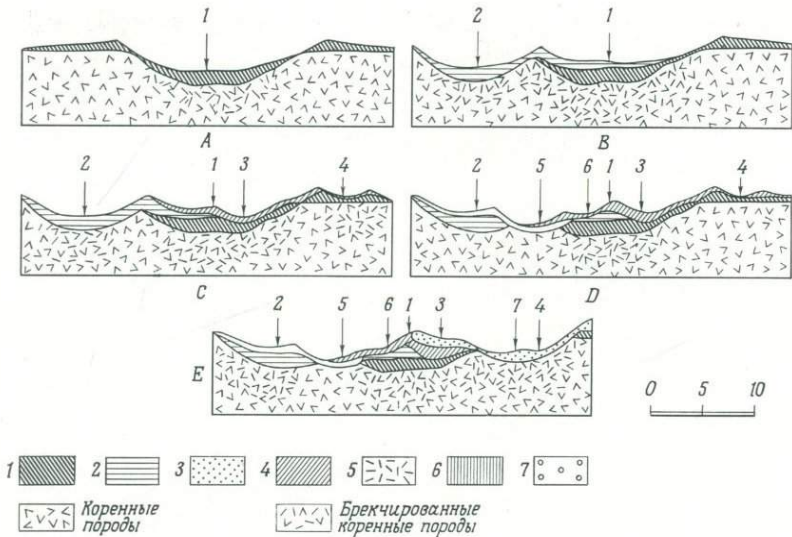
Несмотря на то что интерпретация геологических структур крупного масштаба казалась вполне правдоподобной, еще до получения крупномасштабных изображений космическими аппаратами «Рейнджер» и «Сервейор» и до доставки первых лунных образцов возник живой интерес к точному знанию природы лунной поверхности в малом масштабе. Большинство оптических, электрических, термических и механических свойств поверх-

ности обусловлено ее физическим состоянием, составом и структурой поверхностного и приповерхностного слоя. Лунная поверхность была предметом многих видов измерений дистанционными средствами, например, были получены данные о величинах альбедо, поляризации, радарные характеристики, сведения о вариации различных свойств с изменением фазового угла; всю эту информацию многократно пытались интерпретировать с целью получения представлений о структуре и химическом составе поверхности [16]. Однако, хотя эти данные и были предметом жарких споров между многими исследователями Луны, создать приемлемую модель лунной поверхности, которая получила бы широкое признание, не удалось, если не считать самой общей концепции.

Большинство исследователей обычно предполагали, что лунная поверхность покрыта слоем рыхлого несвязного материала (лунного реголита), состоящего из частиц, образовавшихся главным образом в результате эрозионной деятельности метеоритов, при вторичных выбросах и выносе вещества с поверхности. Возможными компонентами реголита, вероятно, также являются вулканический пепел или тефра (пирокластический материал). Состав, мощность, механические свойства, гранулометрический состав и внешний облик реголита было крайне трудно представить до получения информации, доставленной после прилунения первых аппаратов серии «Сервейор», поэтому все эти вопросы вызывали массу споров¹. Солсбери и Смолли [17] детально разработали модель грунта до осуществления мягких посадок и представляли себе лунную поверхность в виде комплекса перекрывающих друг друга покровов выбросов из лунных ударных кратеров (фиг. 12). Шумейкер [18], подобно многим другим геологам и астрономам, изучавшим Луну, согласился с этой моделью. Имеющаяся в распоряжении информация, полученная в результате исследований по программе «Аполлон», не оставляет сомнения в реальности подобной основной схемы строения реголита на значительной части поверхности Луны.

К сожалению, мощность реголита такова, что обнажения коренных лунных пород в действительности встречаются очень редко, по крайней мере в тех районах, которые оказались доступными для исследования при пилотируемых полетах и использовании сравнительно простых механизмов. Поэтому опробование лунной поверхности в известной мере представляет собой сложную статистическую задачу отбора образцов рых-

¹ Первые данные о характере лунного реголита были получены при мягкой посадке станции Луна-9 в феврале 1966 г. — *Прим. ред.*



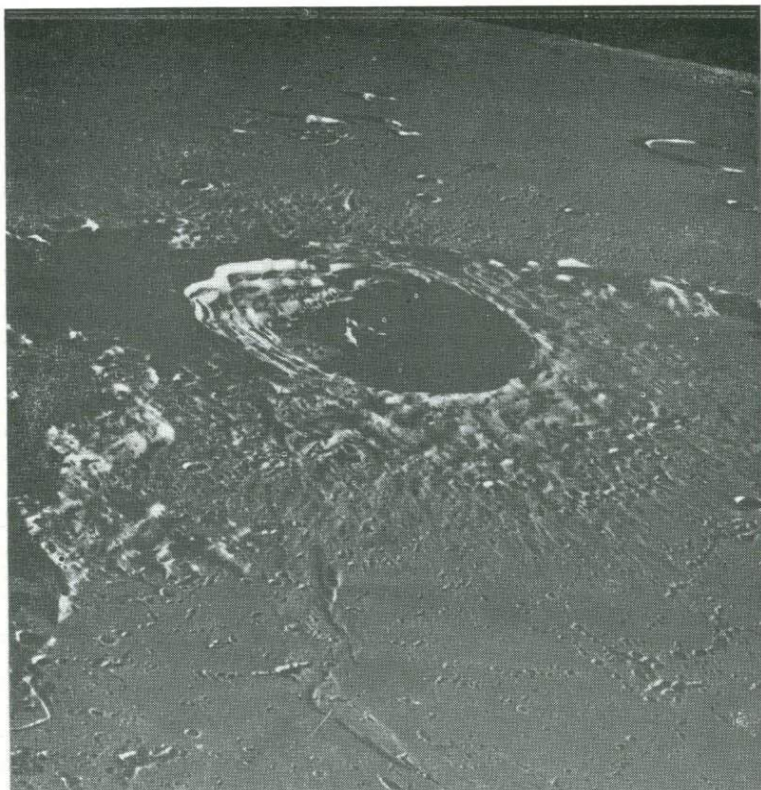
Фиг. 12. Диаграмма, показывающая сложное развитие стратиграфии реголита после семи ударных событий различного масштаба.

Предложено Солсбери и Смолли в 1964 г. [17] как модель эволюции реголита лунных материалов. Предоставлено издательством «Академик Пресс».

лого материала. Мощность реголита в месте посадки «Аполлона-11» составляет 3—6 м [19], «Аполлона-12», вероятно, около 2 м, в месте посадки «Аполлона-14» 8,5 м [20] и в других материковых областях еще больше.

ОЦЕНКА ВОЗРАСТА ПОВЕРХНОСТИ

Относительный возраст топографических элементов лунной поверхности, особенно кратеров, можно оценить по отчетливости морфологической выраженности их деталей, контуров и общего рельефа путем сопоставления с другими элементами того же размера. Чем дальше та или иная структура подвергается бомбардировке метеорными телами, тем более эродированный и «сглаженный» облик она приобретает. Поэтому кратеры с хорошо заметными лучевыми системами и очень четкими морфологическими деталями, такие, как Коперник, Тихо, Аристарх и Кеплер, можно считать сравнительно молодыми или поздними



Фиг. 13. Фотография кратера Эратосфен, сделанная при малой высоте Солнца над горизонтом камерой «Хассельблад».

Видны типичные черты морфологии крупного ударного кратера. Следует отметить многочисленные вторичные кратеры, образованные в результате выбросов из кратеров Эратосфен и Коперник; в особенности следует обратить внимание на структуры типа «сеledочных хребтов», что характерно для выбросов из вторичных кратеров (на переднем плане снимка). Справа в центре снимка видно юго-западное окончание Апеннин. Вид с северо-северо-запада на широкую равнину Моря Дождей (на горизонте) позволяет увидеть исключительно гладкий рельеф морской поверхности. Диаметр кратера Эратосфен, измеренный по валу, составляет приблизительно 66 км. Фотоснимок с «Аполлона-12». Предоставлено НАСА, Центром космических полетов им. Джонсона.

фиг. 13). Кратеры с размытыми контурами, сглаженной морфологией и без видимых лучевых систем, например Гассенди, Катарина, Кавендиш и Мавролик, существовали на поверхности Луны намного дольше и принадлежат к сравнительно древним (фиг. 2). Подобные принципы возрастных соотношений в качестве ключа к определению возраста кратеров и геологических

формаций, на которых они наблюдаются, были детально разработаны Поном и Оффилдом [21]. Они пришли к выводам наиболее общего порядка об относительном возрасте различных регионов видимой стороны Луны на основании выделения наиболее древних кратеров в пределах той или иной формации.

Допустим, что происхождение подавляющего большинства лунных кратеров связано с ударными событиями, вызванными падением метеороидов, астероидов и комет, а распределение ударных кратеров на поверхности является случайным. Тогда относительный возраст различных типов поверхности можно определить путем подсчета плотности кратеров (число кратеров на единицу площади). Чем дольше существует данная поверхность, тем больше кратеров может сформироваться в ее пределах. Первые подсчеты лунных кратеров были выполнены при использовании фотоснимков, полученных с помощью наземных телескопов [22, 23], при этом были учтены только кратеры с диаметром свыше 10 км. Эта работа была продолжена Эпиком [24] и охватывала кратеры с диаметром до 1 км, однако его подсчеты содержали значительные погрешности из-за недостаточного разрешения снимков, вариаций условий освещенности поверхности Луны и ряда других причин. Многие авторы довели статистическую обработку подсчетов и оценку погрешности до высокой степени совершенства [25]. Статистические подсчеты лунных кратеров коротко обсуждены в работе Шумейкера [18], который оценил возрасты метеоритной бомбардировки (экспозиционные возрасты) различных регионов Луны по распределению кратерных плотностей, вычисленных по изображениям, полученным с космических аппаратов серии «Рейнджер» и других. Ряд других авторов применяли те же методы в целях установления возраста различных участков лунной поверхности или частотного распределения размеров небесных тел во внутренней части Солнечной системы на ранних этапах геологической истории [26]. Однако этот метод содержит достаточно большие погрешности в определении *абсолютного* возраста лунной поверхности в частности: а) частота распределения размеров метеороидов в окололунном космическом пространстве в современную эпоху и в прошлые геологические эпохи в основном неизвестна; б) многие лунные кратеры могут иметь вулканическое, вторичное, провальное или иное происхождение, что при подсчетах ни подтвердить, ни отвергнуть не представляется возможным; в) как скорость, так и масса тела, падение которого вызвало образование того или иного кратера, неизвестны. Абсолютные ошибки, присущие этому методу, выявились при оценках возрастов морских поверхностей по данным подсчета кратеров, которые были выполнены непо-

средственно перед доставкой образцов с Луны на Землю. Оказалось, что большинство оценок давали значения возраста на порядок меньше, чем оказалось в действительности. Обзор данных, полученных после завершения программы «Аполлон», и переоценка истории лунного кратерообразования приведены в работе Хартмана [27]. После выполнения радиологического датирования различных участков лунной поверхности на материале доставленных с Луны образцов оказалось, что интенсивность потока крупных тел в окололунном пространстве уже на ранних этапах развития Солнечной системы стала быстро убывать.

ВРЕМЕННЫЕ ЯВЛЕНИЯ НА ЛУННОЙ ПОВЕРХНОСТИ

Описание изменений и временных явлений на поверхности Луны имеет длительную историю. Многие из таких сообщений сделаны любителями или неизвестными наблюдателями, поэтому установить их достоверность не представляется возможным. Однако ряд наблюдений был выполнен опытными и квалифицированными наблюдателями. Сэр Уильям Гершель в 1783 г. описал явление вблизи кратера Аристарх, которое он принял за «извержение вулкана». Позднее он же наблюдал три ярких пятна на той части диска Луны, которая была освещена пепельным светом. Сообщения подобного типа в литературе довольно многочисленны, среди наблюдателей можно назвать Гудакра, Пикеринга, Торнтона, Уилкинса, Олтера и ряд других. В работе Мура [28] приведен обзор предшествующей литературы, где описаны изменения лунной поверхности и даже проведена оценка разрешающей силы и оптических характеристик старых инструментов, чтобы определить, *могли ли* в самом деле наблюдатели видеть те явления, о которых они сообщали.

Сведения об одном из наиболее интересных и хорошо задокументированных современных наблюдений над временными лунными явлениями содержатся в сообщении Козырева [29], который получил спектрограмму временного явления на центральной горке кратера Альфонс. Согласно визуальным наблюдениям Козырева, во время съемки спектрограммы яркость центральной горки была выше обычной [30].

Другое важное наблюдение ярких пятен и цветовых явлений на Луне было сделано в 1963 г. Гринакром и Барром [31] с помощью рефракторного телескопа с диаметром объектива 61 см в Обсерватории Лоуэлла. В двух различных случаях в кратере Аристарх и вокруг него исследователи наблюдали цветовые пятна розового и красного цвета (эти данные были подтверждены

рядом других наблюдений); они также видели, как сразу вслед за исчезновением красных пятен в кратере появилась фиолетово-синеватая дымка [32].

Временные явления, как правило, наблюдают в пределах кратерных валов, центральных горок и вокруг границ морских бассейнов, т. е. там, где чаще всего встречаются крутые склоны. Для объяснения таких явлений было выдвинуто немало гипотез, а в настоящее время представляется наиболее вероятным связывать их с результатом поверхностной или близповерхностной люминесценции силикатов и газов, вызванной, по-видимому, солнечной радиацией [33]. Крайне сомнительно, чтобы такие процессы могли быть непосредственно связаны с лунной вулканической деятельностью.

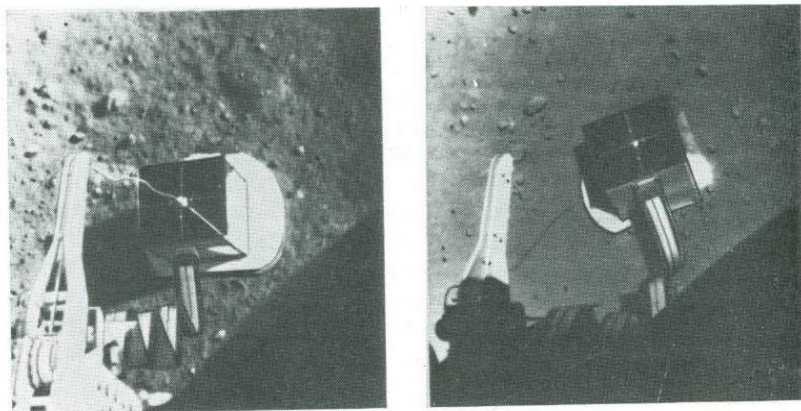
АНАЛИЗ ЛУННЫХ ОБРАЗЦОВ

ВВЕДЕНИЕ

До получения результатов прямых анализов лунной поверхности с помощью эксперимента по обратному рассеянию α -частиц нашим единственным ключом к установлению валового химического состава Луны была вычисленная величина ее плотности ($3,34 \text{ г/см}^3$)¹. В эксперименте по обратному рассеянию α -частиц [34] использовался источник α -частиц, направленных таким образом, чтобы они могли падать на лунную поверхность. Энергия большинства этих α -частиц при обратном рассеянии регистрировалась детектором, при этом величины энергии были пропорциональны весам атомных ядер элементов, входящих в состав лунного вещества. Кроме того, в результате ядерных реакций между α -частицами и ядрами легких элементов появляется некоторое количество протонов. Методика анализа с помощью обратного рассеяния α -частиц была выбрана для полетов серии «Сервейор» из-за своей простоты и высокой вероятности того, что прибор сможет функционировать после прилунения. Различать ядра легких элементов этой методикой достаточно просто; однако спектры тяжелых элементов обнаруживают тенденцию к сближению, поэтому такие компоненты определяются как единая группа или несколько групп.

Предварительные результаты эксперимента по обратному рассеянию α -частиц, осуществленного космическим аппаратом

¹ Первые сведения о составе пород Луны были получены по естественной радиоактивности K, U, Th при γ -съемке с орбиты станции «Луна-10» в марте 1966 г. — *Прим. ред.*

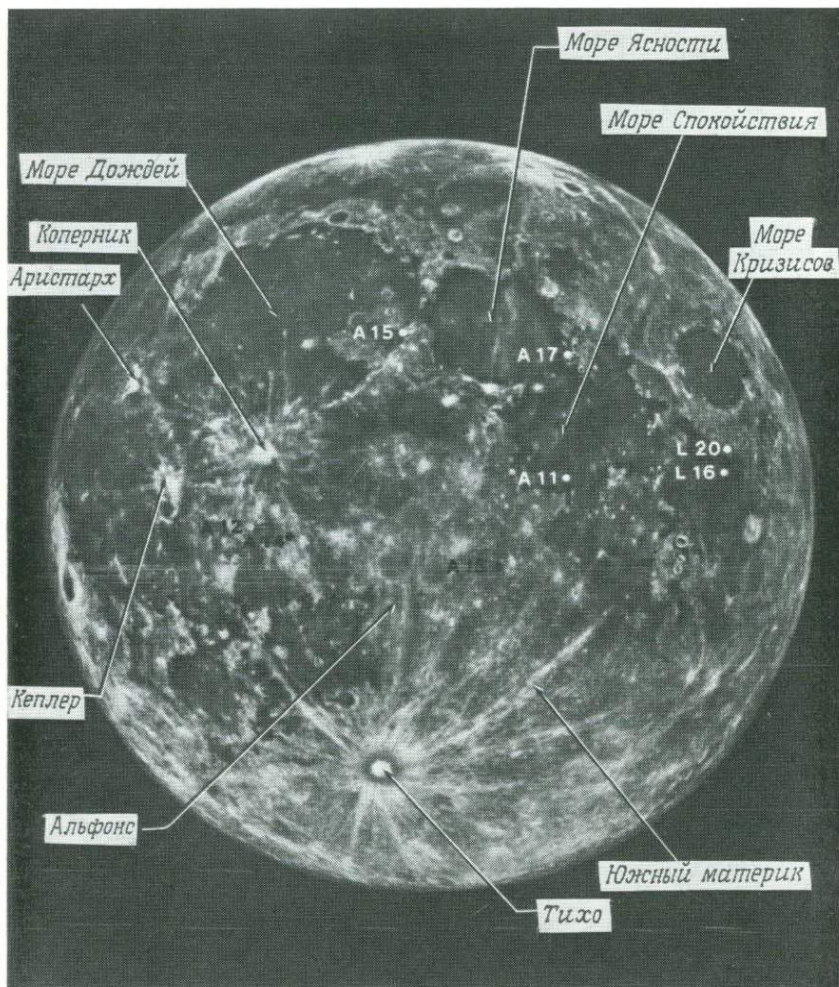


Фиг. 14. Два фототелевизионных изображения эксперимента с прибором по обратному рассеянию α -частиц (главный конструктор д-р А. Туркевич, Чикагский Университет), вынесенным на поверхность Моря Спокойствия с космического аппарата «Сервейор-5».

На снимке слева видно исходное положение прибора; на снимке справа — положение прибора для следующего анализа после запуска ракетного двигателя аппарата и его работы в течение $1/2$ с. По мере движения прибора вниз и вправо по склону (наклон 19°) его фланец слегка зарывается в поверхностный слой. При движении прибор немного поворачивается в направлении против часовой стрелки. Совершенно очевидно, что при этом многие мелкие фрагменты и комки на лунной поверхности также приходят в движение. Предоставлено НАСА, Лабораторией реактивного движения.

«Сервейор-5» (фиг. 14), прилунившегося в Море Спокойствия (23° в. д., 1° с. ш.), показали, что состав поверхности отвечает базальту [35]. Более поздние результаты обработки тех же спектров были опубликованы непосредственно перед высадкой «Аполлона-11» в Море Спокойствия. Оказалось, что поверхность не только имеет базальтовый состав, но и содержит аномально высокие концентрации титана [36]. Научная общественность в большинстве своем игнорировала это сообщение, не поверив результатам, однако впоследствии анализы образцов, доставленных «Аполлоном-11», подтвердили, что анализ «Сервейора» был точен. Хорошие результаты были получены при повторении аналогичных анализов во время полетов космических аппаратов «Сервейор-6» и «Сервейор-7» [37]. Однако анализы с помощью автоматических космических средств могут дать только общую характеристику лунного вещества, а детальные исследования доставленных на Землю образцов остаются для земных лабораторий.

Полеты космических кораблей «Аполлон-11», «Аполлон-12», «Аполлон-14», «Аполлон-15», «Аполлон-16», «Аполлон-17» завершились успешным прилунением и доставкой образцов для детальных исследований (табл. I).



Фиг. 15. Фотография Луны в полнолуние, полученная с помощью наземных средств.

Показаны точки посадки космических аппаратов серий «Аполлон» и «Луна», доставивших образцы лунных пород. Следует отметить различия в альbedo между темными, сравнительно некратерированными морями и яркими, сильно кратерированными поверхностями материков. Лучи сравнительно молодых лунных кратеров, таких, как Тихо (юг, центральная часть), выглядят как отчетливые поверхностные образования при высоких углах Солнца и едва заметны при освещении под острыми углами. Предоставлено Ликской обсерваторией.

Таблица I Вес лунных образцов, доставленных каждой экспедицией по программе «Аполлон»

Экспедиция	Вес образцов, кг
«Аполлон-11»	20,7
«Аполлон-12»	34,1
«Аполлон-14»	42,8
«Аполлон-15»	76,6
«Аполлон-16»	95,4
«Аполлон-17»	110,4
Примерный общий вес	380,0

Кроме того, автоматические межпланетные станции, запущенные в Советском Союзе («Луна-16», «Луна-20»), доставили несколько сот граммов лунных образцов из других районов восточного полушария Луны (фиг. 15). Результаты анализа лунных образцов изложены во многих статьях [38], где помимо обсуждения самих материалов содержится немало широких обобщений. Однако следует помнить, что мы пытаемся представить историю и происхождение довольно крупного планетного тела по образцам только из восьми точек и приборным данным только с одной стороны этого тела.

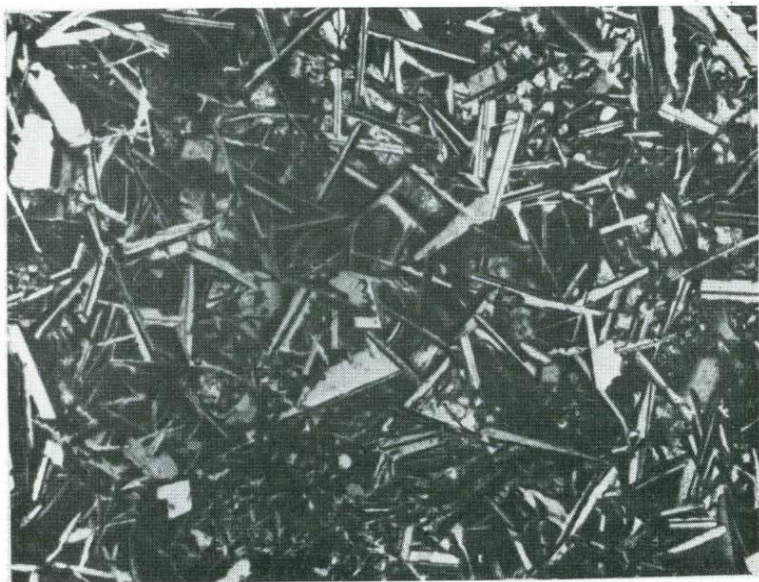
Материал, доставленный с Луны, можно грубо подразделить на три категории:

1. Кристаллические породы со структурой изверженных пород.
2. Несвязный мелкозернистый материал (называемый также грунтом¹ и тонкозернистой фракцией реголита).
3. Брекчи и микробрекчи.

КРИСТАЛЛИЧЕСКИЕ ПОРОДЫ СО СТРУКТУРОЙ ИЗВЕРЖЕННЫХ ПОРОД

Достаточно громоздкое название этого типа лунных образцов необходимо для точности. Хотя большая часть таких образцов, по-видимому, представляет собой обычные изверженные породы (в общепринятом смысле), которые являются продуктом

¹ Рыхлый несвязный грунт Луны в советской литературе в целом принято называть реголитом. Для его тонкозернистой фракции американскими исследователями применяется термин «fines»; верхний предел размеров этой фракции оценивается по-разному.— *Прим. ред.*



Фиг. 16. Шлиф образца № 14 310,214.

Несмотря на то что порода как будто имеет обычную для изверженных пород структуру, ведется широкая дискуссия относительно ее возможного происхождения из импактного расплава. При одном никеле, длина поля зрения примерно 3 мм.

кристаллизации и затвердевания магм на поверхности Луны или близ нее, другая часть образцов, хотя и имеет практически ту же структуру, представляет собой закристаллизованные ударные расплавы. Например, к таким породам [39] может относиться образец 14 310¹ (фиг. 16).

В местах посадок в пределах морей (с «Аполлона-11», «Аполлона-12», «Аполлона-15» и «Аполлона-17» доставлены только образцы с равнин) изверженные породы представлены преимущественно базальтами или микрогаббро и сложены в основном тремя главными минералами: кальциевым плагиоклазом, клинопироксеном и ильменитом (табл. II). Многие из этих пород,

¹ На первый взгляд система нумерации лунных образцов может показаться таинственной. На самом деле, первые две цифры в номерах образцов, доставленных «Аполлоном-11», всегда 10; для «Аполлона-12» — это 12; для «Аполлона-14» — 14; для «Аполлона-15» — 15. Нумерацию образцов с «Аполлона-16» и «Аполлона-17» начинают соответственно с цифр 6 и 7. Часто встречаются такие номера, как 14 310,24, что означает 24-ю порцию, фракцию или иную долю от образца 14 310.

Таблица II Минералогические модальные анализы некоторых морских пород со структурой изверженных пород¹ (в об.%)

	№ образца		
	10 017	10 045	10 058
Клинопироксен ²	59,4	53,2	45,7
Плагиоклаз	25,1	26,9	37,1
Оливин	—	3,1	—
Кристаллит	Следы	1,8	5,1
Окислы Fe и Ti (в основном ильменит)	14,5	11,3	10,5
Троилит	0,36	1,3	0,27
Железо	0,04	0,18	0,03

¹ Заимствовано из работы Брауна и др. (1970): Mineralogical, chemical and petrological features of Apollo 11 rocks and their relationship to igneous processes: Proc. Apollo 11 Lunar Sci. Conf., Geochim. et Cosmochim. Acta, Suppl. 1, 4, A. A. Levinson, ed., p. 197, Pergamon Press.

² В том числе пироксферроит (9,3% в обр. № 10 045; присутствует во всех образцах). Подсчеты выполнены в проходящем свете и скорректированы после подсчета в отраженном свете (примерно 2300 подсчетов в каждом образце на площади около 3 см²).

особенно более мелкозернистые разности, содержат также оливин в качестве главного или второстепенного компонента. Этим породам свойственны структуры самого широкого диапазона: офитовые, субофитовые, равномернозернистые, интерсертальные, харризитовые, диктитакситовые, вариолитовые и интрафасцикулярные. Размер зерен в этих породах варьирует от 0,1 до более чем 1 мм, а некоторые образцы содержат отдельные кристаллы плагиоклаза и (или) пироксена длиной более 1 см. Ряд пород имеет порфиоровую структуру, однако в большинстве случаев размеры кристаллов достаточно близки. В некоторых породах обнаружены структуры, указывающие на быстрое охлаждение на каком-то этапе их становления (фиг. 17). Многие лунные породы, вероятнее всего, охлаждались весьма быстро при излиянии магмы на поверхность Луны в виде лавовых потоков. Структуры и основные черты минералогии ряда морских пород со структурами изверженных пород показаны на фиг. 17—20.

В породах лунных материков обычно проявляется тенденция содержать плагиоклаза больше, чем в морских породах; представлены материковые породы анортозитами, троктолитами, норитами или габбро, обогащенными плагиоклазом. В литературе употребляется немало других названий пород, однако все они, как правило, относятся к упомянутой ассоциации. На фиг. 21—24 приведены фотографии некоторых типичных



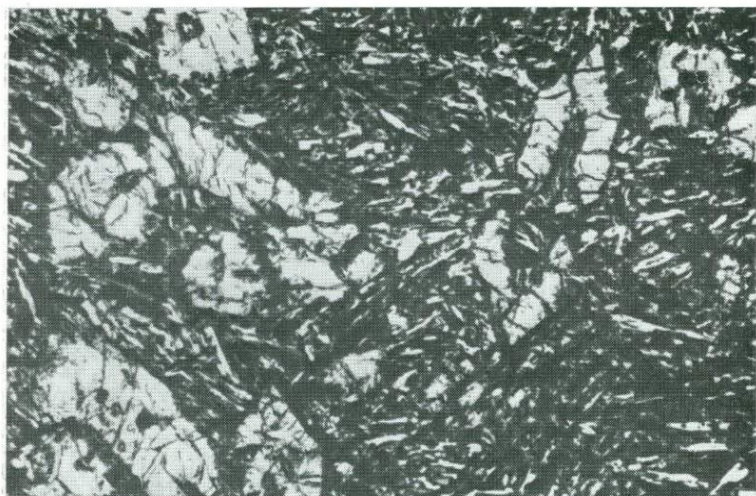
Фиг. 17. Оливиновый витрофир № 12 009.

Проявлена структура быстрой кристаллизации оливина. Здесь оливин присутствует в виде двух морфологических типов, отличающихся также и по размерам. Футляровидные кристаллы содержат включения расплава, в то время как рост некоторых других кристаллов происходил параллельно с более крупными индивидами. При одном николе, длина поля зрения примерно 3 мм.



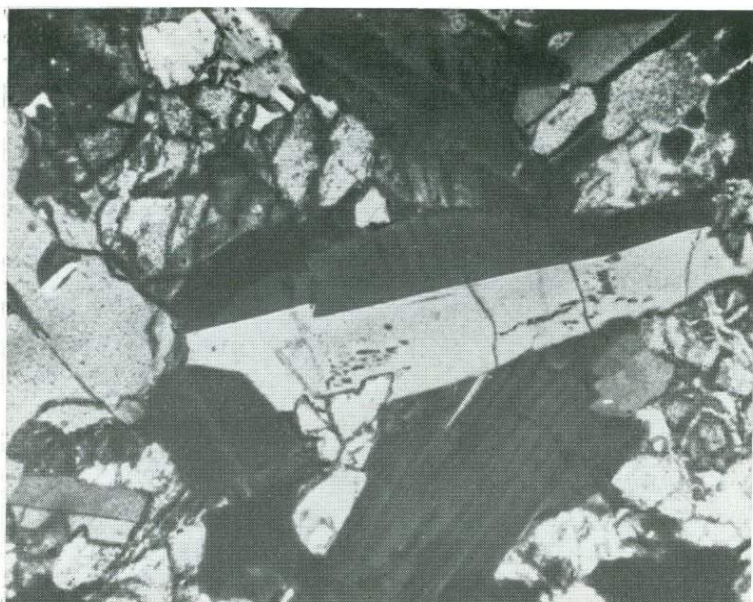
Фиг. 18. Шлиф образца № 12 002,157.

Здесь и на фиг. 19 и 20 представлены микрофотографии горных пород из лунных морей, иллюстрирующие большое разнообразие структур и размеров зерен. Видны радиально-лучистые и пучковидные (интрафасцикулярные) кристаллы плагиоклаза и пироксена. Длина поля зрения 3,2 мм, николи скрещены.



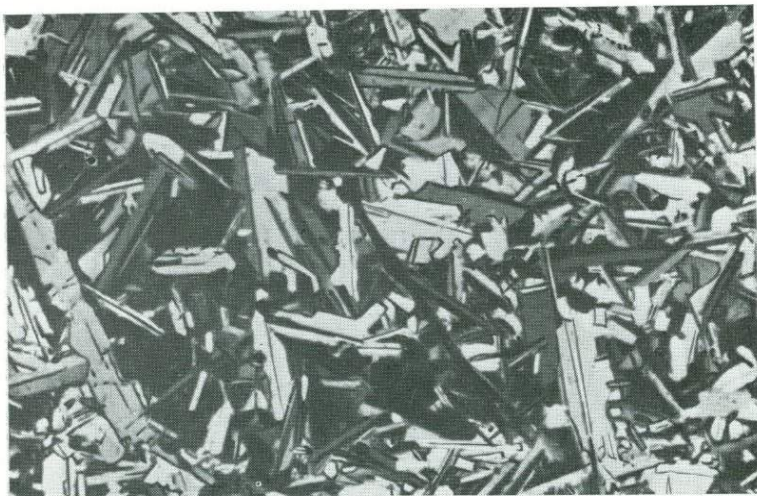
Фиг. 19. Шлиф образца № 12 052,89.

Наблюдаются вкрапленники оливина, которые при реакции с основной массой, очевидно, образуют клинопироксен; основная масса имеет трахитовую структуру и сложена плагиоклазом и пироксеном. При одном николе, длина поля зрения 3,2 мм.



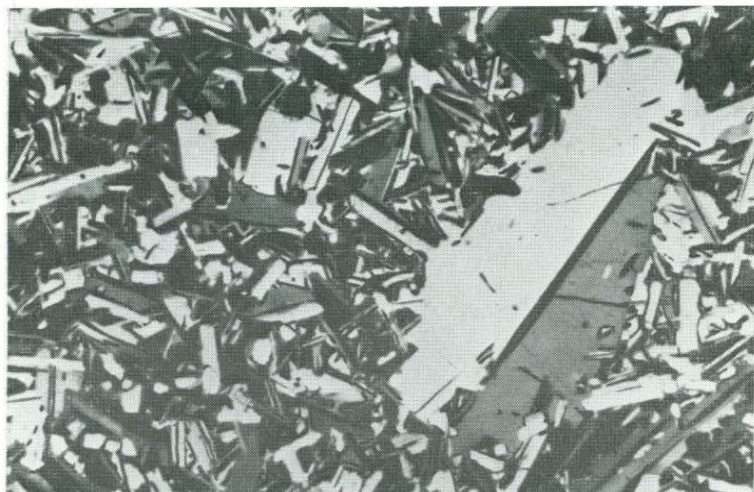
Фиг. 20. Шлиф образца № 12 040,5, представленного сравнительно грубозернистым базальтом.

Длина поля зрения примерно 3,2 мм, николи скрещены.



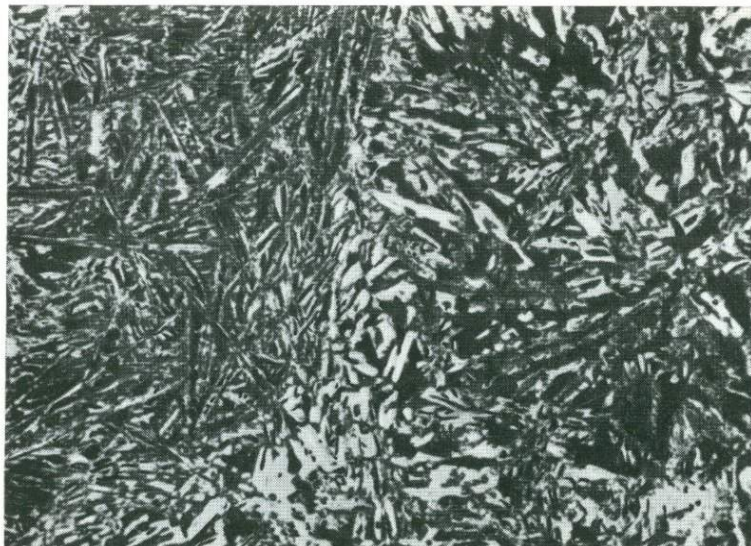
Фиг. 21. Анортозитовое габбро (образец № 68 415).

Образец отобран на южном материке экипажем «Аполлона-16», николи скрещены, длина поля зрения 3,2 мм.



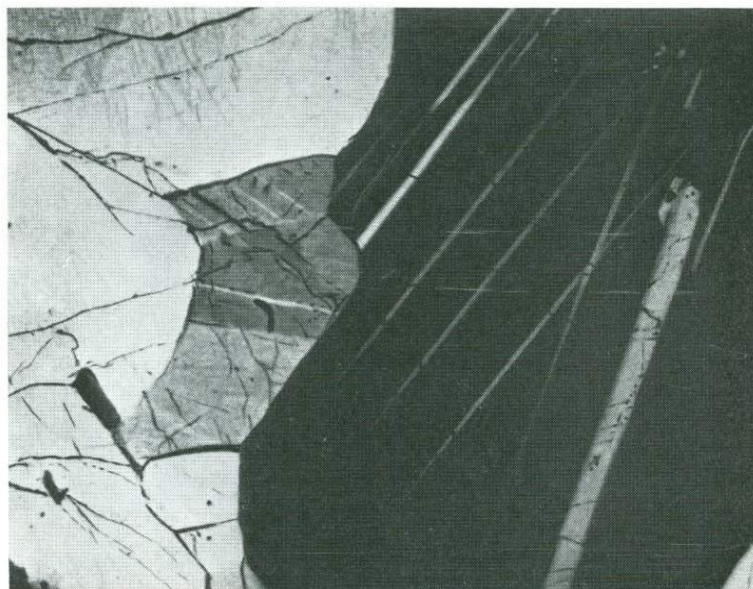
Фиг. 22. Анортозитовое габбро (образец № 68 416).

Пояснения те же, что к фиг. 21.



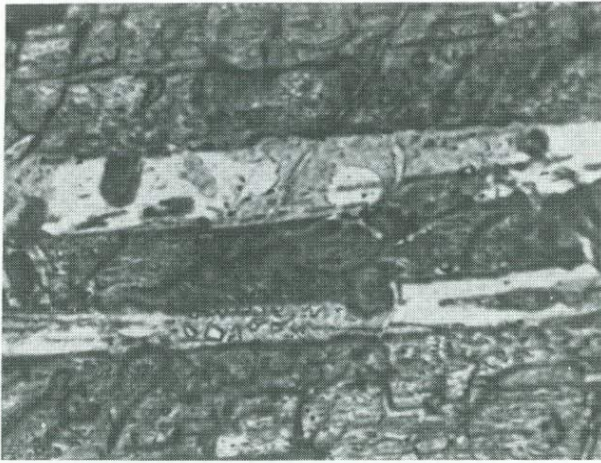
Фиг. 23. Норит (образец № 62 295,69).

Структура изменчивая, от интерстициальной до вариолитовой и интрафасцикулярной; порода содержит сложные взаимные прорастания плагиоклаза (~57%) и ортопироксена (~24%), широко развит мезостазис (~16%), содержащий микрокристаллиты и стекло. При одном николе, длина поля зрения 3,2 мм.



Фиг. 24. Грубозернистый норит (образец № 76 535).

Порода содержит примерно 60% кальциевого плагиоклаза и 40% ортопироксена. Никולי скрещены, длина поля зрения 3,2 мм.

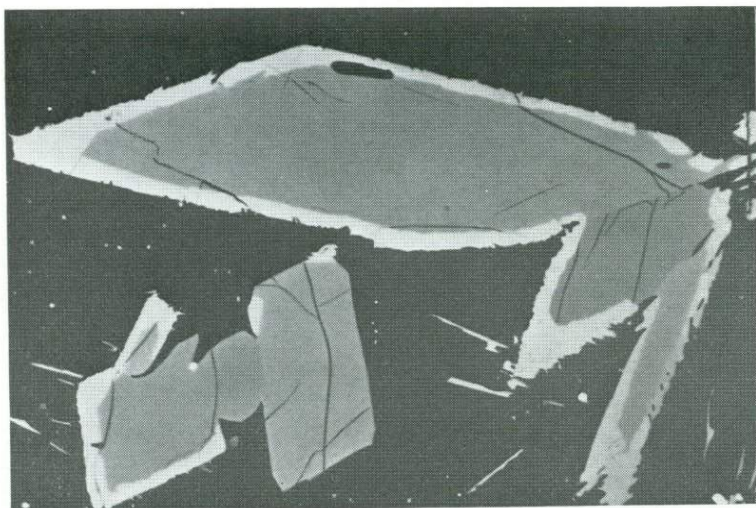


Фиг. 25. Пироксферроит в ассоциации с плагиоклазом (образец № 12 021).

Минерал имеет желтый цвет, относится к триклинной сингонии и представляет собой железистый аналог пироксмангита. Пироксферроит был обнаружен при предварительном изучении образцов «Аполлона-11» в Лунной приемной лаборатории и принадлежит к распространенным минералам некоторых морских базальтов. При одном никеле, длина поля зрения примерно 0,8 мм.

материковых пород, иллюстрирующие типы их структур и минералогический состав.

Химический состав отдельных минеральных фаз практически идентичен составу этих минералов в аналогичных земных породах: плагиоклаз в основном близок к $An_{90} \pm 5$; оливин — $Fo_{85} \pm 10$; ильменит близок к идеальному с составом $FeTiO_3$; состав пироксенов варьирует практически в пределах всей известной четырехугольной диаграммы; здесь встречаются авгиты, субкальциевые авгиты, ферроавгиты, пижониты и некоторые ортопироксены. Кроме того, в образцах, доставленных «Аполлоном-11», был обнаружен новый высокожелезистый пироксенонд, названный пироксферроитом (фиг. 25) [40]. Этот минерал был обнаружен по яркожелтой окраске Группой предварительного исследования материалов с «Аполлона-11». В некоторых образцах он встречен в большом количестве. Состав многих из проанализированных кристаллов пироксферроита близко соответствует формуле $(Fe_{0,85}Ca_{0,15})SiO_3$, но вообще состав минерала изменяется в широком диапазоне, обычно в небольшом количестве в нем содержатся магний и марганец. К числу второстепенных минералов в лунных изверженных породах относятся: калиевый полевой шпат, кристобалит, тридимит, кварц,

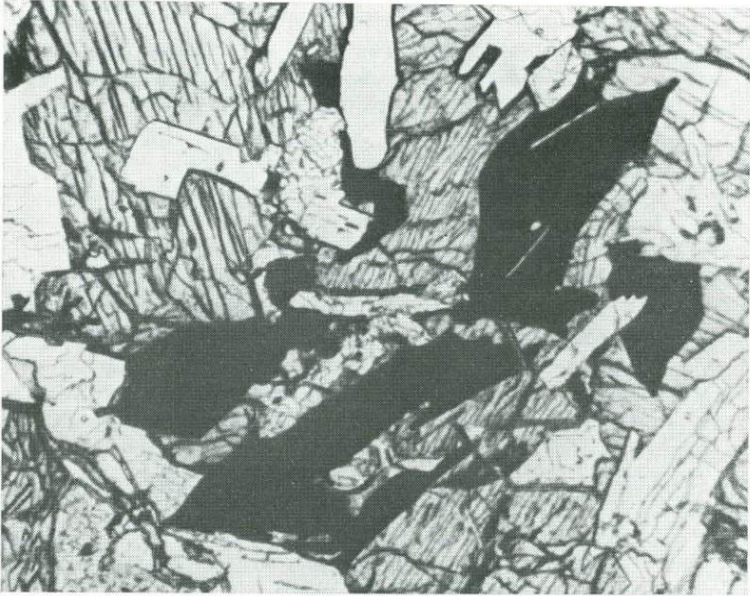


Фиг. 26. Армалколит (серый), окаймленный ильменитом (белый), в шлифе образца № 74 242, доставленного «Аполлоном-17».

Отраженный свет, длина поля зрения примерно 0,2 мм. Предоставлено А. Эль Горези.

бадделейт, самородное железо, троилит, шпинель, перовскит, рутил, фаялит, хромит, ульвошпинель, апатит, циркон и несколько очень редко встречающихся минералов. Еще один новый минерал, встреченный в лунных образцах, был назван армалколитом¹ (фиг. 26) и часто встречается с ильменитом в виде сопутствующей фазы [41]. Состав армалколита варьирует незначительно и в большинстве случаев хорошо укладывается в обобщенную формулу $(\text{Fe}_{0,5}\text{Mg}_{0,5})\text{Ti}_2\text{O}_5$. Армалколит изоструктурен с псевдобрукитом. В образцах, доставленных «Аполлоном-11» и «Аполлоном-12», описан также новый минерал транквиллитит (фиг. 27) [42]. Эта фаза была обнаружена несколькими группами исследователей, которые опубликовали совместное описание минерала. Приблизительная формула транквиллитита $\text{Fe}_8^{2+}(\text{Zr} + \text{Y})_2\text{Ti}_3\text{Si}_3\text{O}_{24}$, но он содержит также небольшие количества Ca, Al, Mn, Cr, Nb, Hf, U и редкоземельных элементов. Минерал имеет красно-бурю окраску, полупрозрачен, не плеохроирует, изотропен или слабо анизотропен. Показатель преломления в среднем равен примерно

¹ Назван по первым буквам фамилий членов экипажа космического корабля «Аполлон-11» (Армстронг, Олдрич, Коллинс). После нахождения минерала в лунных образцах он был найден и в земных породах.

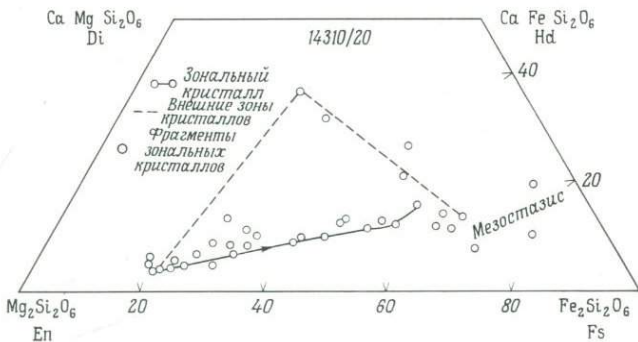


Фиг. 27. Микрофотография транквиллитита (непрозрачный) в проходящем свете, образец № 10 047.

В тонких срезах минерал имеет характерный красно-бурый цвет, но в шлифах нормальной толщины непрозрачен. Минерал обычно выделяется в виде пластинок и пучковидных агрегатов, общие размеры которых не превышают 100 мкм; ассоциируется с поздними интерстициальными минеральными фазами. При одном николе, длина поля зрения примерно 250 мкм.

2,12, а теоретическая плотность около 4,7 г/см³. Транквиллитит выделяется в виде тонких пластинок и сноповидных агрегатов, максимальный размер которых обычно не превышает 100 мкм. Вероятно, этот минерал кристаллизуется на поздних стадиях и ассоциируется с веществом мезостазиса. Вместе с транквиллититом присутствуют стекло, щелочной полевой шпат, троилит, железо, пироксферроит и тридимит/кристобалит. Предварительный рентгеноструктурный анализ показал, что его структура относится к новому классу и совершенно не связана с какими-либо структурными типами земных минералов. Кроме того, обнаружен ряд фаз, которые почти наверняка окажутся новыми минералами. Однако из-за отсутствия кристаллографических данных им еще не присвоены названия.

Породообразующие минералы. Ниже следует описание каждого из четырех породообразующих минералов лунных пород. Более детальное обсуждение других лунных минералов при-



Фиг. 28. Крайне широкие вариации составов лунных пироксенов показаны на диаграмме их составов по материалам *одного* образца № 14 310,20.

Диаграмма представляет собой «пироксеновый четырехугольник», т. е. часть тройной системы $Mg_2Si_2O_6 - Fe_2Si_2O_6 - Ca_2Si_2O_6$. Перепечатано из статьи Брауна и др., опубликованной в Proc. Third Lunar Sci. Conf., Geochim. et Cosmochim. Acta, Suppl. 3, 1, p 143, с разрешения издательства Массачусетского технологического института, Кеймбридж, Массачусетс, США).

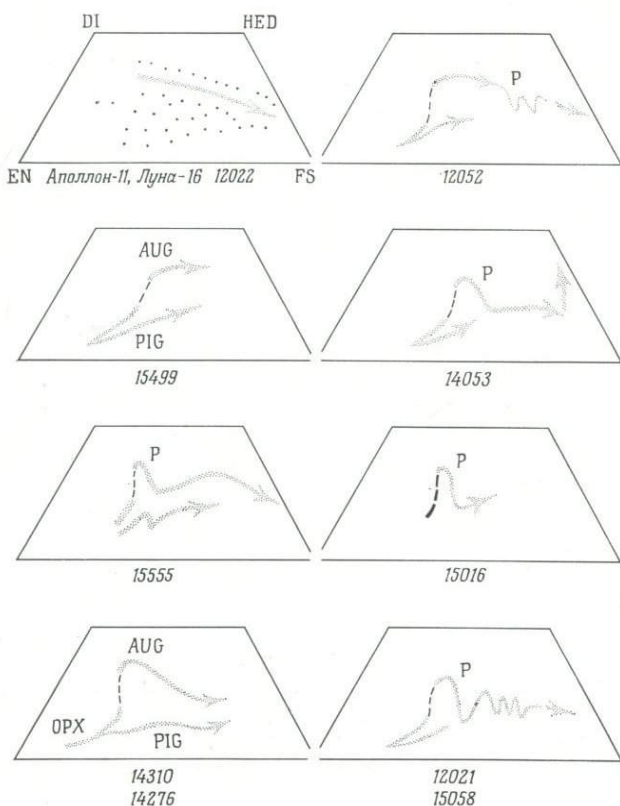
водится в различных томах Трудов научных конференций по Луне [38].

Лунный плагиоклаз фактически ничем не отличается от кальциевого плагиоклаза многих земных плутонических мафических пород. Некоторые из материковых лунных пород более чем на 85% сложены модальным плагиоклазом. Крайне часто встречается двойникование по альбитовому закону, однако нередко наблюдаются карлсбадские, альбит-карлсбадские и периклиновые двойники; отмечен один случай правого двойникования по бавенскому закону [43]. Ширина отдельных двойниковых полосок в полисинтетических двойниках изменчива в широком диапазоне, несмотря на то, что колебания содержания анионной молекулы невелики. Состав большинства лунных плагиоклазов варьирует приблизительно от An_{97} до An_{85} . Оптические характеристики лунных плагиоклазов и сопоставление их с составом главных химических элементов и структурным состоянием в одном и том же зерне также аналогичны известным соотношениям в земных образцах [43, 44]. Анализы элементов-примесей, выполненные Смитом [45], показали, что можно выделить ряд групп плагиоклазов, отличающихся по содержанию в них железа, калия и магния. Зональность в лунных плагиоклазах лишь изредка выявляется с помощью оптических методов; однако в некоторых зернах действительно наблюдается тенденция к образованию каемок, обогащенных калием. Лунные плагиоклазы обнаруживают большое разнообразие габит-

тусов кристаллов и структур. Таблитчатые, лейстовидные и изометрические зерна встречаются особенно часто и, вероятно, отражают различия условий кристаллизации, а иногда и последующую историю. В отдельных случаях наблюдаются пойкилитовые кристаллы плагиоклазов с включениями пироксена, ильменита и других минералов. В нескольких образцах плагиоклаз развивается вокруг зерен пироксена [46]. Такая структура была названа интрафасцикулярной и, по-видимому, является продуктом быстрой скелетной кристаллизации плагиоклаза, сопровождаемой кристаллизацией полностью (или частично) заключенных в плагиоклазе порций расплава [47].

Пироксены лунных пород характеризуются широким разнообразием составов (фиг. 28) — здесь обнаружены: ортопироксен, авгит, ферроавгит, субкальциевый авгит и пироксферроит (точнее, пироксеноид). Некоторые из лунных пироксенов содержат значительное количество титана, до 7 вес. % в образцах пород из сборов «Аполлона-11» и «Аполлона-17». По-видимому, часть титана в лунных пироксенах находится в трехвалентной форме, в то время как в земных породах титан входит в пироксены в виде Ti^{4+} . Этот вывод основан на интерпретации спектров кристаллического поля [48] и на других методах исследований, в том числе на расчетах формулы минералов по данным анализа главных элементов. Во многих лунных породах присутствуют кристаллы авгита, содержащие пластинки пижонита, образовавшиеся при распаде твердого раствора; в кристаллах бронзита наблюдаются пластинки авгита такого генезиса. Изучение ориентировки и размеров пластин — продуктов распада твердого раствора и других микроструктур лунных пироксенов привело к представлениям о ходе охлаждения ряда лунных пород в области субсолидуса [49]. На основе этих данных можно предполагать, что некоторые лунные породы по крайней мере трижды подвергались разогреванию, что, вероятно, можно связывать с проявлением ударного метаморфизма умеренных масштабов.

В немногих образцах встречаются кристаллы пироксена длиной более 2 см, которые обычно имеют пойкилитовую структуру. В некоторых крупных кристаллах проявлена структура песочных часов. Бенс и Папике [50] провели исчерпывающие исследования зональности лунных пироксенов с целью установления возможных кристаллизационных трендов лунных базальтов по результатам изучения зональности (фиг. 29). Распределение Fe и Mg в лунных ортопироксенах отвечает положениям M_1 и M_2 в структуре минерала, причем некоторые образцы обогащены алюминием. Иногда встречается обрастание ортопироксенов пижонитом. Например, многие кристаллы пироксенов в образце 14 310 имеют кайму, сложенную сдвойнико-



Фиг. 29. Кристаллизационные тренды лунных пироксенов, нанесенные на «пироксеновый четырехугольник» [50], см. фиг. 28).

Составы минералов изменяются в широких пределах, а пути кристаллизации весьма разнообразны. Перепечатано с разрешения издательства Массачусетского технологического института, Кеймбридж, Массачусетс, США.

ваным магниальным пижонитом, вокруг бронзита с двойниковой плоскостью {100}. Такие взаимоотношения пироксенов отсутствуют в морских базальтах и служат полезным индикатором для установления кристаллизационного тренда в некоторых материковых породах [51]. В целом рентгеновские исследования распределения катионов и кристаллической структуры ортопироксенов в районе Фра-Мауро (место посадки «Аполлона-14») показали, что эти ортопироксены совершенно идентичны земным ортопироксенам из вулканических пород [51]. Остальные лунные пироксены из обломков брекчий, собранных в местах посадки «Аполлона-14» и «Аполлона-15», представлены

более крупными незональными кристаллами и, возможно, сформировались в плутоно-метаморфических процессах [52].

Ильменит представляет собой главный компонент практически всех морских образцов, а его содержание в некоторых породах достигает 48 модалных процентов. Однако в большинстве образцов содержание этого минерала не превышает нескольких процентов, причем наибольшие содержания отмечены в образцах морских пород коллекции «Аполлона-11» и «Аполлона-17». Вероятно, состав большинства образцов лунного ильменита близок к идеальной формуле (FeTiO_3), а титан находится в четырехвалентной форме, однако ильменит из некоторых образцов (например, 14 053), вероятно, содержит часть титана в трехвалентном состоянии [53]. Эти особенности, по-видимому, связаны с кристаллизацией данной породы в более восстановительных условиях, чем на Земле. Кристаллы ильменита обычно таблитчатые, образуют удлиненные пластины, нередко скелетные и дендритовидные; последние особенно часто встречаются в образцах коллекции «Аполлона-11». Ильмениты редко имеют зональное строение, обычно они полностью гомогенные, однако в отдельных случаях отмечены пластины распада твердого раствора — это пластинки TiO_2 , по-видимому, рутила [54].

Оливины лунных пород в основном принадлежат к форстеритам, однако в мезостатическом материале ряда образцов отмечен и фаялит. Составы большинства проанализированных оливинов соответствуют Fo_{85} плюс-минус приблизительно 10 мол. %. Содержание Са и Сг позволило выделить ряд различных групп лунных оливинов. Оливины с высоким содержанием Са, по-видимому, соответствуют вулканическим условиям кристаллизации, в то время как низкие содержания Са по аналогии с земными породами отражают формирование оливина в плутонических условиях. Точно так же низкие или высокие содержания Сг могут говорить о различной окислительной обстановке [45]. По-видимому, Сг в лунных оливинах в значительной мере представлен двухвалентной $\frac{1}{2}$ формой, что, вероятно, отражает крайне восстановительные условия кристаллизации лунных пород. Пока нельзя еще распознать группы оливинов, различающихся по содержанию Тi или Mn, правда, и общее количество анализов оливина пока довольно ограничено.

Формы выделения и габитус кристаллов лунных оливинов довольно разнообразны. Совершенно поразительна по структуре порода образца № 12 009 (фиг. 17), где наблюдаются кристаллы оливина двух различных габитусов — скелетные и футляровидные, — содержащие включения основной массы. Исследование оптической ориентировки микролитов оливина в образце № 12 009 показало, что существуют лишь слабовыраженные направления, общие для всех кристаллов; это позволяет



Фиг. 30. Волокнистый клинопироксен, кристаллизующийся за счет вкрапленников оливина, образец № 12 052.

При одном николе, длина поля зрения примерно 3,2 мм.

отбросить предположение о том, что движение расплава относительно кристаллов играло заметную роль [55]. Габитус кристаллов оливина из образца № 12 009 отмечался во многих других фрагментах лунных пород, что, по-видимому, указывает на пересыщенность расплава оливиновой молекулой и очень высокую скорость охлаждения. Некоторые оливины, особенно из коллекций «Аполлона-11» и «Аполлона-12», обнаруживают отчетливые признаки резорбции и замещения пироксеном (фиг. 30); однако такую структуру объясняют также исходя из допущения о кристаллизации пироксена после его нуклеации на внутренней поверхности стенок скелетного кристалла оливина. Содержание оливина в лунных породах колеблется от нуля до 91 модального процента (например, № 72 415) в образце брекчированного дунита из коллекции «Аполлона-17». Обогащенные оливином обломки найдены среди мелких фрагментов горных пород (фракции 1—4 мм) и среди брекчий, собранных во всех местах посадки. Мелкие идиоморфные кристаллы оливина присутствуют в стеклах и найдены в частично закристаллизованных стеклянных шариках.

Химический состав. Для выявления доминирующего петрохимического типа лунных пород было проделано немало аналитических исследований. Однако количество отдельных образцов со структурой изверженных пород, которые можно было проанализировать, сравнительно невелико, причем многие из них, возможно, представляют собой продукты кристаллизации ударных расплавов и поэтому не репрезентативны для состава магм из недр Луны. Анализы образцов лунных изверженных пород группы базальтов приведены в табл. III [56]. Рейд и др. [57]

Таблица III Содержание главных элементов в лунных базальтовых породах и средний состав лунных базальтов со структурой изверженных пород (в вес.%)

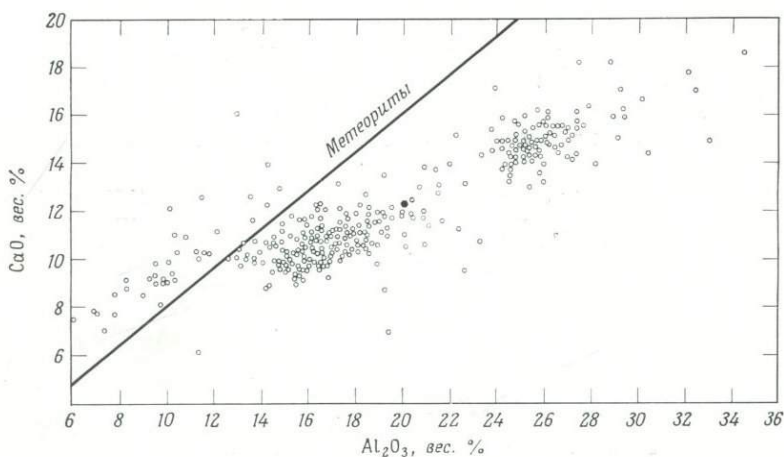
	Средний состав ¹			15 085,34 ²	15 555,157 ²
	«Аполлон-11»	«Аполлон-12»	«Аполлон-14»		
SiO ₂	40,40	47,40	47,70	46,39	44,75
Al ₂ O ₃	8,60	12,80	21,44	5,79	9,85
Fe ₂ O ₃	0,00	0,00	0,00	—	—
FeO	18,90	17,40	7,78	26,75	23,40
MgO	7,74	6,80	7,29	8,20	8,03
CaO	10,70	11,40	13,05	9,12	10,72
Na ₂ O	0,46	0,64	0,70	0,21	0,30
K ₂ O	0,30	0,07	0,48	0,07	0,09
TiO ₂	12,20	3,17	1,16	3,07	2,64
P ₂ O ₅	0,2	0,17	0,42	0,09	0,07
MnO	0,25	0,24	0,11	0,37	0,32
Cr ₂ O ₃	0,37	0,31	0,25	0,67	0,77

¹ По Розе и др. [56].

² По Мейсону и др. [56].

использовали кластер-анализ при обработке данных по стекловатым частицам с целью выявить наиболее предпочтительный химический состав лунных пород. Эти исследователи и ряд других ученых пришли к выводу о существовании по меньшей мере двух главных неморских типов пород: а) анортозитовые габбро (их также называют континентальными базальтами, полевошпатовыми базальтами, габбро-анортозитами и т. п.); б) базальты Фра-Мауро (их называют KREEP ¹ и другими терминами). Неморские породы характеризуются высоким содержанием Al₂O₃, низким FeO и Cr₂O₃ и низким отношением кальция к алюминию по сравнению с морским материалом (фиг. 31). Составы морских стекол из всех мест посадки в области морей постоянно образуют аналогичный рой точек на различных гео-

¹ Термин KREEP составлен из символов химических элементов, которыми обогащен этот тип пород: калий (K), редкоземельные элементы (REE) и фосфор (P); кроме того, в этих породах содержатся повышенные количества других второстепенных и рассеянных элементов.

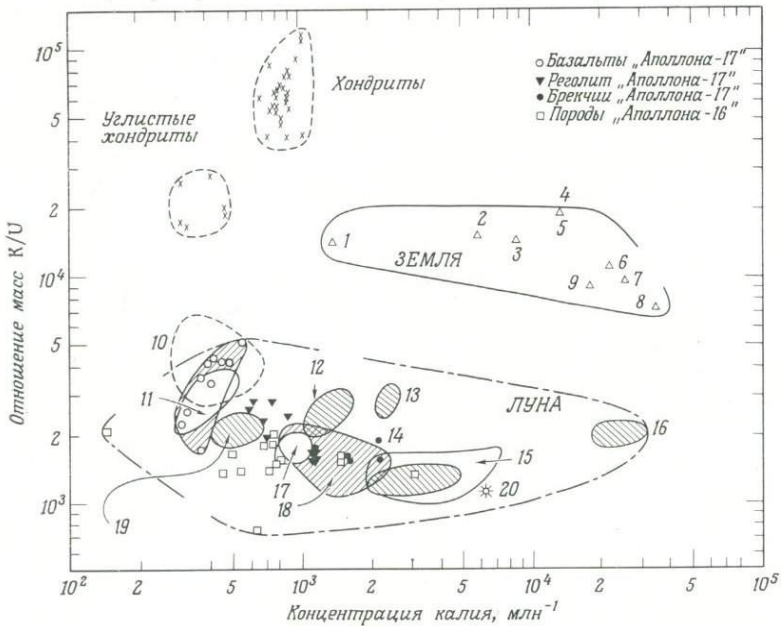


Фиг. 31. График зависимости содержания CaO (в вес. %) от содержания Al_2O_3 (в вес. %) в стеклах реголита с места посадки «Аполлона-14».

Выделяющиеся две группы точек могут относиться к двум совершенно различным типам материнских пород. Состав образца лунной породы № 14 310 показан в виде черного шестиугольника. Типичные величины отношений CaO/Al_2O_3 в метеоритах показаны в виде диагональной прямой. Аналогичные графики построены для других элементов по данным анализов на электронном микронзонде и для образцов из других мест посадки; отмечена та же тенденция группировки точек в областях, отвечающих главным типам лунных пород. Перепечатано из работы Рейда и др. [57] с разрешения издательства Массачусетского технологического института, Кеймбридж, Массачусетс, США.

химических диаграммах. Остальные типы горных пород как в материковых, так и в морских областях распространены мало, однако отмечаются отдельные петрохимические составы, представляющие определенный интерес.

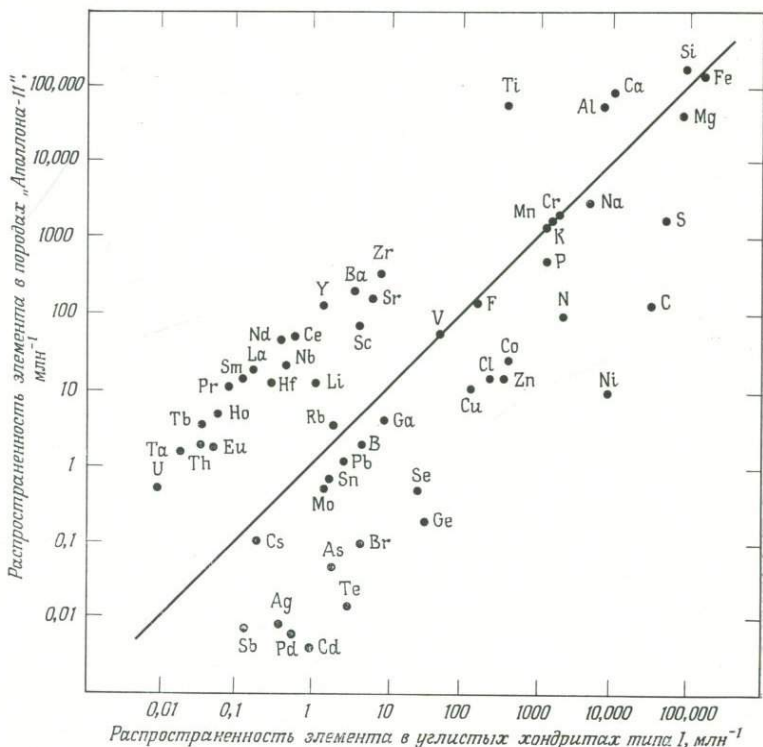
Анализы первых доставленных на Землю лунных образцов уже позволили выделить ряд геохимических тенденций и особенностей лунных пород. В целом в лунных породах со структурой изверженных пород наблюдается тенденция к обеднению щелочами и некоторыми летучими элементами (висмутом, ртутью, цинком, кадмием, таллием, свинцом, германием, хлором и бромом) по сравнению с предполагаемыми кларками этих элементов на Солнце и в родственных типах земных пород. В то же время лунные породы, вероятно, обогащены тугоплавкими элементами, такими, как титан, скандий, цирконий, гафний, иттрий и трехвалентные редкоземельные элементы. Такой химический состав значительно отличается от состава любого известного типа метеоритного вещества. Много внимания было уделено обнаруженному в образцах, доставленных «Аполлоном-11» и «Аполлоном-12», факту резкого обеднения европием по сравнению со всеми другими редкоземельными элементами [58].



Фиг. 32. Диаграмма зависимости отношения масс К/У от концентрации калия в лунных образцах и других объектах Солнечной системы.

Характеристики углистых хондритов, вероятно, ближе всего отвечают составу первичного вещества Солнечной системы, а характеристики лунных образцов близки только к данным для некоторых эвкритов. Из работы J. S. Elridge, G. D. O'Kelley, K. L. Northcutt, 1974, *Primordial radioelement concentrations in rocks and soils from Taurus-Littrow Lunar Sci. Conf., Geochim. et Cosmochim. Acta, Suppl. 5, 2, p. 1029*; предоставлено издательством «Пергамон Пресс». 1 — океанские толситы; 2 — андезиты Сайпан (Геохимический тип андезитов с о-ва Сайпан, Марианские о-ва, выделен С. Тэйлором. Характеризуется низким содержанием К, Rb и легких лантаноидов.— Перев.); 3 — базальты; 4 — андезиты; 5 — щелочные базальты; 6 — тектиты; 7 — гранодиориты; 8 — граниты; 9 — средние породы; 10 — эвкриты; 11 — базальты с «Аполлона-15»; 12 — реголит + брекции «Аполлона-11»; 13 — базальты «Аполлона-11» с высоким содержанием К; 14 — брекции + реголит «Аполлона-12»; 15 — брекции + реголит с «Аполлона-14»; 16 — гранитоид, обр. № 12 013; 17 — реголит «Аполлона-16»; 18 — брекции, реголит с «Аполлона-15»; 19 — базальты с низким содержанием К с «Аполлона-12» и «Аполлона-11»; 20 — КРЕЕП-базальты (обогащенные калием, редкими землями и фосфором).

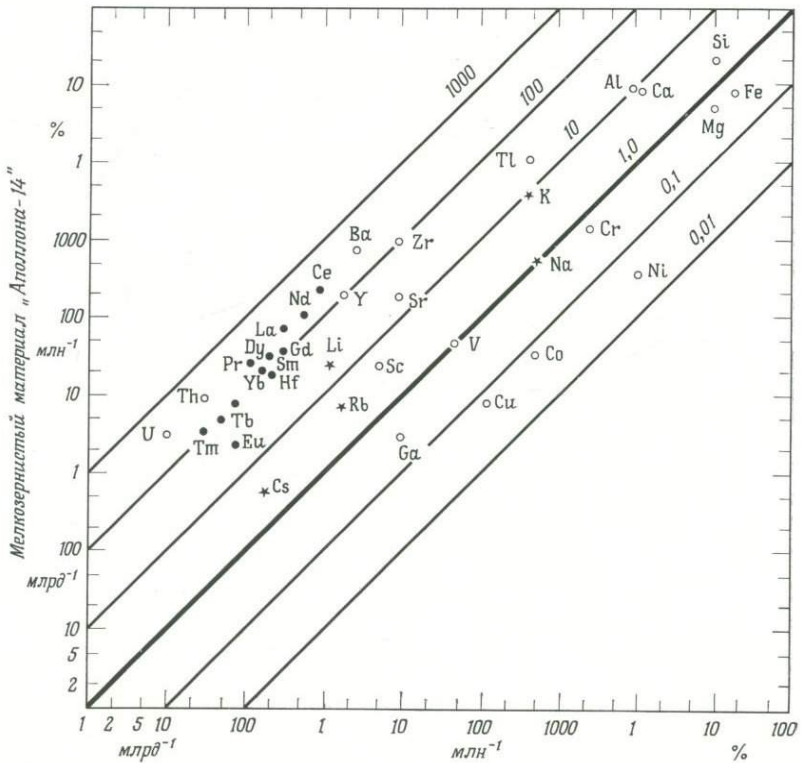
Однако оказалось, что для многих материковых пород, обогащенных полевым шпатом, характерны положительные пики европия, что, по-видимому, объясняется двухвалентным состоянием этого элемента в лунных условиях и вхождением его в лунные плагиоклазы при изоморфном замещении Ca^{2+} , в то же время в земных породах европий представляет собой трехвалентный катион. Сопоставление распространенности химических элементов в лунных породах с их предполагаемыми кларками в первичном веществе Солнечной системы и в других объектах показано на фиг. 32—34.



Фиг. 33. Сопоставление распространенности элементов в кристаллических породах, доставленных «Аполлоном-11», и в углистых хондритах типа I.

Диаграмма построена в логарифмическом масштабе по обоим осям. Точки, расположенные на диагональной прямой, означают, что данный элемент имеет одинаковую распространенность в обоих природных объектах. Выше диагонали расположены элементы, распространенность которых в лунных породах выше, чем в углистых хондритах, а ниже этой диагонали показаны элементы, которыми лунные породы обеднены. Данная диаграмма построена на основании предположения о том, что первичная распространенность элементов в Солнечной системе в первом приближении отвечает их распространенности в углистых хондритах. Заимствовано из кн. *Mason B., and W. I. Melson, 1970, The Lunar Rocks, John Wiley and Sons, New York, p. 151*; есть русск. перевод: *Мэйсон Б., Мелсон У., Лунные породы, изд-во «Мир», 1973.*

По изотопному составу лунные образцы также несколько отличаются от земных пород и метеоритов. Особенно значительные отличия, обусловленные воздействием космического и солнечного облучения, наблюдаются в изотопном составе пород на лунной поверхности. Прямое воздействие космических лучей и солнечной радиации высоких энергий допускает протекание взаимодействия атомов с высокой энергией, что приводит к накоплению ^{26}Al , ^{22}Na , ^{54}Mn , ^{56}Co , ^{48}V , ^{60}Co и других нуклидов.



Фиг. 34. Сопоставление распространенности элементов в образцах тонкозернистой фракции материала, доставленного «Аполлоном-14» (фракция менее 1 мм), и углистых хондритах.

Диаграмма построена в билогарифмическом масштабе. Точки, расположенные на жирной диагональной прямой, означают, что данный элемент имеет одинаковую распространенность в обоих природных объектах; выше диагональной линии расположены элементы, распространенность которых в мелкозернистом материале «Аполлона-14» выше, чем в углистых хондритах типа I, а ниже этой линии показаны элементы, которыми лунные образцы обеднены. Остальные диагональные прямые указывают на различные коэффициенты обогащения и обеднения согласно обозначенным цифрам. Предполагается, что первичная распространенность элементов в Солнечной системе в первом приближении отвечает их распространенности в углистых хондритах типа I. Перепечатано из работы: *Taylor S. R. et al., Composition of the lunar uplands: Chemistry of Apollo 14 samples from Fra Mauro; Proc. Third Lunar Sci. Conf., Geochim. et Cosmochim. Acta, Suppl. 3, 2, p. 1244, 1972;* с разрешения издательства Массачусетского технологического института, Кеймбридж, Массачусетс, США.

Анализ γ -излучения лунных образцов был выполнен О'Келли и др. [59] и другими исследователями (табл. IV). На основании определений количества и относительной концентрации различных нуклидов, образовавшихся при воздействии космического излучения, указанные авторы пришли к выводу, что экс-

Таблица IV Анализы γ -излучения валовых проб пород и мелкозернистого материала, доставленного «Аполлоном-11» *

	№ образца							
	10 057-1	10 072-1	10 003-0	10 017-0	10 018-1	10 019-1	10 021-1	10 002-6
Вес	897	399	213	971	211,5	234	157	301,5
Объемный вес	$2,73 \pm 0,14$	$2,37 \pm 0,24$	$2,88 \pm 0,35$	$3,00 \pm 0,15$	$2,0 \pm 0,2$	$2,02 \pm 0,15$		$1,55 \pm 0,05$
K**	2550 ± 130	2300 ± 120	480 ± 25	2430 ± 120	1420 ± 70	1200 ± 60	1600 ± 80	1100 ± 60
Th**	$3,30 \pm 0,20$	$2,80 \pm 0,17$	$1,01 \pm 0,06$	$3,25 \pm 0,18$	$2,30 \pm 0,20$	$1,90 \pm 0,19$	$2,50 \pm 0,25$	$1,92 \pm 0,10$
U**	$0,79 \pm 0,06$	$0,76 \pm 0,06$	$0,26 \pm 0,03$	$0,83 \pm 0,07$	$0,60 \pm 0,09$	$0,43 \pm 0,06$	$0,54 \pm 0,08$	$0,49 \pm 0,04$
^7Be	< 70		< 100	< 60				< 80
^{22}Na	41 ± 4	46 ± 5	41 ± 4	39 ± 4	55 ± 8	47 ± 7	55 ± 8	51 ± 5
^{26}Al	75 ± 8	73 ± 8	74 ± 8	73 ± 8	108 ± 16	101 ± 15	110 ± 15	120 ± 12
^{44}Ti	$< 2,5$	$< 2,5$		$2,1 \pm 1,3$				$< 2,5$
^{46}Sc	10 ± 2	8 ± 2	13 ± 3	13 ± 3	13 ± 4	10 ± 3	13 ± 4	8 ± 2
^{48}V			12 ± 9	11 ± 7				
^{52}Mn			35 ± 20					
^{54}Mn	32 ± 6	20 ± 4	35 ± 7	33 ± 7	38 ± 10	28 ± 9	33 ± 21	28 ± 7
^{58}Co	31 ± 8	40 ± 10	43 ± 10	26 ± 7	33 ± 10	35 ± 10	21 ± 6	40 ± 7
^{60}Co				$1,1 \pm 0,8$			50 ± 15	

* По О'Келли и др. [59]. Для короткоживущих нуклидов принята поправка на радиоактивность в момент времени 0000 часов по центральному пояскому времени 21 июля 1969 г.

** В качестве стандарта при анализе на Th и U приняты величины земной распространенности изотопов. Кроме того, предполагается существование радиоактивного равновесия в рядах распада Th и U; содержание K, Th и U выражены в млн. $^{-1}$.

Примечание: Вес образцов указан в граммах, объемный вес — в г/см³, результаты анализа γ -излучения выражены числом распадов в минуту на 1 кг образца.

Возраст. Интересно, что разброс цифр среднего возраста лунных пород варьирует в сравнительно узком промежутке времени, составляющем примерно 600 млн. лет. Кроме того, датировкой не обнаружено никаких очень молодых лунных изверженных пород. Представляется, что интенсивное излияние мощных потоков лунных базальтов началось через какой-то неизвестный промежуток времени (~ 500 млн. лет) после формирования Луны и внезапно завершилось примерно 3,3 млрд. лет назад.

По мнению Тера и др. [62], распределение значений возрастов лунных пород свидетельствует о том, что в истории Луны примерно 3,95 млрд. лет назад произошел катаклизм, вероятно связанный с Имбрийским ударным событием. Возраст Луны оценивают примерно в 4,6 млрд. лет, поскольку многие рубидий-стронциевые модельные возрасты реголита и пород (в том числе и морских базальтов) близки к этой величине [62]. При интерпретации возрастов лунных пород следует помнить, что образцы были очень малы. Кроме того, истинный возраст морских пород, вероятно, более древний, чем тот, который удалось определить. В самом деле, в любом месте посадки в пределах лунных морей образцы, принадлежащие к самым верхним (наиболее молодым) лавовым потокам, должны значительно преобладать над породами, представляющими первые лавовые заполнения морских бассейнов. Точно так же среди образцов, доставленных с лунных материков, по-видимому, преобладают выбросы из наиболее молодых крупных бассейнов, т. е. Моря Дождей и, вероятно, Моря Восточного. Тем не менее брекчированный дунит (образец № 72 417) датируется возрастом 4,6 млрд. лет по внутренней Sr/Rb изохроне.

История кристаллизации. Минеральные ассоциации лунных пород, такие, как ильменит — троилит — самородное железо, свидетельствуют о кристаллизации этих пород из крайне сухих и бедных кислородом расплавов. Последовательность образования парагенезисов непрозрачных минералов свидетельствует о закономерном увеличении восстановительного характера среды с понижением температуры при кристаллизации расплавов, из которых сформировались многие лунные породы [63]. Наиболее достоверные оценки летучести кислорода в процессе кристаллизации некоторых лунных пород сводятся к интервалу 10^{-13} — 10^{-14} атм, причем приводятся многочисленные доказательства процессов восстановления в области субсолидуса [64]. В некоторых образцах пород, доставленных «Аполлоном-14» (№ 14 053, 14 072), обнаружено субсолидусное восстановление хромистой ульвошпинели с образованием ассоциации ильменит + алюмосодержащий хромит + самородное железо. Существование подобных минеральных ассоциаций, равно как и прак-

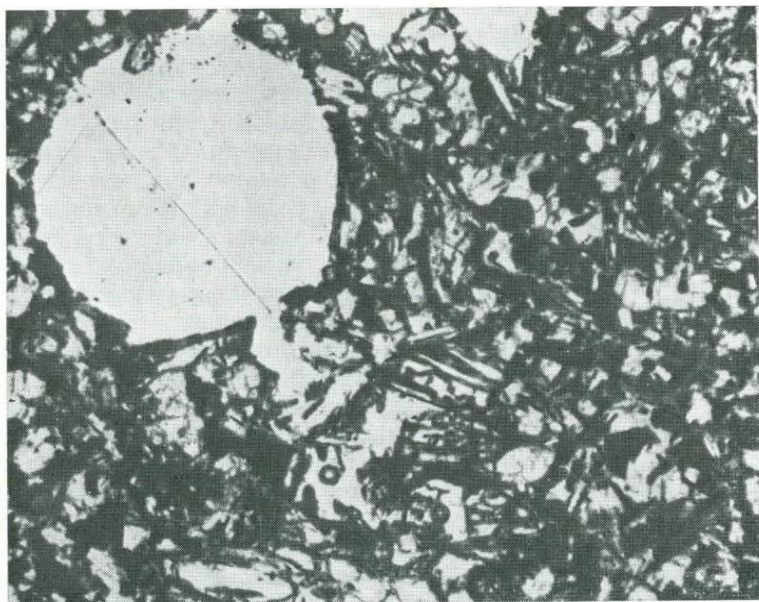
тическое отсутствие гидратированных фаз¹, также свидетельствует о том, что расплавы и магмы формировались в исключительно сухих условиях.

Температуры ликвидуса многих лунных пород, по-видимому, очень высокие и достигают примерно 1300° С; экспериментальные исследования и расчеты показали, что лунные базальты представляют собой весьма жидкие расплавы, вязкость которых ниже, чем вязкость их земных аналогов [65]. Идентификация ликвидусных фаз в лунных породах вызвала широкую дискуссию. Плагиоклаз, ильменит, оливин, клинопироксен и шпинель относятся к наиболее часто встречающимся фазам на ликвидусе разнообразных лунных пород [66]. Принадлежность того или иного минерала к ликвидусным фазам, естественно, зависит от температуры, давления и валового состава расплава.

Малые размеры зерен во многих лунных породах, а также присутствие скелетных форм ряда минералов в некоторых образцах (фиг. 17) указывают на быструю охлаждения и кристаллизации подобных пород. Отсюда представляется весьма вероятным, что большинство лунных пород, особенно из сборов в областях морей, следует относить к экструзиям или приповерхностным интрузиям. Такой вывод согласуется с присутствием многочисленных пустот, зафиксированных в некоторых образцах (например, № 10 022, фиг. 35). Однако идентификация газовой фазы или фаз, растворенных в расплаве и отделившихся от него с образованием пустот, все еще остается проблематичной.

Некоторые из более грубозернистых пород могут принадлежать к обыкновенным интрузиям, однако ряд материковых горных пород, крайне обогащенных полевым шпатом (например, анортозиты), по-видимому, представляют собой кумулаты фаз с низким удельным весом. Равным образом вполне вероятно, что некоторые дуниты и породы с высоким содержанием оливина (например, образец № 72 415) представляют собой кумулаты фаз с высоким удельным весом. Однако оказалось, что многие из лунных пород, кристаллизационная история которых представлялась достаточно простой после первых исследований, подверглись однократному или многократному разогреванию [67], вероятно обусловленному процессами ударного метаморфизма.

¹ В лунных образцах зафиксировано лишь несколько находок гидратированных минералов, обнаруженных в специфических условиях, например, в породах, расплавленных при ударе, или в лунном реголите, так что подобные минералы могли быть продуктами контаминации в наземных лабораториях. Водород, входящий в состав некоторых из этих минералов, мог входить в состав газа солнечного ветра, который, по-видимому, вновь выделился при ударе.

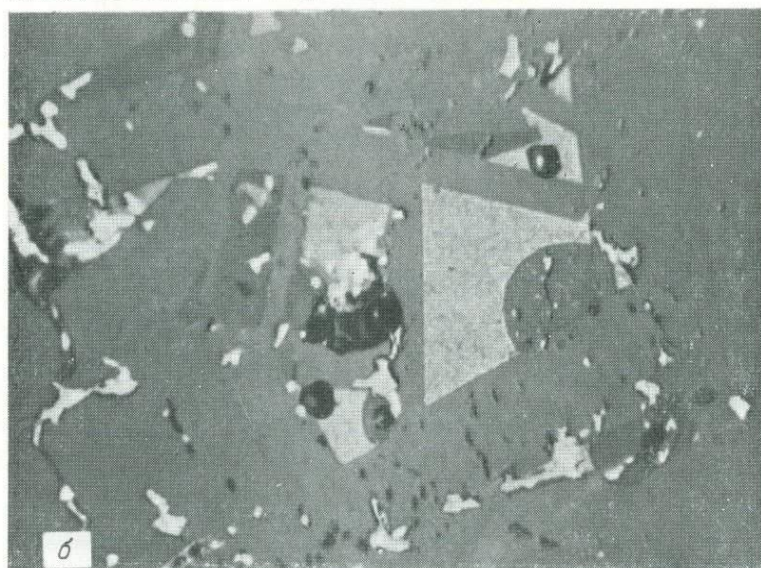
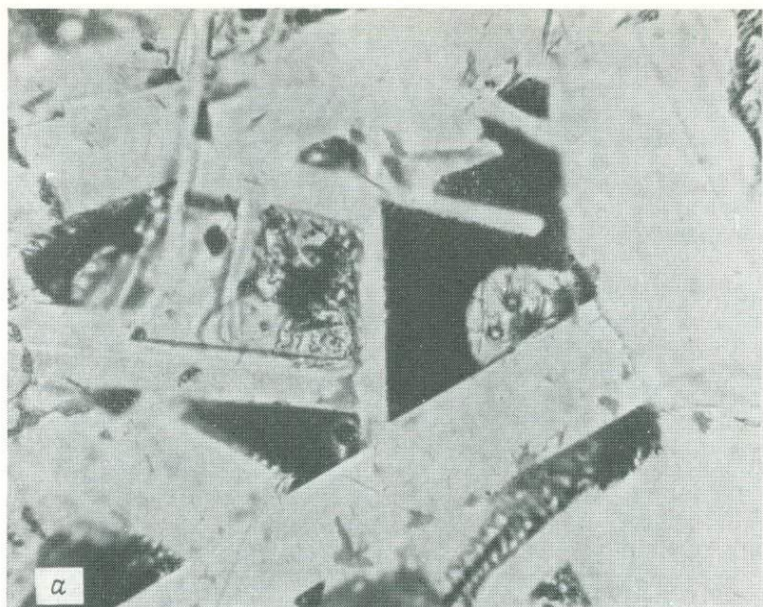


Фиг. 35. Микрофотография участка шлифа образца № 10 022, где виден разрез полости, имеющей почти сферическую форму.

Подобные полости часто встречаются в данном и некоторых других образцах морских базальтов. Состав газа, выделившегося при образовании полости, до сих пор является предметом умозрительных построений. Многочисленные выделения непрозрачного минерала сложены ильменитом.

Остальные минералы представлены плагиоклазом и клинопироксеном, изредка встречается оливин. При одном никеле, длина поля зрения примерно 3,2 мм.

Последовательность формирования расплавов при генерации лунных магм является предметом ряда исследований. Разные ученые предполагают или допускают существование трех главных типов магм: морских базальтов, магмы базальтов типа КРЕЕР и магмы, обогащенной полевым шпатом, из которой формируются материковые анортозиты и другие обогащенные полевым шпатом горные породы [68, 69]. Несмотря на то что среди морских базальтов выделяют несколько различных типов (т. е. базальты, обогащенные и обедненные калием из коллекций «Аполлона-11» и «Аполлона-12» и т. д.), генетические взаимоотношения между этими группами еще не выявлены. Попытка установить последовательность формирования магм путем анализа включений расплава во многих образцах лунных пород была предпринята Реддером и Уэйбленом [70]. Включения (фиг. 36) обнаружены практически во всех лунных порообразующих минералах. По мнению Реддера и Уэйблена, составы



Фиг. 36. Несмесимый расплав, захваченный между лейстами плагноклаза в лунной породе образца № 14 310.

a — в проходящем свете; *b* — в отраженном свете. Шарик расплава, обогащенного кремнеземом, содержит несколько игольчатых кристаллов и стекло, а в сопутствующем расплаве, обогащенном железом, при кристаллизации образовались различные минеральные фазы [70]. Максимальный размер включений расплава, обогащенного кремнеземом, составляет примерно 30 мкм. Воспроизведено из работы: *Roedder E., Weiblen P., Petrographic features and petrologic significance of melt inclusions in Apollo 14 and 15 rocks, с разрешения издательства Массачусетского технологического института, Кеймбридж, Массачусетс, США.*

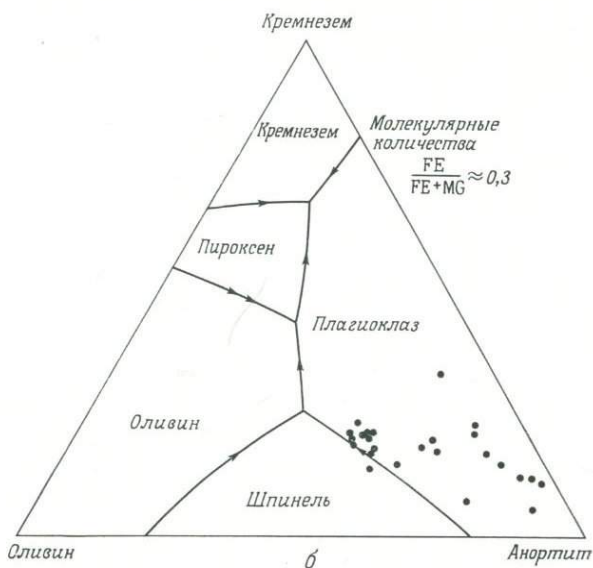
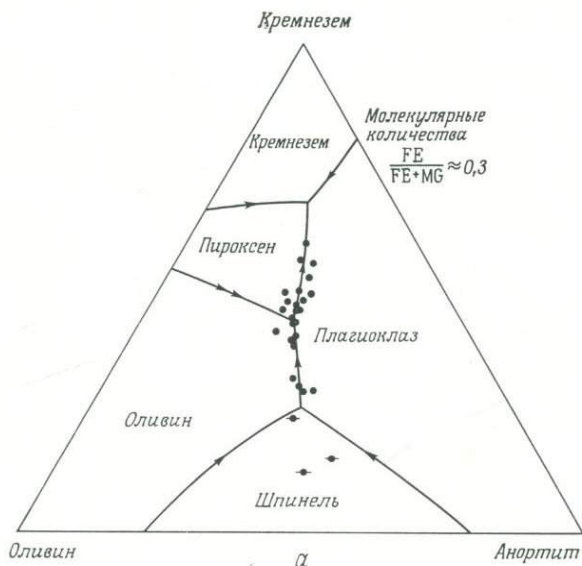
включений расплава во всех минералах из всех точек посадки экспедиций «Аполлон» свидетельствуют об одинаковой последовательности формирования расплавов (фиг. 37), а также о существовании этапа ликвации на поздней стадии кристаллизации всех образцов. Несмесиная жидкость, кристаллизующаяся на последних этапах, обогащена кремнеземом и калием, а ее валовый состав отвечает «граниту».

Происхождение лунных магм. Наиболее приемлемой моделью происхождения лунных магм, по мнению большинства исследователей, можно считать частичное плавление первичного вещества в пределах верхних 200 км оболочки Луны. Однако существуют некоторые расхождения между составом первичного вещества и предполагаемым объемом расплавов при частичном плавлении. Согласно Хаббарду и др. [68], исходное вещество неморских базальтов примерно в три раза богаче тугоплавкими элементами, чем материнские породы морских базальтов. Кроме того, по данным этих исследователей, все неморские базальты могут образоваться при дифференциации единой магмы, в 7—10 раз более богатой тугоплавкими элементами, если допустить различные вариации объемов расплавов, формирующихся в процессе частичного плавления. Помимо того, они предполагают, что глубина залегания первичного источника неморских базальтов должна превышать 100 км, и это согласуется с параметрами предпочитаемой этими авторами термической модели [71].

Составы лунных пород были нанесены Уокером и др. [72] на грань форстерит — кремнезем — анортит в тетраэдре форстерит — кремнезем — фаялит — анортит. В результате они получили псевдотройную диаграмму ликвидуса (фиг. 38), которая была использована для нанесения составов лунных пород и выявления путей их кристаллизации. Согласно этим представлениям, состав первичного материала может отвечать шпинель-анортит-оливиновой породе, при частичном плавлении которой происходит генерация ее поздних дериватов в виде лунных магм различного состава.

Следует вновь подчеркнуть, что одной из наиболее трудных проблем, возникающих при попытках установления генезиса лунных магм, является оценка роли крупных ударных явлений при формировании этих расплавов. Кроме того, многие образцы пород, отобранных с поверхности, могут в действительности принадлежать к реголиту или смеси фрагментов пород и минералов, которые подверглись плавлению и кристаллизации при метеоритной бомбардировке и не представляют, таким образом, вещество первичных лунных магм.

Ударный метаморфизм. В образцах кристаллических пород, доставленных с Луны, нередко наблюдаются признаки ударного

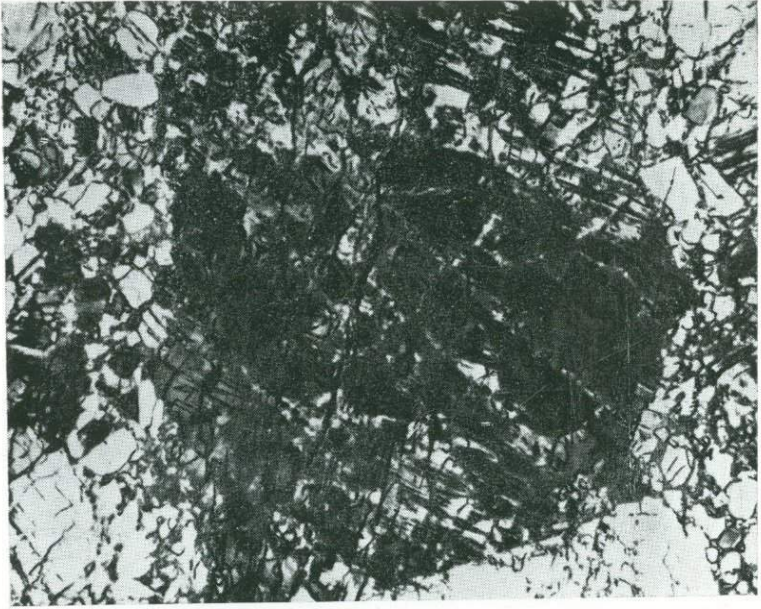


Фиг. 38.

а — псевдотройная диаграмма ликвидуса в системе SiO_2 — $\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$ — Fe_2SiO_4 — Mg_2SiO_4 . Кружками показаны составы отдельных пород формации Фра-Мауро. Кружками с горизонтальными штрихами показаны средние составы шпинель-троктолитовых пород «Луны-20» и «Аполлона-16».

б — сводная диаграмма средних составов обломков стекол и пород, связанных с лунными анортозитами и анортозитовыми норитами.

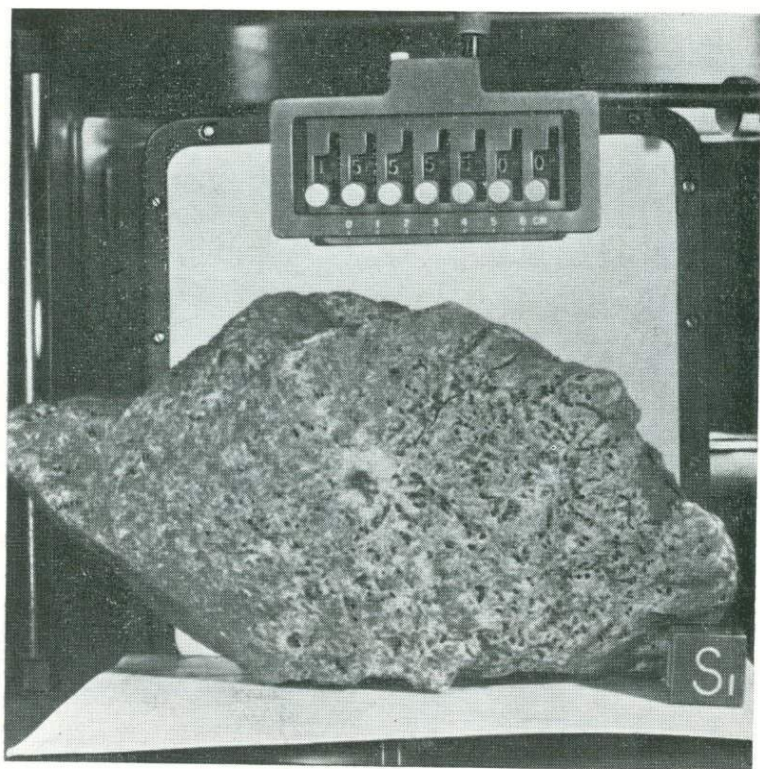
В обоих случаях низкое содержание PO_2 и Cr_2O_3 . По данным Уокера и др. [72].



Фиг. 39. Зерно плагиоклаза, подвергшееся сильному ударному воздействию (анортозитовая брекчия 60 215,13 из сборов «Аполлона-16»). При одном никеле, длина поля зрения примерно 3 мм.

метаморфизма (фиг. 39), в том числе: структуры деформации в плагиоклазах, пироксенах и оливинах, диаплектовые плагиоклазовые стекла; обильные микротрещины; частые двойники в минералах, образование которых вызвано механическими причинами, широко распространены ударные стекла (см. гл. 5). Однако проявления ударного метаморфизма значительно больше развиты в мелких обломках горных пород из лунных брекчий и реголита, чем в крупных образцах пород [68, 69]. Такие наблюдения не являются чем-то неожиданным, поскольку лишь среди небольшой части мощных отложений выбросов из известных земных ударных кратеров обнаружены очевидные признаки ударного метаморфизма. Более частое проявление ударных структур в породах из лунного реголита, вероятно, связано с многократной метеоритной бомбардировкой, которой подвергался материал на большей части лунной поверхности.

К повсеместно распространенным признакам ударного метаморфизма в породах, отобранных с поверхности Луны, относятся микрократеры, образованные в результате высокоскоростных ударов мелких метеороидов (фиг. 40). Такие кратеры при-



Фиг. 40. Лунная порода (№ 15 555), на поверхности которой виден крупный кратер диаметром около 1 см, появившийся в результате высокоскоростного удара микрометеороида.

По-видимому, порода после удара почти распалась на части. Различные буквы, цифры, масштабные линейки и диски серого цвета предназначены для обозначения размеров, ориентировки и номенклатуры образца. Несколько таких «снимков для опознания» представляют собой часть постоянно ведущейся документации каждого лунного образца весом более 50 г. Фотография НАСА, S-71-43 393.

существуют на поверхности всех типов лунного вещества, а не только в изверженных породах (см. фиг. 43, стр. 232), причем их минимальные размеры соответствуют пределам разрешающей способности как оптических, так и сканирующих электронных микроскопов [75].

РЫХЛЫЙ НЕСВЯЗНЫЙ МАТЕРИАЛ

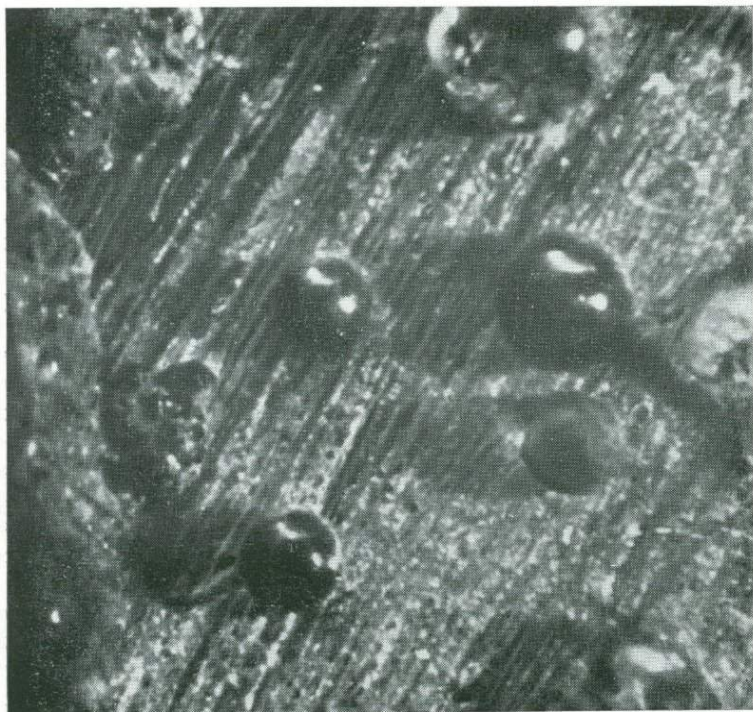
В состав лунного реголита в основном входят отдельные зерна самого разнообразного происхождения [76]. Многочислен-

ные фрагменты горных пород и минералов являются обломками более крупных масс лунных пород, подвергшихся эрозии и измельчению, вызванному падением крупных и мелких метеороидов. Стекла самых различных типов являются одной из главных составных частей большинства лунных «грунтов»¹. Присутствуют ударные стекла, состав которых соответствует полному интервалу составов известных лунных пород, хотя плавленые стекла, представляющие отдельные минералы, встречаются сравнительно редко. Часто отмечаются диаплектовые и тетоморфные стекла, особенно плагиоклазовые.

Частицы стекла правильной формы. Одним из наиболее поразительных компонентов лунного реголита являются стеклянные частицы правильной формы: шарики, уплощенные шарики, гантельки, частицы в форме слезы и другие формы, свидетельствующие о жидком состоянии вещества (фиг. 41). Эти окрашенные стеклянные частицы правильной формы также отвечают по составу широкому диапазону лунных пород и грунтов, а окраска изменяется от светлых серо-зеленых до винно-красных, оранжевых, ярко-зеленых, бурых и желтых тонов. Эти стеклянные шарики обычно содержат некоторое количество ударно-метаморфизованных и(или) частично плавленных минеральных зерен; происхождение таких шариков почти определенно связывают с процессами плавления горных пород вследствие ударов мелких метеороидов. Энергия, выделяющаяся при ударе, приводит к плавлению некоторых пород мишени, которые были выброшены в окололунное пространство; сферическая форма частиц обусловлена поверхностным натяжением расплавленного вещества; прежде чем шарики упадут на поверхность, они охлаждаются и затвердевают. Жидкие выбросы с существенным угловым моментом приобретают форму слезы и гантельки, а уплощенные шарики при падении на поверхность все еще находились в пластическом состоянии. Размеры стеклянных частиц правильной формы варьируют от менее чем 1 мкм до более чем 1 см; однако наиболее часто встречаются шарики с диаметром не более чем несколько миллиметров.

Поверхность стеклянных шариков тщательно исследовали с помощью оптических и сканирующих электронных микроскопов [77]. Некоторые наблюдатели предполагали [78], что бросающиеся в глаза зеленые стеклянные шарики («Аполлон-15», подножие Апеннин, фиг. 42) и оранжевые стеклянные шарики («Аполлон-17») имеют вулканическое происхождение. Однако,

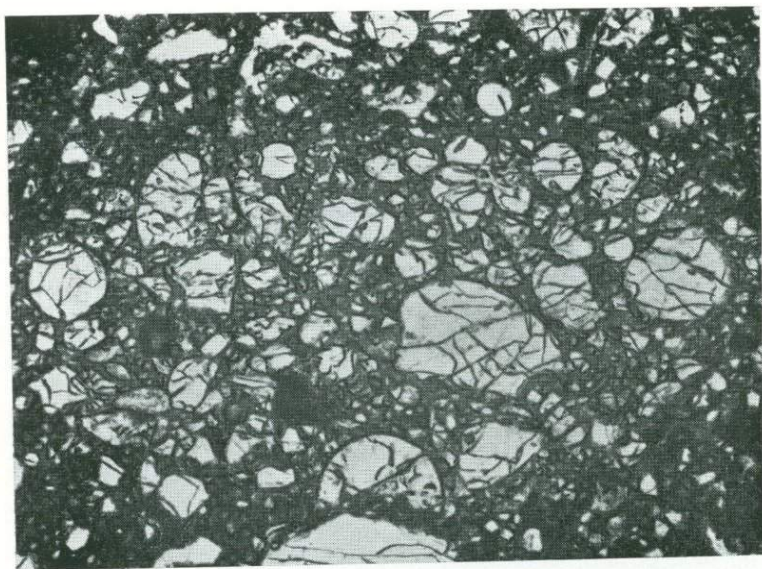
¹ Термин «грунт» широко применялся для обозначения мелкозернистого материала (пород и минералов) лунного реголита. Этот термин не означает какого-либо сходства с земными почвами (например, присутствия органической компоненты, выветривания и т. п.).



Фиг. 41. Стекланные шарики из образца № 10 010 («Аполлон-11»).

Фотография выполнена Группой предварительного изучения лунных образцов на фоне шлифованного алюминия. Цвет и размеры шариков, так же как и аналогичных гантелевидных и каплевидных частиц в лунном реголите, изменяются в широком диапазоне. Наблюдаются шарики диаметром до 1 см, однако большинство из них имеет меньшие размеры; шарики проявляют тенденцию к концентрации в мелкозернистой фракции. Диаметр наиболее крупного шарика на снимке примерно 0,4 мм. Фотография НАСА, S-69-45 181.

по мнению других исследователей, эти шарики могли образоваться и в результате воздействия ударных процессов. Поверхности подобных стекланных шариков, равно как и хорошо оформленные кристаллографические грани или поверхности стекланных фрагментов, представляют собой отличное поле для наблюдений крайне мелких высокоскоростных ударных кратеров (фиг. 43). Эти кратеры повсеместно присутствуют на поверхности частиц лунного реголита, а их строение представляется в следующем виде: центральная воронка, выстланная стеклом, окружена радиальными трещинами и широкой зоной дробления, которая в свою очередь окаймлена переотложенными выбросами в виде полос и лучей [79].



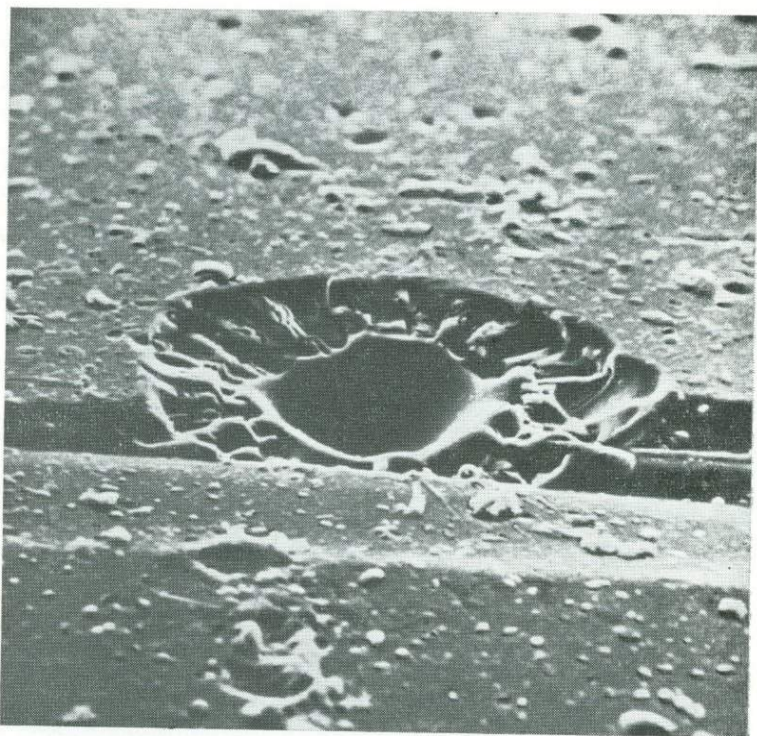
Фиг. 42. Обломок породы в брекчии из коллекции «Аполлона-15» (образец № 15 426).

Почти полностью состоит из зеленых стеклянных шариков и их обломков. Длина поля зрения примерно 1,2 мм, при одном никеле.

Стекловатые агглютинаты¹. Другим видом стеклянных частиц, встреченных в лунном реголите и составляющих заметный компонент лунных образцов, являются стекловатые агглютинаты². Это хрупкие агрегаты из спекшегося стекла, зерен минералов и мелких обломков горных пород. Поверхность реголита принимает на себя многочисленные расплавленные, находящиеся все еще в жидком пластичном состоянии выбросы от ударов метеороидов. Этот расплавленный материал выбросов служит цементом для отдельных зерен реголита; в результате образуются тонкие сетчатые агрегаты зерен, удерживаемые вместе хрупкими волокнами и адгезионными свойствами стекла (фиг. 44). Таким образом, помимо процессов измельчения и разрушения первичного материала лунной поверхности, бомбардировка микрометеороидами вызывает формирование зерен агглютинатов более крупного размера, чем те, которые попадают в сферу действия ударного процесса вблизи точки удара. Про-

¹ Эти частицы называют также агрегатами спекшихся стекол, агломератами, остеклованными агглютинатами, стеклянными брызгами и др.

² В советской литературе эти образования называют также спеками. — Прим. ред.

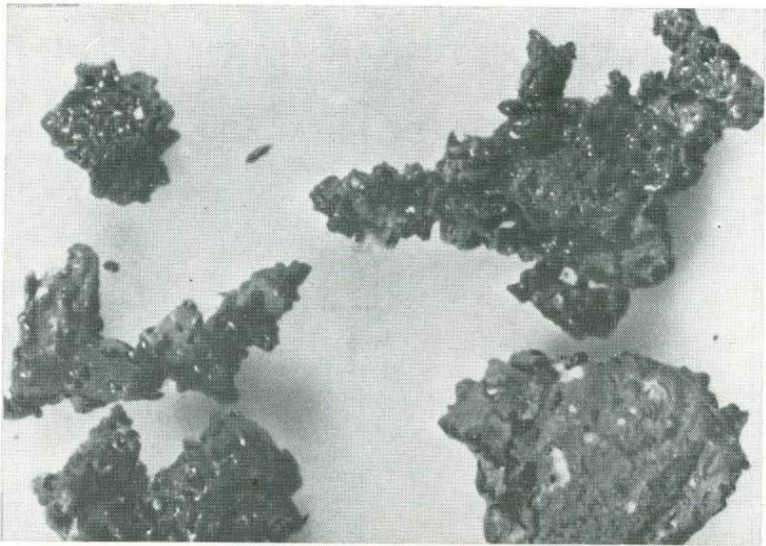


Фиг. 43. Высокоскоростной ударный кратер на поверхности фрагмента лунного стекла.

Диаметр центральной воронки составляет примерно 10 мкм, а ширина окружающей ее зоны дробления составляет около 5 мкм. Изображение получено с помощью сканирующего электронного микроскопа. Предоставлено НАСА, Лабораторией реактивного движения.

центное содержание агглютинатов в образцах реголита может быть использовано в качестве приблизительной меры времени пребывания данного слоя реголита на поверхности, когда он подвергался бомбардировке метеороидами; в связи с этим процентное содержание агглютинатов использовалось некоторыми исследователями как показатель «зрелости» реголита [80]. Другим существенным компонентом большинства образцов реголита являются фрагменты брекчий и микробрекчий, которые описаны в следующем разделе (стр. 239).

Модальные анализы. Этот вид анализа типов частиц в образцах реголита может использоваться для интерпретации происхождения и истории реголита в различных местах посадки. В образцах реголита, отобранных вблизи крупных свежих удар-

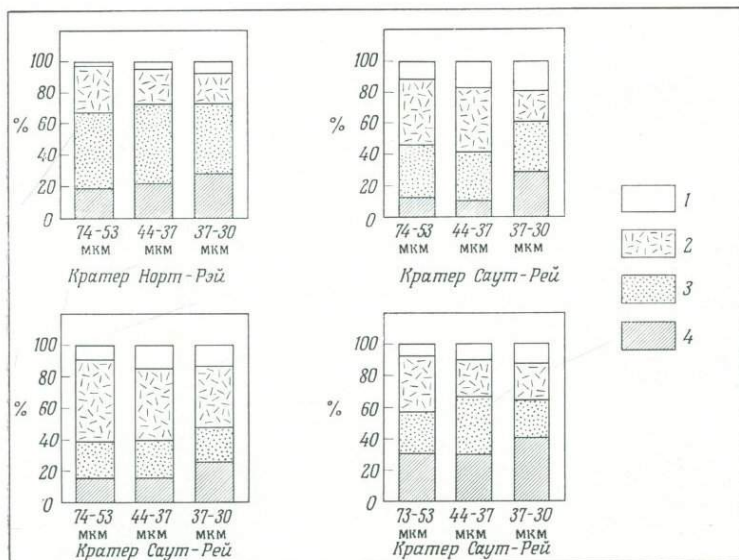


Фиг. 44. Частицы типичных агглютинатов лунного реголита.

Фрагменты пород, зерна минералов, стекло и тонкие пылевые частицы сцементированы буроватым пузырчатом стеклом. Происхождение этого стекла, по-видимому, можно связывать с плавлением вещества реголита в результате ударов микрометеоритов и его разбрызгивания по поверхности. Длина поля зрения примерно 15 мм. Предоставлено НАСА, Центром космических полетов им. Джонсона, фотография S-73-25 448.

ных кратеров (например, кратер Коун, «Аполлон-14»), как правило, распространены многочисленные фрагменты горных пород и зерен минералов при очень низком содержании стекловатых агглютинатов и фрагментов стекол. Образцы, взятые на значительном расстоянии от позднейших ударных кратеров, а особенно образцы, характеризующиеся значительным экспозиционным возрастом метеороидной бомбардировки, обычно содержат большое количество стекловатых агглютинатов, много фрагментов стекла и немногочисленные фрагменты горных пород. В модальных анализах некоторых образцов можно выделить разнообразные фрагменты горных пород и типы стекол, что указывает на различные источники или историю этих частиц. Модальные анализы типов частиц в образцах реголита из коллекции «Аполлона-16» приведена на фиг. 45.

Один из наиболее интересных результатов модальных анализов частиц реголита был получен при исследовании первых образцов, доставленных «Аполлоном-11». Четыре группы исследователей [81] обнаружили, что в образцах «Аполлона-11» содержится незначительное количество фрагментов анортози-

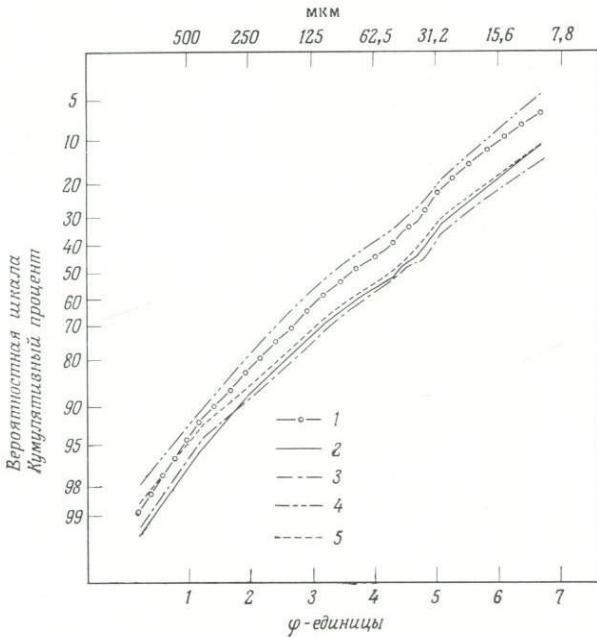


Фиг. 45. Примеры модальных анализов типов частиц лунного реголита, выполненных для трех различных гранулометрических фракций на материале четырех образцов из коллекции «Аполлона-16».

Можно выделить ряд дополнительных категорий среди типов частиц. На основании результатов аналогичных анализов многих образцов реголита из одного района посадки можно получить представление об изменении гранулометрического состава реголита как в горизонтальном, так и в вертикальном направлении и сопоставить эти данные со структурой поверхности. Заимствовано из работы: *Butler et al.*, 1973; Grain size frequency distributions and modal analyses of Apollo 16 fines: Proc. Fourth Lunar Sci. Conf., Geochim. et Cosmochim. Acta, Suppl. 4, 1, p. 267—278; предоставлено издательством «Пергамон Пресс». 1 — стекло; 2 — спекшиеся фрагменты; 3 — фрагменты горных пород; 4 — зерна минералов.

тов и других обогащенных полевым шпатом пород; была выдвинута гипотеза о том, что эти обогащенные полевым шпатом породы могут принадлежать к выбросам из отдаленных кратеров, расположенных в пределах лунных материков. В результате исследования первых лунных образцов появилось первое предположение о том, что лунные материк сложены преимущественно породами, обогащенными полевым шпатом. На основании описанных наблюдений Вуд [82] построил геофизическую модель Луны.

Гранулометрический анализ. Этот вид анализа также можно использовать для характеристики разнообразных поверхностных и приповерхностных геологических комплексов. Большая часть гранулометрических анализов образцов реголита выполнялась на материале фракции с размером зерен менее 1 мм.



Фиг. 46. Примеры гранулометрического анализа лунного реголита (фракция с размером зерен менее 1 мм) из сборов «Аполлона-15».

Следует отметить, что кривые распределения материала этих образцов характеризуются слабой бимодальностью, плохой сортировкой и пологим эксцессом. (Заимствовано из работы: *Butler et al.*, 1972, Size frequency distributions and petrographic observations of Apollo 15 lunar samples; in *Apollo 15 lunar samples*, J. W. Chamberlain and C. Watkins, eds, p. 46; авторские права Лунного института, 1972.) 1 — борозда Хэдли; 2 — кратер Сент-Джордж, станция 2; 3 — «аварийный» образец; 4 — кратер Элбоу; 5 — станция 2.

Сепарация более крупных частиц и выделение квоты такого материала для различных исследований производится с большой тщательностью, поскольку в составе этих фракций могут содержаться уникальные или редкие фрагменты пород. Характер распределения размеров частиц мелкой фракции лунного грунта особенно интересен для тех исследователей Луны, которые предполагают электростатический перенос лунной пыли; однако до сих пор на материале лунных образцов не удалось найти каких-либо доказательств в поддержку указанной гипотезы. Гранулометрический анализ лунных образцов проводился многими исследователями [83], однако большая часть результатов аналогична показанным на фиг. 46. Распределение частиц фракции 1—10 мкм, выраженное в весовых процентах, приближенно следует логнормальному закону. Однако Кинг и др.

[76, 83] отмечают тенденцию проявления слабой бимодальности, причем широкая мода соответствует интервалу размеров 1—4φ, что обусловлено формированием стекловатых агглютинатов. Намечена и более узкая мода, середина которой приходится примерно на размер 5φ; это, возможно, связано с поступлением крайне мелкозернистых выбросов из отдаленных кратеров, расположенных в пределах древних геологических формаций. В целом лунные образцы, частицы которых отвечают рассматриваемому диапазону размеров, характеризуются плохой и очень плохой сортировкой, положим эксцессом кривой распределения и небольшой асимметрией (кривая почти симметрична). Многие исследователи, добываясь воспроизводимых и точных гранулометрических анализов лунных образцов, столкнулись со значительными трудностями, поскольку в них содержится много мельчайших зерен, а материал для анализа совершенно сухой. Обычное сухое рассеивание на ситах связано с большими трудностями из-за слипания зерен в наиболее тонких фракциях, если только относительная влажность недостаточно высока; очевидно, это происходит вследствие электростатического притяжения между наиболее мелкими частицами. Кроме того, принудительное рассеивание приводит к разрушению многочисленных тонких стекловатых агглютинатов. Гранулометрические анализы фракций с размером зерен менее 10 мкм из некоторых лунных образцов осуществлялись с помощью сканирующего электронного микроскопа [84] и фотографирования под оптическим микроскопом [83]. Однако значимость таких подсчетов и интерпретация результатов до сих пор остаются сомнительными.

Кинг и др. [83] предполагают, что в целом существует обратная корреляция между размером зерен лунного мелкозернистого материала (фракция менее 1 мм) и экспозиционным возрастом, соотносимым с метеоритной бомбардировкой, причем это предположение поддерживает ряд других лабораторий. Чем длительней период экспозиции реголита, т. е. его доступность для бомбардировки метеороидами, тем мельче размер зерна вещества реголита. Такие соотношения выявляются особенно наглядно, в случае если учитывается геологическое строение района (например, если можно исключить такие источники крупнозернистого материала, как образцы выбросов из крупных свежих ударных кратеров). Однако ситуация в некоторых местах столь сложна, что трудно выделить образцы, не содержащие примеси молодых крупнообломочных выбросов.

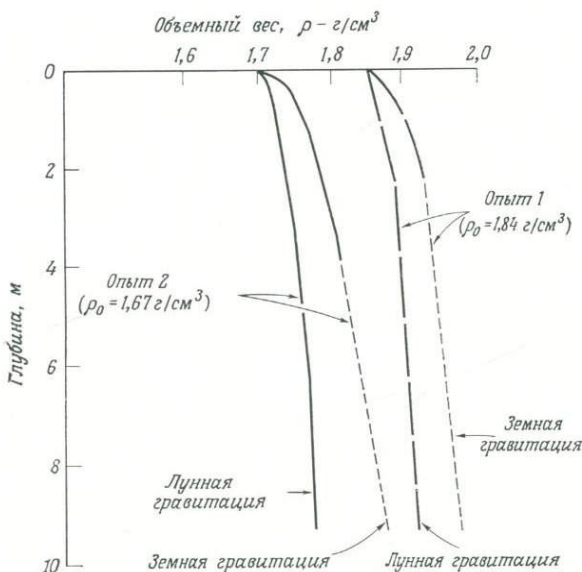
Несмотря на то что в общей закономерности есть немало исключений, представляется, что в лунном реголите проявлена тенденция к увеличению крупности частиц с глубиной; это основано на результатах наблюдений в пройденных на поверхности канавах и доставленных с Луны кернах. Таким образом,

в основании реголита могут залегать трещиноватые крупные глыбы, несколько сдвинутые с места коренного залегания, которые вверх по разрезу постепенно сменяются все более мелкозернистым материалом, причем по мере приближения к поверхности все сильнее проявляются признаки ударного метаморфизма. Однако следует ожидать, что общая закономерность строения реголита осложняется существованием перекрывающих друг друга отложений выбросов из кратеров различного размера, что во многом совпадает с представлениями Солсбери и Смолли [17].

Состав обломков горных пород, принадлежащих к крупным фракциям реголита (1—5 мм), представляет собой намного более пеструю картину, чем ее можно представить на материале штучных образцов, доставленных при осуществлении экспедиций по программе «Аполлон» [85]. Значительная часть исследований, посвященных изучению крупных фракций, направлена на установление вероятных главных типов лунных пород, которые не представлены в виде крупных образцов.

Физические свойства. Физические свойства лунного реголита исследованы с определенной детальностью, причем эти исследования обычно проводились в трех различных аспектах: а) инженерные разработки без каких бы то ни было научных целей или с минимальной научной отдачей; б) калибровочные исследования — попытки интерпретации старых данных, полученных косвенными методами, или получения опорных величин для новых исследований; в) измерения без проблемной направленности, в основном как самоцель прецизионных физических измерений, не имеющих практического приложения и серьезного значения для фундаментальной науки. Подобные работы проводились непосредственно в местах отбора образцов, а также при испытаниях доставленного на Землю материала на воздухе и в вакууме.

Плотность тонкозернистого реголита в естественном залегании на месте отбора проб экипажем «Аполлона-12» оценена величиной 1,6—2,0 г/см³ [86]. Согласно наблюдениям астронавтов, пытавшихся укрепить флагштоки и другое снаряжение в поверхностном слое, плотность реголита быстро возрастает с глубиной. Увеличение объемного веса реголита с глубиной (фиг. 47) зафиксировано в результате расчетов, выполненных Керрьером и др. [87] на основании измерений с помощью вакуумного плотномера на материале лунного образца весом в 200 г. Величина уплотнения, вычисленная по этим данным, невелика, что послужило отправной точкой предположения о существенном влиянии метеороидной бомбардировки на скорость уплотнения с глубиной [87]. Другие измерения плотности лунного грунта дали значения в диапазоне от 1,4 до 2,0 г/см³ [88].



Фиг. 47. График зависимости плотности лунного грунта от глубины взятия образца № 12 001.

Для вычисления уплотнения, обусловленного собственным весом грунта в условиях лунной и земной гравитации, использованы данные, полученные при помощи вакуумного плотномера (опыты 1 и 2) [87]. Перепечатано из работы: *W. D. Carrier, III, et al., Strength and compressibility of returned lunar soil*; с разрешения издательства Массачусетского технологического института, Кеймбридж, Массачусетс, США.

Свойства лунного грунта изменяются в зависимости от местоположения образцов на поверхности и местной геологической обстановки. Подобный вывод сделан в работе Хьюстона и др. [89] на материале наблюдений над глубиной оседания грунта под подошвами ботинок астронавтов; кроме того, вычислены величины пористости грунта по данным измерений углов внутреннего трения, выполненных другими авторами [88]. Примерная величина средней пористости принята равной 43% со стандартным отклонением около $\pm 3\%$ для межкратерного пространства. Обнаружено, что пористость материала на кратерных валах и склонах кратеров и борозд увеличивается обычно до 46–47%, однако в некоторых районах достигает еще больших значений.

Наиболее вероятные значения когезии лунного грунта приходятся на интервал 0,1–1,0 кН/м², а углов внутреннего трения — на интервал 30–50°, причем, согласно Митчеллу и др. [88], наибольшие углы соответствуют наименьшей пористости.

БРЕКЧИИ И МИКРОБРЕКЧИИ

Все типы частиц, входящих в состав несвязного рыхлого материала (лунного грунта), могут быть компонентами брекчий и микробрекчий¹. В составе брекчий в большом количестве присутствуют стеклянные шарики, обломки пород, стекла и минералов (фиг. 48). Несомненно, в состав многих брекчий входят также и хрупкие агглютинаты, хотя часто их идентификация сопряжена с трудностями. Теперь стало очевидно, что существуют два главных типа брекчий: реголитовые брекчий² и автотаморфизованные брекчий отложений базисной волны.

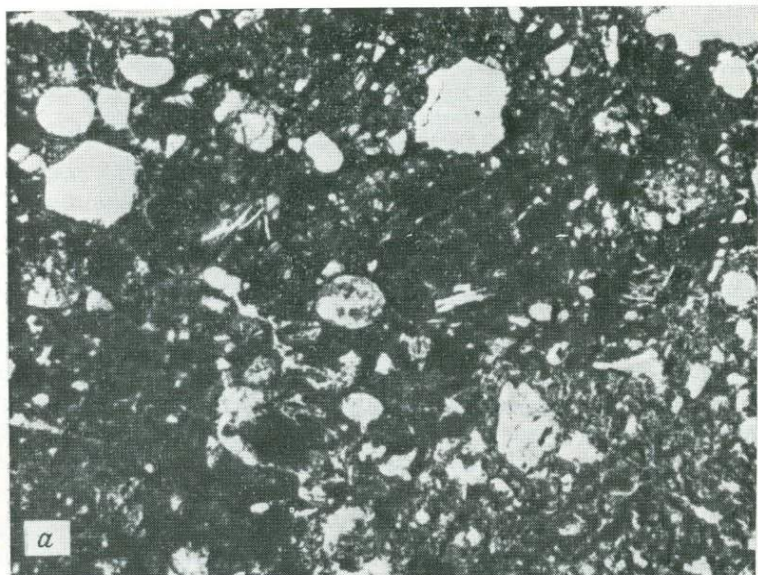
Реголитовые брекчий. Этот тип брекчий наиболее распространен в образцах, доставленных «Аполлоном-11» [90], и несколько реже встречается в коллекциях остальных экспедиций. Примером такой брекчий может служить образец № 14 313, который рассматривают как ударно-литифицированный реголит [91]. В этом типе брекчий содержатся многочисленные легко распознаваемые обломки брекчий и пород с магматическими структурами, нераскristализованные стеклянные частицы правильной формы и другие нераскristализованные стеклянные фрагменты. Обломочные частицы этой брекчий полимиктового типа варьируют по своему облику от неизмененных ударными процессами до плавленных при ударе, однако признаки развитого термального метаморфизма не обнаружены. Четко различаются границы обломочных зерен, а в основной массе, которая обычно представлена буроватым стеклом, не обнаруживается признаков перекристализации. Штуфные образцы реголитовых брекчий обычно выглядят как слабосвязные (крошащиеся) образования по сравнению с сильнометаморфизованными брекчийами.

Автотаморфизованные брекчий. Согласно интерпретации Уорнера и др. [92], стратиграфически формация Фра-Мауро в районе посадки «Аполлона-14» представляется единым автотаморфизованным комплексом, сложенным остывшими ударными выбросами из бассейна Моря Дождей. Такая трактовка основана на существовании ряда петрографических типов брекчий, варьирующих от неперекристализованных до полностью

¹ Термин «микробрекчия» использовался многими исследователями, в том числе сотрудниками Группы по предварительному исследованию лунных образцов, однако в этой книге к соответствующим образованиям любых масштабов применен термин «брекчия».

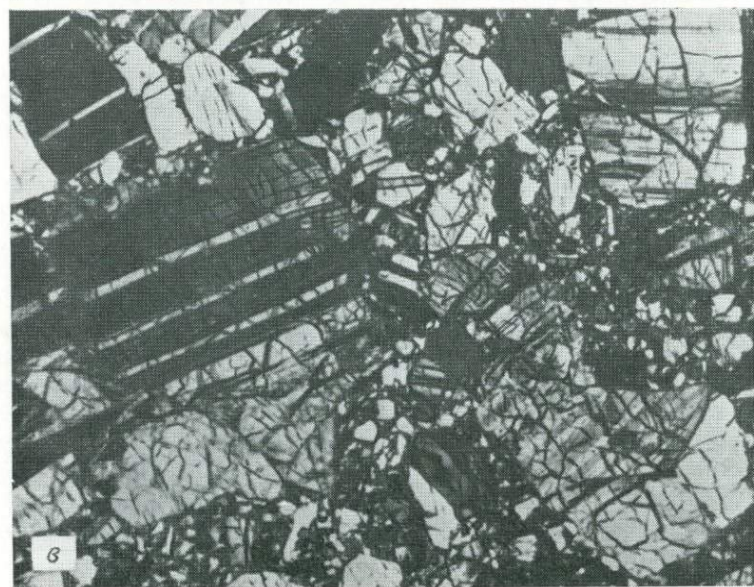
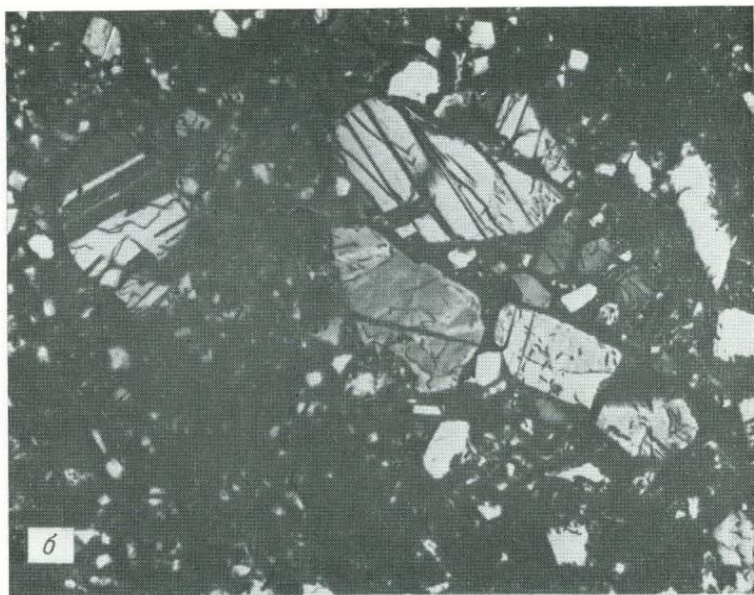
² Этот термин применяется в настоящее время большинством исследователей, но в сущности он является синонимом терминов: «микробрекчия ударного сжатия», «слабо литифицированная брекчия» или «слабо литифицированная фация брекчий, I группа».

перекристаллизованных разностей, и геологическом строении района посадки «Аполлона-14». Последнее, по-видимому, обусловлено ударным событием, вызвавшим образование Моря Дождей. Неперекристаллизованные брекчии идентичны реголитовым брекчиям, описанным выше, за исключением того, что в них редко встречаются агглютинаты, а треки частиц, связанных с солнечным ветром, и соответствующие особенности химизма часто отсутствуют. Брекчии, подвергшиеся перекристаллизации и термическому метаморфизму, наиболее легко выделяются по структуре основной массы (фиг. 49) и визуально наблюдаемым признакам повсеместного метаморфизма и перекристаллизации обломков, шариков и основной массы. Вертикальный разрез комплекса отложений базисной волны и баллистических выбросов ударного происхождения, подвергшихся спеканию и перекристаллизации, должен напоминать аналогичный разрез земных туфовых отложений пепловых потоков (гл. 1, фиг. 17). Если верны оценки Андерсона и др. [93] и Грива и др. [94], то исходные температуры формирования отдельных частей формации Фра-Мауро укладываются в диапазоне 700—1050° С.



Фиг. 48. Микрофотографии шлифов трех типов лунных брекчий.

α — порода № 14 318,43, характеризующаяся сложной структурой и разнообразием форм и размеров обломков; такие брекчии типичны для коллекций, собранных экспедициями по программе «Аполлон»;



а — брекчия, обогащенная полевым шпатом (образец № 65 095,54), из сборов «Аполлона-16», на лунных материках; *б* — анортзитовая брекчия (№ 60 215,13). Фото *а* — при одном никеле, фото *б* и *в* — никели скрещены. Длина поля зрения на всех микрофотографиях примерно 3,2 мм.

Следовательно, участки лунной поверхности, находящиеся вдали от крупных ударных кратеров и имеющие сравнительно молодой возраст (например, поверхности морей), должны содержать преимущественно реголитовые брекчии, однако древние поверхности и районы, прилегающие к крупным ударным кратерам (например, поверхности материков), должны содержать оба типа брекчий. Наиболее сложный комплекс брекчий встречен в районе посадки «Аполлона-16» и описан в работе Уилшира и др. [95].

Лунные хондры¹. Хондры были обнаружены в обоих типах брекчий в районе посадки «Аполлона-14» [96], причем это событие явилось первой несомненной находкой хондр вне хондритовых метеоритов². Кинг и др. обсуждали применимость этих наблюдений для интерпретации происхождения хондритов (см. стр. 43). Эти авторы считают, что лунные хондры сформировались по крайней мере с помощью трех видов механизмов в связи с крупными лунными ударными событиями:

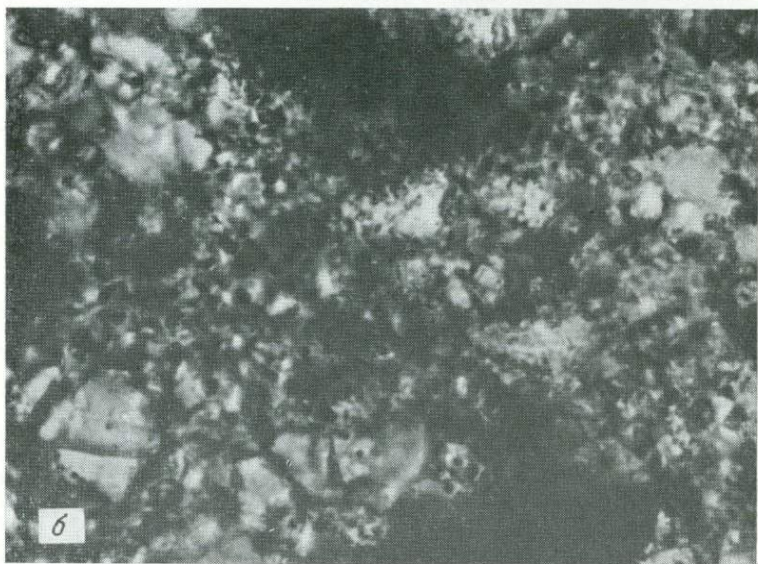
1. Кристаллизация силикатных шариков и капель (фиг. 50, 51). Таким путем могли сформироваться хондры из свободного силикатного расплава, который был выброшен в окололунное пространство; при этом образовались грубосферические формы, обусловленные поверхностным натяжением, которые затем подверглись переохлаждению и быстрой кристаллизации, как показали Нельсон и др. [97]. Даже если стекло не переохлаждается и не кристаллизуется описанным способом, более медленная кристаллизация и девитрификация стекла происходят в случае, если оно входит в состав раскаленных отложений выбросов и базисной волны.

2. Округление обломков горных пород и минеральных зерен в процессе абразии, которой подвергаются отложения базисной волны, имеющие ударное происхождение (фиг. 52). Предполагается, что формация Фра-Мауро в районе посадки «Аполлона-14» представлена отложениями базисной волны и другими выбросами из кратера, образование которого привело к возникновению бассейна Моря Дождей. Для большинства частиц, слагающих эти отложения базисной волны, существовали все условия для протекания процессов взаимодействия и абразии на протяжении 500 км пути переноса до их отложения в районе посадки «Аполлона-14».

3. Диффузионные процессы вокруг обломков и минеральных зерен, состав которых заметно отличается от состава окружаю-

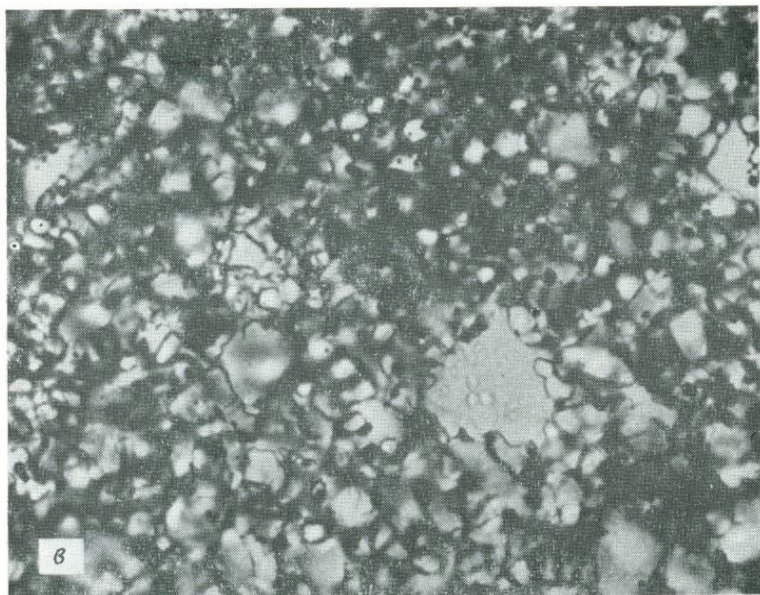
¹ В советской литературе применяется термин хондронды. — *Прим. ред.*

² Впоследствии хондроподобные тела были обнаружены в выбросах из ударного кратера Лонар-Лейк, Индия.

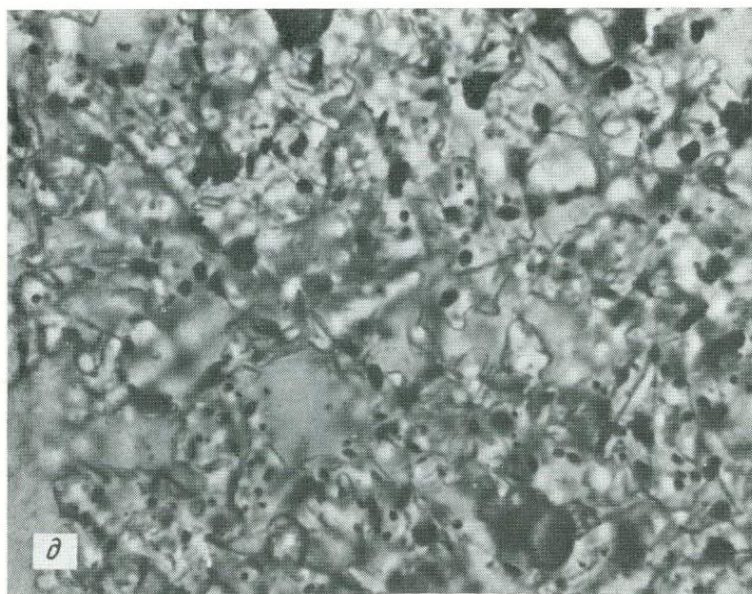


Фиг. 49. Структуры основной массы брекчий (сборы «Аполлона-14»).

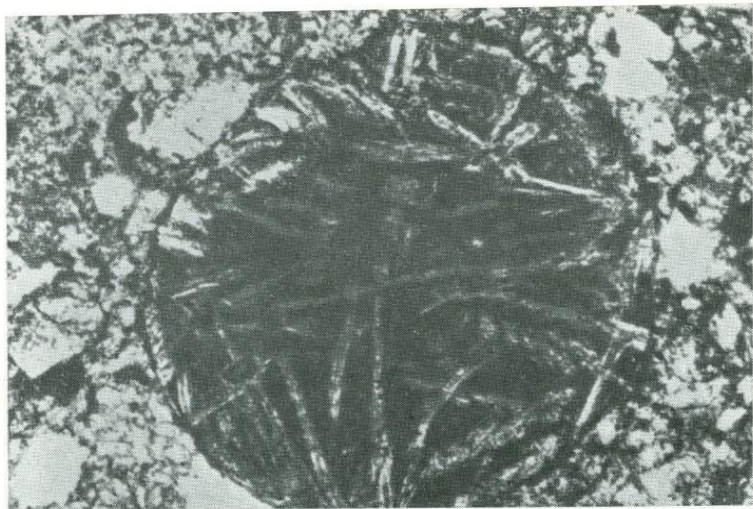
На микрофотографии видно проявление разной степени прогрессивного термического метаморфизма и перекристаллизации: неметаморфизованная брекчия (а) и наиболее глубоко метаморфизованная и перекристаллизованная брекчия (е). Длинная сторона каждого снимка соответствует 220 мкм; сходящийся проходящий свет. Перепечатано из работы Уорнера [92] с разрешения издательства Массачусетского технологического института, Кеймбридж, Массачусетс, США.



Фиг. 49.



Фиг. 49.



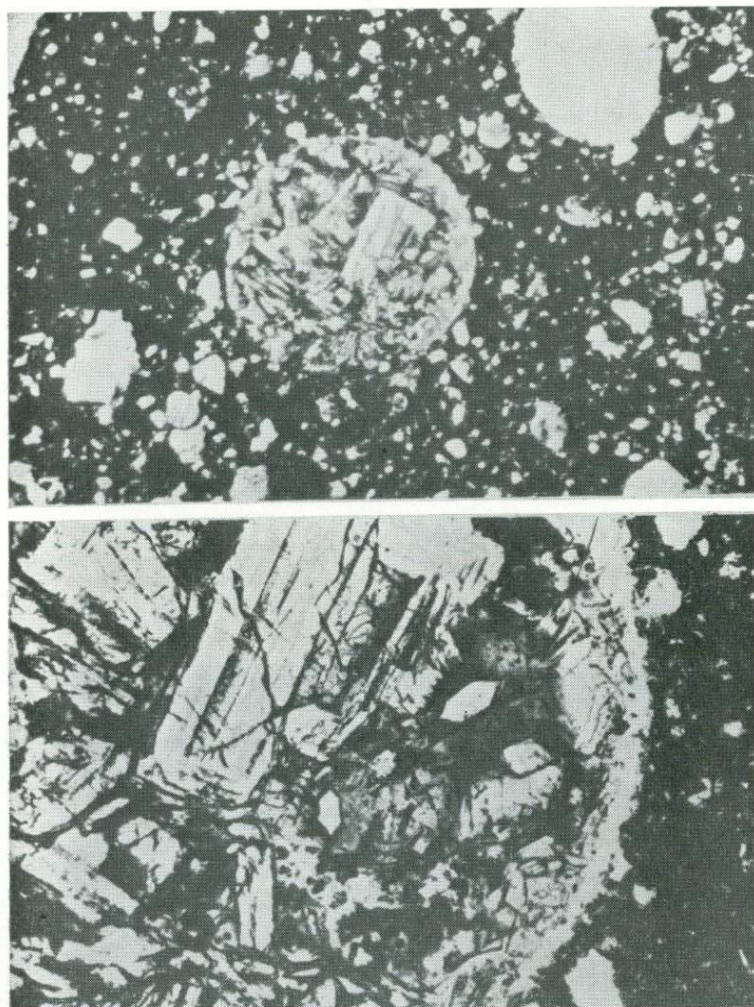
Фиг. 50. Лунная хондра из образца № 14 318 (сборы «Аполлона-14»).

Очевидно, хондра представляла собой жидкую каплю, которая приобрела сферическую форму вследствие поверхностного натяжения, затем на ее поверхности началась нуклеация кристаллов плагиоклаза и пироксена, а кристаллизация продолжалась по направлению к центру шарика. Кристаллы окаймлены темно-бурым замутненным стеклом. Диаметр хондры 0,5 мм; при одном никеле. Из работы Кинга и др. [96]; авторское право Американской ассоциации развития науки, 1972.

щего обломочного материала, в раскаленных отложениях базисной волны и баллистических выбросов (фиг. 53).

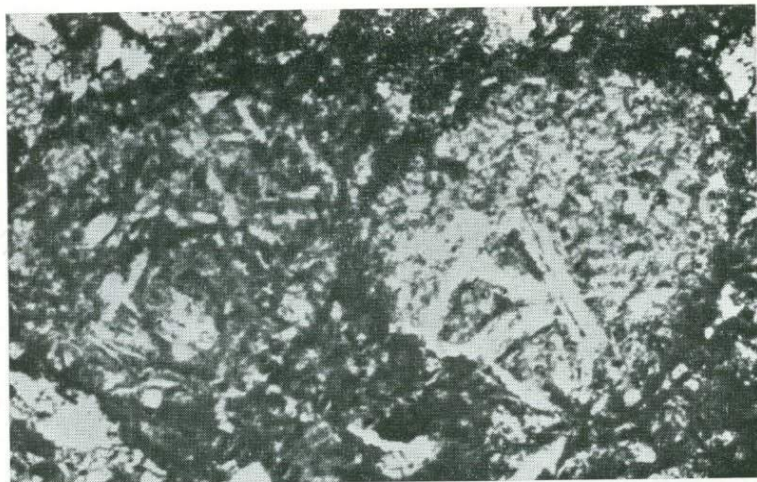
Относительная распространенность. Брекчии относятся к наиболее распространенному типу пород, собранных экипажами «Аполлона-14» и «Аполлона-16», часто встречаются в коллекциях образцов из остальных мест посадки космических аппаратов, за исключением «Аполлона-12» (табл. VI). Районы посадки, приуроченные к материкам и древним поверхностям, по-видимому, сложены в основном брекчированными выбросами из обширных морских бассейнов и близлежащих крупных кратеров. Некоторые из образцов пород, которые отнесены в табл. VI к фрагментам со структурой изверженных пород, в действительности могут принадлежать к крупным обломкам слабо сцементированных брекчий, которые были отделены от их коренного залегания в процессе эрозии или при отборе пробы.

Геохимия, возраст, физические свойства. Многие исследователи обнаружили фрагменты метеоритов в составе лунного грунта и брекчий. В состав этих фрагментов входят обломки каменных метеоритов, метеоритного никелистого железа



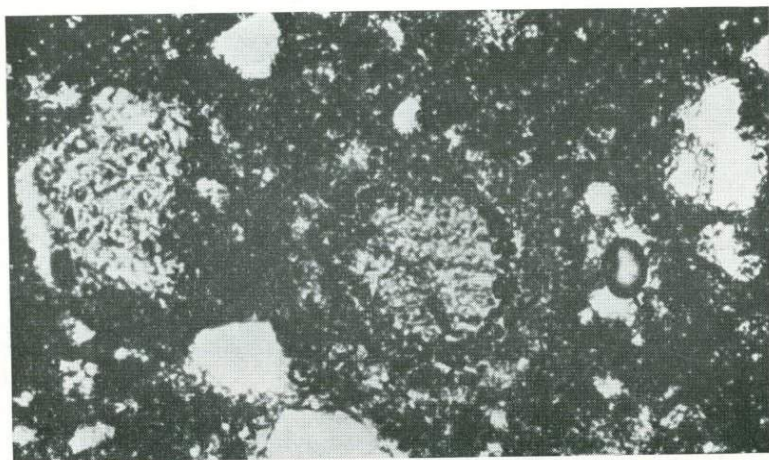
Фиг. 51. Лунная хондра, сложенная идиоморфными кристаллами ортопироксена и оливина в буром прозрачном стекле из образца № 14 313, сборы «Аполлона-14».

Следует отметить, что в стеклянном шарике в правом верхнем углу на верхнем снимке нет следов девитрификации или кристаллизации. Диаметр хондры примерно 0,8 мм. Нижний снимок — увеличенная фотография лунной хондры верхнего снимка. Следует обратить внимание на скелетные и идиоморфные кристаллы ортопироксена и мелкие идиоморфные кристаллы оливина в светло-бурой основной массе, сложенной стеклом. В стекле иногда проявлены процессы раскристаллизации, однако в большинстве случаев стекло в промежутках между кристаллами выглядит прозрачным. Оба снимка при одном никеле. Перепечатано из работы Кинга и др. [1961] с разрешения издательства Массачусетского технологического института, Кеймбридж, Массачусетс, США.



Фиг. 52. Лунные хондры, образовавшиеся, по-видимому, в результате округления обломков пород в процессе абразии.

Хондры такого типа часто встречаются в образцах из сборов «Аполлона-14». Абразия происходила, вероятно, в базисной волне порожденной Имбрийским ударным событием, по мере переноса материала на расстояние 500 км до места его отложения в районе посадки в пределах формации Фра-Мауро. Длина поля зрения 0,8 мм при одном никеле. Перепечатано из работы Кинга и др. [1961 с разрешения издательства Массачусетского технологического института, Кембридж, Массачусетс, США.



Фиг. 53. Обломок дунита, окаймленный диффузионными гало (ореолами) пироксена и непрозрачных минералов в образце из сборов «Аполлона-14».

Такие обломки, окруженные зоной перекристаллизации, широко распространены в брекчиях «Аполлона-14», а аналогичная перекристаллизация часто отмечена вокруг хондр в слабо перекристаллизованных хондритовых метеоритах. Длина поля зрения 0,8 мм при одном никеле. Из работы Кинга и др. [1961; авторские права Американской ассоциации развития науки, 1972.

Таблица VI Число образцов брекчий и пород со структурой изверженных пород в коллекциях, собранных экипажами космических кораблей «Аполлон»¹

	Брекчий	Материалы со структурой изверженных пород
«Аполлон-11»	8	5
«Аполлон-12»	4	41
«Аполлон-14»	30	2
«Аполлон-15»	29	27
«Аполлон-16»	60	21
«Аполлон-17»	46	47
Всего:	177	143

¹ Учтены только образцы, вес которых превышает 50 г. Читатель должен отдавать себе отчет в том, что на количественное соотношение образцов мог значительно повлиять субъективизм экипажа космического корабля в отборе пород. (Источники: каталоги лунных образцов программы «Аполлон» и списки лучших образцов. Сюда не включены образцы, отколотые непосредственно от поверхности глыб.)

и, возможно, один обломок мезосидерита. Обширные аналитические исследования рассеянных элементов, выполненные Ганапати, Андерсом и их коллегами [98], позволили оценить содержание метеоритного вещества в составе пород и грунта из коллекций, собранных при выполнении программы «Аполлон». Среднее содержание метеоритного вещества, отвечающего по составу углистым хондритам C1, в грунте и брекчиях, доставленных экспедициями «Аполлон», составляет примерно 2%.

Выполнены многочисленные анализы грунта и брекчий (табл. VII), которые обычно обнаруживают незначительные концентрации тугоплавких элементов (фиг. 34). В остальном результаты анализов похожи на анализы материала со структурой изверженных пород.

Модельные возрасты лунного грунта и брекчий, определенные радиологическими методами, обычно древнее возрастов горных пород с магматическими структурами, а их величины группируются вокруг значения 4,6 млрд. лет [99]. Интерпретация таких модельных возрастов недостаточно ясна, по-видимому, свинец в грунте обладает повышенной подвижностью, возможно, вследствие разогрева при ударных явлениях. Однако результаты датирования, полученные рубидий-стронциевым и свинцовым методами, согласуются, поэтому предполагается, что реголит, представляющий собой результат аккумуляции различных разновозрастных частиц, можно рассматривать как агрегат материала лунной коры [100]. Возраст 4,6 млрд. лет,

Таблица VII Примеры средних петрохимических составов лунных брекчий и реголита (в вес. %) ¹

	Брекчия			Реголит (фракция < 1 мм)		
	«Аполлон-11»	«Аполлон-12»	«Аполлон-14»	«Аполлон-11»	«Аполлон-12»	«Аполлон-14»
SiO ₂	41,80	46,52	47,78	42,04	46,40	47,93
Al ₂ O ₃	13,10	14,64	16,76	13,92	13,50	17,60
Fe ₂ O ₃	0,00	0,00	0,00	0,00	0,0	0,00
FeO	15,90	13,85	10,24	15,74	15,50	10,37
MgO	7,70	9,06	10,57	7,90	9,73	9,24
CaO	11,80	11,15	10,48	12,01	10,50	11,19
Na ₂ O	0,46	0,61	0,83	0,44	0,59	0,68
K ₂ O	0,16	0,40	0,56	0,14	0,32	0,55
TiO ₂	8,49	2,17	1,68	7,48	2,66	1,74
P ₂ O ₅	< 0,2	—	0,54	0,12	0,40	0,53
MnO	0,22	0,19	0,13	0,21	0,21	0,14
Cr ₂ O ₃	0,32	0,33	0,21	0,30	0,40	0,25

¹ Из работы: *Rose H. J., Cuttitta F., Ansell C. S., Carron M. K., Christian R. P., Dwornik E. J., Greenland L. P., Ligon D. T.* Compositional data for twenty-one Fra Mauro lunar materials: Proc., Third Lunar Sci. Conf., 2; *D. Heymann*, ed., Geochim. et Cosmochim. Acta, Suppl., 3, 2, p. 1215 - 1229, 1972.

возможно, относится к доминирующему среди прочих возрасту пород, являющихся источником лунного реголита.

Значительный интерес вызвало определение магнитных свойств лунных брекчий и других пород. Гоце и др. [101] установили корреляцию магнитных свойств брекчий с «Аполлона-14» со степенью их метаморфизма; эти брекчий характеризуются заметной остаточной намагниченностью. Оказалось, что тип намагниченности коррелируется с размером зерен интерстициального железа, присутствующих в образце брекчий, что в свою очередь коррелируется со степенью метаморфизма. Отсюда сделан вывод, что остаточная намагниченность лунных брекчий имеет термическое происхождение и одновозрастна с периодом образования брекчий. Однако обычно в лунных брекчиях содержится такой компонент намагниченности, который так же стабилен, как величина намагниченности, характерная для лунных изверженных пород, правда, этот параметр обычно очень невелик. Типичные значения природной остаточной намагниченности лунных пород варьируют в диапазоне от $2 \cdot 10^{-6}$ до $2 \cdot 10^{-3}$ э. м. е./г [102]. Статистический анализ показал, что природная остаточная намагниченность брекчий выше, чем в породах с магматическими структурами.

Большинство исследователей считают, что «устойчивый» компонент намагниченности лунных пород представлен термоостаточной намагниченностью, приобретаемой в магнитном поле напряженностью примерно в 10^3 γ [102]. Следует отме-

туть, что напряженность остаточных магнитных полей, измененных в настоящее время на Луне, варьирует примерно от 6γ до величины, несколько превышающей 100γ. С помощью вспомогательных спутников, запущенных с космических кораблей «Аполлон-15» и «Аполлон-16», было установлено, что характерные размеры лунных магнитных аномалий измеряются десятками километров. Кроме того, имеются наблюдения, показывающие, что интенсивность магнитного поля над материками выше, чем над поверхностями морей. Некоторые крупные аномалии ассоциируются с кратерами, такими, как Ван-де-Грааф. Ранкорн с сотрудниками [103] активно поддерживают представление о том, что намагниченность лунных пород в основном обусловлена существованием внутреннего лунного магнитного поля как результата движений в расплавленном ядре Луны на ранних этапах ее истории. Тем не менее эта гипотеза и другие варианты, а также проблема происхождения намагниченности лунных образцов и региональных лунных магнитных полей все еще остаются предметом дискуссий.

Органические и биологические анализы. Лунные образцы, особенно брекчии и грунт, детально исследовались с целью установления содержания в них органических соединений и возможных форм жизни. К хранению и изучению в изолированных условиях первых образцов, доставленных с Луны, предъявлялись такие требования, как будто в них содержались «крайне опасные болезнетворные формы». Были сконструированы специальные устройства для изоляции биологических агентов в образцах, а также самого экипажа космического корабля до тех пор, пока с помощью тестов не удостоверили отсутствие каких-либо организмов, которые могли бы представить опасность для земной биосферы. Была построена и оснащена специальная Лунная приемная лаборатория, в задачу которой входило проведение таких тестов на образцах и экипаже, находившихся в изоляции, а также осуществление предварительного геологического изучения образцов и других неотложных экспериментов [104]. Результаты опытов в карантине и экспериментов по обнаружению жизни, конечно, оказались полностью отрицательными [105], равно как и поиски ископаемых форм жизни [106]. В лунных образцах были найдены органический углерод и его соединения, однако их концентрация оказалась крайне низкой; она коррелируется с допустимым масштабом контаминации этих образцов [107]. Практически во всех образцах с поверхности Луны обнаружены малые количества углерода, метана и этана, однако источником их почти наверняка является солнечный ветер. Содержание углерода и его соединений во многих метеоритах намного превышает их концентрации в лунных образцах.

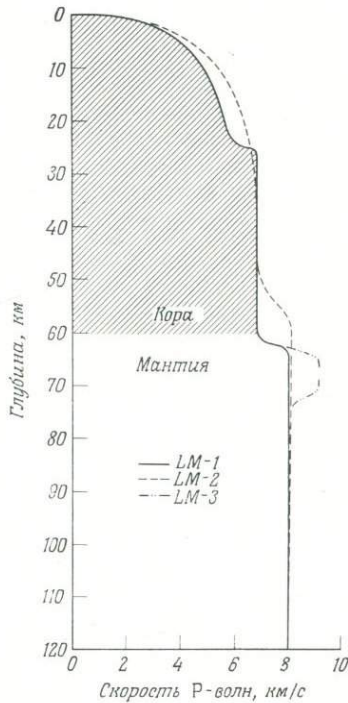
ГЕОФИЗИКА ЛУНЫ

Данные, полученные с помощью приборов, размещенных на поверхности Луны, а также на космических аппаратах, запущенных на селеноцентрические орбиты, дали возможность представить широкую картину геофизического строения Луны, особенно если рассматривать эти данные в комплексе с материалами изучения лунных образцов.

СТРУКТУРА ЛУННОЙ КОРЫ

Структуру близповерхностной части разреза лунных пород удалось выявить с помощью пассивных и активных лунных сейсмических экспериментов [108] и изучения скоростей прохождения сейсмических волн в образцах, доставленных с Луны. Помимо лунотрясений и мелких детонационных взрывов, падения на лунную поверхность взлетных ступеней лунных моделей и второй ступени ракеты «Сатурн-IVB» сыграли роль превосходных энергетических источников для геофизических исследований лунных недр [109]. Скоростная структура близповерхностного слоя и внутренних частей Луны выведена на основании прямых наблюдений и таких расчетных моделей скоростной структуры, которые дают наилучшее приближение к результатам наблюдений. Близповерхностная зона Луны совершенно определенно имеет различное строение в разных районах, однако обобщения, которые мы делаем, представляются обоснованными, исходя из доступной в настоящее время информации.

Поверхность Луны и неглубокий приповерхностный слой состоят из скопления обломков горных пород и минеральных зерен, представляющих слабосвязный материал. Скорость распространения сейсмических волн в этом слое составляет 180—220 м/с. На глубине от 3 до 15 м описанный горизонт подстилается высокоскоростным слоем, который характеризуется скоростями 250—300 м/с. Далее до глубины приблизительно 5 км происходит постепенное увеличение скорости волн примерно до 4 км/с [110]. Ниже 5 км скорость продолжает постепенно увеличиваться до 6 км/с на 25-километровой глубине, где наблюдается резкое изменение наклона кривой глубина — скорость (фиг. 54), а затем вплоть до глубины 60 км скорость остается практически постоянной и составляет 7 км/с. На глубине 60 км наблюдаются новый резкий скачок и возрастание скорости волн до глубины 63 км, где она достигает примерно 8 км/с [111].



Фиг. 54. График зависимости скорости продольных сейсмических волн во внешнем слое Луны мощностью 120 км от глубины.

Следует отметить существование границы между «корой» и «мантией» на глубине примерно 60 км и приповерхностную границу на глубине 25 км. Пунктиром показаны другие лунные модели скоростных разрезов (LM), которые в основном отвечают тем же результатам наблюдений. Предоставлено Леммлейном [116]; авторские права Американского геофизического союза.

Интерпретация вышеперечисленных данных сводится к тому, что на Луне существует фрагментарный и трещиноватый внешний слой, мощность которого оценивают в несколько километров. Ниже этого слоя до глубины 25 км Луна, по-видимому, сложена базальтами (или иными породами с той же скоростью распространения волн). На глубине от 25 до 65 км, судя по скоростному разрезу и результатам изучения лунных образцов, вероятнее всего, залегают аноксидированные габбро. Ниже глубины

65 км, т. е. ниже границы между лунной корой и мантией, породы представлены, по-видимому, более мафическими разностями и, вероятно, обогащены оливином и пироксеном, что объясняет высокую скорость распространения сейсмических волн в этом слое [111]. Если учесть, что несколько лунных сейсмических станций до сих пор функционируют, то с использованием новых дополнительных данных вышеизложенную модель можно будет уточнить и расширить.

СОСТОЯНИЕ ВНУТРЕННИХ ЧАСТЕЙ ЛУНЫ

Температура и физическое состояние внутренних частей Луны являются предметом широкого обсуждения. Различные исследователи представляют недра Луны по-разному: есть аргументы в пользу горячего, холодного и слегка нагретого состояния. Эти представления в разной степени учитывают предполагаемую скорость (а, следовательно, количество тепла) аккреции, предполагаемое содержание радиоактивных элементов и гипотетические механизмы происхождения Луны.

Недавние эксперименты на лунной поверхности в рамках программы «Аполлон» внесли свой вклад в обсуждение рассматриваемой проблемы. К этим исследованиям относятся осуществление пассивных сейсмических экспериментов, измерения теплового потока и работа магнитометра, установленного на поверхности Луны. В ходе эксперимента по определению теплового потока [112] были выполнены непосредственные определения этого параметра и температуры приповерхностного слоя в двух местах посадки космических кораблей («Аполлон-15» и «Аполлон-17»). Оказалось, что тепловой поток на лунной поверхности составляет примерно половину теплового потока, измеренного на поверхности Земли. Это удивительно высокое значение для небесного тела, диаметр которого составляет всего $1/4$ земного. В месте посадки «Аполлона-15» измеренная величина теплового потока несколько ниже $3,3 \cdot 10^{-6}$ вт/см². Аналогичные значения были получены при измерениях в месте посадки «Аполлона-17». Если такие цифры типичны для большей части лунной поверхности, то в настоящее время температура Луны слишком высока для того, чтобы ее можно было согласовать с «хондритовой» моделью состава Луны. Для обеспечения необходимого разогрева при экзотермическом радиоактивном распаде К, Th или U средние содержания этих элементов в породах Луны должны были бы превышать их концентрации в метеоритах класса хондритов.

По данным Сонетта и др. [113], полученным с помощью анализа телеметрической информации магнитометра на поверхно-

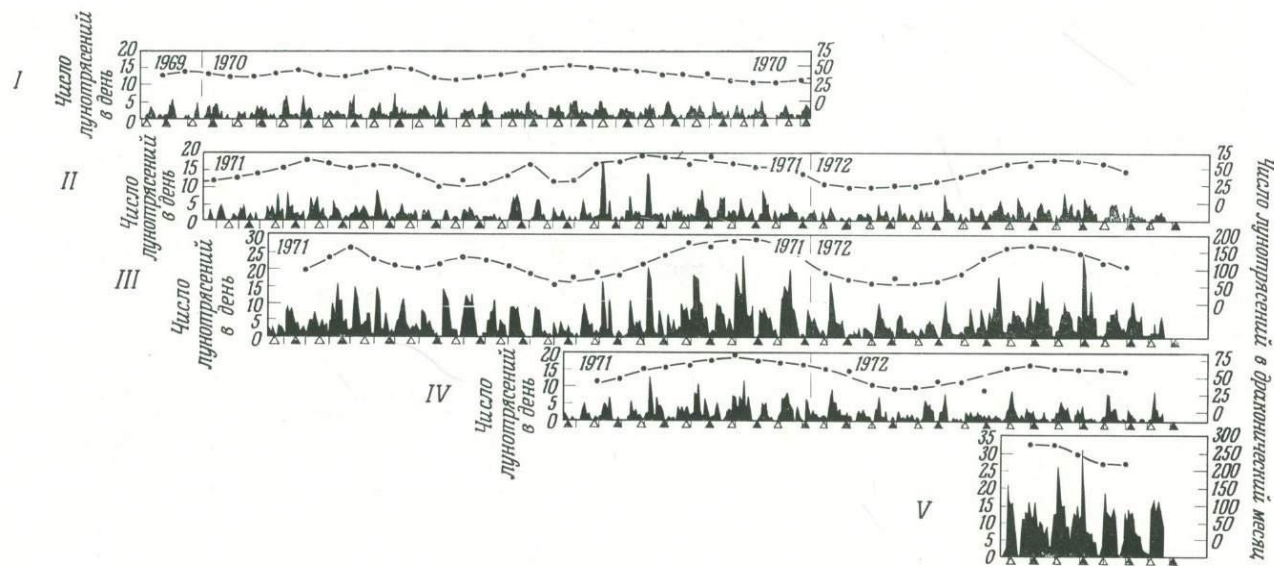
сти Луны, наиболее предпочтительна была бы модель холодной или слабо нагретой Луны. По этой модели в глубинах ядра температура достигает 800°C , а пик на профиле электропроводности соответствует температуре всего 450°C . Однако в работе Дайела и др. [114] приводятся более высокие температуры, характеризующие недра Луны.

Самые последние данные пассивного лунного сейсмического эксперимента [115] указывают на возможность частичного плавления лунных недр ниже глубины примерно 1050 км, где температура достигает приблизительно 1000°C . Эти выводы основаны на следующем наблюдении: поперечные сейсмические волны, возникающие на обратной стороне Луны вследствие ударов метеороидов и лунотрясений, не фиксируются некоторыми сейсмографами, установленными на видимой стороне. Потери энергии поперечных волн указывают на их сильное затухание (низкая сейсмическая добротность) во внутренних частях Луны, что так же, как и на Земле, должно быть обусловлено частичным плавлением силикатов. Дальнейшим подтверждением высокой степени разогревания сравнительно неглубоких слоев могли бы служить находки молодых лунных вулканических пород, однако таковые пока не обнаружены. Наиболее молодые из известных к настоящему времени лунных пород имеют возраст не менее 3 млрд. лет.

Приповерхностный слой характеризуется очень слабым затуханием сейсмических колебаний (высокой сейсмической добротностью). Это явление наблюдается при записи сейсмических колебаний, вызванных падением космических аппаратов и ступеней ракет: такие сейсмограммы регистрируются исключительно долго, иногда в течение двух часов. Причины столь слабых затуханий сейсмических волн пока не выявлены. Возможно, внешняя оболочка Луны обладает достаточной жесткостью и способна выдержать значительную литостатическую нагрузку, например масконы (стр. 259), в течение длительного периода времени.

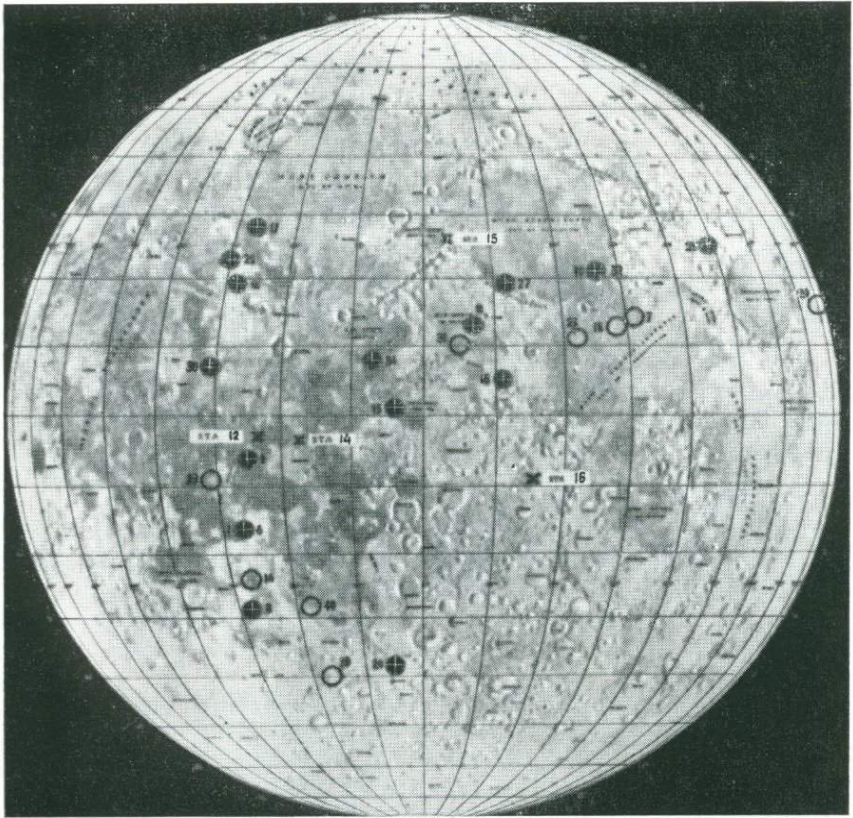
ЛУНОТЯСЕНИЯ И ТЕКТНИКА ЛУНЫ

Пассивный сейсмический эксперимент показал, что Луна по сравнению с Землей практически асейсмична. Если бы не высокая чувствительность установленных на Луне сейсмометров, действующих на фоне исключительно низкого сейсмического шума Луны, то можно было бы прийти к выводу о полном отсутствии тектонической жизни нашего спутника. Однако наблюдается большое число очень слабых лунотрясений (около 1800 в год), причем они происходят с определенной периодич-



Фиг. 55. Лунная сейсмическая активность (кроме метеороидных ударов) за период с 24 ноября 1969 г. по 27 июля 1972 г.

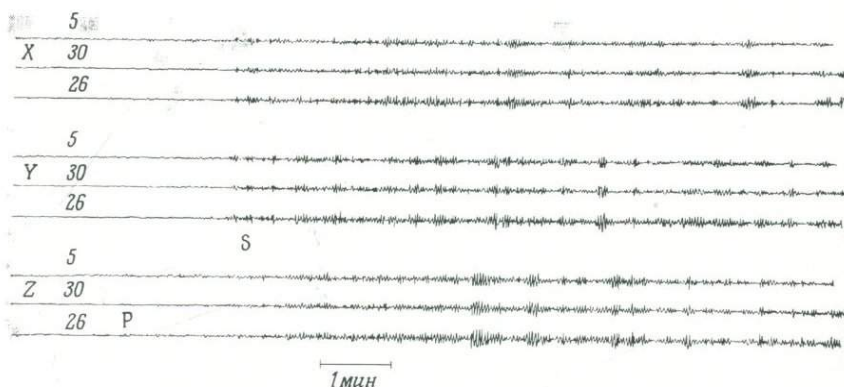
I — станция 12, 24 ноября 1969 г.— 31 декабря 1970 г.; II — станция 12, 1 января 1971 г.— 27 июля 1972 г.; III — станции 14, 7 февраля 1971 г.— 27 июля 1972 г.; IV — станция 15, 3 августа 1971 г.— 27 июля 1972 г.; V — станция 16, 22 апреля 1972 г.— 27 июля 1972 г. Число лунотрясений в день представлено как функция времени. Вертикальными штрихами на оси абсцисс показано время максимальной либрации по долготе. Черные треугольники обозначают периоды перигея, а светлые — периоды апогея. Пунктирные линии обозначают число сейсмических событий за драконический месяц. Долгопериодические вариации числа лунотрясений (около 206 земных суток) наблюдались в 1971 и 1972 гг. на станциях № 12, 14 и 15, но отсутствовали в течение 1969—1970 гг. на станции № 12. Местоположение сейсмических станций см. на фиг. 56. Предоставлено Леммлейном [116]; авторские права Американского геофизического союза.



Фиг. 56. Расположение эпицентров лунных сейсмических событий эндогенного происхождения и сейсмических станций, установленных экипажами кораблей «Аполлон-12», «Аполлон-14», «Аполлон-16».

Светлыми кружками показаны очаги лунотрясений глубиной от 730 до 1200 км; черными — очаги, глубина которых не поддается определению. Отметим, что эпицентры № 1 и 6, 18 и 32 настолько сближены, что их нельзя различить в данном масштабе. Один из очагов расположен на обратной стороне Луны. Предоставлено Леммлейном [116]; авторские права Американского геофизического союза.

ностью. Отмечена четкая тенденция приуроченности сейсмических событий к периодам максимального проявления приливных сил (фиг. 55) [116]. Более того, многие из подобных лунотрясений имеют абсолютно одинаковые очаги и исходят из одних и тех же эпицентров (фиг. 56) в пределах точности сейсмометрической сети. Совпадение эпицентров и очагов лунотрясений, по-видимому, можно объяснить их происхождением в результате тектонических движений, связанных с одними и теми же



Фиг. 57. Растянутые во времени записи трех следующих друг за другом лунных сейсмических явлений.

Следует отметить исключительное сходство зафиксированных серий колебаний. X и Y — долгопериодические горизонтальные составляющие; Z — вертикальная долгопериодическая составляющая. Две наиболее ярко выраженные фазы колебаний соответствуют вступлениям прямых продольных волн (P-волн) и поперечных волн (S-волн). Такие сходные сейсмические события происходят в одном очаге и, по-видимому, возникают в результате движений по одному и тому же разлому под действием приливных сил. Предоставлено Леммлейном [116]; авторские права Американского геофизического союза.

структурами или трещинами. Подобная интерпретация согласуется с поразительным сходством форм записи сейсмограмм (фиг. 57). Такие наблюдения могут иметь место только в случае, если размеры очаговых зон крайне невелики и достигают всего 10 км и менее, в противном случае в неоднородной среде не могли бы возникнуть серии сейсмических колебаний, зарегистрированные в столь одинаковой форме [117].

Очаги лунотрясений в основном располагаются на довольно больших глубинах (примерно 800 км) [117], а их максимальные магнитуды по шкале Рихтера равны 2—3. Согласно Латэму и др., общий расход сейсмической энергии, высвобождаемой Луной, оценивается величиной порядка 10^{15} эрг/год, что на 9 порядков ниже, чем на Земле.

Большинство сейсмических сигналов лунотрясений не обладает сходными формами записи колебаний; лунотрясения, как правило, группируются в «рой», соответствующий «пароксизму» [117]. Такие события происходят с частотой 8—12 в день в пределах пароксизма по сравнению с частотой 1—2 в день в промежутках между пароксизмами. Пароксизмы возникают и заканчиваются внезапно и не относятся к какому-либо одному крупному или достаточно заметному сейсмическому событию. Согласно гипотезе Латэма и др., описанные пароксизмы луно-

трясений могут соответствовать периодам лунной вулканической активности, которые в настоящее время крайне непродолжительны.

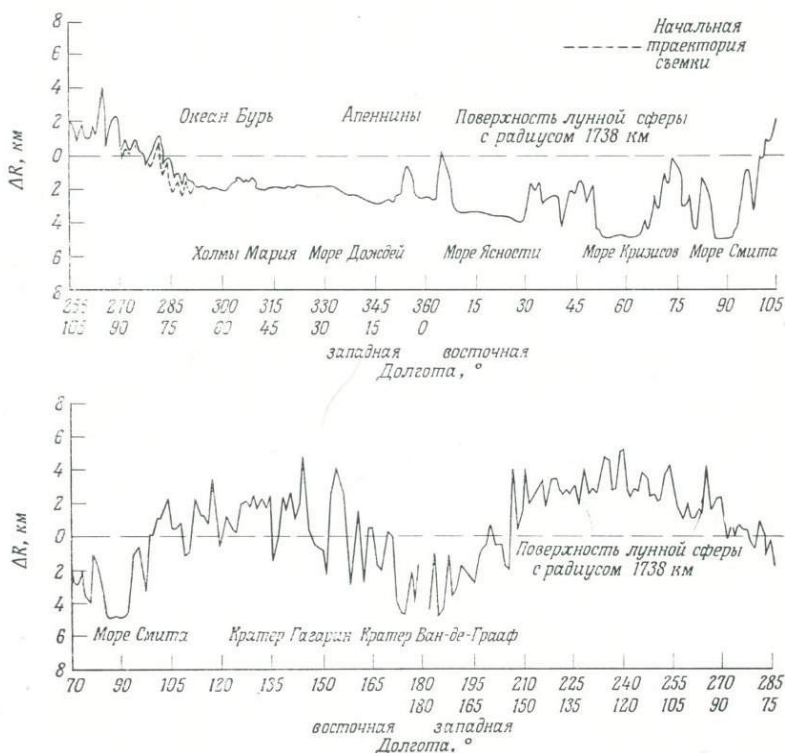
МАСКОНЫ

Детальный анализ движения космического корабля по окололунной орбите позволил Мюллеру и Сьогрену [118] установить наличие крупных положительных гравитационных аномалий, ассоциирующихся с круговыми морскими бассейнами. Указанные авторы назвали эти аномалии «масконами» (концентрации масс), и этот термин получил широкое распространение. Данные последующих наблюдений подтвердили существование масконов, однако относительно их происхождения взгляды расходятся. Юри [119] предположил, что масконы возникают при захвате Луной метеоритных тел с высокой плотностью, что может осуществиться при низких относительных орбитальных скоростях. Другие исследователи начали систематизацию и обобщение информации о Луне с целью обнаружить дополнительные масконы, в результате чего Кемпбеллу и др. [120] удалось выявить два новых бассейна с масконами, один из которых расположен на обратной стороне Луны и имеет огромные размеры.

В первом приближении происхождение масконов, по-видимому, нетрудно объяснить. Теперь, имея в своем распоряжении анализы лунных образцов, мы знаем, что лунные моря сложены базальтовыми породами, плотность которых колеблется от 3,2 до 3,4 г/см³, а плотности соответствующих пород, обогащенных полевым шпатом, и мощных стекловатых брекчий, развитых на лунных материках, равны 2,9—3,1 г/см³. Ассоциация масконов с кольцеобразными морскими бассейнами, почти несомненно, отражает значительную мощность пород высокой плотности, заполняющих кратер и наличие связанных с ним трещин, образованных в результате крупных ударных явлений. Отсутствие масконов, связанных с морским материалом вне кольцевых морских бассейнов, вероятно, обусловлено незначительной мощностью морского материала. Для интерпретации величины наблюдаемых аномалий, очевидно, нет необходимости привлекать существование остаточного метеоритного вещества с высокой плотностью. Однако проблема осложняется, поскольку используется допущение о степени изостатической компенсации. Вполне может быть, что благодаря существованию мощной жесткой внешней оболочки Луны масконы могут находиться в состоянии, исключающем полное изостатическое равновесие в течение чрезвычайно длительного периода времени.

ЛАЗЕРНАЯ АЛЬТИМЕТРИЯ

Эксперимент с лазерным альтиметром впервые был поставлен на командном и служебном отсеках космического корабля «Аполлон-15» и подтвердил ряд важных фактов, связанных со строением Луны. Примерно после четырех с половиной витков альтиметры показали, что центр масс Луны смещен на 2 км от геометрического центра ее фигуры по направлению к ее видимой стороне [121]. Были построены точные профили поверхности районов, над которыми проходила орбита движения космического корабля (фиг. 58). Эти профили показывают, что гипсометрические отметки морей намного ниже, чем материков, а их поверхность значительно ровнее. Некоторые элементы рельефа оказались более резко выраженными, чем ожидалось.



Фиг. 58. Профили лазерной альтиметрии на видимой (вверху) и обратной стороне Луны (внизу) по данным эксперимента на космическом корабле «Аполлон-15».

Займствовано из работы Kaula W. M. et al., Analysis and interpretation of lunar laser altimetry; с разрешения издательства Массачусетского технологического института, Кейсбридж, Массачусетс, США.

Например, глубина кратера Гагарин от дна до его вала составляет примерно 6 км, а дно Моря Смита находится на 4 км ниже окружающих лунных материков. На высоте съемки от 74 до 148 км лазерный луч высвечивает участок с диаметром примерно в 30 м, а точность альтиметрических измерений составляет при этом ± 2 м. С помощью такого метода было найдено, что некоторые лунные моря имеют исключительно плоскую поверхность с колебаниями не более 150 м на расстоянии от 200 до 600 км [121].

Каула и др. [121], по данным альтиметрии, сейсмичности и вещественному составу Луны вычислили отношение моментов инерции I/MR^2 , где I — средний момент инерции, M — масса, R — радиус. Наиболее предпочтительной величиной по сравнению с 0,4 является отношение моментов инерции, равное 0,395; последнее отвечает соответствующему отношению для сферы, характеризуемой однородным распределением плотности. Этот факт накладывает существенные ограничения на допустимые размеры гипотетического железоникелевого ядра Луны, объем которого не должен превышать 3% от общего объема Луны.

ОРБИТАЛЬНАЯ ГАММА-СПЕКТРОМЕТРИЯ И РЕНТГЕНОМЕТРИЯ

Орбитальный эксперимент по гамма-спектрометрии был предпринят экипажами космических кораблей «Аполлон-15» и «Аполлон-16» [123]. Несмотря на то что разрешающая способность спектра установленного прибора не особенно высокая, она достаточна для обнаружения ряда важных основных образований. Различия в скорости счета в диапазоне энергии γ -квантов 0,55—2,75 Мэв обусловлены в основном различиями содержаний Th, U и K. Наиболее высокая радиоактивность района, охваченного данным экспериментом, приходится на участки Моря Дождей и Океана Бурь (включая материковую область Аристарх) и укладывается в интервал значений от 84 до более 91 импульса в секунду. Уровень радиоактивности остальной поверхности Луны намного ниже и составляет 74—84 импульсов в секунду. Кроме того, создается впечатление, что величина отношения K/U на всей лунной поверхности ниже, чем на поверхности Земли.

Рентгено-флуоресцентный анализ, выполненный экспедицией «Аполлон-15», показал, что породы лунных материков систематически обогащены алюминием и обеднены магнием по сравнению с породами лунных морей; значит, они, по-видимому, обогащены плагиоклазом по сравнению с морскими породами. Согласно интерпретации Адлера и др. [124], доминирую-

щим типом материковых пород, вероятно, являются анортозитовые габбро или полевошпатовые базальты с подчиненным количеством анортозитов или других пород. Те же авторы полагают, что обогащенные полевым шпатом материковые породы могут представлять первую из главных стадий дифференциации Луны.

ПРОИСХОЖДЕНИЕ ЛУНЫ

До того как на Землю были доставлены образцы лунных пород, собранные в ходе экспедиций «Аполлон», наиболее популярными теориями происхождения Луны были две: а) Луна представляет собой часть Земли, которая была отторгнута либо в результате увеличения скорости вращения прото-Земли, либо под действием гравитационного поля какого-то третьего небесного тела; б) Луна представляет собой крупный захваченный астероид или иное тело, происхождение которого связано с другой областью Солнечной системы.

Дж. Дарвин предложил в 1908 г. «гипотезу отделения» с приложением схем подобного механизма отделения Луны от Земли [125]. Впоследствии эта гипотеза и ее вариации обсуждались Уайзе [126] и О'Кифом [127]. Оказалось, что непосредственно после отделения в связи с разогревом, вызванным приливными силами трения, должна произойти значительная потеря массы, так же как и углового момента движения. Идея гравитационного взаимодействия с другим (неопределенным) небесным телом отвергается большинством современных исследователей из-за ее относительно малой вероятности и контраргументов из области динамики. Однако причины ротационной неустойчивости более массивной прото-Земли остаются также неясными. Дарвин [125] и другие ранние исследователи этой проблемы считали, что ротационная неустойчивость протопланеты могла быть обусловлена сжатием при ее остывании. О'Киф показал, что подобный механизм почти не повлияет на ротационную неустойчивость массы планеты. Рингвуд и др. [128] допускают, что ротационная неустойчивость могла быть следствием дифференциации планеты, иными словами, формирования ее ядра. Очевидно, что образование ядра приведет к увеличению скорости вращения, однако О'Киф [129] убедительно показал, что этот феномен приведет одновременно и к усилению ротационной устойчивости планеты. Представляется крайне маловероятным отделение Луны от Земли до образования земного ядра или до начала глобального процесса дифференциации. Если бы это было так, средняя плотность Луны (с поправкой

на гравитационное сжатие) совпадала бы со средней плотностью Земли ($5,5 \text{ г/см}^3$), на самом же деле она равна $3,34 \text{ г/см}^3$. Если Луна отделилась после завершения глобальной дифференциации Земли, то она должна состоять из вещества земной коры и верхней мантии (объем Луны составляет примерно лишь $\frac{1}{80}$ объема Земли), однако, судя по образцам, доставленным с Луны, различия в химизме этого материала и пород земной коры и мантии слишком велики, чтобы можно было принять упомянутую гипотезу происхождения Луны. Однако в работе О'Кифа [129] мы находим утверждение, что Луна имеет примерно такой же дефицит сидерофильных элементов, как кора и мантия Земли. Далее О'Киф предполагает, что отсутствие летучих элементов в веществе Луны можно было бы объяснить интенсивным разогревом, происходящим после отделения Луны и обусловленным приливными силами, что согласуется с представлениями Уайзе [126]. Рингвуд и Эссен [130] в целом поддерживают модернизированную гипотезу отделения Луны от Земли, защищаемую О'Кифом и Уайзе. Однако они полагают, что химическое фракционирование вещества Земли и Луны настолько велико по своим масштабам, что, вероятно, потребуется полное испарение материала, который затем конденсируется и образует Луну. Рингвуд подчеркивает, что источником этого материала, который после аккреции формировал Луну, могла быть гигантская горячая первичная атмосфера.

Гипотезу захвата как основу для объяснения происхождения Луны широко поддерживали до экспедиции «Аполлона-11», но после она стала менее популярной. Исследования эволюции Луны вследствие приливных сил, выполненные Герстенкорном [131], показали, что Луна находилась недалеко от Земли всего ~ 2 млрд. лет назад. Поскольку это намного меньше возраста Земли, Герстенкорн предположил, что Луна была захвачена незадолго до периода ее максимального сближения с Землей и переведена на орбиту ретроградного обращения вокруг Земли. Мак-Доналд [132] и Эпик [133] указывают, что сближение Луны с Землей должно было вызвать значительное разогревание обоих тел вследствие внутренних приливных сил. Кроме того, все формы строения поверхности Луны, наблюдаемые в настоящее время, должны были сформироваться в основном во время захвата или после него, а геологическое строение древних пород земной коры должно было бы нести отпечаток этих грандиозных событий, однако этого не наблюдается. Можно добавить еще, что возраст кристаллизации лунных пород намного превышает 2 млрд. лет. Юри [134] в свою очередь допускает, что захват Луны произошел примерно 4,5 млрд. лет назад, причем это тело имело первичный химический состав, близкий (за исключением газов) к составу Солнца, и отлича-

лось от планет земной группы отношением железа к силикатам. Однако пересмотр величины распространенности железа в солнечной атмосфере [135] привел к аннулированию этого аргумента. В работе Рингвуда [130] суммированы итоги современной разработки гипотезы захвата, при этом показано, что «захват Луны Землей представляется весьма маловероятным событием».

Гипотеза «двойной планеты» предполагает, что Луна всегда была ближайшим соседом Земли, а ее аккреция происходила в одном и том же районе Солнечной системы. Согласно этой гипотезе, уже в ходе дифференциации протопланетного облака в Земле произошло преимущественное по сравнению с Луной накопление металлического железа; однако эти процессы нельзя точно описать или представить [136]. Недавно было выдвинуто предположение о том, что аккреция Земли завершилась до образования Луны, причем Солнце стало светящимся телом до того, как аккреция привела к формированию Луны в виде тела осязаемых размеров. Если это действительно так, то находит свое объяснение удерживание летучих элементов Землей, равно как и их дефицит на Луне, однако механизм аккреции Луны остается весьма малопонятным.

Каково бы ни было происхождение Луны, следует принимать во внимание такие факты, как древний возраст пород лунной поверхности, современное состояние ее недр, существующие различия в составе лунных, земных пород и метеоритов. Процессы возникновения спутников планет не могут быть чрезвычайно маловероятными событиями, поскольку таких спутников в Солнечной системе достаточно много. Захват астероидов представляется вполне реальным механизмом происхождения внешних спутников Юпитера и спутников Марса, однако фундаментальная проблема возникновения более крупных тел Солнечной системы, в особенности нашей Луны, остается все еще далекой от своего решения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Koestler A.*, The sleepwalkers — A history of man's changing vision of the Universe, Macmillan, New York, 624 p., 1959.
2. *Emanuelli P.*, Da Vinci's astronomy, in Leonardo Da Vinci, Istituto Geografico De Agostini S. p. A., Novara, Reynal and Co., New York, p. 208, 1956.
3. *Gilbert G. K.*, The Moon's face: A study of the origin of its features, Bull. Phil. Soc. Wash., 12, p. 241—292, 1893.
4. *Gifford A. C.*, The mountains of the Moon, New Zealand Jour. Sci. Tech., 7, p. 129—142, 1924; см. также 11, p. 319—327, 1930.

5. *Mohorovicic S.*, Experimentelle Untersuchungen Über die Entstehung der Mondkrater: ein neuer Beitrag zur Explosionshypothese (на хорватском языке; резюме на немецком языке) *Archiv za Hemiju i Farmaciju*, Zagreb., 2, p. 66—76, 1928.
6. *Wegener A.*, Die Entstehung der Mondkrater, Sammlung Vieweg, Heft 55, Braunschweig, 48 p., 1921. См. также перевод на английский язык в *The Moon*, 14, p. 211—236, 1975.
7. *Barrell J.*, On continued fragmentation, and the geologic bearing of the Moon's surficial features, *Am. Jour. Sci.*, 5th ser., 13, p. 282—314, 1927. См. также *Smithsonian Inst. Ann. Rept.*, p. 283—306, 1928.
8. *Spencer L. J.*, Meteorites and the craters on the Moon, *Nature*, 139, p. 655—657, 1937.
9. *Baldwin R. B.*, The measure of the Moon, Univ. of Chicago Press, Chicago, 488 p., 1963.
10. *Fielder G.*, Structure of the Moon's surface, Pergamon Press, New York, 266 p., 1961. См. также *Fielder G.*, Lunar geology, Lutterworth Press, London, 184 p., 1965 и многочисленные работы этого автора с соавторами.
11. *Hackman R. J.*, Photointerpretation of the lunar surface (with fold-in map supplement), *Photogramm. Eng.*, 27, No. 3, p. 377—386, 1961; *Geology of the Moon*, *Space Sci.*, 10, No. 10, p. 2—6, 1961, см. также *Hackman R. J.*, *Mason A. C.*, Engineer special study of the surface of the Moon, U. S. Geol. Survey, Misc. Geol. Inv., Map I-351 (4 sheets), 1961. Особенно см. *Hackman R. J.*, Geologic map of the Kepler region of the Moon, U. S. Geol. Survey, Misc. Geol. Inv., Map I-355, 1962.
12. *Shoemaker E. M.*, *Hackman R. J.*, Stratigraphic basis for a lunar time scale, in *The Moon*, *Kopal Z.*, *Mikhailov Z. K.*, eds., Symp. No. 14, Intern. Astron. Union, Academic Press, London, p. 289—300, 1962; кроме того, *Shoemaker E. M.*, *Hackman R. J.*, *Eggleton R. E.*, Interplanetary correlation of geologic time, *Advances in the Astronaut. Sci.*, 8, p. 70—89, 1962.
13. *Wilhelms D. E.*, Summary of lunar stratigraphy — Telescopic observations, U. S. Geol. Survey Prof. Pap. 599—F, 47 p., 1970.
14. Например, см. *El Baz F.*, New geological findings in Apollo 15 lunar orbital photography, *Proc. Third Lunar Sci. Conf.*, *Geochim. et Cosmochim. Acta*, Suppl. 3, 1, *King E. A., Jr.*, ed., p. 39—61, 1972; кроме того, *El Baz F.*, *Roosa S. A.*, *ibid.*, p. 63—83.
15. *Wilhelm D. E.*, *McCauley J. F.*, Geologic map of the near side of the Moon, U. S. Geol. Survey, Map I—703, 1974; кроме того, *McCauley J. F.*, *Wilhelms D. E.*, Geological province map of the near side of the Moon, *Icarus*, 15, p. 363—367, 1974.
16. Существует обширная литература, но для введения в курс дела см. сводки в *Baldwin R. B.*, The measure of the Moon, Univ. of Chicago Press, Chicago, 488 p., 1963; кроме того, *Salisbury J. W.*, *Glaser P. E.*, eds., The lunar surface layer — Materials and characteristics, Academic Press, New York, 532 p., 1964; *Hess W. N.*, *Menzel D. H.*, *O'Keefe J. A.*, eds., The nature of the lunar surface, Johns Hopkins Press, Baltimore, Md., 320 p., 1966 и многие другие работы.
17. *Salisbury J. W.*, *Smalley V. G.*, The lunar surface layer, in *The Lunar Surface Layer — Materials and Characteristics*, *Salisbury J. W.*, *Glaser P. E.*, eds., Academic Press, New York, p. 410—443, 1964.
18. *Shoemaker E. M.*, Preliminary analysis of the fine structure of the lunar surface in Mare Cognitum, in *The Nature of the Lunar Surface*, *Hess W. N.*, *Menzel D. H.*, *O'Keefe J. A.*, eds., The Johns Hopkins Press, Baltimore, Md., p. 23—77, 1966, кроме того, опубликовано в Jet Propulsion Lab., Cal. Inst. Tech., Tech. Rept. No. 32—700.
19. *Shoemaker E. M.*, *Hait M. H.*, *Swann G. A.*, *Schleicher D. L.*, *Dahlem D. H.*, *Schaber G. G.*, *Sutton R. L.*, Lunar regolith at

- Tranquillity Base, Science, **167**, p. 452—455, 1970; см. также *Oberbeck V. R., Quaide W. L.*, Estimated thickness of a fragmental surface layer of Oceanus Procellarum, Jour. Geophys. Res., **72**, No. 18, p. 4697—4704, 1967.
20. *Watkins J. S., Kovach R. L.*, Apollo 14 active seismic experiment, Science, **175**, p. 1244—1245, 1972.
 21. *Pohn H. A., Offield T. W.*, Lunar crater morphology and relative age determination of lunar geologic units, U. S. Geol. Survey, Interagency Rept., Astrogeol. 13, 35 p., 1969.
 22. *MacDonald T. L.*, The number and area of lunar objects, Jour. Brit. Astron. Assoc., **41**, p. 288—290, 1931.
 23. *Young J.*, A statistical investigation of the diameters and distribution of lunar craters, Jour. Brit. Astron. Assoc., **50**, p. 309—326, 1940.
 24. *Opik E. J.*, The lunar surface as an impact counter, Royal Astron. Soc., Monthly Notices, **120**, No. 5, p. 404—411, 1960; см. также *Kreiter T. J.*, Dating lunar features by using crater frequency, Pub. Astron. Soc. Pac. **72**, p. 393—398, 1960.
 25. *Gault D. E.*, Saturation and equilibrium conditions for impact cratering on the lunar surface — criteria and implications, Radio Sci., **5**, p. 273—291, 1970; эта работа не публиковалась в открытой печати вплоть до 1970 г., однако она была закончена в 1960 г. и была широко известна ученым, изучавшим Луну. См. также *Marcus A. H.*, A stochastic model for the formation and survival of lunar craters, Icarus, **3**, p. 460—472; **5**, p. 165—177, 178—190, 190—200, 590—605; **6**, p. 56—74, 1964. См. также *Marcus A. H.*, Statistical theories of lunar and Martian craters, in *Mantles of the Earth and Terrestrial Planets*, *Runcorn S. K.*, ed., Wiley, Interscience, New York, p. 417—424, 1967.
 26. Например, см. *Hartmann W. K.*, Terrestrial and lunar flux of large meteorites in the last two billion years, Icarus, **4**, p. 157—165, 1965; кроме того, Early lunar cratering, Icarus, **5**, p. 406—418, 1966; Preliminary note on lunar cratering rates and absolute time-scales, Icarus, **12**, p. 131—133, 1970; Lunar cratering chronology, Icarus, **13**, p. 299—301, 1971. См. также *Freyer R. J., Titulaer C.*, Counts of small craters in the southern lunar highlands, Earth and Planet, Sci. Letters, **9**, p. 6—9, 1970. См. также *Ronca L. B., Green R. R.*, Statistical geomorphology of the lunar surface, Geol. Soc. Am., Bull., **81**, p. 337—352, 1970. Кроме того, *Soderblom L. A., Lebofsky L. A.*, A technique for rapid determination of relative ages of lunar areas from Orbiter photography, Cal. Inst. Tech., Div. Earth and Planet. Sci., Contr. 1657, 1971 и другие многочисленные статьи.
 27. *Hartmann W. K.*, Paleocratering of the Moon: Review of post-Apollo data, Astrophys. Space Sci., **17**, p. 48—64, 1972.
 28. *Moore P. A.*, An evaluation of the reported lunar changes, in *Geological Problems in Lunar Research*, *Whipple F. E.*, ed., New York Acad. Sci., Annals, **123**, art. 2, p. 797—810, 1965; кроме того, Variations on the surface of the Moon, An Evaluation, Astron. Jour., **7**, No. 4, p. 106—113, 1965.
 29. *Козырев И. А.*, Свечение лунной поверхности и интенсивность солнечного корпускулярного излучения, Изв. Крымской астрофиз. обсер., **16**, стр. 148—159, 1956.
 30. *Kopal Z.*, The Moon, 2nd ed., Academic Press, New York, Chap. 6, p. 108—118, 1964.
 31. *Greenacre J. A.*, A recent observation of lunar color phenomena, Sky and Teles., **26**, No. 6, p. 316—317, 1963; кроме того, Another lunar color phenomenon, Sky and Teles., **27**, p. 3, 1964.
 32. Lunar color phenomena, USAF, ACIC Tech. Paper No. 12, 11 p., May, 1964.

33. *Kopal Z.*, Luminescence of the moon and solar activity, in *The Nature of the Lunar Surface*, *Hess W. N.*, *Menzel D. H.*, *O'Keefe J. A.*, eds., The Johns Hopkins Press, Baltimore, Md., p. 173—183, 1966; см. также *Derham C. J.*, *Geake J. E.*, Luminescence of meteorites, *Nature*, 201, p. 62—63, 1964.
34. *Turkevich A. L.*, Chemical analysis of surfaces by use of large-angle scattering of heavy charge particles, *Science*, 134, p. 672—674, 1961; кроме того, *Turkevich A. L.*, *Knolle K.*, *Emmert R. A.*, *Anderson W. A.*, *Patterson J. H.*, *Franzgrote E.*, Instrument for lunar surface chemical analysis, *Rev. Sci. Instr.*, 37, No. 12, p. 1681—1686, 1966 и другие статьи.
35. *Turkevich A. L.*, *Franzgrote E. J.*, *Patterson J. H.*, Chemical analysis of the Moon at the Surveyor V landing site — Preliminary results, *Cal. Inst. Tech.*, Jet Propulsion Lab., *Tech. Rept.* 32—1246, p. 120—149, 1967; кроме того, под тем же названием *Univ. of Chicago*, *Enrico Fermi Inst. Nuclear Studies*, Doc 67—84, 12 p. plus figures, 1967. См. также Chemical analysis of the Moon at the Surveyor V landing site, *Science*, 158, p. 635—637, 1967 и другие статьи.
36. *Turkevich A. L.*, *Franzgrote E. J.*, *Patterson J. H.*, Chemical composition of the lunar surface in Mare Tranquillitatis, *Science*, 165, p. 277—279, 1969.
37. *Turkevich A. L.*, *Franzgrote E. J.*, *Patterson J. H.*, Chemical analysis of the Moon at the Surveyor VI landing site — Preliminary results, *Cal. Inst. Tech.*, Jet Propulsion Lab., *Tech. Rept.* 32—1262, p. 127—153, 1968; кроме того, *Turkevich A. L.*, Chemical analysis of the Moon at the Surveyor VII. landing site — Preliminary results, *Science*, 162, p. 117—118, 1968.
38. Ниже перечислены основные источники информации о лунных образцах; однако помимо указанных книг имеется много отдельных журнальных публикаций: *Science*, 167, No. 3918, 30 January, 1970, 792 p. (это первая публикация результатов конференции по материалам экспедиции «Аполлон-11»); *Geochim. et Cosmochim. Acta*, Suppl. 1, 1—3, Proc. Apollo 11 Lunar Sci. Conf., *Levinson A. A.*, ed., Pergamon Press; *Geochim. et Cosmochim. Acta*, Suppl. 2, 1—3, Proc. Second Lunar Sci. Conf., *Levinson A. A.*, ed., Pergamon Press; *Geochim. et Cosmochim. Acta*, Suppl. 3, 1, *King E. A., Jr.*, ed., 2, *Heymann D.*, ed., 3, *Crisswell D. R.*, ed., Proc. Third Lunar Sci. Conf. MIT Press; *Geochim. et Cosmochim. Acta*, Suppl. 4, 1—3, Proc. Fourth Lunar Sci. Conf., Pergamon Press; *Geochim. et Cosmochim. Acta*, Suppl. 5, 1—3, Proc. Fifth Lunar Sci. Conf., Pergamon Press; *Geochim. et Cosmochim. Acta*, Suppl. 6, 1—3, Proc. Sixth Lunar Sci. Conf., Pergamon Press. В каждом случае краткое описание лунных образцов после их предварительного исследования до распределения материала между группами ученых помещалось в журнале «Science» за подписями сотрудников Группы предварительного изучения лунных образцов. Кроме того, после каждой лунной экспедиции исследователи получали каталоги с описанием образцов и другими сведениями; однако эти каталоги рассылались лишь сотрудникам, работавшим по программе «Аполлон» и некоторым депозитариям документов НАСА, и в настоящее время недоступны. Например, the Apollo 11, Lunar Sample Information Catalog, NASA, Manned Spacecraft Center, August 31, 1969, 412 p., вместе с таблицами был размножен в количестве 400 экземпляров и представляет собой библиографическую редкость. Сборник статей, посвященных исследованию части образца с «Луны-16», см. в *Earth and Planetary Sci. Letters*, 13, No. 2, p. 223—471; серию статей, посвященных образцу с «Луны-20», см. в *Earth and Planetary Sci. Letters*, 17, No. 4; кроме того, *Geochim. et Cosmochim. Acta*, 37, No. 4, April, 1973.

39. Например, см. *Dence M. R., Plant A. G.*, Analysis of Fra Mauro samples and the origin of the Imbrium Basin, Proc. Third Lunar Sci. Conf., Geochim. et Cosmochim. Acta, Suppl. 3, 1, *King E. A., Jr.*, ed., p. 379—399, 1972; *Green D. H., Ringwood A. E., Ware N. G., Hibberson W. O.*, Experimental petrology and petrogenesis of Apollo 14 basalts, Proc. Third Lunar Sci. Conf., Geochim. et Cosmochim. Acta, Suppl. 3, 1, *King E. A., Jr.*, ed., p. 197—206, 1972 и другие статьи в том же томе. См. также *Ganapathy R., Laul J. C., Morgan J. W., Anders E.*, Moon: Possible nature of the body that produced the Imbrian Basin, from the composition of Apollo 14 Samples, Science, 175, p. 55—58, 1972.
40. *Chao E. C. T., Minkin J. A., Erondel C., Klein C., Jr., Drake J. C., Fuchs L., Tani B., Smith J. V., Anderson A. T., Moore P. B., Zechman G. R., Jr., Traill R. J., Plant A. G., Douglas J. A. V., Dence M. R.*, Pyroxferroite, a new calcium bearing iron silicate from Tranquillity Base, Proc. Apollo 11 Lunar Sci. Conf., *Levinson A. A.*, ed., Geochim. et Cosmochim. Acta, Suppl. 1, 1, Pergamon Press, p. 65—79, 1970.
41. *Anderson A. T., Bunch T. E., Cameron E. N., Haggerty S. E., Boyd F. R., Finger L. W., James O. B., Keil K., Prinz M., Ramdohr P., El Goresy A.*, Armalcolite, A new mineral from the Apollo 11 samples, Proc. Apollo 11 Lunar Sci. Conf., *Levinson A. A.*, ed., Geochim. et Cosmochim. Acta, Suppl. 1, 1, Pergamon Press, p. 55—63, 1970.
42. *Lovering J. F., Wark D. A., Reid A. F., Ware N. G., Keil K., Prinz M., Bunch T. E., El Goresy A., Ramdohr P., Brown G. M., Peckett A., Phillips R., Cameron E. N., Douglas J. A. V., Plant A. G.*, Tranquillityite: A new silicate mineral from Apollo 11 and Apollo 12 basaltic rocks, Proc. Second Lunar Sci. Conf., Geochim. et Cosmochim. Acta, Suppl. 2, 1, *Levinson A. A.*, ed., MIT Press, p. 39—45, 1971.
43. *Wenk H.-R., Ulbrich M., Müller W. F.*, Lunar plagioclase: A mineralogical study, Proc. Third Lunar Sci. Conf., Geochim. et Cosmochim. Acta, Suppl. 3, 1, *King E. A., Jr.*, ed., MIT Press, p. 569—579, 1972. Кроме того, другие статьи в том же томе.
44. *Butler J. C., Carman M. F., Jr., King E. A., Jr.*, Unit cell parameters, compositions and 2V measurements of selected lunar plagioclases, The Moon, 9, p. 327—334, 1974.
45. *Smith J. V.*, Minor elements in Apollo 11 and Apollo 12, olivine and plagioclase, Proc. Sec. Lunar Sci. Conf., Geochim. et Cosmochim. Acta, Suppl. 2, 1, *Levinson A. A.*, ed., MIT Press, p. 143—150, 1971.
46. *King E. A., Jr., Carman M. F., Butler J. C.*, Mineralogy and petrology of coarse particulate material from lunar surface at Tranquillity Base, Science, 167, No. 3918, p. 650—652, 1970.
47. *Drever H. I., Johnston R., Butler P., Jr., Gibb F. G. F.*, Some textures in Apollo 12 lunar igneous rocks and in terrestrial analogs, Proc. Third Lunar Sci. Conf., Geochim. et Cosmochim. Acta, Suppl. 3, 1, *King E. A., Jr.*, ed., MIT Press, p. 171—184, 1972.
48. *Burns R. G., Abu-Eid R. M., Huggins F. E.*, Crystal field spectra of lunar pyroxenes, Proc. Third Lunar Sci. Conf., Geochim. et Cosmochim. Acta, Suppl. 3, 1, *King E. A., Jr.*, ed., MIT Press, p. 533—543, 1972.
49. *Ghose S., Ng G., Walter L. S.*, Clinopyroxenes from Apollo 12 and 14: Exsolution, domain structure, and cation order, Proc. Third Lunar Sci. Conf., Geochim. et Cosmochim. Acta, Suppl. 3, 1, *King E. A., Jr.*, ed., MIT Press, p. 507—531, 1972.
50. *Bence A. E., Papike J. J.*, Pyroxenes as recorders of lunar basalt petrogenesis, Chemical trends due to crystal-liquid interaction, Proc. Third Lunar Sci. Conf., Geochim. et Cosmochim. Acta, Suppl. 3, 1, *King E. A., Jr.*, ed., MIT Press, p. 431—469, 1972.

51. *Takeda H., Ridley W. I.*, Crystallography and chemical trends of orthopyroxene-pigeonite from rock 14310 and coarse fine 12033, Proc. Third Lunar Sci. Conf., Geochim. et Cosmochim. Acta, Suppl. 3, 1, *King E. A., Jr.*, ed., MIT Press, p. 423—430, 1972.
52. *Weigand P. W., Hollister L. S.*, Pyroxenes from breccia 14303, Proc. Third Lunar Sci. Conf., Geochim. et Cosmochim. Acta, Suppl. 3, 1, *King E. A., Jr.*, ed., MIT Press, p. 471—480, 1972.
53. *Pavišević M., Ramdohr P., El Goresy A.*, Electron microprobe investigations of the oxidation states of Fe and Ti in ilmenite in Apollo 11, Apollo 12, and Apollo 14 crystalline rocks, Proc. Third Lunar Sci. Conf., Geochim. et Cosmochim. Acta, Suppl. 3, 1, *King E. A., Jr.*, ed., MIT Press, p. 295—303, 1972.
54. *El Goresy A., Ramdohr P., Taylor L. A.*, The opaque minerals in the lunar rocks from Oceanus Procellarum, Proc. Second Lunar Sci. Conf., Geochim. et Cosmochim. Acta, Suppl. 2, 1, *Levinson A. A.*, ed., MIT Press, p. 219—235, 1971. См. также *Simpson P. R., Bowie S. H. U.*, Opaque phases in Apollo 12 samples, *Ibid.*, p. 207—218.
55. *Drever H. I., Johnston R., Butler P., Jr., Gibb F. G. F.*, Some textures in Apollo 12 lunar igneous rocks and in terrestrial analogs, Proc. Third Lunar Sci. Conf., Geochim. et Cosmochim. Acta, Suppl. 3, 1, *King E. A., Jr.*, ed., MIT Press, p. 171—184, 1972; кроме того, неопубликованные работы автора настоящей книги.
56. *Mason B., Jarosewich E., Melson W. G.*, Mineralogy, petrology and chemical composition of lunar samples 15085, 15256, 15271, 15471, 15475, 15476, 15535, 15555, and 15556, Proc. Third Lunar Sci. Conf., Geochim. et Cosmochim. Acta, Suppl. 3, 1, *King E. A., Jr.*, ed., MIT Press, p. 785—796, 1972; *Rose H. J., Jr., Cullitta F., Anell C. S., Carron M. K., Christian R. P., Dwornik E. J., Greenland L. P., Lignon D. T., Jr.*, Compositional data for twenty-one Fra Mauro lunar materials, Proc. Third Lunar Sci. Conf., Geochim. et Cosmochim. Acta, Suppl. 3, 2, *Heymann D.*, ed., MIT Press, p. 1215—1229, 1972. См. также многочисленные другие статьи во вторых томах трудов каждой из Лунных конференций, где сосредоточены информация о распределении главных и малых элементов, изотопные и другие аналитические данные.
57. *Reid A. M., Warner J., Ridley W. I., Johnston D. A., Harmon R. S., Jakeš P., Brown R. W.*, The major element compositions of lunar rocks as inferred from glass compositions in the lunar soils, Proc. Third Lunar Sci. Conf., Geochim. et Cosmochim. Acta, Suppl. 3, 1, *King E. A., Jr.*, ed., MIT Press, p. 363—378, 1972.
58. *Gast P. W., Hubbard N. J., Wiesmann H.*, Chemical composition and petrogenesis of basalts from Tranquillity Base, Proc. Apollo 11 Lunar Sci. Conf., Geochim. et Cosmochim. Acta, Suppl. 1, 2, *Levinson A. A.*, ed., Pergamon Press, p. 1143—1163, 1970.
59. *O'Kelley G. D., Eldridge J. S., Schonfeld E., Bell P. R.*, Primordial radionuclide abundances, solar proton and cosmic-ray effects and ages of Apollo 11 lunar samples by non-destructive gamma ray spectrometry, Proc. Apollo 11 Lunar Sci. Conf., Geochim. et Cosmochim. Acta, Suppl. 1, 2, *Levinson A. A.*, ed., Pergamon Press, p. 1407—1423, 1970; кроме того, *O'Kelley G. D., Eldridge J. S., Northcutt K. J.*, Primordial radioelements and cosmogenic radionuclides in lunar samples from Apollo 15, Proc. Third Lunar Sci. Conf., Geochim. et Cosmochim. Acta, Suppl. 3, 2, *Heymann D.*, ed., MIT Press, p. 1659—1670, 1972 и другие статьи Окриджской и других исследовательских групп.
60. *Funkhouser J. G., Schaeffer O. A., Bogard D. D., Zähringer J.*, Gas analysis of the lunar surface, Proc. Apollo 11 Lunar Sci. Conf., Geochim. et Cosmochim. Acta, Suppl. 1, 2, *Levinson A. A.*, ed., Pergamon Press, p. 1111—1116, 1970; см. также более поздние статьи.

61. *Eberhardt P., Geiss J., Graf H., Grögler N., Krahenbühl U., Schwaller H., Schwarzmüller J., Stettler A.*, Trapped solar wind noble gases, exposure age and K/Ar-age in Apollo 11 lunar fine material, Proc. Apollo 11 Lunar Sci. Conf., Geochim. et Cosmochim. Acta, Suppl. 1, 2, *Levinson A. A.*, ed., Pergamon Press, p. 1037—1070, 1970; *Heymann D., Yaniv A.*, Inert gases in fines from the Sea of Tranquillity, *Ibid.*, p. 1247—1259, 1970 и другие поздние статьи.
62. *Tera F., Papanastassiou D. A., Wasserburg G. J.*, A lunar cataclysm at ~3.95 AE and the structure of the lunar crust, Lunar Science IV, *Chamberlain J. W., Watkins C.*, eds., Lunar Sci. Inst., p. 723—725, 1973.
63. *Cameron E. N.*, Opaque minerals in certain lunar rocks from Apollo 12, Proc. Sec. Lunar Sci. Conf., Geochim. et Cosmochim. Acta, Suppl. 2, 1, *Levinson A. A.*, ed., p. 193—206, 1971. См. также *Brett R., Butler P., Jr., Meyer C., Jr., Reid A. M., Takeda H., Williams R.*, Apollo 12 igneous rocks 12004, 12008, 12009, and 12022, A mineralogical and petrological study, *Ibid.*, p. 301—317, 1971.
64. *El Goresy A., Taylor L. A., Ramdorhr P.*, Fra Mauro crystalline rocks, Mineralogy, geochemistry and subsolidus reduction of the opaque minerals, Proc. Third Lunar Sci. Conf., Geochim. et Cosmochim. Acta, Suppl. 3, 1, *King E. A., Jr.*, ed., MIT Press, p. 333—349, 1972.
65. *Weill D. F., McCallum I. S., Bottinga Y., Drake M. J., McKay G. A.*, Mineralogy and petrology of some Apollo 11 igneous rocks, Proc. Apollo 11 Lunar Sci. Conf., Geochim. et Cosmochim. Acta, Suppl. 1, 1, *Levinson A. A.*, ed., Pergamon Press, p. 937—955, 1971.
66. *Green D. H., Ringwood A. E., Ware N. G., Hibberson W. O.*, Experimental petrology and petrogenesis of Apollo 14 basalts, Proc. Third Lunar Sci. Conf., Geochim. et Cosmochim. Acta, Suppl. 3, 1, *King E. A., Jr.*, ed., MIT Press, p. 197—206, 1972; кроме того, *Ford C. E., Biggar G. M., Humphries D. J., Wilson G., Dixon D., O'Hara M. J.*, Role of water in the evolution of the lunar crust; an experimental study of sample 14310; an indication of lunar calc-alkaline volcanism, *Ibid.*, p. 207—229; и другие статьи.
67. *Chao E. C. T., James O. B., Minkin J. A., Boreman J. A., Jackson E. D., Raleigh C. B.*, Petrology of unshocked crystalline rocks and evidence of impact metamorphism in Apollo 11 returned lunar sample, Proc. Apollo 11 Lunar Sci. Conf., Geochim. et Cosmochim. Acta, Suppl. 1, 1, *Levinson A. A.*, ed., Pergamon Press, p. 287—314, 1970; кроме того, *Ghose S., Ng G., Walter L. S.*, Clinopyroxenes from Apollo 12 and 14: Exsolution, domain structure, and cation order, Proc. Third Lunar Sci. Conf., Geochim. et Cosmochim. Acta, Suppl. 3, 1, *King E. A., Jr.*, ed., MIT Press, p. 507—531, 1972.
68. *Hinners N. W.*, The new moon: A view, Rev. Geophys. Space Phys., 9, p. 447—522, 1971; кроме того, *Hubbard N. J., Gast P. W., Rhodes J. M., Bansal B. M., Wiesmann H., Church S. E.*, Nonmare basalts, Part II, Proc. Third Lunar Sci. Conf., Geochim. et Cosmochim. Acta, Suppl. 3, 2, *Heymann D.*, ed., MIT Press, p. 1161—1179, 1972.
69. *Wood J. A., Dickey J. S., Jr., Marvin U. B., Powell B. N.*, Lunar anorthosites and a geophysical model of the moon, Proc. Apollo 11 Lunar Sci. Conf., Geochim. et Cosmochim. Acta, Suppl. 1, 1, *Levinson A. A.*, ed., Pergamon Press, p. 965—988, 1970.
70. *Roedder E., Weiblen P. W.*, Petrographic features and petrologic significance of melt inclusions in Apollo 14 and 15 rocks, Proc. Third Lunar Sci. Conf., Geochim. et Cosmochim. Acta, Suppl. 3, 1, *King E. A., Jr.*, ed., MIT Press, p. 251—279, 1972.
71. *Gast P. W., McConnell R. K., Jr.*, Evidence for initial chemical layering of the moon, Lunar Sci. III, Lunar Sci. Inst., Contr. 88, *Watkins C.*, ed., p. 289—290, 1972.

72. Walker D., Longhi J., Hayes J. F., Experimental petrology and origin of Fra Mauro rocks and soil, Proc. Third Lunar Sci. Conf., Geochim. et Cosmochim. Acta, Suppl. 3, 1, King E. A., Jr., ed., MIT Press, p. 797—817, 1972. Кроме того, Walker D., Grove T. L., Longhi J., Stolper E. M., Hays J. F., Origin of lunar feldspathic rocks, Earth Planet. Sci. Letters, 20, p. 325—336, 1973.
73. LSPET (Lunar Sample Preliminary Examination Team), Preliminary examination of samples from Apollo 11, Science, 165, p. 1211—1227, 1969.
74. Многочисленные доказательства проявления ударного метаморфизма лунных образцов задокументированы многими исследователями. Например, см. Engelhardt W. von, Arndt J., Müller W. F., Stöffler D., Shock Metamorphism in lunar samples, Science, 167, p. 669—670, 1970; кроме того, Engelhardt W. von, Arndt J., Müller W. F., Stöffler D., Shock metamorphism of lunar rocks and origin of the regolith at the Apollo 11 site, Proc. Apollo 11 Lunar Sci. Conf., Geochim. et Cosmochim. Acta, Suppl. 1, 1, Levinson A. A., ed., Pergamon Press, p. 363—384, 1970; кроме того, Chao E. C. T., James O. B., Minkin J. A., Boreman J. A., Jackson E. D., Raleigh C. B., Petrology of unshocked crystalline rocks and evidence of impact metamorphism in Apollo 11 returned lunar samples, Proc. Apollo 11 Lunar Sci. Conf., Geochim. et Cosmochim. Acta, Suppl. 1, 1, Levinson A. A., ed., Pergamon Press, p. 287—314, 1970 и другие статьи во всех сборниках трудов Лунных конференций.
75. Микрократеры, возникновение которых связано с ударами микрометеоритов, были обнаружены в образцах с «Аполлона 11» Группой предварительного изучения лунных образцов. Количественные исследования см. в Gault D. E., Hörz F., Hartung J. B., Effects of microcratering on the lunar surface, Proc. Third Lunar Sci. Conf., Geochim. et Cosmochim. Acta, Suppl. 3, 3, Criswell D. R., ed., MIT Press, p. 2713—2734, 1972; кроме того, Hartung J. B., Hörz F., Gault D. E., Lunar microcraters and interplanetary dust, Ibid., p. 2735—2753, 1972; Morrison D. A., McKay D. S., Heiken G. H., Moore H. J., Microcraters on lunar rocks, Ibid., p. 2767—2791, 1972.
76. King E. A., Jr., Bulter J. C., Carman M. F., Jr., The lunar regolith as sampled by Apollo 11 and Apollo 12: Grain size analyses, modal analyses and origins of particles, Proc. Ses. Lunar Sci. Conf., Geochim. et Cosmochim. Acta, Suppl. 2, 1, A. A. Levinson A. A., ed., MIT Press, p. 737—746, 1971 и многочисленные другие статьи.
77. Carter J. L., Chemistry and surface morphology of fragments from Apollo 12 soil, Proc. Sec. Lunar Sci. Conf., Geochim. et Cosmochim. Acta, Suppl. 2, 1, Levinson A. A., ed., MIT Press, p. 873—892, 1971; кроме того, Fulchignoni M., Funicello R., Taddeucci A., Trigila R., Glassy spheroids in lunar fines from Apollo 12 samples 12070,37; 12001,73; and 12057,60, Ibid., p. 937—948, 1971 и многочисленные другие работы.
78. Carter J. L., Padovani E., Genetic implications of some unusual particles in Apollo 16 less than 1 mm fines 68841,11 and 69941,13, Proc. Fourth Lunar Sci. Conf., Geochim. et Cosmochim. Acta, Suppl. 4, 3, Pergamon Press, p. 323—332, 1973; кроме того, McKay D. S., Clanton U. S., Ladle G., Scanning electron microscope study of Apollo 15 green glass, Ibid., p. 225—238, 1973.
79. Hörz F., Hartung J. B., Gault D. E., Micrometeorite craters on lunar rock surfaces, Jour. Geophys. Res., 76, p. 5770—5798, 1971; кроме того, Hartung J. B., Hörz F., Gault G. E., Lunar microcraters and interplanetary dust, Proc. Third Lunar Sci. Conf., Geochim. et Cosmochim. Acta, Suppl. 3, 3, Criswell D. R., ed., MIT Press,

- p. 2735—2753, 1972; кроме того, *Schneider E., Storzer D., Hartung J. B., Fchtig H., Gentner W.*, Microcraters on Apollo 15 and 16 samples and corresponding cosmic dust fluxes, Proc. Fourth Lunar Sci. Conf., Geochim. et Cosmochim. Acta, Suppl. 4, 3, Pergamon Press, p. 3277—3290, 1973.
80. *McKay D. S., Heiken G. H., Taylor R. M., Clanton U. S., Morrison D. A., Ladle G. H.*, Apollo 14 soils: Size distribution and particles types, Proc. Third Lunar Sci. Conf., Geochim. et Cosmochim. Acta, Suppl. 3, 1, *King E. A., Jr.*, ed., MIT Press, p. 983—994, 1972.
 81. *King E. A., Jr., Carman M. F., Butler J. C.*, Mineralogy and petrology of coarse particulate material from lunar surface at Tranquillity Base, Science, 167, p. 650—652, 1970; *Short N. M.*, Evidence and implications of shock metamorphism in lunar samples, Ibid., p. 673—675, 1970; *Anderson A. T., Jr., Crewe A. V., Goldsmith J. R., Moore P. B., Newton J. C., Olsen E. J., Smith J. V., Wyllie P. J.*, Petrologic history of the moon suggested by petrography, mineralogy, and crystallography, Ibid., p. 587—590, 1970; *Wood J. A., Dickey J. S., Jr., Marvin U. B., Powell B. N.*, Lunar anorthosites, Ibid., p. 602—604, 1970.
 82. *Wood J. A., Dickey J. S., Jr., Marvin U. B., Powell B. N.*, Lunar anorthosites and a geophysical model of the moon, Proc. Apollo 11 Lunar Sci. Conf., Geochim. et Cosmochim. Acta, Suppl. 1, 1, *Levinson A. A.*, ed., Pergamon Press, p. 965—988, 1970.
 83. *King E. A., Jr., Butler J. C., Carman M. F.*, Chondrules in Apollo 14 samples and size analyses of Apollo 14 and 15 fines, Proc. Third Lunar Sci. Conf., Geochim. et Cosmochim. Acta, Suppl. 3, 1, *King E. A., Jr.*, ed., MIT Press, p. 673—686, 1972; *McKay D. S., Heiken G. H., Taylor R. M., Clanton U. S., Morrison D. A., Ladle G. H.*, Apollo 14 soils: Size distribution and particle types, Ibid., p. 983—994, 1972; *Butler J. C., Greene G. M., King E. A., Jr.*, Grain size frequency distributions and modal analyses of Apollo 16 fines, Proc. Fourth Lunar Sci. Conf., Geochim. et Cosmochim. Acta, Suppl. 4, 1, Pergamon Press, p. 267—278 1973 и многочисленные другие статьи.
 84. Например, см. *Görz H., White E. W., Johnson G. G., Jr., Pearson M. W.*, CESEMI studies of Apollo 14 and 15 fines, Proc. Third Lunar Sci. Conf., Geochim. et Cosmochim. Acta, Suppl. 3, 3, *Criswell D. R.*, ed., MIT Press, p. 3195—3200, 1972.
 85. *King E. A., Jr., Carman M. F., Butler J. C.*, Mineralogy and petrology of coarse particulate material from lunar surface at Tranquillity Base, Science, 167, p. 650—652, 1970; кроме того, Proc. Apollo 11 Lunar Sci. Conf., Geochim. et Cosmochim. Acta, Suppl. 1, 1, *Levinson A. A.*, ed., Pergamon Press, p. 599—606, 1970.
 86. *Scott R. F., Carrier W. D., III, Costes N. C., Mitchell J. K.*, Apollo 12 soil mechanics investigation, Geotechnique, 21, p. 1—14, 1971.
 87. *Carrier W. D., III, Bromwell L. G., Martin R. T.*, Strength and compressibility of returned lunar soil, Proc. Third Lunar Sci. Conf., Geochim. et Cosmochim. Acta, Suppl. 3, 3, *Criswell D. R.*, ed., MIT Press, p. 3223—3234, 1972.
 88. Исчерпывающий обзор оценок и измерений плотности лунного реголита см. в *Mitchell J. K., Houston W. N., Scott R. F., Costes N. C., Carrier W. D., III, Bromwell L. G.*, Mechanical properties of lunar soil, Density, porosity, cohesion, and angle of internal friction, Proc. Third Lunar Sci. Conf., Geochim. et Cosmochim. Acta, Suppl. 3, 3, *Criswell D. R.*, ed., MIT Press, p. 3235—3253, 1972.
 89. *Houston W. N., Hovland H. J., Mitchell J. K., Namiq L. I.*, Lunar soil porosity and its variation as estimated from footprints and boulder tracks, Proc. Third Lunar Sci. Conf., Geochim. et Cosmochim. Acta, Suppl. 3, 3, *Criswell D. R.*, ed., MIT Press, p. 3255—3263, 1972.

90. *Chao E. C. T., Boreman J. A., Desborough G. A.*, The petrology of unshocked and shocked Apollo 11 and 12 microbreccias, Proc. Sec. Lunar Sci. Conf., Geochim. et Cosmochim. Acta, Suppl. 2, 1, *Levinson A. A.*, ed., MIT Press, p. 797—816, 1971 и работы многих других авторов.
91. *Floran R. J., Cameron K. L., Bence A. E., Papike J. J.*, Apollo 14 breccia 14313, A mineralogic and petrologic report, Proc. Third Lunar Sci. Conf., Geochim. et Cosmochim. Acta, Suppl. 3, 1, *King E. A., Jr.*, ed., MIT Press, p. 661—671, 1972.
92. *Warner J. L.*, Metamorphism of Apollo 14 breccias, Proc. Third Lunar Sci. Conf., Geochim. et Cosmochim. Acta, Suppl. 3, 1, *King E. A., Jr.*, ed., MIT Press, p. 623—643, 1972.
93. *Anderson A. T., Jr., Braziunas T. F., Jacoby J., Smith J. V.*, Breccia populations and thermal history, Nature of the pre-Imbrian crust and impacting body, Lunar Sci. III., *Watkins C.*, ed., Lunar Sci. Inst. Contr. 88, p. 24—26, 1972; кроме того, Thermal and mechanical history of breccias 14 306, 14 063, 14 270, and 14 321, Proc. Third Lunar Sci. Conf., Geochim. et Cosmochim. Acta, Suppl. 3, 1, *King E. A., Jr.*, ed., MIT Press, p. 819—835, 1972.
94. *Grieve R., McKay G., Smith H., Weill D.*, Mineralogy and petrology of polymict breccia 14 321, Lunar Sci. III, *Watkins C.*, ed., Lunar Sci. Inst. Contr. 88, p. 338—340, 1972.
95. *Wilshire H. G., Stuart-Alexander D. E., Jackson E. D.*, Apollo 16 rocks: Petrology and classification, Jour. Geophys. Res., 78, p. 2379—2392, 1973.
96. *King E. A., Jr., Carman M. F., Butler J. C.*, Chondrules in Apollo 14 samples, Implications for the origin of chondritic meteorites, Science, 175, 7 Jan., 1972, p. 59—60, 1972; *King E. A., Jr., Butler J. C., Carman M. F.*, Chondrules in Apollo 14 samples and size analyses of Apollo 14 and 15 fines, Proc. Third Lunar Sci. Conf., Geochim. et Cosmochim. Acta, Suppl. 3, 1, *King E. A., Jr.*, ed., MIT Press, p. 673—686, 1972; *Kurat G., Keil K., Prinz M., Nehru C. E.*, Chondrules of lunar origin, Ibid., p. 707—721, 1972; кроме того, *Nelen J., Noonan A., Fredriksson K.*, Lunar glasses, breccias, and chondrules, Ibid., p. 723—737, 1972.
97. *Nelson L. S., Blander M., Skaggs S. R., Keil K.*, Use of a CO₂ laser to prepare chondrule-like spherules from supercooled molten oxide and silicate droplets, Earth Planet. Sci. Letters, 14, p. 338—344, 1972.
98. *Ganapathy R., Keys R. R., Laul J. C., Anders E.*, Trace elements in Apollo 11 lunar rocks: Implications for meteorite influx and origin of moon, Proc. Apollo 11 Lunar Sci. Conf., Geochim. et Cosmochim. Acta, Suppl. 1, 2, *Levinson A. A.*, ed., Pergamon Press, p. 1117—1142, 1970; *Ganapathy R., Laul J. C., Morgan J. W., Anders E.*, Moon: Possible nature of the body that produced the Imbrian basin, from the composition of Apollo 14 samples, Science, 175, p. 55—59, 1972; *Morgan J. W., Krähenbühl U., Ganapathy R., Anders E.*, Trace elements in Apollo 15 samples: Implications for meteorite influx and volatile depletion on the moon, Proc. Third Lunar Sci. Conf., Geochim. et Cosmochim. Acta, Suppl. 3, 2, *Heymann D.*, ed., MIT Press, p. 1361—1376 и другие статьи.
99. Первый обзор данной проблемы см. в *Huey J. M., Ithochi H., Black L. P., Ostic R. G., Kohman T. P.*, Lead isotopes and volatile transfer in the lunar soil, Proc. Ses. Lunar Sci. Conf., Geochim. et Cosmochim. Acta, Suppl. 2, 2, *Levinson A. A.*, ed., MIT Press, p. 1547—1564, 1971.
100. *Albee A. L., Burnett D. S., Chodos A., Eugster O. J., Hueneke J. C., Papanastassiou D. A., Podosek F. A., Russ G. P., II, Sanz H. G., Tera F., Wasserburg G. J.*, Ages, irradiation history and chemical

- composition of lunar rocks from the Sea of Tranquillity, *Science*, **167**, p. 463—466, 1970.
101. Gose W. A., Pearce G. W., Strangway D. W., Larson E. E., Magnetic properties of Apollo 14 breccias and their correlation with metamorphism, *Proc. Third Lunar Sci. Conf., Geochim. et Cosmochim. Acta*, Suppl. 3, 3, *Criswell D. R.*, ed., MIT Press, p. 2387—2395, 1972.
 102. Nagata T., Fisher R. M., Scherer F. C., Fuller M. D., Dunn J. R., Rock magnetism of Apollo 14 and 15 materials; *Proc. Third Lunar Sci. Conf., Geochim. et Cosmochim. Acta*, Suppl. 3, 3, *Criswell D. R.*, ed., MIT Press, p. 2423—2447, 1972. Превосходный обзор проблем лунного магнетизма см. в *Fuller M.*, *Lunar magnetism*, *Rev. Geophys. and Space Phys.*, **12**, p. 23—70, 1974.
 103. Collinson D. W., Runcorn S. K., Stephenson A., Manson A. J., Magnetic properties of Apollo 14 rocks and fines, *Proc. Third Lunar Sci. Conf., Geochim. et Cosmochim. Acta*, Suppl. 3, 3, *Criswell D. R.*, ed., MIT Press, p. 2343—2361, 1972. См. также *Pearce G. W., Strangway D. W., Gose W. A.*, Remanent magnetization of the lunar surface, *Ibid.*, p. 2449—2464, 1972.
 104. McLane J. C., Jr., King E. A., Jr., Flory D. A., Richardson K. A., Dawson J. P., Kemmerer W. W., Wooley B. C., *Lunar Receiving Laboratory*, *Science*, **155**, p. 525—529, 1967.
 105. Например, см. *Oyama V. I., Merek E. L., Silverman M. P.*, A search for viable organisms in a lunar sample, *Proc. Apollo 11 Lunar Sci. Conf., Geochim. et Cosmochim. Acta*, Suppl. 1, 2, *Levinson A. A.*, ed., Pergamon Press, p. 1921—1927, 1970.
 106. Schopf J. W., Micropaleontological studies of Apollo 11 samples, *Proc. Apollo 11 Lunar Sci. Conf., Geochim. et Cosmochim. Acta*, Suppl. 1, 2, *Levinson A. A.*, ed., Pergamon Pergamon Press, p. 1933—1934, 1970.
 107. Johnson R. D., Davis C. C., Total organic carbon in the Apollo 11 lunar samples, *Proc. Apollo 11 Lunar Sci. Conf., Geochim. et Cosmochim. Acta*, Suppl. 1, 2, *Levinson A. A.*, ed., Pergamon Press, p. 1805—1812, 1970.
 108. Latham G., Ewing M., Press F., Sutton G., Dorman J., Nakamura Y., Toksöz N., Lammllein D., Duennebier F., Passive Seismic Experiment, Sec. 8, Apollo 15 Prelim. Sci. Rept., NASA SP-289; см. также другие отчеты; кроме того, *Kovach R. L., Watkins J. S.*, The near-surface velocity structure of the Moon, *Lunar Sci. III*, *Watkins C.*, ed., *Lunar Sci. Inst.*, Contr. No. 88, p. 461—462, 1972.
 109. Latham G., Ewing M., Press F., Sutton G., Dorman J., Nakamura Y., Toksöz N., Meissner R., Duennebier F., Kovach R., Seismic data from man-made impacts on the Moon, *Science*, **170**, p. 620—626, 1970.
 110. *Kovach R. L., Watkins J. S., Nur A., Talwani P.*, The properties of the shallow lunar crust: An over-view from Apollo 14, 16 and 17, *Lunar Sci. IV*, *Lunar Sci. Inst. and NASA Manned Spacecraft Center*, *Chamberlain J. W., Watkins C.*, eds., p. 444—445, 1973.
 111. Toksöz M. N., Press F., Dainty A., Anderson K., Latham G., Ewing M., Dorman J., Lammllein D., Sutton G., Duennebier F., Structure, composition and properties of lunar crust, *Proc. Third Lunar Sci. Conf., Geochim. et Cosmochim. Acta*, Suppl. 3, 3, *Criswell D. R.*, ed., MIT Press, p. 2527—2544, 1972.
 112. Langseth M. G., Jr., Clark S. P., Jr., Chute J., Jr., Keihm S., The Apollo 15 lunar heat flow measurement, *Lunar Sci. III*, *Watkins C.*, ed., *Lunar Sci. Inst. Contr. No. 88*, p. 475—477, 1972. См. также *Langseth M. G., Chute J. L., Keihm S.*, Direct measurement of heat flow from the Moon, *Lunar Sci. IV*, *Chamberlain J. W., Watkins C.*, eds., *Lunar Sci. Inst.*, p. 455—456, 1973.
 113. Sonett C. P., Schubert G., Smith B. F., Schwartz K., Colburn D. S., Lunar electrical conductivity from Apollo 12 magnetometer

- measurements, Compositional and thermal inferences, Proc. Sec. Lunar Sci. Conf., Geochim. et Cosmochim. Acta, Suppl. 2, 3, *Levinson A. A.*, ed., MIT Press, p. 2415—2431, 1971.
114. *Dyal P.*, *Parkin C. W.*, *Cassen P.*, Surface magnetometer experiments: Internal lunar properties and lunar field interactions with the solar plasma, Proc. Third Lunar Sci. Conf., Geochim. et Cosmochim. Acta, Suppl. 3, 3, *Criswell D. R.*, ed., MIT Press, p. 2287—2307, 1972.
115. *Latham G.*, *Dorman J.*, *Duennebier F.*, *Ewing M.*, *Lammlein D.*, *Nakamura Y.*, Moonquakes, meteoroids and the state of the lunar interior, Lunar Sci. IV, *Chamberlain J. W. Watkins C.*, eds., Lunar Sci. Inst., p. 457—459, 1973.
116. *Latham G.*, *Ewing M.*, *Press F.*, *Sutton G.*, *Dorman J.*, *Nakamura Y.*, *Toksöz N.*, *Lammlein D.*, *Duennebier F.*, Moonquakes, Science, 174, p. 687—692; см. также многочисленные другие статьи тех же авторов, опубликованные начиная с 1970 г. Хорошая современная сводка: *Lammlein D. R.*, *Latham G. V.*, *Dorman J.*, *Nakamura Y.*, *Ewing M.*, Lunar seismicity, structure, and tectonics, Rev. Geophys. Space Phys., 12, No. 1, p. 1—21, 1974.
117. *Latham G.*, *Ewing M.*, *Dorman J.*, *Lammlein D.*, *Press F.*, *Toksöz N.*, *Sutton G.*, *Duennebier F.*, *Nakamura Y.*, Moonquakes and lunar tectonism results from the Apollo passive seismic experiment, Proc. Third Lunar Sci. Conf., Geochim. et Cosmochim. Acta, Suppl. 3, 3, *Criswell D. R.*, ed., MIT Press, p. 2519—2526, 1972; см. также *Latham G.*, *Dorman J.*, *Duennebier F.*, *Ewing M.*, *Lammlein D.*, *Nakamura Y.*, Moonquakes, meteoroids and the state of the lunar interior, Proc. Fourth Lunar Sci. Conf., Geochim. et Cosmochim. Acta, Suppl. 4, 3, Pergamon Press, p. 2515—2527, 1973.
118. *Muller P. M.*, *Sjogren W. L.*, Mascons — lunar mass concentrations, Science, 161, No. 3842, p. 680—684, 1968.
119. *Urey H. C.*, Mascons and the history of the Moon, Science, 162, No. 3860, p. 1408—1410, 1968.
120. *Campbell M. J.*, *O'Leary B. T.*, *Sagan C.*, Moon — Two new mascon basins, Science, 164, No. 3885, p. 1273—1275, 1969.
121. *Kaula W. M.*, *Schubert G.*, *Lingenfelter R. E.*, *Sjogren W. L.*, *Wollenhaupt W. R.*, Analysis and interpretation of lunar laser altimetry, Proc. Third Lunar Sci. Conf., Geochim. et Cosmochim. Acta, Suppl. 3, 3, *Criswell D. R.*, ed., MIT Press, p. 2189—2204, 1972. См. также *Kaula W. M.*, *Schubert G.*, *Lingenfelter R. E.*, *Sjogren W. L.*, *Wollenhaupt W. R.*, Lunar topography from Apollo 15 and 16 laser altimetry, Proc. Fourth Lunar Sci. Conf., Geochim. et Cosmochim. Acta, Suppl. 4, 3, Pergamon Press, p. 2811—2819, 1973.
122. *Kaula W. M.*, *Schubert G.*, *Lingenfelter R. E.*, *Sjogren W. L.*, *Wollenhaupt W. R.*, Apollo laser altimetry and inferences as to lunar structure, Proc. Fifth Lunar Sci. Conf., Geochim. et Cosmochim. Acta, Suppl. 5, 3, Pergamon Press, p. 3049—3058, 1974.
123. *Metzger A. E.*, *Trombka J. I.*, *Peterson L. E.*, *Reedy R. C.*, *Arnold J. R.*, A first look at the lunar orbital gamma-ray data, Proc. Third Lunar Sci. Conf., Geochim. et Cosmochim. Acta, Suppl. 3, 3, *Criswell D. R.*, ed., MIT Press, frontispiece, 4 p., 1972.
124. *Adler I.*, *Gerard J.*, *Trombka J.*, *Schmadebeck R.*, *Lowman P.*, *Blodget H.*, *Yin L.*, *Eller E.*, *Lamothe R.*, *Gorenstein P.*, *Bjorkholm P.*, *Harris B.*, *Gursky H.*, The Apollo 15 x-ray fluorescence experiment, Proc. Third Lunar Sci. Conf., Geochim. et Cosmochim. Acta, Suppl. 3, 3, *Criswell D. R.*, ed., MIT Press, p. 2157—2178, 1972; см. также Proc. Fourth Lunar Sci. Conf., Geochim. et Cosmochim. Acta, Suppl. 4, 3, Pergamon Press, p. 2783—2791.
125. *Darwin G. H.*, On the tidal friction of a planet attended by several

- satellites, and on the evolution of the solar system, Scientific Papers, 2, Cambridge Univ. Press, London, p. 406—458, 1908.
126. *Wise D. U.*, An origin of the moon by fission during formation of the earth's core, Jour. Geophys. Res., 68, p. 1547—1554, 1963; кроме того, *Wise D. U.*, Origin of the moon from the earth, Some new mechanisms and comparisons, Jour. Geophys. Res., 74, p. 6034—6045, 1969.
127. *O'Keefe J. A.*, Origin of the moon, Jour. Geophys. Res., 64, p. 2758—2767, 1969.
128. *Ringwood A. E.*, Some aspects of the thermal evolution of the earth, Geochim. et Cosmochim. Acta, 20, p. 241—259, 1960.
129. *O'Keefe J. A.*, The origin of the Moon, Jour. Geophys. Res., 75, p. 6565—6574, 1970.
130. *Ringwood A. E.*, *Essene E.*, Petrogenesis of Apollo 11 basalts, internal constitution and origin of the moon, Proc. Apollo 11 Lunar Sci. Conf., Geochim. et Cosmochim. Acta, Suppl. 1, 1, *Levinson A. A.*, ed., Pergamon Press, p. 769—799, 1970.
131. *Gerstenkorn M.*, Über Gezeitenreibung bei Zweikörperproblem, Zeit. Astrophys., 26, p. 245—274, 1955.
132. *MacDonald G. J. F.*, Tidal friction, Rev. Geophys., 2, p. 467—541, 1964.
133. *Öpik E. J.*, The moon's surface, Ann. Rev. Astron. Astrophys., 7, p. 473—526, 1969.
134. *Urey H. C.*, Origin and history of the moon, in Physics and Astronomy of the Moon, *Kopal Z.*, ed., Academic Press, Chap. 13, p. 481—523, 1962.
135. *Garz T.*, *Kock M.*, *Richter J.*, *Baschek B.*, *Holweger H.*, *Unsold A.*, Abundances of iron and some other elements in the sun and in meteorites, Nature, 223, p. 1254, 1969.
136. Например, см. *Lalimer W. M.*, Astrochemical problems in the formation of the Earth, Science, 112, p. 597—599, 1950; кроме того, *Orowan E.*, Density of the moon and nucleation of planets, Nature, 222, p. 867, 1969.

РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА ПО ОБЩИМ ВОПРОСАМ

137. *Mutch T. A.*, Geology of the Moon, Princeton Univ. Press, Princeton, N. J., Revised edition, 391, p., 1972.
138. Science, 30 January, 1970, 167, No. 3918, p. 417—492, The Moon Issue. Первый отчет ведущих исполнителей программы исследования лунных образцов, представленный на Лунной конференции по итогам экспедиции «Аполлон-11».
139. *Taylor S. R.*, Lunar Science: A Post-Apollo View, Pergamon Press, 372 p., 1975. Полная сводка данных по изучению Луны с ярко выраженным геохимическим акцентом.
140. *Freeberg J. H.*, Bibliography of the lunar surface, U. S. Dept. of Commerce, National Tech. Info. Serv., PB 194 206, 344 p., 1970.
141. *Levinson A. A.*, *Taylor S. R.*, Moon rocks and minerals, Pergamon Press, New York, 222 p., 1971. Сжатое и доступное введение в изучение образцов с «Аполлона-11».
142. *Frondel J. W.*, Lunar Mineralogy, Wiley-Interscience, Wiley, New York, 323 p., 1975. Прекрасная обобщающая работа по лунной минералогии, особенно полезна для минералогов и петрологов.

143. Proceedings of the Apollo 11 Lunar Science Conference, *Geochim. et Cosmochim. Acta*, Suppl. 1, 1—3, Levinson A. A., ed., Pergamon Press, 1970; Proc. of the Second Lunar Sci. Conf. *Geochim. et Cosmochim. Acta*, Suppl. 2, 1—3, MIT Press, Levinson A. A., ed., 1971; Proc. of the Third Lunar Sci. Conf. (1972) *Geochim. et Cosmochim. Acta*, Suppl. 3, 1—3, MIT Press, King E. A., Heymann D., Criswell D. R., eds., 1972; Proc. of the Fourth Lunar Sci. Conf., *Geochim. et Cosmochim. Acta*, Suppl. 4, 1—3, Pergamon Press, 1973; Proc. of the Fifth Lunar Sci. Conf., *Geochim. et Cosmochim. Acta*, Suppl. 5, 1—3, Pergamon Press, 1974 и труды более поздних конференций.
144. Перспективы изучения Луны до доставки лунных образцов см. в Baldwin R. B., *The measure of the Moon*, Univ. of Chicago Press, Chicago, 488 p., 1963; Fielder G., *Lunar Geology*, Lutterworth Press, London, 184 p., 1965; Markov A. V., ed., *The Moon*, Univ. of Chicago Press, Chicago, 391 p., 1962.

Довольно быстро выяснилось, что почти все общие выводы о природе Марса, сделанные на основе данных «Маринера-4», «Маринера-6» и «Маринера-7», нужно пересмотреть или даже отбросить. Результаты первых космических полетов были обусловлены досадным стечением обстоятельств. Дело обстояло так, как если бы космический корабль внеземной цивилизации, пролетая над землей, смог бы сфотографировать лишь участки поверхности океанов.

Дж. Мак-Коули, Х. Гипшер, Р. Стейнбахер, 1974 г.

7. Марс

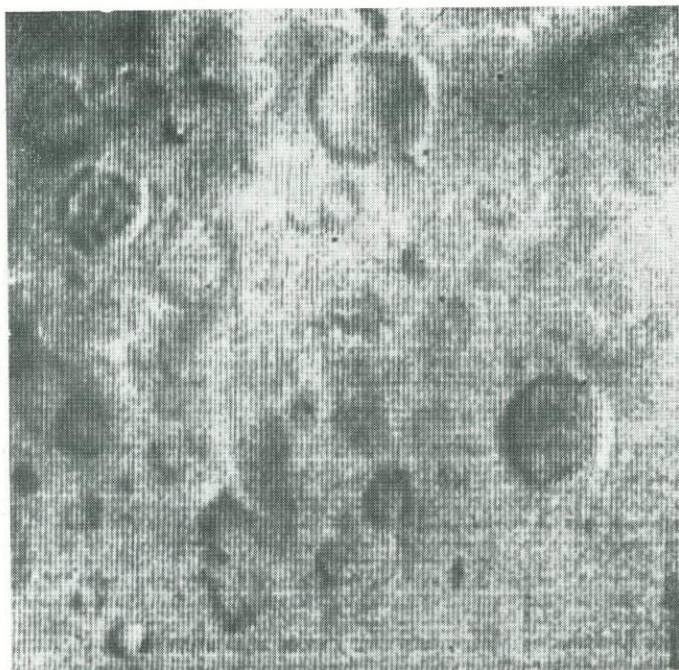
ВВЕДЕНИЕ. ИСТОРИЯ

Еще в древности люди замечали, что на небе есть объекты, которые выглядят как звезды, но их видимое движение резко отличается от обычного перемещения звезд. Эти «блуждающие» звезды были названы планетами, от греческого слова «планетес», что и означает «блуждающая». Марс — одна из планет, издавна известная человеку, а изучение его движения по небу сыграло важнейшую роль в развитии представлений о строении и динамике Солнечной системы [1]. Наводил свой астрономический телескоп на Марс и Галилей. Правда, Галилей пришел к выводу, что с его маленьким инструментом трудно наблюдать на поверхности планеты интересные детали. Наиболее ранние телескопические зарисовки поверхности Марса принадлежат Ф. Фонтана, но они, скорее, демонстрируют недостатки его инструмента. Лишь один рисунок, сделанный в августе 1638 г., представляет научную ценность: на нем изображен Марс в промежуточной фазе освещенности [2]. Первые надежные определения поверхностных деталей планеты были сделаны около 1659 г. Гюйгенсом, который обнаружил изменения альбедо поверхности и уверенно наблюдал южную полярную шапку Марса. В дальнейшем по мере улучшения астрономической оптики и размеров инструментов в многочисленных наблюдениях обнаруживались всё новые детали марсианской поверхности и более подробно изучалась атмосфера планеты.

Многие исследователи Марса в прошлом сообщали об обнаружении линейных образований и «каналов» на планете. Из этих наблюдателей наибольшей славой пользовался Дж. Скиапарелли¹, который с большой тщательностью нанес на карты планеты многочисленные детали поверхности, обнаруженные им. Скиапарелли, по-видимому, обнаружил на Марсе больше каналов, чем любой другой астроном-наблюдатель. Он был уверен, что темные участки марсианской поверхности и связывающие их линии каналов являются водными системами. Скиапарелли осмотрительно отмечал, что только немногие каналы наблюдаются постоянно. После него очень большую активность в наблюдениях Марса проявлял П. Лоуэлл, который особое внимание уделил наблюдению каналов и объяснению этого феномена. Лоуэлл построил собственную обсерваторию в Флагстаффе (штат Аризона) в высокогорной местности, где прозрачность атмосферы создавала благоприятные условия для проведения наблюдений за планетами и, в частности, Марсом. Лоуэлл зарегистрировал более 500 различных марсианских каналов и был твердо уверен, что эти каналы построены разумными существами для орошения их почти безводной планеты. Большая часть научных публикаций по Марсу, относящихся к этому периоду, посвящена обсуждению проблемы каналов и спорам об их природе, что для нас представляет в основном лишь исторический интерес. Исчерпывающий обзор наблюдений Марса, проведенный в прошлом, можно найти у Глестуона [1] и Фламариона [2]. К этому времени, особенно к периоду деятельности Скиапарелли, относится создание терминологически сложной классической номенклатуры деталей поверхности Марса. Для современного ученого эти названия звучат чуждо. Происхождение многих терминов, связанных с классической литературой, описано Мак-Доналдом [3].

Современное геологическое исследование Марса начинается с середины 1960-х г.г., когда стали использовать совершенные космические аппараты, снабженные телевизионными системами. При полете «Маринера-4» было получено изображение примерно 1% марсианской поверхности при максимальном разрешении 3 км. Поскольку выбор участков съемки был случайным, оказалось, что заснятая часть поверхности представляет собой довольно малоинтересные районы, покрытые кратерами и очень напоминающие некоторые участки лунной поверхности (фиг. 1). Эти результаты вызвали падение интереса к Марсу у некоторых

¹ Скиапарелли не был ни первым наблюдателем, который обнаружил линейные образования на Марсе, ни первым, кто ввел в обиход термин «каналы», хотя обычно это связывают с его именем. А. Секки использовал термин «канал» при описании деталей марсианской поверхности еще в 1869 г. [1].

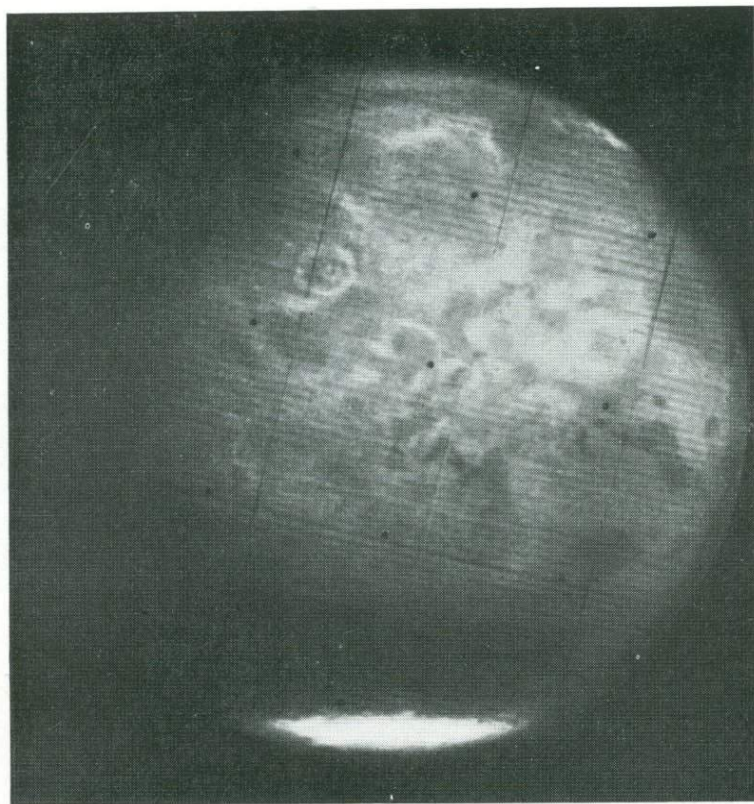


Фиг. 1. Изображение поверхности Марса, переданное с космического аппарата «Маринер-4», в области Атлантида (Atlantis) на границе с Морем Сирен (Mare Sirenum).

Площадь поверхности примерно 265×265 км. Видны изменения альбедо поверхности и крупные марсианские кратеры. Один из кратеров в верхнем левом углу снимка, очевидно, имеет центральную горку. Предоставлено НАСА, Лабораторией реактивного движения.

специалистов, пришедших к преждевременному выводу, что Марс очень похож на Луну и отнюдь не так любопытен, как думали раньше. Полученные «Маринером-4» изображения не давали возможности решить задачу существования и происхождения каналов. «Маринер-4» дал лишь 20 изображений при пролете вблизи планеты, а их качество сильно уступало качеству изображений, полученных в дальнейших полетах космических аппаратов.

В 1969 г. «Маринер-6» и «Маринер-7» приблизились в своем полете к Марсу и дали более 200 высококачественных изображений, некоторые с разрешением 0,3 км (фиг. 2 и 3) [5]. Эти полеты позволили существенно расширить исследованную зону поверхности, которая составила более 10% полной поверхности планеты. В результате был получен детальный материал, доста-

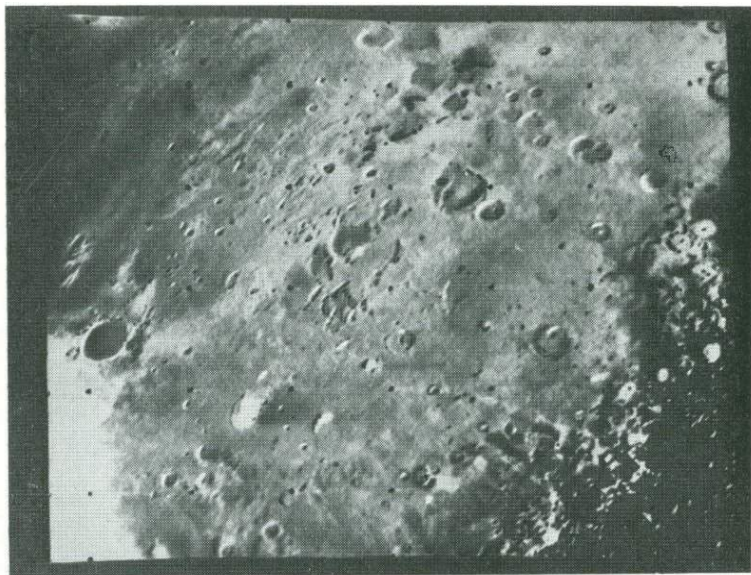


Фиг. 2. Мелкомасштабное изображение Марса, переданное с космического аппарата «Маринер-7» с расстояния 474 750 км (север вверху).

Четко выделяется южная полярная шапка, так же как и многочисленные светлые облака в центральной части диска. Кольцеобразная структура — гора Олимп (Olympus Mons, Nix Olympica) и окружающие ее облака. Предоставлено НАСА, Лабораторией реактивного движения.

точный, кстати, для того, чтобы расстаться с идеей о существовании марсианских каналов¹. Изображения южной полярной шапки показывают, что это обширный район поверхностных отложений, толщина слоя которых, вероятно, больше, чем это предполагалось ранее [6]. Области концентрации кратеров раз-

¹ В первых картах Марса, изданных НАСА, намечены каналы по данным земных наблюдений. Но по мере того, как поступали сведения от «Маринера-6», «Маринера-7» и «Маринера-9», каналы изображались все неотчетливее и, наконец, полностью исчезли в последних картах.



Фиг. 3. Крупномасштабное изображение поверхности Марса, переданное с космического аппарата «Маринер-7».

Видно гораздо больше деталей, чем на снимках «Маринера-4». Представлено НАСА, Лабораторией реактивного движения.

личных размеров оказались четко выделенными. Различны и распределения размеров марсианских кратеров в разных районах [7]. Это позволило сделать вывод, что на поверхности Марса имеются области различных возрастов, а эоловое воздействие на поверхностные отложения может играть важную роль в процессах на планете и ее морфологии.

Современные сведения о Марсе и структуре его поверхности в основном базируются на замечательных данных, полученных при полете «Маринера-9», который начал двигаться по ареоцентрической орбите 14 ноября 1971 г., в период, когда на поверхности планеты бушевала мощная пылевая буря [8]. Пылевая буря закрывала почти всю поверхность (фиг. 4). Но в течение следующих месяцев буря стихла и удалось получить великолепные детальные изображения полной поверхности планеты, некоторые изображения с разрешением около 100 м.

Основные данные о физических свойствах планеты представлены в табл. I.



Фиг. 4. Мозаичное фототелевизионное изображение примерно одной четверти марсианского диска, полученное вскоре после вывода «Маринера-9» на ареоцентрическую орбиту.

Поверхность планеты почти полностью скрыта глобальной пылевой бурей. Центр мозаики приходится на хребет Фарсид (Tharsis Ridge), а в верхнем левом углу едва заметна гора Олимп. Если ориентироваться на центральную часть мозаики, то вверху располагаются «Северное», «Среднее» и «Южное» пятна, которые представляют собой щитовые вулканы и кальдеры. Предоставлено НАСА, Лабораторией реактивного движения.

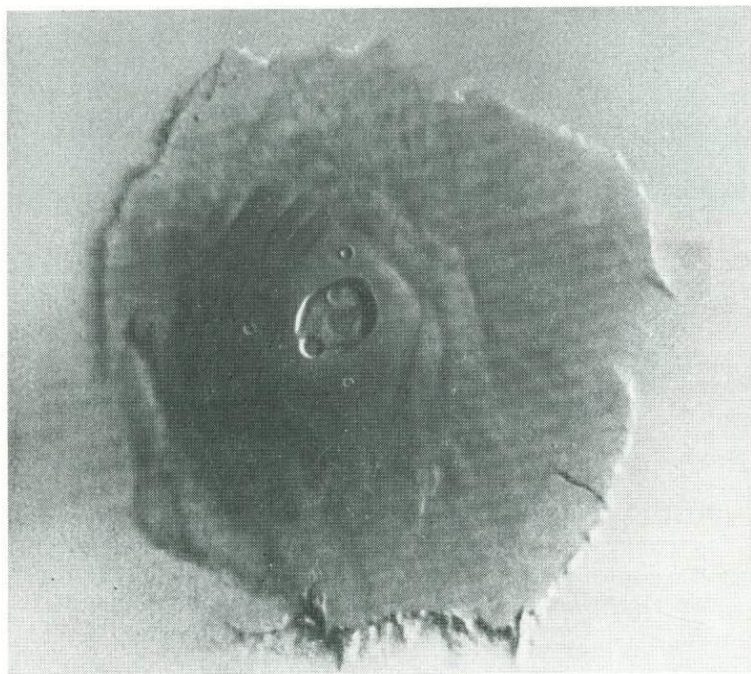
Таблица I Общая характеристика планеты Марс ¹

Масса	$6,419 \cdot 10^{23}$ кг
Экваториальный радиус	~ 3400 км
Полярный радиус	~ 3360 км
Средний радиус	3393 км
Радиус Марса/Радиус Земли	0,531
Плотность	3,9 г/см ³
Ускорение силы тяжести	375 см/с ²
Сидерические сутки	24 ч 37 мин 22,67 с
Солнечные сутки	24 ч 39 мин 35,23 с
Скорость вращения	0,26 км/с

¹ В основном по данным Гласстона [1], с некоторыми дополнениями по последним данным «Маринера-9».

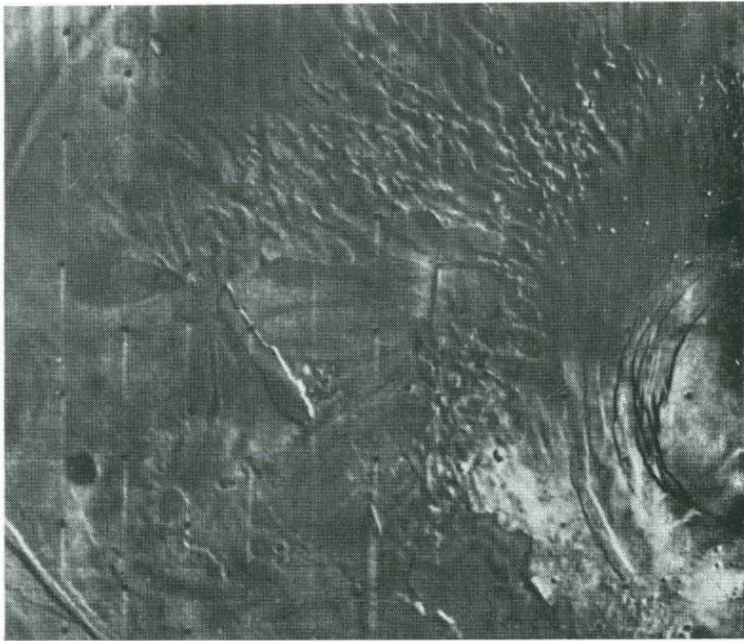
СТРОЕНИЕ ПОВЕРХНОСТИ

Проявления вулканизма. Снимки «Маринера-9» однозначно подтвердили, что гора Олимп, которую первоначально относили к крупным кратерам, представляет собой грандиозную вулканическую постройку с вершинной кальдерой (фиг. 5). Три других крупных пятна в пределах хребта Фарсид также оказались крупными вулканами (фиг. 6). Подобные объекты не были обнаружены на Луне; по-видимому, они там и не существуют или по крайней мере не достигают таких масштабов. Гора Олимп возвышается над окружающей равниной более чем на 20 км,



Фиг. 5. Гора Олимп на изображении, переданном с «Маринера-9» после окончания пылевой бури.

Эта форма рельефа, очевидно, представляет собой гигантскую вулканическую постройку, поперечник основания которой составляет около 500 км, а на вершине расположена сложная кальдера с диаметром около 65 км. Последние результаты измерений с помощью УФ-спектрометра показывают, что гора возвышается над окружающей равниной более чем на 20 км. Вокруг основания вулкана прослеживается отвесный уступ высотой до 2 км, происхождение которого трудно объяснить. Углы склона вулканической постройки очень пологие, что указывает на довольно низкую вязкость лав, возможно представленных базальтами. Предоставлено НАСА, Лабораторией реактивного движения.



Фиг. 6. Изображение участка «Южного пятна», переданное с «Маринера-9» после прекращения пылевой бури.

«Пятно» представляет собой грандиозный кальдерный комплекс. Диаметр наиболее крупной кальдеры около 115 км. Предоставлено НАСА, Лабораторией реактивного движения.

а поперечник ее основания превышает 500 км; вершинная кальдера этого вулкана имеет сложное строение, а ее диаметр равен примерно 65 км. По материалам съемки марсианской поверхности с «Маринера-9» на ней обнаружено много крупных вулканических построек. Судя по числу кратеров на склонах вулканов и по различию в видимой степени их эродированности, такие вулканы могут иметь самый разнообразный возраст. На Марсе обнаружено немало более мелких вулканических конусов, многим из которых сопутствуют лавовые потоки; такие конусы наблюдаются практически в любом районе планеты (фиг. 7) [9].

Обширные территории марсианской поверхности, по всей вероятности, сложены эффузивными изверженными породами, в какой-то степени напоминающими лунные моря. Сравнительно гладкие равнины с низким альбедо, испещренные грядами и бороздами и ассоциирующиеся с вулканическими щитами, занимают десятки тысяч квадратных километров, например Тиррен-



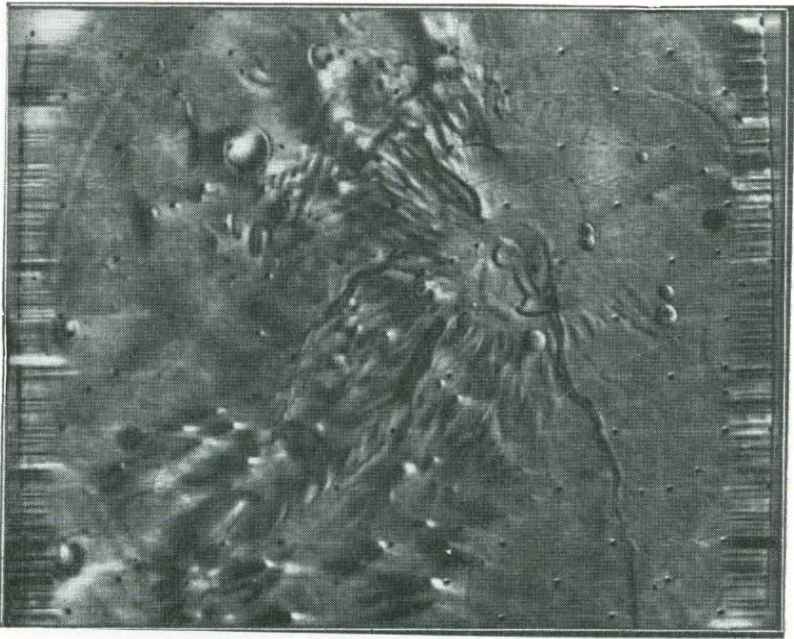
Фиг. 7. Небольшая щитовидная структура и кальдера, образование которой связано с нормальным сбросом, вероятно совпадающим с трещиной, по которой происходило поступление магмы на поверхность.

Следует отметить «ветровые борозды» на поверхности, обусловленные аккумуляцией поверхностных эоловых осадков; 90° з. д., 15° с. ш. Предоставлено НАСА, Лабораторией реактивного движения.

ская патера (Dandelion)¹ и ее окрестности, 22° ю. ш., 253° з. д. (фиг. 8).

Проявления эоловых процессов. Пыль в атмосфере Марса, наблюдавшаяся в период приближения к планете космического аппарата «Маринер-9», так же как и глобальные пылевые бури, установленные ранее при телескопических исследованиях, показывает, что атмосфера вполне способна осуществлять перенос обломочных частиц по поверхности планеты, несмотря на то что общее атмосферное давление составляет лишь $1/100$ земного. В действительности многие обломочные частицы поднимаются до высоты более 20 км над марсианской поверхностью и приво-

¹ Международным Астрономическим союзом этой структуре присвоено наименование Тирренская патера.— *Прим. ред.*



Фиг. 8. Щитовой вулкан Тирренская патера и кальдерный комплекс в Тирренском море (Mare Tyrrhenum) на Марсе (примерные координаты 260° з. д., 28° ю. ш.).

На пологих склонах щита видны многочисленные отдельные лавовые потоки, вероятно сложенные базальтами. Лавовые потоки спускаются в пределы окружающей равнины, которая также, по-видимому, сложена преимущественно базальтами. Кальдеры имеют неправильные очертания и этим легко отличаются от расположенных поблизости круговых кратеров, имеющих, вероятно, ударное происхождение. Предоставлено НАСА, Лабораторией реактивного движения.

дят к полной маскировке строения горы Олимп, как, например, на первом этапе полета «Маринера-9».

Осадочные отложения, представленные эоловыми наносами, достаточно обычны на поверхности Марса, их можно видеть на многих снимках с «Маринера-9» как камерой «А», так и камерой «В»¹. Многие из марсианских кратеров имеют эоловые шлейфы (фиг. 9); ветровые полосы широко распространены в экваториальной области, а обширные дюнные поля наблюдаются в днищах ряда кратеров (фиг. 10). Точный размер частиц, кото-

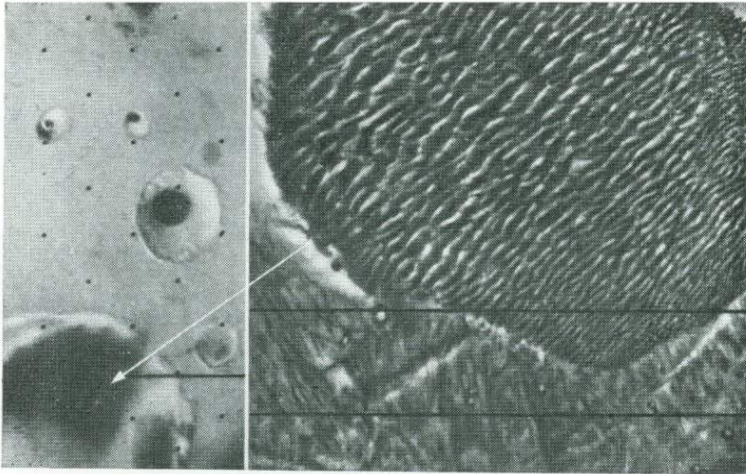
¹ Снимки камерой «А» выполнены с помощью системы широкоугольных объективов с фокусным расстоянием 50 мм и имеют разрешение 1—3 км. Снимки камерой «В» выполнены с помощью системы узкоугольных объективов с фокусным расстоянием 500 мм и разрешением от 100 до 300 м.



Фиг. 9. Светлые и темные альбедные детали, обычные на обширной площади марсианской поверхности.

Наиболее вероятно их происхождение за счет эолового отложения и денудации. Предоставлено НАСА, Лабораторией реактивного движения.

рые могут переноситься в марсианской атмосфере, или наиболее предпочтительные их размеры являются предметом догадок, и большинство исследователей относят обломочный материал к «мелкозернистым» образованиям. Однако на основании данных о скорости перемещения небольших песчаных бурь по поверхности Марса и других движений в его атмосфере предполагают, что скорость марсианских ветров превышает 70 м/с. Обычно наблюдаемая на поверхности Марса аккумуляция обломочного материала указывает на существование эоловых процессов переноса и эрозии в качестве важного геологического агента. Еще до полета «Маринера-9» Саган и Поллак [10] пред-

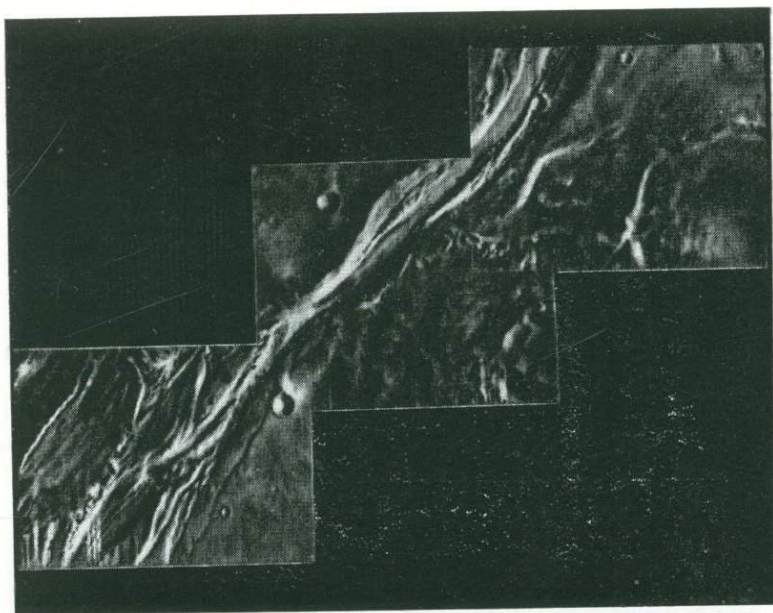


Фиг. 10.

Слева: изображение, переданное камерой «А» «Маринера-9», на котором виден кратер с диаметром 150 км со светлыми и темными деталями на его дне. *Справа:* снимок более высокого разрешения (камера «В»), на котором видно, что очень темный участок дна кратера на самом деле представляет собой донное поле размером 128×64 км, сложенное эоловыми поверхностными обломочными отложениями. Гребни дон в большинстве случаев взаимно параллельны, однако некоторые из них разветвляются. Размер дон на окраинах донного поля меньше, чем в центре. Это поле, вероятно, сформировалось под воздействием сильных приповерхностных ветров, дующих примерно в одном и том же направлении. Предоставлено НАСА, Лабораторией реактивного движения.

ложили модель, объясняющую некоторые сезонные изменения альбедо и цвета марсианской поверхности ветровым переносом материала. Позднее Воронов и Кинг [7] на основании изучения снимков с «Маринера-6» и «Маринера-7» предположили, что малое количество мелких кратеров в некоторых участках с высоким альбедо можно объяснить частичным или полным их заполнением эоловым обломочным материалом. Смит считает, что многие из марсианских кратеров могут служить эффективными ловушками эоловых обломочных отложений при соответствующем ветровом режиме, и иллюстрирует эту идею несколькими земными аналогами [11]. Такие выводы, по-видимому, можно подтвердить с помощью снимков с «Маринера-9».

Русла. На снимках «Маринера-9» зафиксировано много исключительно протяженных и широких русел. Эти структурные элементы не похожи на лунные извилистые рилли и гораздо внушительнее последних по своим размерам (фиг. 11). Милтон [12] обсуждает морфологию и происхождение этих структур и приходит к заключению о возможности формирования русел и других форм рельефа в результате деятельности текущих вод

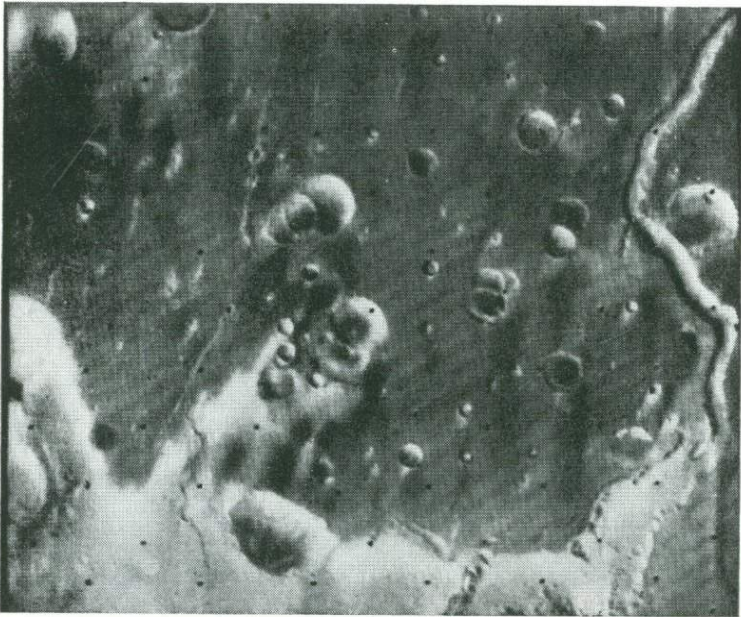


Фиг. 11. Мозаика из трех изображений, переданных камерой «В», на которой виден отрезок крупного русла длиной 75 км в области Амазония (Amazonis).

Следует отметить русловые валы и ветвление русел на правом верхнем снимке. Очевидно, русло подверглось эрозии или по меньшей мере рельеф его формировался под действием жидких агентов, скорее всего воды. Предоставлено НАСА, Лабораторией реактивного движения.

в геологическом прошлом Марса. В некоторых случаях обнаружены прирусловые валы и признаки ветвления русел; представляется весьма вероятным, что поверхностные потоки играли определенную роль в их формировании, однако состав и свойства этих жидких агентов (или агента) остаются предметом дискуссий. Многие русла имеют крупные меандры (фиг. 12), и создается впечатление, что они в основном ориентированы вниз по склону. Однако наша информация о марсианских склонах весьма приблизительна. Наблюдается тенденция к расширению крупных русел по направлению к устьям, что напоминает земные реки, более того, похоже, что марсианские русла впадают в основном в пределы относительно бесструктурных гладких равнин. Предполагают, что вероятным источником жидких геологических агентов может служить высвобождение летучих из мощного слоя марсианской мерзлоты [13].

В экваториальных широтах чрезвычайно распространены многочисленные мелкие русла, ветвистые системы дренажа и элементы, напоминающие русла временных водотоков (арройо);

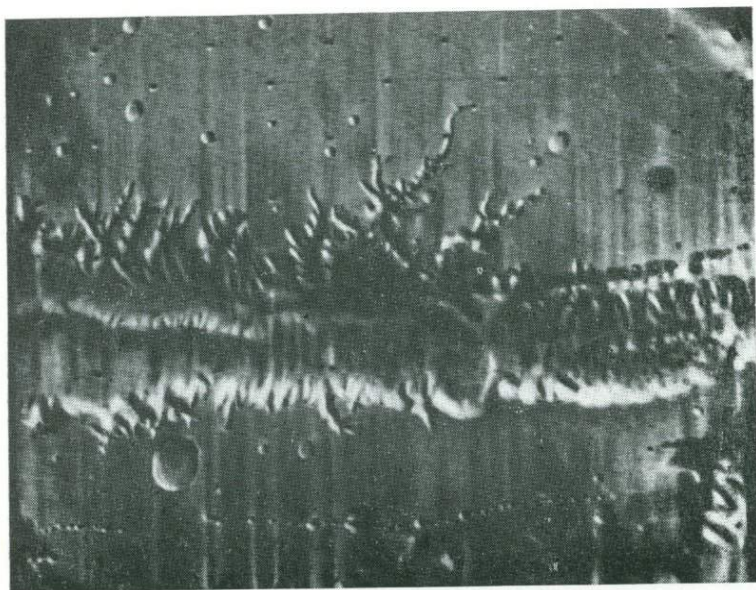


Фиг. 12. Изображение, переданное с «Маринера-9», на котором виден ряд крупных извилистых русел с отчетливыми меандрами.

Протяженность наиболее крупного русла достигает нескольких сотен километров. Предоставлено НАСА, Лабораторией реактивного движения.

эти формы особенно развиты в пределах участков поверхности, вероятно имеющих крутые склоны. Милтон [12] предполагает, что такие формы рельефа обусловлены стоком при выпадении атмосферных осадков. Многие исследователи Марса считают эту гипотезу вполне приемлемой.

Каньоны. На поверхности Марса обнаружен ряд крупных каньонов. Некоторые из них по размерам вдвое больше Большого каньона в штате Аризона (фиг. 13). Однако представляется, что эти каньоны формировались на марсианской поверхности не только благодаря воздействию жидких агентов. В самом деле, один из крупнейших каньонов, расположенный на одной линии с еще более громадным каньоном, представляет собой замкнутую депрессию (фиг. 14). Происхождение каньонов неизвестно и, возможно, связано с формированием «хаотического рельефа», который, как полагают, возник при деградации мощного слоя мерзлоты или оттока магмы [13]. Некоторые ученые считают, что каньоны формируются вдоль трансформных разломов, окраин плит или осей разрастания марсианской коры, где континентальный дрейф только начинает проявляться в виде изме-



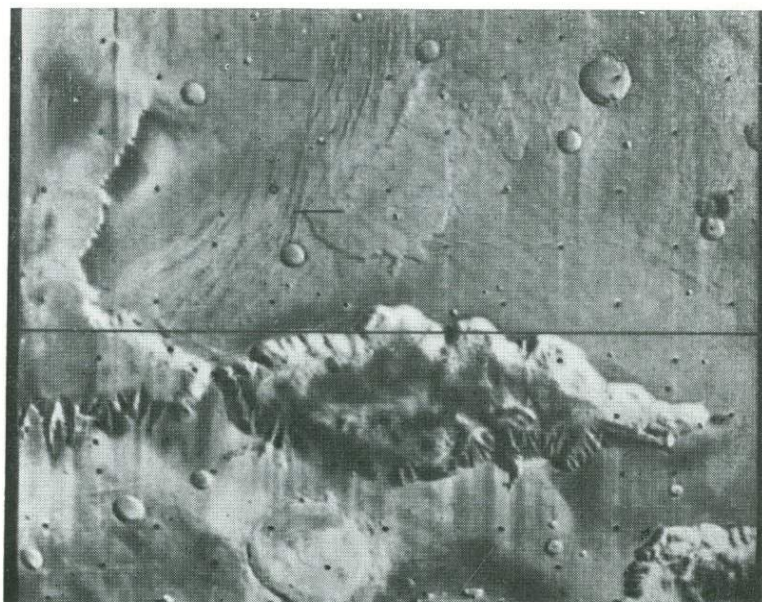
Фиг. 13. Огромный каньон на поверхности Марса.

Каньон вдвое глубже и в несколько раз шире Большого каньона в штате Аризона. Следует обратить внимание на разветвленные «притоки» каньона в верхней половине снимка. Предоставлено НАСА, Лабораторией реактивного движения.

нений топографии планеты [14]. Ответ на этот вопрос дадут дальнейшие исследования Марса.

Уступы и крутые откосы. На Марсе развиты многочисленные высокие уступы и откосы, многие из них достигают высоты 2 км, причем, по-видимому, происходит их активное отступление с образованием участков с низкохолмистым и хаотическим рельефом и гладких равнин за счет более высоких плато (фиг. 15). Некоторые из таких уступов имеют протяженность более 1000 км. Определяющими факторами образования многих марсианских уступов могут служить обвальные явления вследствие деятельности текучих и таяния подземных вод и мерзлоты [12]. Шарп и др. [15] впервые выдвинули гипотезу, позволяющую объяснить формы строения поверхности Марса таянием мерзлотных и подповерхностных льдов. В пределах многих уступов проявлена эрозия, обусловленная эоловой деятельностью, однако последняя, вероятно, играет роль второстепенного фактора и не является основной причиной отступления уступов.

В строении многих крупных марсианских уступов отмечается хорошо выраженная слоистость (фиг. 15), что указывает

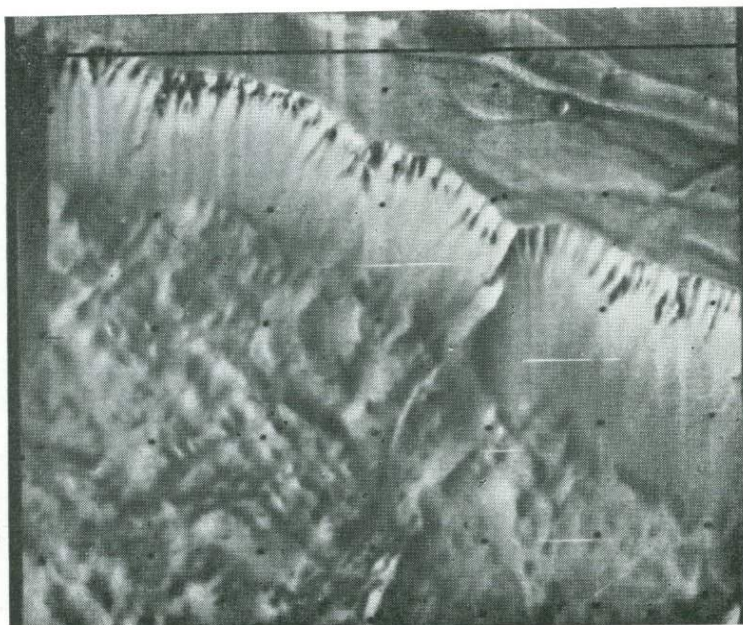


Фиг. 14. Крупная замкнутая каньонообразная депрессия на изображении, полученном с «Маринера-9».

Представляется крайне маловероятным происхождение такой депрессии в результате эрозии поверхности текучими водами. Предоставлено НАСА, Лабораторией реактивного движения.

на существование стиграфических комплексов или их групп, достигающих значительной мощности. Многие из таких слоев почти наверняка представлены эффузивными вулканическими породами; однако предполагают, что на Марсе помимо этого могут встречаться обширные толщи стратифицированных лёссовых отложений.

Полярные области и шапки. Начиная с момента открытия южной полярной шапки Марса в конце XVII века, природа полярных шапок была предметом споров. Лоуэлл предположил, что полярные шапки Марса так же, как и земные, сложены мощными отложениями замерзшей воды. Теперь мы считаем, что полярные шапки в основном сложены твердой углекислотой CO_2 , возможно, с подчиненным количеством клатратов $\text{CO}_2 - \text{H}_2\text{O}$ и замерзшей воды. Во время работы космического аппарата «Маринер-9» вначале южная полярная шапка Марса сокращалась довольно быстро, а затем процесс отступления замедлился. Это наблюдение привело к предположению о том, что либо мощность остаточной полярной шапки намного больше,

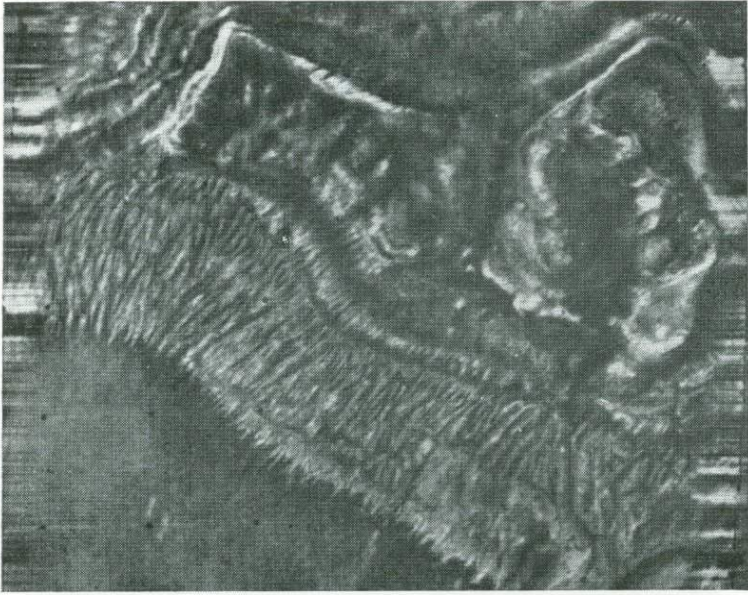


Фиг. 15. Марсианский уступ, на котором видна отчетливая слоистость.

По мере разрушения в основании его образуется хаотический рельеф. Высота уступа достигает примерно 2 км. Изображение передано камерой «В» с «Маринера-9». Предоставлено НАСА, Лабораторией реактивного движения.

чем ее периферической части, либо в центральной части содержатся летучие компоненты, устойчивые при повышенных температурах, либо и то и другое вместе. Над северной полярной областью вплоть до последнего этапа деятельности «Маринера-9» держалась плотная дымка, образуя северный полярный «капюшон», однако последние снимки с аппарата дали исчерпывающую картину данного района.

Происхождение форм геологического строения полярных областей Марса освещено в работах Содерблома и др. [16], Каттса [17], Сагана [18], Шарпа [19] и других. На обоих полюсах непостоянные полярные шапки подстилаются слоистыми формациями (фиг. 16). Этот комплекс поверхностных образований сложен сравнительно маломощными, пологозалегающими слоями, мощность которых по оценкам может быть от 10 до 30 м. Предполагается, что эти отложения представлены лёссом, переслаивающимися слоями лёсса и мерзлотных летучих компонентов или даже стратифицированными задровыми отложе-



Фиг. 16. Изображение, переданное с «Маринера-9» (камера «В»), на котором видны слоистые отложения.

Такой тип слоистых отложений развит в пределах обеих полярных областей. По-видимому, мощность отдельных слоев не превышает 10 м; предполагают, что это лёссовые отложения, переслаивающиеся с замерзшими летучими соединениями. Предоставлено НАСА, Лабораторией реактивного движения.

ниями, вынесенными из полярных ледников. Вероятно, такие образования принадлежат к наиболее молодым поверхностным комплексам, наблюдаемым в пределах любой из полярных областей [16]. По данным Каттса [17], в слоистых отложениях, подстилающих постоянные ледяные шапки, может быть захоронена значительная масса замерзшей воды вместе с пылевыми частицами.

Слоистые и тонкослоистые отложения главных полярных областей чаще всего окружены гладкими «изъеденными» и несущими следы ряби равнинами. «Изъеденные» равнины названы так в соответствии с их внешним обликом (фиг. 17); считают, что их формирование хотя бы отчасти следует связывать с процессами дефляции на гладких равнинах или других геоморфологических объектах такого же типа. Распределение поверхностных наносов можно рассматривать как результат их эолового отложения. Поэтому Содерблом и др. [20] пришли к выводу о существовании направленного переноса эолового обломочного



Фиг. 17. «Изъеденная» равнина, расположенная примерно в 800 км от марсианского южного полюса.

Видны ложбины, сформированные, по-видимому, в результате выдувания. Мелкие впадины имеют поперечник от 1 до 3 км. Изображение передано камерой «В» «Маринера-9» с расстояния 3343 км от поверхности планеты. Предоставлено НАСА, Лабораторией реактивного движения.

материала от обеих полярных областей к средним широтам. Такие «покровные» наносы распространены вокруг марсианских полярных областей в пределах высоких и средних широт. К аналогичному заключению пришел также Катц [21], который построил свои представления на основании данных об ориентировке и распространенности альбедных деталей и золотых поверхностных образований. На окраинах полярных шапок, особенно на юге, обнаружены крупные хребты и ущелья. Происхождение этих форм рельефа неясно, однако создается впечатление, что их возникновение или преобразование связано с ветровым режимом в околополярных районах. Однако некоторые исследователи считают, что эти хребты соответствуют по внешнему виду ледниковым моренам.

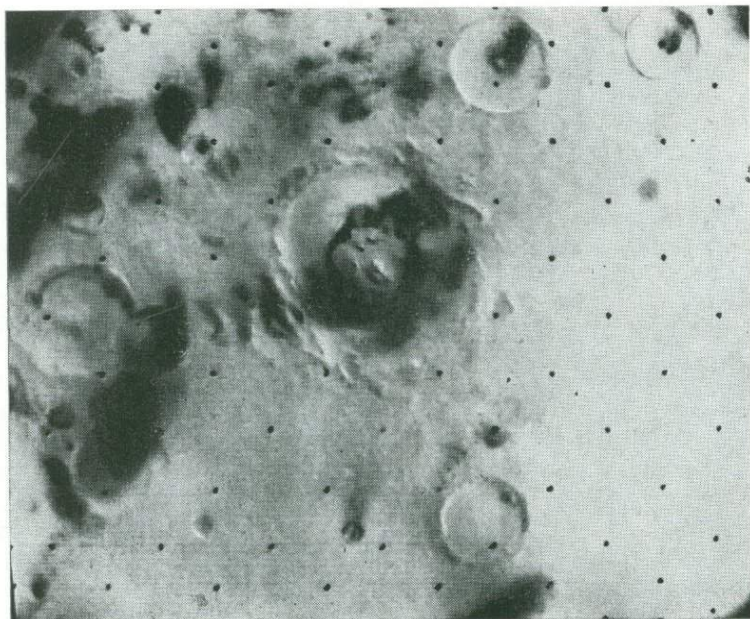
Кратеры. Несмотря на то что необычные формы марсианского рельефа вполне естественно привлекли к себе внимание, доминирующими элементами топографии Марса остаются кратеры. В 1950 г. Эпик впервые высказал предположение о широком распространении кратеров на Марсе. Однако лишь после

успешного полета пролетного аппарата «Маринер-4» в 1965 г. стало очевидно, что эта гипотеза правильна. «Маринер-4» передал снимки настолько небольшой площади поверхности, что для статистического исследования кратеров оказалось недостаточно данных, однако после съемок «Маринера-6» и «Маринера-7» были получены снимки гораздо более обширных районов с лучшим разрешением, т. е. появился материал для серьезного обсуждения. Региональные вариации плотности кратеров и степени их деградации были изучены Мак-Иллом и Уайзе [23], которые пришли к выводу о существовании реальных вариаций плотности кратеров с наименьшими видимыми размерами. Аналогичная работа ранее была выполнена Вороновым и Кингом [7].

На основании последних данных (снимки камеры «В» с «Маринера-9») в некоторых областях планеты весьма распространены малые кратеры с диаметром несколько сотен метров. В то же время в других районах, особенно в краевых зонах полярных шапок, плотность распространения малых кратеров очень невелика; вероятно, это можно объяснить заполнением их в результате отложения эоловых обломочных наносов (стр. 286). По-видимому, некоторые из участков поверхности вблизи полярных областей, где ранее происходило заполнение кратеров наносами, в настоящее время вновь вскрыты эрозией [20].

Обзор исследований по морфологии и плотности распределения марсианских кратеров содержится в работе Хартманна [24]. Он пришел к выводу о том, что возраст большей части поверхностных образований вокруг центров вулканизма в пределах хребта Фарсид составляет всего около $3 \cdot 10^8$ лет, что намного моложе возраста любого из известных нам районов поверхности Луны. Крупные кратеры наиболее распространены в пределах таких типов марсианской поверхности, которые считаются наиболее древними. На Марсе есть несколько прекрасных примеров громадных многокольцевых бассейнов [25], аналогичных Морю Восточному или Морю Дождей на Луне. Наиболее разительным примером может служить область Эллада, размеры которой в полтора раза больше бассейна Моря Дождей, однако дно и многие внешние структурные формы этого бассейна замаскированы поверхностными обломочными отложениями и поздними потоками вулканического происхождения.

Так же как и на Луне, большинство марсианских кратеров, по-видимому, имеет ударное происхождение. Для многих из них характерны центральные горки (фиг. 18) и обширные отложения выбросов, окаймляющие кратер. Очень мало кратеров с заметными лучевыми системами выбросов. Это, вероятно,



Фиг. 18. Крупный марсианский кратер (диаметр около 125 км) с хорошо заметной центральной горкой и другими структурами в центре.

Следует отметить вариации альbedo на дне кратера. Предоставлено НАСА Лабораторией реактивного движения.

объясняется отсутствием снимков высокого разрешения, выполненных при очень высоких углах Солнца. Кроме того, важную роль, по-видимому, играют марсианские ветры, под воздействием которых мелкозернистый обломочный материал лучевых систем может как выдуться, так и отлагаться на гребнях лучей. Пылевая буря, достигшая своего апогея в период вывода космического аппарата «Маринер-9» на ареоцентрическую орбиту, могла привести к затуханию лучевых систем очень молодых ударных кратеров. Подобные бури, вероятно, нередки на Марсе. Вокруг ряда крупных кратеров различаются вторичные кратеры, особенно на снимках, сделанных камерой «В» с «Маринера-9», однако даже вторичные кратеры встречаются не так часто, как на Луне. Двойные кратеры, валы которых почти соприкасаются, наблюдаются на Марсе гораздо чаще, чем можно было бы предполагать для случайных процессов. Количественное исследование данной проблемы предприняли Обербек и Аояги [26], которые считают, что двойные кратеры могли возникнуть в результате раскалывания некоторых падающих

метеороидов под действием приливных напряжений, порожденных гравитационным полем Марса.

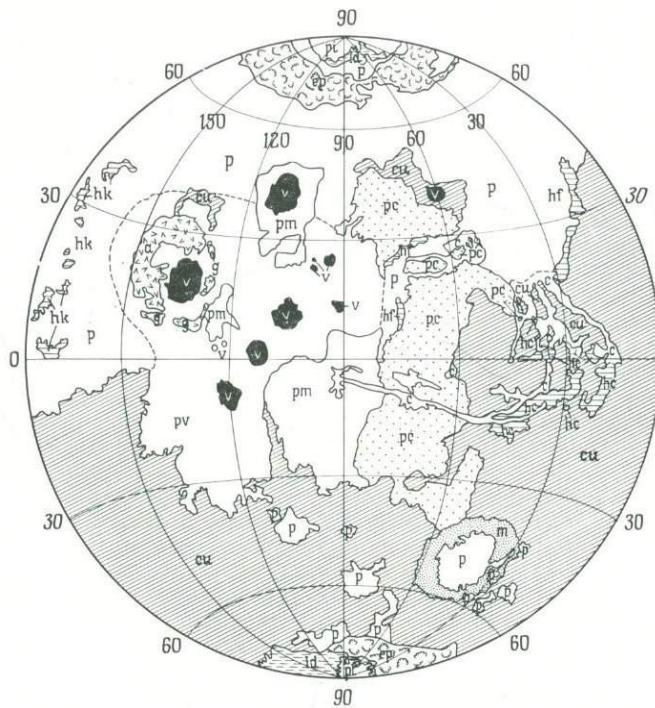
На основании анализа плотности распространения марсианских кратеров и распределения их по размерам исследователи выделяют поверхности и комплексы самого различного возраста. Соундерс и др. (фиг. 19) составили геолого-геоморфологическую карту всей планеты. Эта работа значительно сложнее, чем составление карты Луны, поскольку на поверхности Марса нет единообразия процессов эрозии и отложения. Однако по мере того, как геология поверхности Марса будет дополняться все новыми данными, наши оценки относительного и абсолютного возраста отдельных участков Марса будут становиться все более точными.

ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ НАБЛЮДЕНИЯ

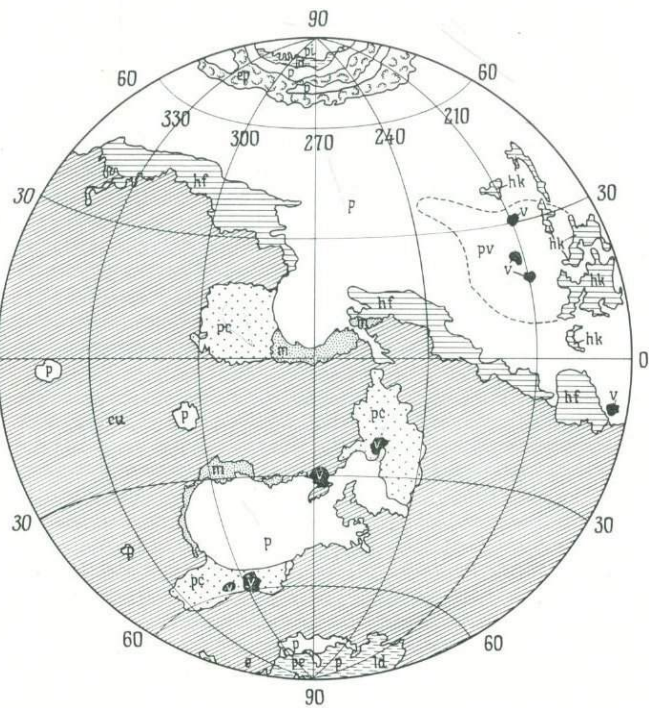
Оценка топографической информации, полученной с помощью УФ-спектрометра, установленного на «Маринере-9», позволила Шуберту и Лингенфелтеру [27] прийти к выводу, что центр фигуры Марса отстоит от центра его масс примерно на 1 км. Этот вывод основан на анализе величин амплитуд первой гармоники функции, описывающей наиболее точные данные по топографии поверхности. Фаза первой гармоники указывает на перетекание масс по направлению к хребту Фарсид. Шуберт и Лингенфелтер полагают, что этот результат согласуется с гипотезой дифференциации Марса и существованием внутренней конвекции как активного процесса в недрах планеты. Ограниченное развитие крупных вулканических построек на поверхности Марса также, по-видимому, является аргументом в пользу упомянутой концепции.

СОСТАВ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ И ВАЛОВЫЙ СОСТАВ

До сих пор в нашем распоряжении нет прямых химических анализов пород марсианской поверхности. Можно предполагать, что некоторые изливавшиеся на поверхность магмы в геологическом прошлом имели относительно низкую вязкость, сравнимую с вязкостью земных базальтов. Морфология некоторых других вулканических образований указывает, что можно допустить существование несколько более дифференцированных пород.



α



δ

Фиг. 19. Геолого-геоморфологическая карта Марса, составленная Р. Саундерсом, Р. Арвидсоном, К. Джонсом и Т. Митчем.

Комплексы полярных областей:

pi — постоянные льды, преимущественно замерзшая вода;
ld — слоистые отложения, маломощные (менее 100 м)
протяженные полосы на изображениях, переданных камерой «В», представляют собой чередование пологих и крутых террасовидных уступов;

ep — изъеденные равнины, поверхности, на которых развиты впадины неправильной формы, многие из них сливаются.

Вулканические комплексы:

v — вулканические постройки, щиты, купола или конусы;

pv — вулканические равнины с небольшим количеством кратеров. Наблюдаются фестончатые уступы, рассматриваемые в качестве передового фронта потоков;

pt — умеренно кратерированные равнины, вулканические формы рельефа отсутствуют;

pc — кратерированные равнины, равнины с наибольшей плотностью кратеров, присутствуют валы, напоминающие морские лунные валы, кроме того, наблюдаются более древние эродированные вулканические формы рельефа.

Измененные комплексы:

hc — холмистый хаотический рельеф, рельеф, представленный беспорядочным нагромождением глыб местного поверхностного материала вдоль русел или в замкнутых котловинах; }

hf — холмистый разъеденный рельеф, комплекс окаймления северных склонов уступов; представлен крупными блоками вблизи контакта с кратерированной поверхностью, более мелкими блоками в пределах равнин;

hk — собственно холмистый рельеф, изолированные области распространения холмов, достигающих в поперечнике 10 км, их трудно отнести к формам хаотического или разъеденного рельефа;

s — отложения русел, гладкие днища русел, сложенные, вероятно, аллювиальными, эоловыми или склоновыми отложениями;

p — нерасчлененные равнины: на изображениях камеры «А» выглядят как редко и умеренно кратерированная поверхность; на изображениях камеры «В» видны гряды, уступы и русла неправильной формы; обычно имеют размытые очертания;

q — бороздчатый рельеф, участки извилистых протяженных хребтов, которые примыкают к горе Олимп и протягиваются на 100 км при ширине 1—5 км; внешняя зона имеет более иссеченный облик.

Древние комплексы:

si — нерасчлененная кратерированная поверхность, сильно и умеренно кратерированные нагорья, наиболее древний тип поверхности;

t — гористый рельеф, формы, связанные с окраинными зонами бассейнов, расчлененный рельеф, по-видимому, сформирован эродированными выбросами бассейнов.

Равноплощадная проекция Ламберта (предоставлено Р. Саундерсом).

Наличие на поверхности Марса замерзшей воды и (или) гидратированных минералов предполагается Пиментелем и др. [28] на основании интерпретации ИК-спектрометрических данных, полученных космическими аппаратами «Маринер-6» и «Маринер-7». Единственным критерием определения валового состава планеты является величина ее плотности, достигающая примерно $3,9 \text{ г/см}^3$. Вероятно, эта цифра может служить надежным показателем величины отношения железа к силикатам. Отсюда следует, что Марс по сравнению с Луной содержит больше железа, но по сравнению с Землей — меньше¹.

АТМОСФЕРА

Исследование атмосферы Марса является предметом многочисленных научных работ и может дать ценные данные для выяснения вопроса эволюции планеты. У. Гершель первым в 1784 г. установил, что у Марса есть «заметная» атмосфера. Но о составе или плотности марсианской атмосферы фактически не было ничего известно до эксперимента Кёйпера в 1947 г., когда он провел сравнение одновременно снятых инфракрасных спектров Марса и Луны. Отличия в спектрах должны быть вызваны атмосферой Марса, так как у Луны нет атмосферы. Кёйпер обнаружил линии поглощения, характерные для углекислого газа. По его оценке, масса CO_2 в столбе единичной площади

¹ В настоящее время имеются данные элементного анализа марсианского реголита, полученные при помощи рентгеновских флуоресцентных спектрометров, установленных на КА «Викинг». Определены состав для мелкодисперсной фракции (частицы $\leq 100 \text{ мкм}$) в вес.% в точке посадки «Викинга-1» и разность концентрации для двух мест посадки (S2 — S1).

Элемент	S1	S2 — S1	Элемент	S1	S2 — S1
Mg	$5,0 \pm 2,5$	Д. о.	K	$< 0,25$	0
Al	$3,0 \pm 0,9$	Д. о.	Ca	$4,0 \pm 0,8$	$-0,2$
Si	$20,9 \pm 2,5$	$-0,1$	Ti	$0,51 \pm 0,2$	2
S	$3,1 \pm 0,5$	$+0,7$	Fe	$12,7 \pm 2,0$	$-0,1$
			Ок.	$50,1 \pm 4,3$	Д. о.
Cl	$0,7 \pm 0,3$	$+0,1$	X	$8,4 \pm 7,8$	Д. о.

Ок. — сумма неидентифицированных окислов, X — необнаруженные компоненты, в том числе H_2O , Na_2O , CO_2 и NO_x , Д. о. — данные отсутствуют. См. Кондратьев К. Я., «Викинги» на Марсе, Гидрометеиздат, Л., 1977. — Прим. ред.

марсианской атмосферы приблизительно вдвое превышает соответствующее значение для земной атмосферы. Однако более поздние данные, полученные по измерениям интенсивности радиосигналов при покрытии диском планеты космических кораблей серии «Маринер», показали, что атмосфера Марса значительно более разрежена. Максимальное давление атмосферы у поверхности по данным, полученным на большей части измеренных участков, составляет 8—10 мбар, а среднее, вероятно, ближе к 6 мбарам.

Установлено, что атмосфера Марса состоит почти исключительно из CO_2 ¹. Но с помощью «Маринера-9» был получен очень важный результат — установлено наличие воды в атмосфере. Над выступающими деталями топографического рельефа (вулканическими горами) в районе хребта Фарсид наблюдались облака [29], которые располагались на очень небольших высотах, так что они не могли состоять из замерзшего CO_2 . Многолетние оптические астрономические исследования фиксировали изменение яркости вышеуказанных деталей марсианской поверхности в зависимости от времени суток или сезона на Марсе. Многие астрономы-наблюдатели приходили к мысли, что такие изменения яркости деталей могут вызываться только наличием облачности. Но природа и состав таких облаков были неизвестны. По данным «Маринера-9» Леови и др. [29] определили, что эти облака, скорее всего, являются результатом орографического поднятия, но, возможно, в их образовании играют роль также конвекция и местная дегазация. По наблюдениям, проведенным с помощью инфракрасного спектрометра на «Маринере-9» на северном полушарии Марса в весенний сезон, Конрат и др. [30] определили, что над северной полярной шапкой содержание водяного пара составляет максимум 20—30 мкм осажденной воды². Прямые спектральные доказательства существования облаков из частиц водяного льда в марсианской атмосфере в районе хребта Фарсид были получены Курраном и др. [31]. Вряд ли остаются сомнения в том, что водяные пары и частицы водяного льда представляют небольшую, но, вероятно, очень важную составляющую марсианской атмосферы.

Постепенное затухание пылевой бури в течение полета «Маринера-9» позволило специалистам провести последовательное изучение, почти слой за слоем, всей атмосферы планеты. В различных участках планеты, особенно в южных полярных

¹ По данным «Викинга-1» углекислый газ составляет 95% атмосферы планеты. Кроме того, важными составляющими являются азот (2—3%) и аргон (1—2%). — *Прим. перев.*

² По данным «Викинга-1», в области темной каймы, окружающей полярную шапку, наблюдалось содержание водяного пара, равное 80—100 мкм осажденной воды. — *Прим. перев.*

областях, наблюдались волнистые облака, свидетельствующие о сильных ветрах. В области Эллада (Hellas) в период раннего утра для этого места наблюдались плотные облачные образования [29]. Однако следует отметить, что данные по верхней атмосфере не адекватны геологическим интерпретациям.

СПУТНИКИ

Два спутника Марса были открыты американским астрономом А. Холлом (Морская обсерватория, Вашингтон) в августе 1977 г. Многочисленные попытки обнаружить спутники Марса, предпринятые разными астрономами до этого, были безуспешны. Первые наблюдения спутников привели Холла в смущение. Марсианские спутники так быстро меняли свое положение относительно друг друга и относительно Марса, что Холл сначала подумал о существовании нескольких спутников. Холл назвал ближайший к Марсу спутник Фобосом («страх»), а внешний — Деймосом («ужас»), по имени легендарных коней, запряженных в колесницу Марса (или адъютантов бога войны по другим легендам).

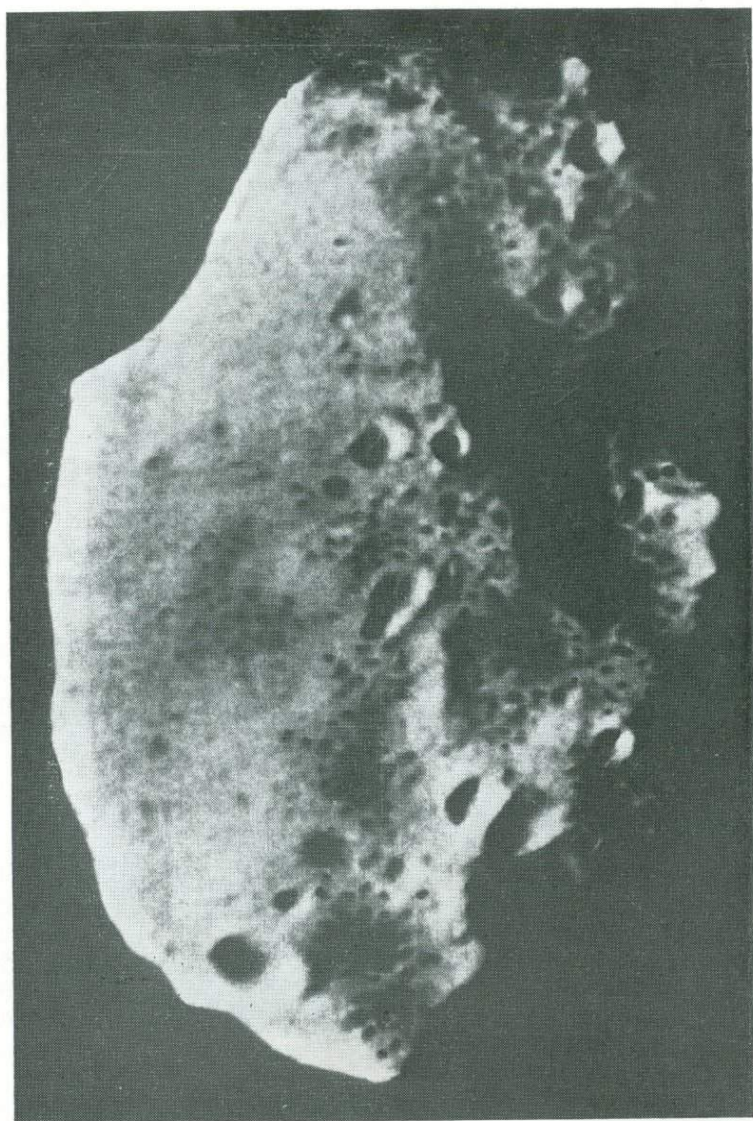
До полета «Маринера-9» оценки размеров этих двух крошечных космических тел отличались большими ошибками. Но с помощью «Маринера-9» были получены изображения обоих спутников (фиг. 20 и 21), и сейчас мы располагаем хорошей информацией о размерах, объемах и массах спутников Марса (табл. II).

Таблица II Основные оси Фобоса и Деймоса [32]

Спутник	Наибольшая ось (радиус, км)	Промежуточная ось (радиус, км)	Наименьшая ось (радиус, км)	Объем, км ³	Масса ¹ , 10 ¹⁸ г
Фобос	13,5±1	10,7±1	9,5±1	5748	17,2
Деймос	7,5(+3, -1)	6,4±1	5,5±1	1054	3,46

¹ Исходя из плотности 3 г/см³.

Данные «Маринера-9» подтвердили вывод, что оба спутника обращаются синхронно по своим орбитам. Орбиты обоих спут-



Фиг. 20. Фобос — внутренний спутник Марса.

Изображение передано «Маринером-9» с расстояния примерно 5540 км. Видны многочисленные кратеры, некоторые из них окружены кольцевыми горами. Концентрация кратеров на поверхности Фобоса примерно такая, как концентрация кратеров таких же размеров в гористых районах Луны. В то же время концентрация кратеров таких же размеров на поверхности самого Марса заметно ниже. Наибольший поперечник Фобоса около 27 км. Фобос, вероятно, является захваченным астероидом. Предоставлено НАСА, Лабораторией реактивного движения.



Фиг. 21. Деймос — внешний и меньший по размерам спутник Марса.

Изображение передано «Маринером-9» с расстояния примерно 5490 км. Наибольший поперечник Деймоса около 15 км. Выступающий вблизи терминатора небольшой кратер называется Свифт (Swift), а менее отчетливый кратер больших размеров непосредственно над первым — кратер Вольтер (Voltaire). Отличается большей угловатостью внешних очертаний, большей видимой плотностью и более «сфероидальной» поверхностью по сравнению с Фобосом. Предоставлено НАСА, Лабораторией реактивного движения.

ников имеют очень небольшой эксцентриситет. Период обращения Фобоса по орбите немного меньше 7,5 часов, что составляет треть длительности марсианских суток. Фобос — единственный известный спутник планеты Солнечной системы, с периодом обращения, меньшим периода вращения центральной планеты. Период обращения Деймоса приблизительно 30 часов 18 минут. Орбиты обоих спутников очень близко расположены относительно Марса, и Фобос проходит вблизи предела Роша¹. Радиусы орбит Фобоса и Деймоса соответственно равны 9450 км и 23 500 км [1]. Так как радиус Марса равен примерно 3380 км, то из этого следует, что ни один из спутников не может наблюдаться из районов географических полюсов Марса.

Состав спутников Марса неизвестен. Но изображения, полученные «Маринером-9», позволяют рассмотреть детали их поверхности. Оба спутника густо покрыты кратерами, и Хартман указывает [24], что плотность покрытия кратерами намного больше, чем на поверхности самого Марса. Отсюда следует, что на поверхности Марса значительное число кратеров было уничтожено эрозией и(или) у спутников была иная история бомбардировки метеоритами, которые образуют на поверхности планеты кратеры с диаметрами порядка 1 км. Фотометрические и некоторые другие данные свидетельствуют о существовании реголита на поверхности и Фобоса, и Деймоса, напоминающего лунный [32]. Существует также предположение [32], что низкие значения геометрического альбеда спутников могут свидетельствовать о том, что они состоят из базальтов или включают материал типа углистых хондритов. Не подлежит сомнению, во всяком случае, что оба спутника состоят из весьма плотных материалов, иначе они, вероятно, не смогли бы сохранить целостности, имея такие большие кратеры на своих поверхностях.

Очень небольшие размеры и неправильные формы Фобоса и Деймоса, а также тот необычный факт, что их орбиты очень близки к планете, а скорости движения очень велики, приводят многих исследователей к гипотезе, что оба спутника являются захваченными астероидами.

Во время приближения «Маринера-9» к Марсу был организован поиск других, возможно еще меньших, спутников, но ни одного такого объекта не было обнаружено. Полный альбом замечательных фотографий Фобоса и Деймоса с соответствующими исследовательскими данными был опубликован Веверкой и др. [34].

¹ Предельное расстояние, ближе которого приливные силы планеты разрушают спутник.— *Прим. перев.*

БУДУЩИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Присутствие водяных паров и частиц водяного льда в атмосфере Марса, а также учет возможности, что в прошлом на Марсе были большие количества воды, делает более обоснованным предположение о существовании жизни, чем считалось некоторое время назад. Даже незначительная атмосфера и большое расстояние от Солнца представляют определенную возможность защиты от радиации. Температурные условия некоторых областей на низких широтах находятся в пределах, допустимых для существования некоторых земных организмов. Чем больше мы узнаем о Марсе, тем более вероятным кажется, что жизнь могла бы возникнуть здесь независимым образом и сохраниться. Есть ли жизнь на Марсе или нет — это первый вопрос, который будет изучаться в ближайших американских и, вероятно, советских программах исследования Марса ¹.

Требует разрешения и ряд других важных вопросов. Присутствие воды в марсианской атмосфере означает, что следует ожидать различия в ходе эрозионных процессов на поверхности Марса и Луны. Есть ли в марсианском грунте гидратированные минералы? Каков состав горных пород и минералов марсианской поверхности и более глубоких слоев планеты? Каков возраст поверхностных слоев и объектов на поверхности Марса? Что больше напоминает Марс по основному химическому составу: Землю, Луну или метеориты? ² На эти и многие другие вопросы должны быть получены ответы. Автоматические межпланетные станции предоставят нам очень большой объем информации. Значительный прогресс в разрешении поставленных проблем начнется тогда, когда доставленные космическими кораблями небольшие образцы грунта попадут в земные лаборатории и подвергнутся детальному анализу. Тогда произойдет информационный взрыв в нашем знании о Марсе, подобный тому, какой произошел в области исследований Луны.

¹ Данные, полученные с помощью СА «Викинга-1» при проведении экспериментов по выделению газов с мечеными атомами, для определения возможности существования жизни на Марсе не дали определенных результатов. Возможен и вывод об отсутствии на планете органической жизни. — *Прим. перев.*

² Полеты «Викинга» к Марсу в 1976-77 гг. и проведение экспериментов на поверхности планеты позволили дать ответ на некоторые из этих вопросов. В частности, установлено наличие большого количества связанной воды в различных минеральных соединениях марсианского грунта. Установлено также, что в месте посадки СА «Викинга-1» грунт состоит из пород типа туфов — *Прим. перев.*

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Glasstone S.*, The book of Mars, National Aeronautics and Space Admin., SP-179, 315 p., 1968.
2. *Flammarion C.*, La Planete Mars et ses Conditions d'Habitabilite, Gauthier-Villars et Fils, 1 and 2, 1892, 1909.
3. *McDonald T. L.*, The origins of Martian nomenclature, *Icarus*, 15, p. 233—240, 1971.
4. *Nicks O. W.*, A review of the Mariner IV results, NASA, Spec. Pub., SP-130, 39 p., 1967.
5. *Leighton R. B.*, *Horowitz N. H.*, *Murray B. C.*, *Sharp R. P.*, *Herriman A. H.*, *Young A. T.*, *Smith B. A.*, *Davies M. E.*, *Leovy C. B.*, Mariner 6 television pictures, First report, *Science*, 165, p. 684—690, 1969; кроме того, Mariner 7 television pictures, First report, *Science*, 165, p. 787—795, 1969; Mariner 6 and 7 television pictures, Preliminary analysis, *Science*, 166, p. 49—67, 1969. Однако лучшие статьи по результатам исследований «Маринера-6» и «Маринера-7» см. в Scientific Findings from Mariner 6 and 7 Pictures of Mars, Final Report, reprinted from *Jour. Geophys. Res.*, 76, No. 2, p. 293—472, January 10, 1971.
6. *Leighton R. B.*, *Murray B. C.*, Behavior of CO₂ and other volatiles on Mars, *Science*, 153, p. 136—144, 1966.
7. *Woronow A.*, *King E. A.*, Size frequency distribution of Martian craters and relative age of light and dark terrains, *Science*, 175, p. 755—757, 1972.
8. *Masursky H.*, *Batson R. M.*, *McCauley J. F.*, *Soderblom L. A.*, *Willey R. L.*, *Carr M. H.*, *Milton D. J.*, *Wilhelms D. E.*, *Smith B. A.*, *Kirby T. B.*, *Robinson J. C.*, *Leovy C. B.*, *Briggs G. A.*, *Duxbury T. C.*, *Acton C. H., Jr.*, *Murray B. C.*, *Cutts J. A.*, *Sharp R. P.*, *Smith S.*, *Leighton R. B.*, *Sagan C.*, *Veverka J.*, *Noland M.*, *Lederberg J.*, *Levinthal E.*, *Pollack J. B.*, *Moore J. T., Jr.*, *Hartmann W. K.*, *Shipley E. N.*, *De Vaucouleurs G.*, *Davies M. E.*, Mariner 9 television reconnaissance of Mars and its satellites, Preliminary results, *Science*, 175, p. 294—305, 1972.
9. *Carr M. H.*, Volcanism on Mars, *Jour. Geophys. Res.*, 78, p. 4049—4062, 1973.
10. *Sagan C.*, *Pollack J. B.*, A windblown dust model of Martian surface features and seasonal changes, *Astron. Jour.*, 73, p. S33—S34, 1968; кроме того, *Smithson. Astrophys. Obs.*, Spec. Rept. 255, 44 p.
11. *Smith H. T. U.*, Aeolian deposition in Martian craters, *Nature Phys. Sci.*, 238, p. 72—74, 1972.
12. *Milton D. J.*, Water and processes of degradation in the Martian landscape, *Jour. Geophys. Res.*, 78, p. 4037—4047, 1973.
13. *Sharp R. P.*, Mars: Fretted and chaotic terrains, *Jour. Geophys. Res.*, 78, p. 4073—4083, 1973.
14. *Hodgkinson R. J.*, устное сообщение. См. особенно *Sengör A. M. C.*, *Jones I. C.*, A new interpretation of Martian tectonics with special reference to the Tharsis region, *Geol. Soc. Amer.*, Program with Abstracts, 7, No. 7, Sept., 1975, p. 1264, abstract, 1975.
15. *Sharp R. P.*, *Soderblom L. A.*, *Murray B. C.*, *Cutts J. A.*, The surface of Mars, 2: Uncratered terrains, *Jour. Geophys. Res.*, 76, p. 331—342, 1971.
16. *Soderblom L. A.*, *Malin M. C.*, *Cutts J. A.*, *Murray B. C.*, Mariner observations of the surface of Mars in the North Polar Regions, *Jour. Geophys. Res.*, 78, p. 4197—4210, 1973.

17. *Cutts J. A.*, Nature and origin of layered deposits of the Martian polar regions, *Jour. Geophys. Res.*, **78**, p. 4231—4249, 1973; см. также *Ibid.*, p. 4211—4221.
18. *Sagan C.*, Liquid carbon dioxide and the Martian polar laminas, *Jour. Geophys. Res.*, **78**, p. 4250—4251, 1973.
19. *Sharp R. P.*, Mars: South polar pits and etched terrain, *Jour. Geophys. Res.*, **78**, p. 4222—4230, 1973.
20. *Soderblom L. A.*, *Kreidler T. J.*, *Masursky H.*, Latitudinal distribution of a debris mantle on the Martian surface, *Jour. Geophys. Res.*, **78**, p. 4117—4122, 1973.
21. *Cutts J. A.*, Wind erosion in the Martian polar regions, *Jour. Geophys. Res.*, **78**, p. 4211—4221, 1973.
22. *Öpik E. J.*, Mars and the asteroids, *Irish Astron. Jour.*, **1**, p. 221, 1950.
23. *McGill G. E.*, *Wise D. U.*, Regional variations in degradation and density of Martian craters, *Jour. Geophys. Res.*, **77**, p. 2433—2441, 1972.
24. *Hartmann W. K.*, Martian cratering, 4, Mariner 9 initial analysis of cratering chronology, *Jour. Geophys. Res.*, **78**, p. 4096—4116, 1973.
25. *Wilhelms D. E.*, Comparison of Martian and lunar multiringed circular basins, *Jour. Geophys. Res.*, **78**, p. 4085—4095, 1973.
26. *Oberbeck V.*, *Aoyagi M.*, Martian doublet craters, *Jour. Geophys. Res.*, **77**, p. 2419—2432, 1972.
27. *Schubert G.*, *Lingenfelter R. E.*, Martian center of mass — center of figure offset, *Nature*, **242**, p. 251—252, 1973.
28. *Pimentel G. C.*, *Forney P. B.*, *Herr K. C.*, Evidence about hydrate and solid water in the Martian surface from the 1969 Mariner infrared spectrometer, *Jour. Geophys. Res.*, **79**, p. 1623—1634, 1974.
29. *Leovy C. B.*, *Briggs G. A.*, *Smith B. A.*, Mars atmosphere during the Mariner 9 extended mission, Television results, *Jour. Geophys. Res.*, **78**, p. 4252—4266, 1973.
30. *Conrath B.*, *Curran R.*, *Hanel R.*, *Kunde V.*, *Maguire W.*, *Pearl J.*, *Pirraglia J.*, *Welker J.*, *Burke T.*, Atmospheric and surface properties of Mars obtained by infrared spectroscopy of Mariner 9, *Jour. Geophys. Res.*, **78**, p. 4267—4278, 1973.
31. *Curran R. J.*, *Conrath B. J.*, *Hanel R. A.*, *Kunde V. G.*, *Pearl J. C.*, Mars: Mariner 9 spectroscopic evidence for H₂O ice clouds, 1973 (рукопись).
32. *Pollack J. B.*, *Veverka J.*, *Noland M.*, *Sagan C.*, *Duxbury T. C.*, *Acton C. H., Jr.*, *Born G. H.*, *Hartmann W. K.*, *Smith B. A.*, Mariner 9 television observations of Phobos and Deimos, 2, *Jour. Geophys. Res.*, **78**, p. 4313—4326, 1973.
33. *Pollack J. B.*, *Veverka J.*, *Noland M.*, *Sagan C.*, *Hartmann W. K.*, *Duxbury T. C.*, *Born G. H.*, *Milton D. J.*, *Smith B. A.*, Mariner 9 television observations of Phobos and Deimos, *Icarus*, **17**, p. 394—407, 1972.
34. *Veverka J.*, *Noland M.*, *Sagan C.*, *Pollack J.*, *Quam L.*, *Tucker R.*, *Eross B.*, *Duxbury T.*, *Green W.*, A Mariner 9 Atlas of the Moons of Mars, *Icarus*, **23**, No. 2, p. 206—289, 1974.
35. Литература, посвященная проблемам поисков внеземной жизни, крайне обширна. В качестве введения и источника библиографических ссылок см. *Biology and the Exploration of Mars*, *Pittendrigh, C. S.*, *Vishniac W.*, *Pearman J. P. T.*, eds., National Academy of Sciences, National Research Council, Pub. 1296, NAS/NRC., 516 p., 1966.

РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА ПО ОБЩИМ ВОПРОСАМ

36. *Mutch T. A., Arvidson R. E., Jones K. L., Head J. W., III, Saunders R. S.*, The Geology of Mars, Princeton Univ. Press, Princeton, New Jersey, 1976. Исчерпывающая сводка по геологии Марса с использованием данных «Маринера-9», с прекрасными иллюстрациями.
37. *Journal of Geophysical Research*, 78, No. 20, p. 4007—4440, July 10, 1973. Этот выпуск целиком посвящен интерпретации снимков, выполненных «Маринером-9», и других экспериментов и представляет собой концентрированную сводку современных знаний о планете Марс.
38. *Glasstone S.*, The book of Mars, National Aeronautics and Space Administration, SP-179, 315 p., 1968. В этой книге суммирована обширная литература, посвященная раннему этапу изучения Марса, и содержит много ссылок. Из новейших данных, как показывает дата выпуска, в рукописи могла быть учтена лишь информация, полученная «Маринером-4».
39. *Journal of Geophysical Research*, 76, No. 2, p. 293—472, January 10, 1971. В этом выпуске в едином томе сосредоточена лучшая сводка данных, полученных «Маринером-6» и «Маринером-7». Интересно сопоставить некоторые из первых сведений, появившихся после полетов указанных космических аппаратов с гораздо более информативными результатами «Маринера-9».
40. *Collins S. A.*, The Mariner 6 and 7 pictures of Mars, NASA, Spec. Pub., SP-263, 159 p., 1971.
41. NASA, Mars: As Viewed by Mariner 9, NASA, Spec. Pub., SP-329, 225 p., 1974. Хорошая коллекция фотографий, выполненных «Маринером-9», с кратким пояснительным текстом.

Появление Гермеса часто сулило неудачи земным обитателям. Если же астероид под этим именем встретится с Землей, а это может произойти, то сила удара высвободит энергию, равную энергии взрыва миллиарда водородных бомб, которая может уничтожить значительную часть населения нашей планеты.

Р. Джестроу, М. Томпсон, 1974 г.

8. Астероиды

ВВЕДЕНИЕ. ИСТОРИЯ

В Солнечной системе есть много «малых планет» — астероидов. Некоторые из них имеют солидные размеры — до 760 км в диаметре, но в основном их размеры гораздо меньше. Ни одно из этих тел не может наблюдаться непосредственно невооруженным глазом, — только с помощью телескопа. Возможно, что двумя условными исключениями из этого правила могут быть спутники Марса — Фобос и Деймос (см. гл. «Марс», фиг. 20 и 21), которые могут быть астероидами, захваченными Марсом.

Открытие первых астероидов связано с историей попыток обнаружить так называемую «исчезнувшую планету» Солнечной системы, существование которой следовало из закона планетных расстояний Боде [1].

Тициус в 1772 г. обнаружил интересную числовую закономерность в расстояниях известных планет от Солнца. Об этом открытии он упоминает в виде туманного замечания в одной из своих работ. Однако только после исследований Боде этот результат получил известность и стал именоваться законом Боде. Боде, ставший впоследствии директором Берлинской обсерватории, обратил внимание на слишком большое расстояние между Марсом и Юпитером, не соответствующее выведенной математической закономерности. Однако открытие 13 марта 1781 г. Гершелем планеты Уран¹ утвердило правильность

¹ Уран был первой планетой, открытой в историческое время. В ознаменование заслуги Гершеля король Георг III подарил ему обсерваторию и наградил пожизненной пенсией, что позволило Гершелю заняться исключительно астрономией; до этого он зарабатывал на жизнь как профессиональный музыкант.

закона, так как истинное расстояние планеты от Солнца всего на 2% отличалось от предсказанной величины (19,2 а. е. по сравнению с предсказанными 19,6 а. е.) [2]. Поэтому открытие Урана стимулировало организацию поиска «исчезнувшей планеты», которая по расчетам должна была находиться на расстоянии 2,8 а. е. В эту работу включились 24 европейских астронома [3]. В новогоднюю ночь с 1800 на 1801 г. итальянский астроном Дж. Пиацци проводил многочасовые наблюдения в своей обсерватории в Палермо, Сицилия, с целью уточнения положения звезд в области созвездия Тельца и создания точной карты этой области звездного неба. В тщетных¹ попытках отыскать одну из звезд он обнаружил звездоподобный объект восьмой звездной величины [4]. Пиацци следил некоторое время за обнаруженным объектом и установил, что он движется по небу, описывая «петлю», характерную для видимого перемещения планет по небу. Открытое новое космическое тело Пиацци назвал Церерой в честь богини-покровительницы Сицилии и написал о своем открытии Боде. Молодой математик К. Гаусс рассчитал, что Церера находится на расстоянии 2,77 а. е. от Солнца [5]. Вслед за этим быстро последовали открытия и других малых планет, находящихся примерно на таких же расстояниях от Солнца. Приблизительно через год В. Ольберс открывает Палладу. Юнона и Веста были открыты соответственно в 1804 и 1807 гг., а к 1890 г. было обнаружено и занесено в каталоги свыше 300 астероидов. По оценке Грёневельда и Кёйпера [6], к настоящему времени наблюдалось в общей сложности около 40 000 астероидов, но по большей части эти наблюдения не позволили определить их орбиты и яркости с достаточной точностью, чтобы считать их зарегистрированными. Полное количество астероидов с абсолютной звездной величиной² больше 19, по оценке Къянга [8], превышает 70 000.

ОРБИТЫ

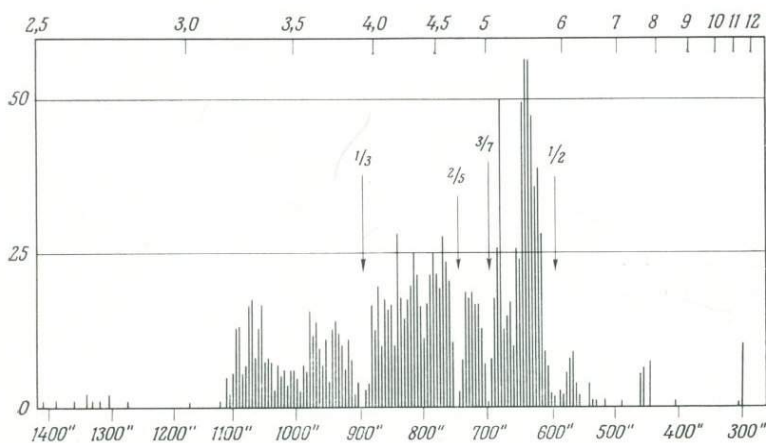
ПОЯС АСТЕРОИДОВ

Орбиты большей части астероидов расположены между орбитами Марса и Юпитера, т. е. на расстояниях от Солнца 1,5 — 5,2 а. е., причем 7/8 из них между 2,3 и 3,3 а. е. Но так

¹ Как выяснилось, из-за опечатки в звездном каталоге Волластона, которым пользовался Пиацци.

² Абсолютная звездная величина — это та яркость объекта, которую он будет иметь на стандартном расстоянии, в некотором выбранном диапазоне волн, при условии отсутствия поглощения в промежуточной среде.

как многие орбиты астероидов имеют большой эксцентриситет, пояс астероидов занимает значительно более широкую зону. Движение всех известных к настоящему времени астероидов по орбитам является прямым, т. е. против часовой стрелки, если смотреть с северного полюса мира. Распределение орбит астероидов по периодам обращения сильно отклоняется от случайного. Кроме района концентрации орбит со средним расстоянием от Солнца примерно 2,8 а. е., что соответствует соотношениям закона Боде, имеются и области глубоких минимумов орбит астероидов, вызванных так называемыми «резонансами», или «соизмеримостями» с периодом обращения Юпитера. Большая часть орбит астероидов находится внутри орбиты Юпитера, и у астероидов более короткие периоды обращения. Юпитер обладает очень большой массой, сравнимой почти с общей массой Солнечной системы без Солнца. Поэтому гравитационное поле Юпитера во многом определяет ситуацию в средней части Солнечной системы. Глубокие минимумы в распределении орбит астероидов по периодам обращения соответствуют таким орбитам, периоды обращения тел по которым составляют простые доли периода обращения Юпитера: $1/2$, $1/3$, $2/5$ и $3/7$ (фиг. 1). Эти области минимумов распределения астероидных орбит получили название окон Кирквуда, по имени американского астронома, который обратил внимание на эту особен-



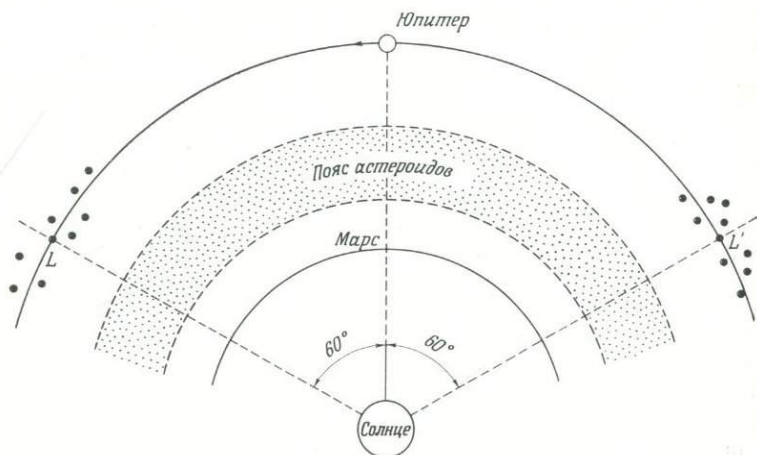
Фиг. 1. Гистограмма распределения астероидов по периодам обращения (в годах, верхняя шкала на оси абсцисс) или по средним суточным орбитальным движениям в угловых секундах (нижняя шкала).

Гистограмма демонстрирует окна Кирквуда и другие соизмеримости. Hartmann W. K. 1968, *Astrophys. Jour.*, 162, p. 337.

ность в 1866 г. Швейцер [9] детально изучал окна Кирквуда и пришел к выводу, что гравитационное влияние Юпитера устраняет тела, которые движутся по таким резонансным орбитам. Однако, с другой стороны, движения по некоторым соизмеримым орбитам могут стабилизироваться резонансными эффектами [10, 11]. Поэтому астероиды, периоды обращения которых составляют $3/4$ или $2/3$ периода Юпитера, обладают стабильными орбитами, и со временем в распределении орбит астероидов образовались концентрации вблизи этих районов. По Альвену [12], если отношение среднего периода обращения малой планеты к периоду Юпитера не составляет простой дроби, то возмущения от Юпитера погашаются и движение астероида остается устойчивым в течение относительно большого промежутка времени. Следует подчеркнуть, что «первоначальное» распределение орбит астероидов в области пояса или в любой другой части Солнечной системы остается неизвестным. Даже сведения о современном распределении имеются только для относительно больших объектов. Наклонения орбит большей части астероидов невелики, но у некоторых объектов могут достигать такой большой величины, как 30° , — величины, намного превышающей наклонения орбит больших планет.

ТРОЯНЦЫ

Французский математик и астроном Лагранж в 1772 г. нашел решение сложной задачи трех тел. Он показал, что если тело небольшой массы движется вокруг Солнца приблизительно по той же орбите, что и гораздо большая планета, то в случае, когда Солнце, планета и малое тело находятся в вершинах равностороннего треугольника, положение малого тела на орбите относительно планеты будет оставаться постоянным. В 1906 г. М. Вольф обнаружил астероид Ахилл, который удовлетворяет таким условиям. Затем было обнаружено много объектов аналогичного характера [13, 14]. Таким образом, имеются целые группы астероидов, находящихся в 60° как впереди, так и позади Юпитера на его орбите, в так называемых точках Лагранжа (фиг. 2). Все астероиды этой группы получили названия по именам мифических героев (греков и троянцев) Троянской войны, описанной Гомером в «Илиаде». Эксцентриситеты и наклонения орбит некоторых астероидов из группы Троянцев очень велики. Поэтому они совершают весьма сложные движения относительно апекса треугольника и временами могут далеко отходить от положения идеальных лагранжевых точек [15]. Возможно, что в течение длительного промежутка времени благодаря силе притяжения Юпитера в группу Троянцев могут попадать новые



Фиг. 2. Относительное расположение Солнца и орбит Марса и Юпитера.

Точки Лагранжа (L , L') на орбите Юпитера расположены на 60° впереди и 60° позади планеты. Астероиды группы Троянцев впереди Юпитера называют греками, а позади — троянцами.

астероиды. С другой стороны, возмущения, вызываемые притяжением Сатурна в период приближения группы к этой планете, могут устранять некоторые астероиды из группы [16, 17]. Данлоп и Герелс [48], а также Рабе [49] высказали предположение, что некоторые астероиды из группы Троянцев могли быть раньше спутниками Юпитера.

АСТЕРОИДЫ, ПЕРЕСЕКАЮЩИЕ ОРБИТУ МАРСА

К настоящему времени известно более 30 астероидов во внутренней части пояса астероидов, орбиты которых пересекают орбиту Марса. Перигелии орбит таких астероидов меньше афелия орбиты Марса. Некоторые из этих астероидов могут быть поставщиками материальных обломков, которые в дальнейшем, возможно, пересекут и земную орбиту. Андерсом [16] было показано, что астероиды, пересекающие орбиту Марса, могли явиться в конце концов источником некоторых метеоритов, выпавших на поверхность Земли.

АСТЕРОИДЫ ГРУППЫ АПОЛЛОН

У некоторых астероидов форма орбит такова, что они могут заходить в центральную часть Солнечной системы, внутрь земной орбиты. В настоящее время известно по крайней мере 15 таких астероидов [20]. Эпик, основываясь на скорости роста числа открытий таких астероидов, пришел к выводу, что их должно быть около сорока. Более поздние оценки дают цифру 100 и больше и называют даже возможной такую большую величину, как 1000. Все эти астероиды малы, с диаметрами в пределах 0,5 км.

Как показал Андерс [16], полупериод¹ жизни астероидов группы Аполлон составляет всего один процент возраста Солнечной системы. Поэтому они должны быть остатками какой-то многочисленной древней популяции или же эта популяция должна пополняться. Многие современные специалисты считают, что по крайней мере часть, если не большинство, метеоритов обязана своим происхождением именно этим астероидам. Поскольку эти астероиды пересекают орбиту Земли, то в принципе необходимы сравнительно небольшие энергии, чтобы возмутить движение по орбите или просто столкнуть фрагмент астероида таким образом, чтобы при дальнейшем движении он мог столкнуться с Землей.

АСТЕРОИДЫ С ПОЧТИ ОДИНАКОВЫМИ ОРБИТАМИ

Японский астроном Хираяма [21] в серии статей, опубликованных с 1917 по 1933 г., сообщал, что многие астероиды можно сгруппировать по совокупности сходных элементов орбит. В качестве классификационных параметров орбит Хираяма брал главную полуось, эксцентриситет и наклонение и показал, что эти величины группируются вокруг некоторых избранных значений. Соответствующие группы астероидов получили название семейств Хираямы. Перепроверка вывода Хираямы была проведена Брауэром в 1951 г. [22], который использовал орбитальные элементы, скорректированные за счет вековых возмущений больших планет, вызывающих периодические возмущения орбит астероидов, а также за счет других поправок. Брауэр переопределил 9 семейств Хираямы и установил наличие еще 19 дополнительных «групп». Семейства Брауэра

¹ Период времени, в течение которого половина членов данной группы существенно изменяет свои орбиты и выходит из состава группы (за счет планетных возмущений орбит и захвата планетами).

содержат от 9 до 62 астероидов, в то время как в группах содержится от 4 до 11 астероидов. Наконец, вся проблема подверглась новому анализу в работах Арнольда [23], который использовал литературные данные по орбитам и обработал их с помощью современной вычислительной техники. В результате в классификации существующих семейств произошли значительные изменения и, кроме того, было открыто несколько новых семейств (табл. 1). Другие группы астероидов были обна-

Таблица I Новые семейства астероидов, определенные Арнольдом [23]

Семейства	A-81	A-82	A-83	A-84	A-85	A-86	A-87	A-88	A-89	A-90	A-91
Полное число членов	9	7	8	9	17	17	14	26	10	12	7
Члены ¹	42 67 118 474 585 647 889 902 1528	19 21 138 435 557 1190 1586	26 37 66 77 309 384 708 1084	505 563 826 869 1178 1277 1525 1555 1681	55 59 123 127 197 200 237 359 371 481 527 559 614 741 872 1176 1716	103 110 160 203 206 272 308 363 460 847 1007 1020 1228 1352 1420 1517 1726	58 125 128 210 267 301 340 380 395 868 1039 786 1251 1502 1541	137 199 250 314 448 493 545 665 690 762 768 786 788 791 986 1030 1069 1113 1115 1165 1369 1452 1519 1572 1701 1735	408 552 567 874 942 979 1255 1380 1582 1678	92 318 490 844 1015 1023 1086 1161 1163 1351 1395 1558	403 519 716 824 858 984 1433

¹ Астероидам дается классификационный или каталожный номер только тогда, когда вычислены элементы его орбиты. Номер показывает порядок обнаружения и установления элементов орбиты данного астероида.

ружены по схожести иных свойств их орбит. Так, например, группа Хильды [11] — это астероиды, которые объединяются вблизи резонанса $2/3$. Семейство Флоры содержит астероиды,

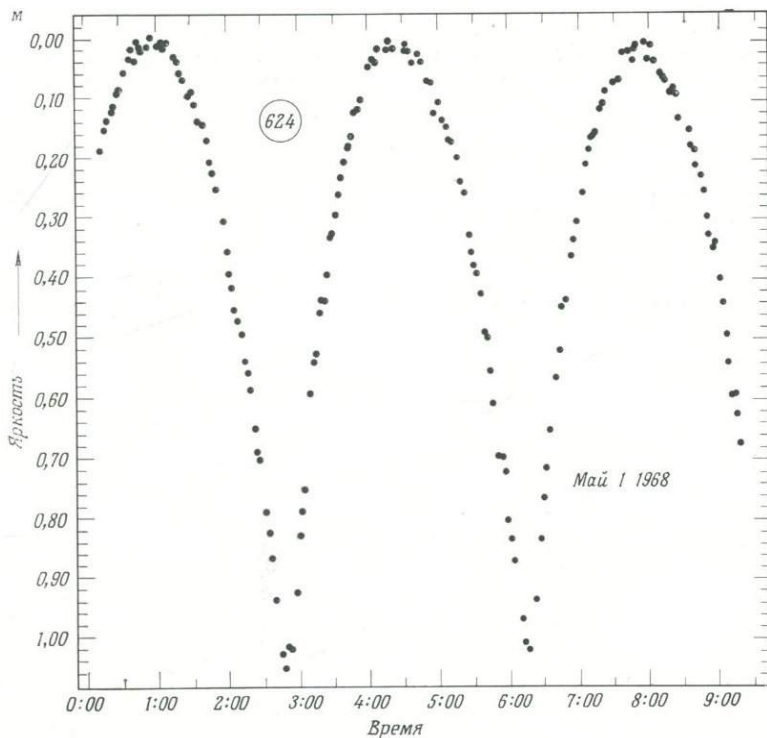
сходные по всем пяти элементам орбит. На основе существования этой группы Альвен [24] развил гипотезу «струйных потоков»¹. Научная литература по потокам метеоров и астероидов рассмотрена в обзоре Линдблада [25].

ОПТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Имеются многочисленные работы по измерениям яркости, альbedo, оптических диаметров и других оптических свойств астероидов [6, 18, 20, 26 и др.]. Согласно этим данным, большая часть астероидов вращается с довольно большими скоростями. Этот факт был впервые установлен Герелсом [27], который изучал изменения интенсивности излучения со временем (фиг.3) Имеются два возможных объяснения такой формы кривых зависимости яркости от времени: а) у астероида примерно однородное поверхностное альbedo, но он имеет вытянутую или нерегулярную форму и при движении поворачивается или кувывается; б) астероид почти правильной формы, но имеет такие особенности в строении поверхности, которые приводят к разнице поверхностного альbedo в разных местах. Вероятно, для некоторых астероидов справедливы оба предположения, но большинство специалистов считают более вероятным первое.

Непосредственно по фотографическим изображениям могут быть измерены только диаметры четырех самых близких астероидов. Однако диаметры астероидов могут быть измерены более точно с помощью сложных оптических измерений [28]. Многие современные исследования были проведены в инфракрасном диапазоне. Такие измерения позволяют определить альbedo и благодаря этому рассчитать величину диаметра, если известно абсолютное значение яркости и приняты допущения о других параметрах. Размеры малых астероидов могут быть определены по их блеску, особенно если возможно сравнить их яркость с яркостью опорных звезд, других планет или Луны, по которым имеются соответствующие точные данные. Кёйпер [29] на основе обзора имеющихся данных по астероидам построил кривую распределения астероидов по массам (фиг. 4), в которой имеются «горб» или точка перегиба в области масс, примерно составляющих 10^{20} г. Кёйпер считает, что точка перегиба определяет примерную границу между астероидами, которые возникли в результате аккреции (это наибольшие по массе

¹ Гипотеза предполагает существование концентрации кеплерова движения масс в центральном поле тяготения в потоке движения частиц или тел с близкими орбитами. Высказываются серьезные сомнения в корректности этой гипотезы.— *Прим. перев.*



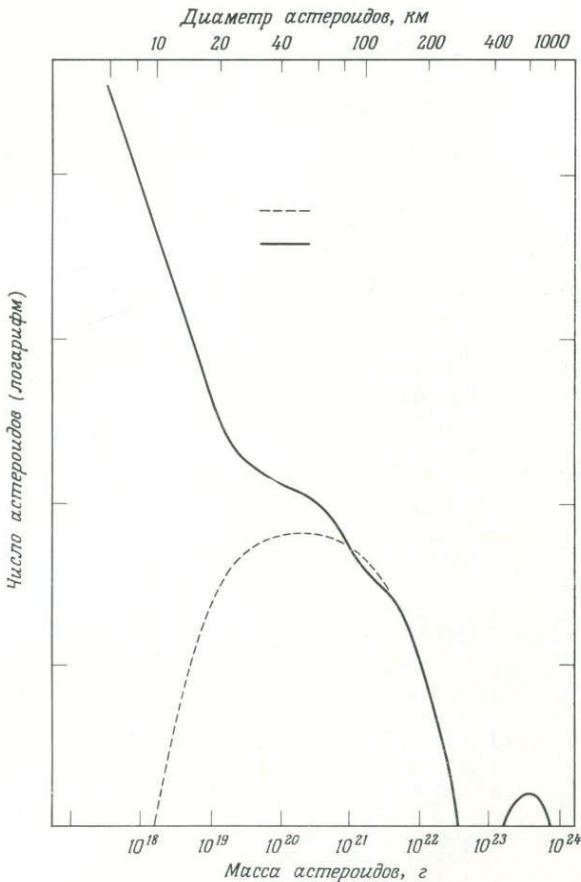
Фиг. 3. Кривая изменения блеска астероида (624) Гектор.

Эти данные могут интерпретироваться как указание на то, что некоторые астероиды имеют неправильную форму и, вращаясь при движении по орбите, обладают различным альбедо.

астероиды), и астероидами малых масс, которые возникают в результате дробления. В дальнейшем Андерс [16] развил эту аргументацию, исследовав распределение астероидов по массам в различных частях пояса астероидов. Так, например, Андерс установил, что распределение абсолютных звездных величин¹ астероидов, находящихся на удалении между 2,15 и 3,16 а. е., приближается к гауссовому для наиболее ярких и больших астероидов, а распределение слабых астероидов аппроксимируется логарифмической кривой. Андерс подтвердил справедливость интерпретации Кёйпера.

Спектральное отражение астероида Весты было лучше изучено Мак-Кордом и др. [30]. Полученные результаты лучше всего

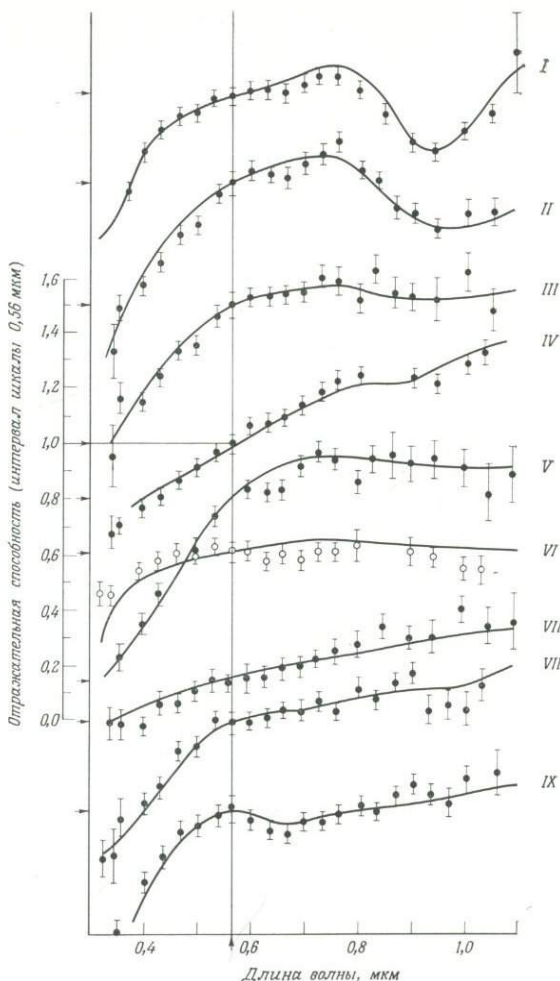
¹ Принято считать, что блеск астероида или его «звездная величина» пропорциональны его размерам или среднему диаметру. При оценке масс предполагается, что средняя плотность вещества астероида равна $3,3 \text{ г/см}^3$. — Прим. перев.



Фиг. 4. Распределение астероидов по массам (по Кёйперу [29]).

Прерывистая линия показывает предполагаемое первичное распределение. Предоставлено Американским астрономическим обществом.

очевидно, согласуются с известными составами базальтовых ахондритов. Это заключение в основном базируется на спектральных данных о полосе поглощения в области 0,9 мкм, обусловленного наличием двухвалентного железа в позиции M_2 в магнетальном пироксене. Для астероида Торо (1685) кривые отражательной способности в видимом и близком инфракрасном диапазонах были получены Чепменом и др. [31]. Авторы пришли к заключению, что этот астероид уникален и по полученным данным, скорее всего, состоит из равновесных хондритов типа



Фиг. 5. Связь телескопических спектров астероидов (жирные точки с отрезками, показывающими пределы ошибок) и лабораторных спектров (сплошные линии) метеоритов.

Сходство спектров указывает на схожесть минералогического состава. Может быть сделан вывод, что каждому рассмотренному метеориту или группе одинаковых по составу метеоритов могут быть найдены соответствующий исходный астероид или группа астероидов. Для многих метеоритов еще не найдено «соответствующих астероидов». Charman C. R., 1974, The asteroids as meteorite parent bodies: Meteoritics, 9, No. 4, p. 323.

I — астероид (4) Веста — метеорит Караета, базальтовый ахондрит; *II* — астероид (349) Дембовска — метеорит Jelica, LL6 хондрит; *III* — астероид (887) Алинда — метеорит Bremervörde, H3 хондрит; *IV* — астероид (230) Атамантис — метеорит Veramin, мезосидерит; *V* — астероид (80) Сафо — метеорит Lancé, C3 хондрит; *VI* — астероид (2) Паллада — метеорит Kargoonda, C4 хондрит; *VII* — астероид (16) Психея — метеорит Abee, энгатитовый хондрит; *VIII* — астероид (221) Эос — метеорит Murchison, C2 хондрит; *IX* — астероид (176) Идуна — метеорит Mighet, C2 хондрит.

L (оливин-гиперстеновых). Спектральные данные для современного распределения больших астероидов не обнаруживают четкой корреляции поверхностного состава с гелиоцентрическими расстояниями. Мак-Кордом и Чепменом было выдвинуто предположение о возможном соответствии спектров астероидов химическому составу различных типов метеоритов (фиг. 5) [32].

К настоящему времени представляется весьма вероятным, что по крайней мере некоторые метеориты представляют собой осколки астероидов, но проблема конкретных тел, из которых они произошли, по-прежнему, обсуждается. Решение этого вопроса может быть связано с дальнейшим прогрессом в области спектральных исследований, бортовых космических экспериментов или даже с получением образцов материала астероидов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Flammarion C.*, The Flammarion Book of Astronomy, Trans. A. B. Paget, Dir. by G. Flammarion, Simon and Schuster, New York, 670 p. 1964.
2. *MacPherson H. C.*, Makers of Astronomy, Oxford Press, 244 p., 1933. Кроме того, *Brandt J. C.*, *Maran S. P.*, New Horizons in Astronomy, W. H. Freeman, San Francisco, 496 p., 1972.
3. *Roth G. D.*, The System of Minor Planets, D. Van Nostrand, New York, 128 p., 1962.
4. *Leuschner A. O.*, Research surveys of the orbits and perturbations of minor planets 1 to 1091, Lick Obs. Pubs., 19, 519 p., 1935.
5. *Payne-Gaposchkin C.*, Introduction to Astronomy, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N.J., 507 p., 1954.
6. *Groeneveld I.*, *Kuiper G. P.*, Photometric studies of asteroids, I, Astrophys. Jour., 120, p. 200—220, 1954.
7. См. *Kuiper G. P.*, *Fujita Y.*, *Gehrels T.*, *Groeneveld I.*, *Kent J.*, *van Briesbroeck G.*, *VanHouten-Groeneveld C.*, Survey of asteroids, Astrophys. Jour., Suppl. 32, p. 289—427, 1958; кроме того, *Gehrels T.*, Minor planets — II, Photographic magnitudes, Astron. Jour., 72, p. 1288—1291, 1967; *Schubart J.* The minor planet (1221), Amor, Astron. Astrophys., 2, p. 173—181, 1969.
8. *Kiang T.*, Asteroid counts and their reduction, Monthly Notices, Roy. Astron. Soc., 123, p. 509, 1962.
9. *Schweizer F.*, Resonant asteroids in the Kirkwood Gaps and statistical explanations of the gaps, Astron. Jour., 74, p. 779—788, 1969.
10. *Schubart J.*, Long period effects of the motion of Hilda-type planets, Astron. Jour., 73, p. 99—103, 1968.
11. *Columbo G.*, *Franklin F. A.*, *Munford C. M.*, On a family of periodic orbits of the restricted three-body problem, and the question of the gaps in the Asteroid Belt and in Saturn's rings, Astron. Jour., 73, p. 111—123, 1968.
12. *Alfvén H.*, Jet streams in space, Astrophys. and Space Sci., 6, p. 161—174, 1970.

13. *VanHouten C. J., Gehrels T.*, Minor planets and related objects-V; The density of Trojans near the preceding Lagrangian point, *Astron. Jour.*, **75**, p. 659—662, 1970.
14. *Deprit A., Rabe E.*, Periodic Trojan orbits for the resonance 1/12, *Astron. Jour.*, **74**, p. 317—323, 1969.
15. *Kozai Y.*, Secular perturbations of asteroids with high inclination and eccentricity, *Astron. Jour.*, **67**, p. 591—598, 1962.
16. *Anders E.*, Origin, age, and compositions of meteorites, *Space Sci. Rev.*, **3**, p. 583—714, 1964. См. также *Wetherill G. W.*, Evaluation of the Apollo asteroids as sources of stone meteorites, *Jour. Geophys. Res.*, **73**, p. 635—648, 1968; *Wetherill G. W.*, Solar System sources of meteorites and large meteoroids, *Ann. Rev. Earth and Planetary Sci.*, **2**, p. 303—331, 1974.
17. *Alfvén H., Arrhenius G.*, Structure and evolutionary history of the Solar System, I, *Astrophys. Space Sci.*, **8**, p. 338—421, 1970.
18. *Dunlop L. J., Gehrels T.*, Minor planets III, Light curves of a Trojan asteroid, *Astron. Jour.*, **74**, p. 796—803, 1969.
19. *Rabe E.*, The Trojans as escaped satellites of Jupiter, *Astron. Jour.*, **59**, p. 433—439, 1954.
20. *Baade W.*, On the number of asteroids brighter than absolute magnitude 19,0, *Publ. Astron. Soc. Pacific.*, **46**, p. 54—56, 1934.
21. *Hirayama K.*, *Proc. Phys. Math. Soc. Japan*, ser. 2, **9**, p. 354, 1918; ser. 3, **1**, p. 52, 1919; *Japan. Jour. Astron. and Geophys.*, **1**, p. 55, 1923; **5**, p. 137, 1928; *Proc. Imp. Acad. Japan*, **9**, p. 482.
22. *Brouwer D.*, Secular variations of the orbital elements of minor planets, *Astron. Jour.*, **56**, p. 9—32, 1951.
23. *Arnold J. R.*, Asteroid families and «jet streams», *Astron. Jour.*, **74**, p. 1235—1242, 1969.
24. *Alfvén H.*, Asteroidal jet streams, *Astrophys. Space Sci.*, **4**, p. 84—102, 1969; кроме того, *Alfvén H.*, Jet streams in space, *Astrophys. Space Sci.*, **6**, p. 161—174, 1970.
25. *Lindblad B. A.*, Meteor and asteroid streams, in *Proc. Nobel Symp. 21, from Plasma to Planet*, Alna Elvius, ed., Wiley Interscience, Almqvist and Wiksell, Stockholm, 389 p., 1972.
26. *Cuffey J.*, Pallas, Vesta and Ceres, Photoelectric photometry, *Astron. Jour.*, **58**, p. 212, 1953.
27. *Gehrels T.*, Photometric studies of asteroids, 5, The light curve and phase function of 20 Massalia, *Astrophys. Jour.*, **123**, p. 331—338, 1956.
28. *Dollfus A.*, Diameter measurements of asteroids, in *Physical Studies of the Minor Planets*, *Gehrels T.*, ed., NASA, Spec. Pub., SP-267, p. 25—31, 1971.
29. *Kuiper G. P.*, On the origin of asteroids, *Astron. Jour.*, **55**, p. 164, 1950.
30. *McCord T. B., Adams J. B., Johnson T. V.*, Asteroid Vesta, Spectral reflectivity and compositional implications, *Science*, **168**, p. 1445—1447, 1970. См. также *Chapman C., Johnson T. V., McCord T. B.*, Review of spectrophotometric studies of asteroids, in *Physical Studies of the Minor Planets*, *Gehrels T.* ed., NASA, Spec. Pub., SP-267, p. 51—65, 1971; *Chapman C. R., McCord T. B., Johnson T. V.*, Asteroidal spectral reflectivities, *Astron. Jour.*, **78**, p. 126—140, 1973.
31. *Chapman C. R., McCord T. B., Pieters C.*, Minor planets and related objects, X, Spectrophotometric study of the composition of (1685) Toro, *Astron. Jour.*, **78**, p. 502—505, 1973.
32. *McCord T. B., Chapman C. R.*, Asteroids: Spectral reflectance and color characteristics, *Astrophys. Jour.*, **195**, No. 2, p. 553—562, 1975.

РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА ПО ОБЩИМ ВОПРОСАМ

33. Physical studies of the minor planets, *Gehrels T.*, ed., NASA, Special Publication, SP-267, 687 p., 1971.
34. The system of Minor Planets, *Roth G. D.*, D. Van Nostrand, New York, 128 p., 1962.
35. *Chapman C. R.*, *Morrison D.*, *Zellner B.*, Surface properties of Asteroids, A synthesis of polarimetry, radiometry and spectrophotometry, *Icarus*, 25, p. 104—130, 1975.

Космические полеты к кометам и астероидам будут следующим важным шагом в выяснении проблемы возникновения Солнечной системы.

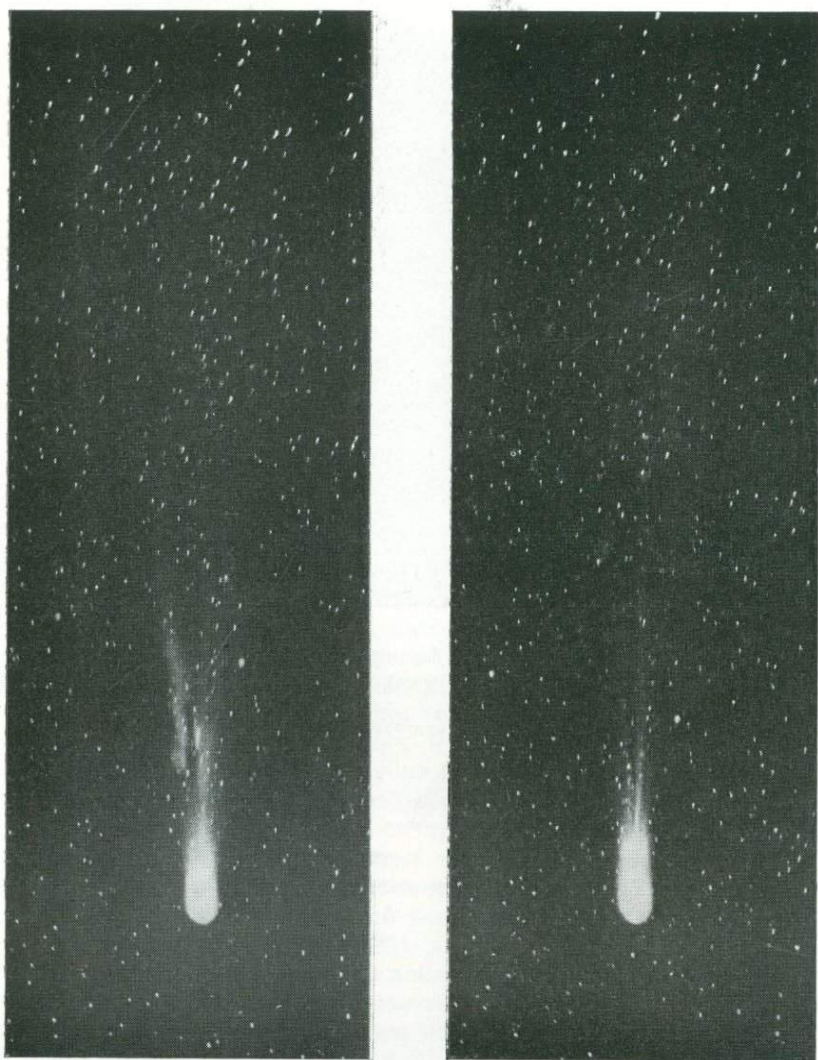
Ф. Уилл, 1974 г.

9. Кометы

ВВЕДЕНИЕ. ИСТОРИЯ

Изучение длинной истории наблюдения комет возвращает нас к вполне информативным записям древнекитайских астрономов, которые тщательно отмечали передвижение комет среди звезд. Замечания о наблюдениях комет в старых европейских хрониках менее упорядочены, но известно, что в древности кометы привлекали огромное внимание, так как появление комет воспринималось как предвестник великих бедствий и потрясений¹. Аристотель считал, что кометы — это явления, которые происходят в верхней части атмосферы, и этот ошибочный взгляд был исправлен только в 1577 г. Тихо Браге, который установил, что кометы должны быть небесными телами, находящимися от нас на расстояниях, по меньшей мере в три раза превышающих расстояние до Луны. Этот вывод следовал из его наблюдений, показавших отсутствие у комет заметного дневного параллакса [2]. Тихо Браге также предполагал, что кометы обращаются вокруг Солнца. Кеплер в 1607 г. со всеми подробностями описал прохождение кометы Галлея, но он счи-

¹ Считалось, что кометы предвещают появление чумы и иных бедствий, а по многочисленным старинным записям можно судить, что существовала вера, будто бы появление комет влияет на государственные события и даже на судьбы народов. На ковре из Байи изображена комета Галлея, появившаяся в 1066 г. в канун битвы при Гастингсе. Другим примером является мнение, что комета 1456 г. предвещала падение Константинополя, хотя в действительности город был взят турками в 1453 г.! [1].



Фиг. 1. Комета Галлея, вид 6 июня (*слева*) и 7 июня (*справа*) 1910 г.

Отчетливо видны быстрые изменения в структуре хвоста. Предоставлено Ликской обсерваторией.



Фиг. 2. Комета Когоутека по фотографии 28 ноября 1973 г., сделанной с помощью 46-сантиметровой камеры Шмидта в обсерватории Маунт-Паломар.

Предоставлено Хэйлской обсерваторией.

тал, что кометы проходят через Солнечную систему по прямым траекториям.

Самой известной из всех комет является комета Галлея (фиг. 1). Первые записи о появлении этой кометы относятся к 467 г. до н. э. Эдмунд Галлей был первым астрономом, который осознал, что кометы 1531, 1607 и 1682 гг. — это одна и та же комета, и успешно предсказал следующее появление кометы в 1758 г., через 16 лет после его смерти. Было установлено, что в китайских хрониках имеются регулярные записи о появлении этой кометы на протяжении 12 столетий [1]. Главный вывод, полученный на основе исследования кометы Галлея, — это заключение, что кометы движутся в Солнечной системе по эллиптическим орбитам с очень большими эксцентриситетами.

В 1973 и 1974 гг. была открыта комета Когоутека, которая привлекла широкое общественное внимание (фиг. 2). Но она оказалась далеко не такой эффектной, как ожидали, потому что ее трудно было увидеть невооруженным глазом. Эта комета

была открыта и прослеживалась задолго до прохождения ею перигелия орбиты, и поэтому, когда она приблизилась к Земле, она стала объектом многочисленных научных наблюдений и измерений.

ОРБИТЫ

Чаще всего кометы имеют эллиптические орбиты с очень большим эксцентриситетом. У многих кометных орбит эксцентриситеты столь велики, что периоды обращения комет весьма продолжительны и достигают тысяч и миллионов лет, а афелии орбит могут находиться на расстояниях более 10^5 а. е. [3]. Это так называемые «долгопериодические» кометы, составляющие самое многочисленное семейство комет. Кроме того, есть и «короткопериодические» кометы, среди которых есть и движущиеся по своим орбитам с малыми периодами меньше десяти лет и большими периодами, достигающими 150 лет. Возникновение таких короткопериодических комет связано с воздействием Юпитера, изменяющего орбиты долгопериодических комет [4]. Наблюдалось более 65 комет с гиперболическими орбитами, однако, по-видимому, это все же кометы, у которых первоначально орбиты были эллиптическими, а гиперболическими они стали за счет возмущающего влияния планет [3]. Кометы, движущиеся по гиперболическим орбитам, имеют соответственно скорость, достаточную для того, чтобы покинуть Солнечную систему. Существуют также и многочисленные «ежегодные» кометы, эксцентриситеты орбит которых очень малы. Некоторые из этих объектов, такие, как P/Швассман — Вахмана и P/Отерма¹, имеют орбиты, аналогичные орбитам некоторых астероидов. Марсден [5] исследовал соотношения между орбитами комет и астероидов и пришел к выводу, что между ними есть определенные сходства. В самом деле, пока не наблюдалось вторичное появление комет P/Аренда — Риго и P/Неуьмина 1, они классифицировались как астероиды. При первом появлении этих комет лишь некоторые наблюдатели отмечали слабые признаки комы. Марсден предположил, что если кометы избегают столкновения с Юпитером, то они могут просуществовать до самого конца своей жизни в качестве комет. Некоторые асте-

¹ Кометы с эллиптическими орбитами и периодами обращения меньше 200 лет называются короткопериодическими и обозначаются буквой P перед названием кометы [в отечественной литературе такое обозначение не применяется. — *Перев.*]. Кометы обычно называются по имени первооткрывателя; известным исключением является наименование кометы Галлея.

роиды группы Аполлон, возможно, представляют собой остатки таких комет. Наклонения орбит комет могут иметь разные величины и у многих из них достигать больших значений, что резко отличает их от планетных орбит [3].

СОСТАВ

Состав комет известен не очень хорошо. Имеются многочисленные спектральные исследования газовой составляющей комет, показывающие как полосы излучения (молекулярные спектры), так и немногочисленные отдельные линии атомных спектров. Среди обнаруженных соединений есть нейтральные молекулы, такие, как CN, HCN, CH_3CN , $\text{C}_2\text{H}_6\text{OH}$, C_2 , C_3 , NH, OH, NH_2 , CH, Na, O_1 , Fe и Ni, характерные для голов комет, и ионизированные молекулы CO^+ , N_2^+ , CO_2^+ , H_2O^+ и CH^+ , встречающиеся в кометных хвостах [6]. Считается, что эти соединения выделяются из замерзших летучих веществ ядра комет. Кометы содержат также значительные количества пыли и более крупных твердых обломков вещества. Эти твердые тела никогда непосредственно не наблюдались и не анализировались, но предполагается, что они состоят в основном из силикатов. Большое количество пылевидных твердых частиц следует за кометой при ее прохождении через внутренние части Солнечной системы, и ими вызвано появление ежегодных метеорных дождей. Например, комета P/Темцеля — Туттля 1866 I почти наверняка является источником метеорного потока Леонид [3]. До сих пор не удалось показать, что какой-либо из метеоритов представляет собой один из крупных обломков твердого вещества комет. Однако некоторые исследователи подозревают, что углистые хондриты, богатые летучими составляющими, могут иметь кометное происхождение. Уэтерилл [7] изучал связь орбит ярких болидов и хондритных метеоритов с орбитами короткопериодических комет и астероидов группы Аполлон. Наибольший интерес для геологии представляет изучение твердого вещества в составе комет.

СТРУКТУРА, РАЗМЕРЫ, ПРОИСХОЖДЕНИЕ

При прохождении внутренней части Солнечной системы кометы, как правило, имеют развитые головы и хвосты. Голову кометы иногда можно подразделить на отчетливое твердое ядро



Фиг. 3. Комета Аренда — Роланда, вид 25 апреля 1957 г.

Виден «шип», выступающий перед головой кометы, который, по-видимому, является тонкой струей концентрированных частиц, имеющих гравитационное ускорение к Солнцу. Сила ускорения превышает силу светового давления Солнца, отталкивающего частицы, отсюда следует, что эти частицы больше по размерам, чем частицы, входящие в состав хвоста. Предоставлено Ликской обсерваторией.

311

II

311

и кому — газовое облако, окружающее ядро. Многие кометы представляют собой весьма неотчетливые объекты и характеризуются только маленькой, слабо развитой комой и полным отсутствием хвоста [8]. Иногда у комет наблюдается острие или «шип» из вещества, которое находится впереди головы при движении кометы по орбите (фиг. 3). Некоторые кометы — это гигантские объекты, комы которых могут достигать в диаметре 10^5 км, а хвосты простираются на расстояния до 10^8 км. Но большинство комет по размерам гораздо меньше. Секанина [9] оценил, что средняя потеря массы при прохождении перигелия для 23 короткопериодических комет составляет от 10^{12} до 10^{14} г и ядра этих комет в среднем содержат массу около 10^{17} — 10^{18} г. Приходящаяся на все кометы доля массы Солнечной системы неизвестна. Камерон считает, что на малые частицы на внешней границе Солнечной системы может приходиться значительная часть ее массы.

Возможно, что большая часть такого вещества аккрецируется долгопериодическими кометами из Облака Оорта¹. Оро [11] показал, что газовый состав многих планет сходен с составом межзвездных газовых облаков и этот межзвездный материал может содержаться в кометах.

Совершенно ясно, что кометы проводят большую часть своей жизни далеко за орбитами внешних планет Солнечной системы и вне досягаемости наземных телескопов. В настоящее время хорошо известны орбитальные элементы многих кометных орбит и хорошо обоснована идея происхождения короткопериодических комет из долгопериодических. Но остается неясным вопрос о происхождении долгопериодических комет. Они могут представлять собой материал первичных конденсатов из внешних областей Солнечной системы. Прямые эксперименты и анализ кометного вещества приведут к определенному прогрессу в решении кометных проблем.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Brandt J. C., Maran S. P.*, New Horizons in Astronomy, W. H. Freeman, San Francisco, 496 p., 1972.
2. *Abell G.*, Exploration of the Universe, Holt, Rinehart and Winston, New York, 722 p., 1969.
3. *Porter J. G.*, The statistics of comet orbits, in The Solar System IV,

¹ Термином «Облако Оорта» или «Облако Эпика — Оорта» обозначается «рой» кометных тел, который окружает Солнечную систему. Большая часть этого облака простирается примерно на 50 000 а. е. Предположение о существовании такого образования было высказано голландским астрономом Я. Оортом [4].

The Moon, Meteorites and Comets, *Middlehurst B. M., Kuiper G. P.*, eds., Univ. of Chicago Press, Chicago, p. 550—572, 1963.

4. *Oort J. H.*, The structure of the cloud of comets surrounding the Solar System, and a hypothesis concerning its origin, *B. A. N.*, **11**, p. 91, 1950. См. также *Whipple F. L.*, Evidence for a comet belt beyond Neptune, *Proc. National Acad. Sci.*, **51**, No. 5, p. 711—718, 1964.
5. *Marsden B. G.*, On the relationship between comets and minor planets, *Astronomical Jour.*, **75**, No. 2, p. 206—217, 1970.
6. *Wurm K.*, The physics of comets, in *The Solar System IV. The Moon, Meteorites and Comets*, *Middlehurst B. M., Kuiper G. P.*, eds., Univ. of Chicago Press, Chicago, p. 573—617, 1963. См. также *Whipple F. L.*, Comets: Data, problems and objectives, in *Proc. Soviet-American Conf. Cosmochem. Moon and Planets*, Moscow, June 4—8, 1974, 1975.
7. *Wetherill G. W.*, Stone meteorites: Time of fall and origin, *Science*, **159**, p. 79—82, 1968; кроме того, Origin of Prairie Network fireballs and meteorites, *Trans. Am. Geophys. Union*, **50**, p. 224, abstract, 1969.
8. *Roemer E.*, Comets: Discovery, Orbits, Astrometric Observations, in *The Solar System IV; The Moon, Meteorites and Comets*, *Middlehurst B. M., Kuiper G. P.*, eds., Univ. Chicago Press, Chicago, p. 527—549, 1963.
9. *Sekanina Z.*, Total gas concentration in atmospheres of the short-period comets and impulsive forces upon their nuclei, *Astron. Jour.*, **74**, No. 7, p. 944—950, 1969.
10. *Cameron A. G. W.*, The formation of the Sun and planets, *Icarus*, **1**, p. 13—69, 1962.
11. *Oro J.*, Extraterrestrial Organic analyses, *Space Life Sci.*, **3**, p. 507—550, 1972.

РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА ПО ОБЩИМ ВОПРОСАМ

12. *Marsden B. G.*, Comets, in *Annual Review of astronomy and Astrophysics*, *Burbidge G. R.*, ed., Annual Review Inc., Palo Alto, Calif., p. 1—21, 1974. В этой статье содержится библиография современных работ, посвященных практически всем аспектам исследования комет.

Пройдут столетия, современные социальные и политические проблемы будут казаться нашим потомкам столь же далекими, как для нас проблемы Тридцатилетней войны, однако наш век будут вспоминать хотя бы по одному факту: это было время, когда земляне впервые вышли в дальний космос, в котором затеряна их маленькая планета.

К. Саган, 1975 г.

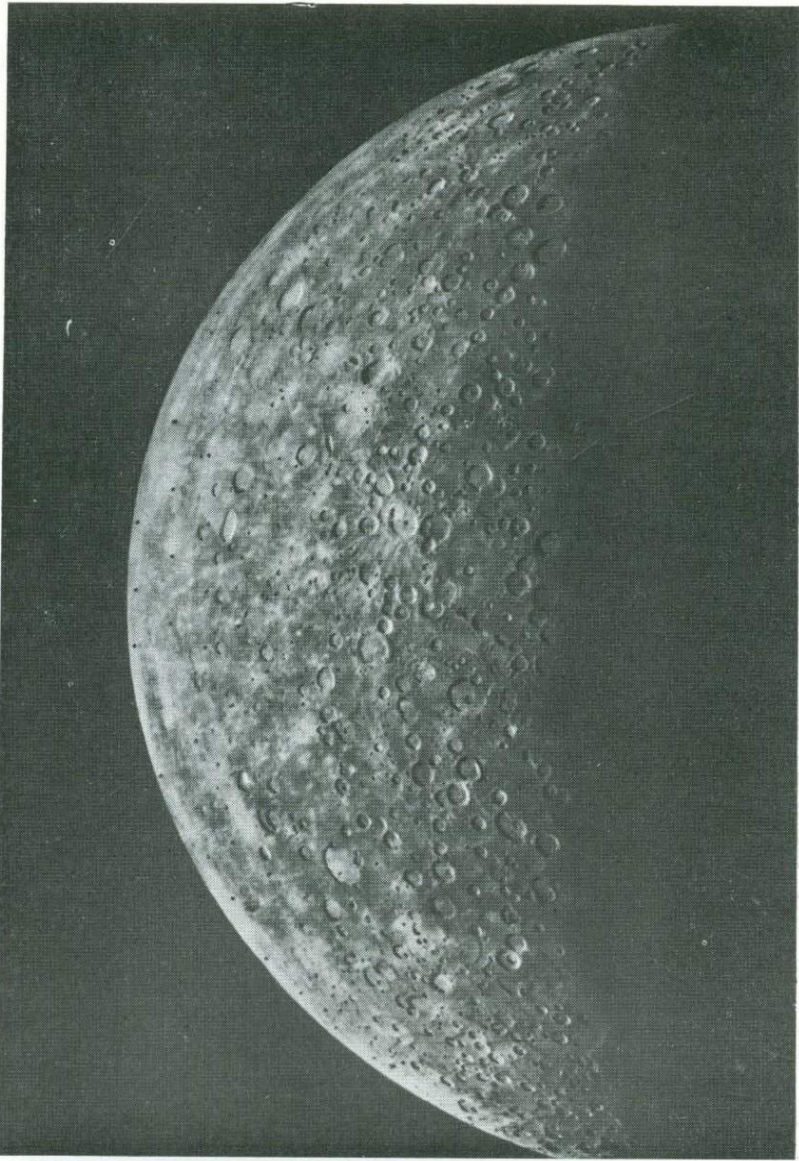
10. Другие планеты и их спутники

ВВЕДЕНИЕ

Остальные, до сих пор не рассмотренные объекты Солнечной системы либо настолько удалены от нас, что о них известны лишь самые общие сведения, либо представляют значительно меньший геологический интерес. Мы не будем пытаться суммировать астрономическую литературу, за исключением той, которая представляет геологический интерес, и геологическое изучение этих объектов только начинается.

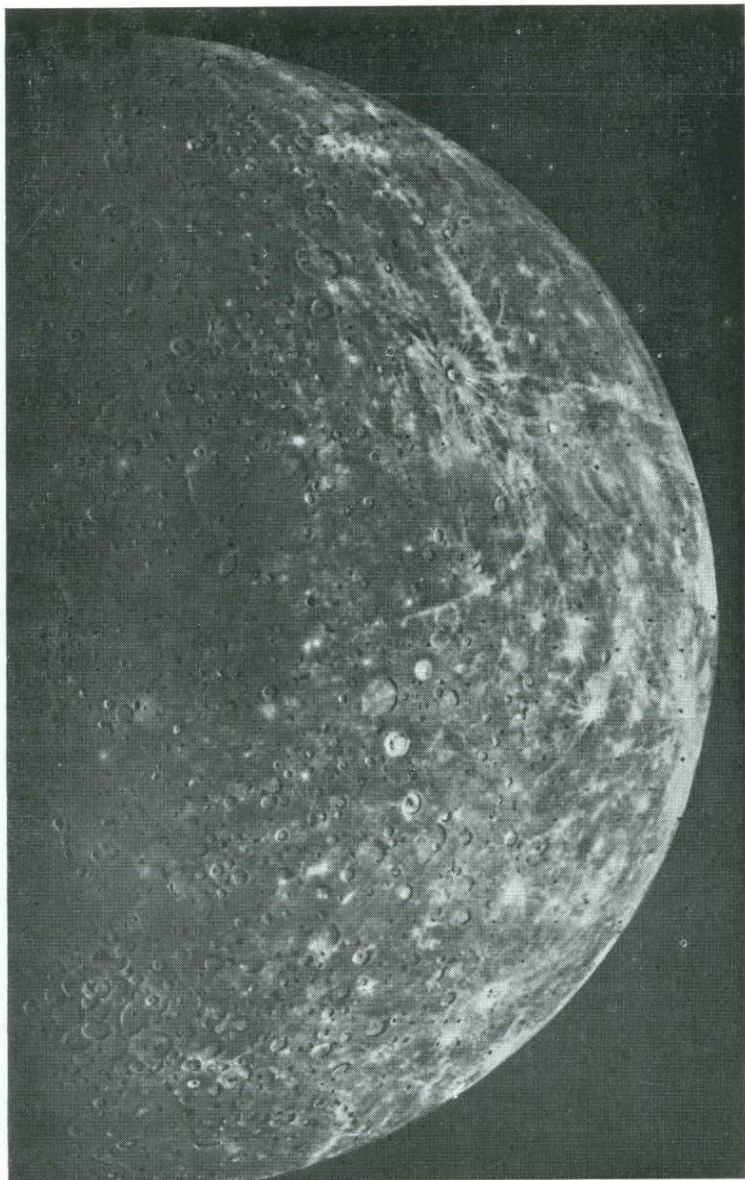
МЕРКУРИЙ

Наши знания о строении поверхности этой ближайшей к Солнцу планеты резко возросли после исключительно успешного полета космического корабля «Маринер-10», который трижды пролетал на близком расстоянии от Меркурия. Было получено более 2000 снимков, которые дают представление



Фиг. 1. Мозаичное фотозображение области Меркурия в примерном диапазоне долгот от 20° з. д. (терминатор) до 110° з. д. (яркий лимб); север вверху.

Четко выделяются кратеры с яркими лучевыми системами; некоторые кратеры в пределах этой сильно кратерированной местности имеют диаметр около 200 км. Кроме того, наблюдаются протяженные линейные структуры. Изображения переданы космическим аппаратом «Маринер-10» примерно за 6 часов до максимального приближения к планете с расстояния около 234 000 км. Предоставлено НАСА, Лабораторией реактивного движения.



Фиг. 2. Мозаичное фотоизображение области Меркурия в примерном диапазоне долгот от 110° з. д. (яркий лимб) до 200° з. д. (терминатор); север вверху.

Эта часть планеты имеет сильно кратерированную поверхность; есть и слабо кратерированные области. Вблизи терминатора в центре левой части снимка находится участок крупного многокольцевого бассейна. Эти изображения переданы космическим аппаратом «Маринер-10» примерно через 5,5 часов после максимального приближения к планете с расстояния около 210 000 км. Предоставлено НАСА, Лабораторией реактивного движения.

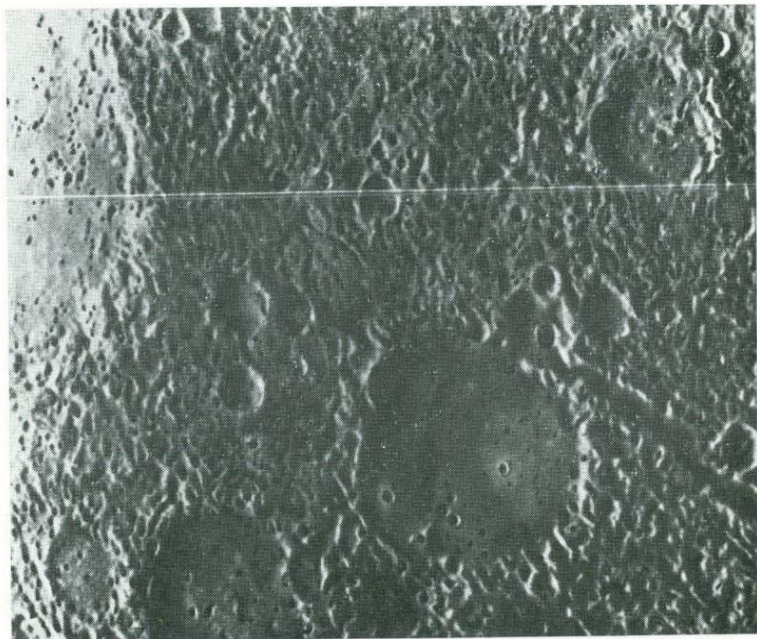


Фиг. 3. Изображение северного лимба Меркурия, на котором виден обращенный на восток уступ северного лимба, протягивающийся на сотни километров.

В левой части изображения на лимбе заметен разрыв, обусловленный отсутствием данных. Линейная протяженность поверхности в нижней части снимка составляет около 580 км. Предоставлено НАСА, Лабораторией реактивного движения.

о значительной части поверхности планеты. Некоторые из снимков выполнены с разрешением менее 1 км, а многие полезны для геологического описания и интерпретации свойств поверхности (фиг. 1—6) [1].

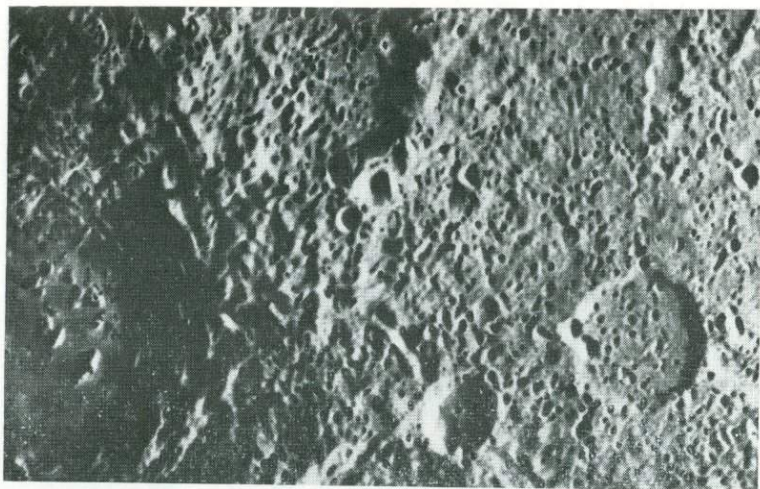
Меркурий — это небольшая планета, его средний диаметр составляет 4878 км, атмосфера практически отсутствует, если не считать небольшого количества гелия, обнаруженного в ходе УФ-измерений на «Маринере-10», общее атмосферное давление составляет менее $2 \cdot 10^{-9}$ мбар. Средняя плотность планеты равна $5,45 \text{ г/см}^3$, что указывает на более высокое отношение железа к силикатам по сравнению с Луной и Землей [2]. Период вращения Меркурия 58,66 дня, что близко согласуется с величиной отношения между его периодами вращения вокруг своей оси и обращения вокруг Солнца, равной $3/2$ [3]. Общее впечатление от снимков Меркурия, выполненных «Маринером-10», такое, будто его поверхность покрыта крупными ударными



Фиг. 4. Изображение участка поверхности Меркурия размером 290×220 км, полученное с близкого расстояния.

Видны многочисленные древние кратеры и низкие холмы. Долина справа имеет ширину 7 км и длину более 100 км. Крупный плоскодонный кратер в центральной части снимка имеет диаметр примерно 80 км. Предоставлено НАСА, Лабораторией реактивного движения.

кратерами; это заставляет проводить близкие аналогии с Луной. Однако при детальном рассмотрении обнаруживаются и существенные различия. Хотя на поверхности Меркурия наблюдается по меньшей мере один крупный многокольцевой бассейн (рис. 2), дихотомический план строения лунной поверхности (моря — материки) для Меркурия, вероятно, не характерен. Заметные вариации альбеда, столь часто встречаемые на поверхности Луны, на Меркурии проявлены в значительно меньшей степени. Широко распространены ударные кратеры с лучевыми системами (фиг. 1, 2), кроме того, легко выявляется последовательный ряд кратеров, от очень молодых до сравнительно древних, сильно преобразованных структур. Вокруг свежих ударных кратеров наблюдаются признаки стирания более древних форм рельефа, однако зона таких изменений в шесть раз уже, чем вокруг аналогичных лунных кратеров, а поля вторичных кратеров на Меркурии ближе к первичному кратеру



Фиг. 5. Сильно кратерированная поверхность Меркурия, аналогичная участкам лунных материков.

Плоскодонный кратер в правой части снимка имеет внутренние горки, а многие мелкие кратеры в центральной части снимка, по-видимому, являются вторичными по отношению к этому кратеру. Неровная поверхность вокруг крупного кратера, вероятно, сложена кратерными выбросами. Предоставлено НАСА, Лабораторией реактивного движения.

[4]. Эти наблюдения согласуются с большей величиной гравитации на Меркурии по сравнению с Луной, однако существенную роль могут играть и другие факторы. Средняя плотность и диаметр Меркурия таковы, что можно грубо считать размер металлического ядра планеты равным $\frac{3}{4}$ ее диаметра, конечно, в случае, если она дифференцирована. При этом мощность литосферы не может превышать примерно 600 км. Столь мало мощная литосфера в соответствии с другими возможными вариациями ее состава и физического состояния будет реагировать на ударные процессы по-иному, чем более мощные литосферы Земли, Луны и Марса. [В данном случае под литосферой понимается вся «каменная оболочка», одевающая металлическое ядро.— *Ред.*] Тектоника Меркурия также в значительной мере должна зависеть от таких факторов, как размеры ядра планеты и высокое относительное содержание железа. Грандиозные уступы (фиг. 3) на поверхности Меркурия также можно связывать с большими размерами меркурианского ядра, однако объяснение их происхождения пока представляет собой нерешенную проблему.

Спектры отражения (фиг. 7, 8), полученные Мак-Кордом и Адамсом [5], показали, что поверхность Меркурия покрыта

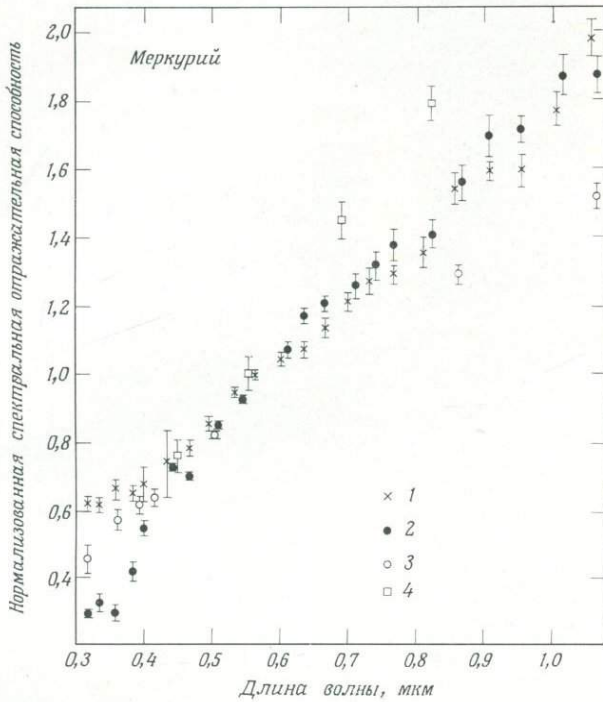


Фиг. 6. Изображение высокого разрешения участка Меркурия с сильно кратерированной поверхностью.

Дно кратера диаметром 61 км (слева внизу) пересекается фронтом лавового потока. Сравнительно свежий кратер (в центре) имеет диаметр примерно 25 км. Различаются и кратеры с диаметром не менее 1 км. Черная линия соответствует немногочисленным помехам при передаче информации. Предоставлено НАСА, Лабораторией реактивного движения.

реголитом, строение которого весьма напоминает лунный. Эти авторы пришли к заключению об определяющей роли темного стекла и материала, обогащенного железом и титаном, в оптической характеристике поверхности. Если опираться только на факт существования многочисленных кратеров на поверхности Меркурия, то можно ожидать, что структура вещества отдельных участков поверхности будет напоминать как некоторые обломочные лунные породы, так и несвязный реголитовый материал.

Исследования поверхности Меркурия с помощью космических средств с аналитической аппаратурой на борту или при использовании систем доставки образцов на Землю вполне осуществимы на современном этапе развития техники. Будущие космические программы, несомненно, дадут более полную информацию об этой планете земной группы, интересной в геологическом отношении.

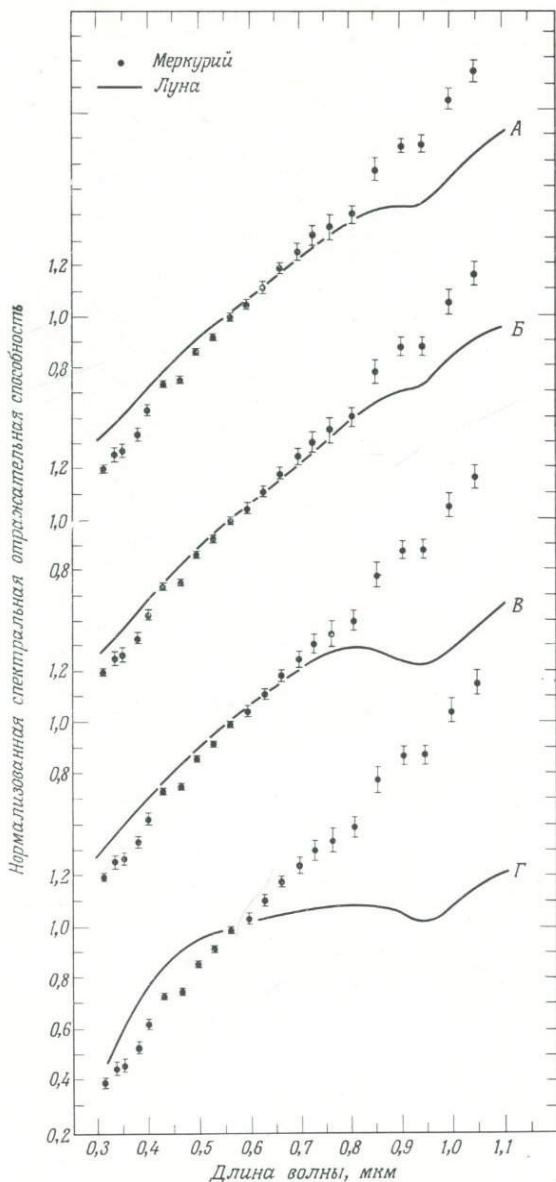


Фиг. 7. Спектральная отражательная способность диска Меркурия.

В каждой из двух серий наблюдений за единицу принята отражательная способность при длине волны 0,564 мкм. Показаны также результаты более ранних измерений. Длины волн, отвечающие каждой паре точек из обеих новых серий наблюдений, одинаковы, но для того, чтобы показать диапазон ошибок измерений, точки одной из серий произвольно смещены. Авторские права 1972 г. Американской ассоциации развития науки. 1, 2 — Мак-Корд, 25 декабря 1969 г. и 12 марта 1972 г. соответственно; 3 — Ирвин и др.; 4 — Харрис.

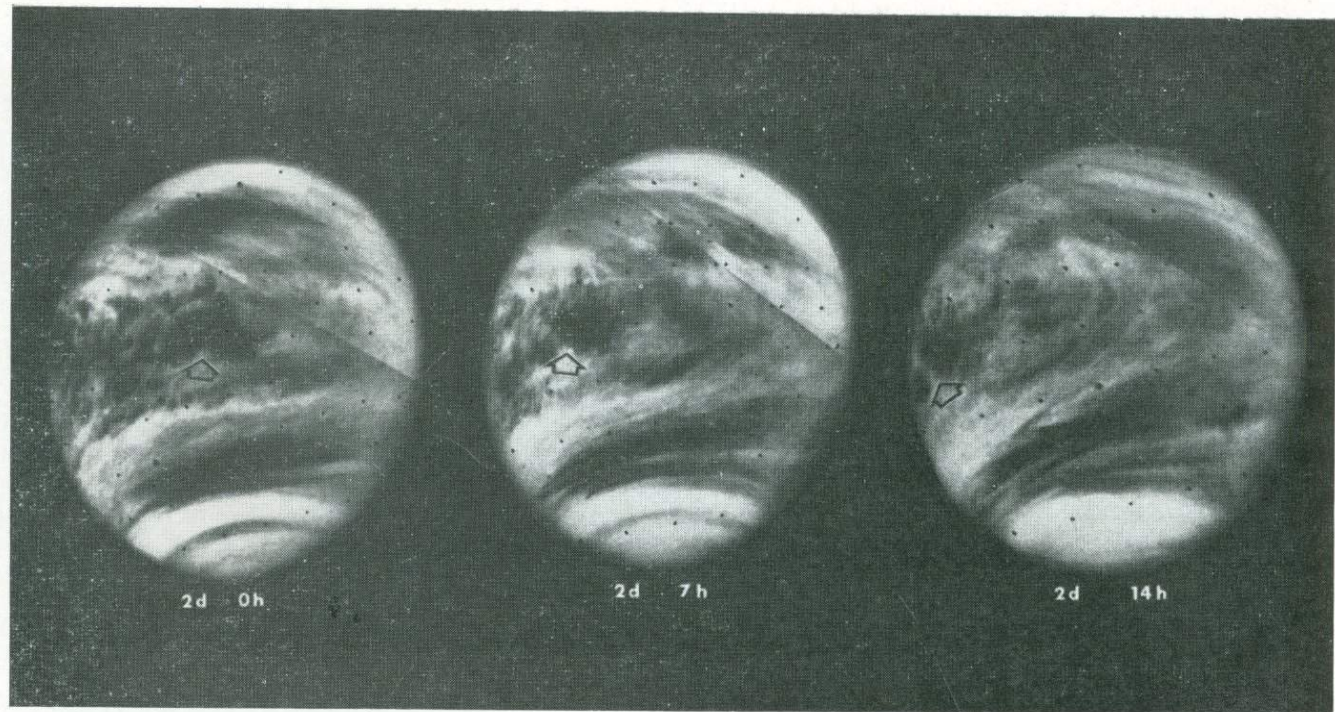
ВЕНЕРА

Самые лучшие снимки Венеры, выполненные со значительного расстояния, также сделаны с помощью космического аппарата «Маринер-10» (фиг. 9) [6], а фотографии поверхности и сведения о составе атмосферы получены советскими автоматическими станциями, осуществившими зондирование атмосферы и мягкую посадку на венерианскую поверхность. Теперь известно, что Венера имеет атмосферу, по плотности превышающую земную примерно в 90 раз и состоящую преимущественно



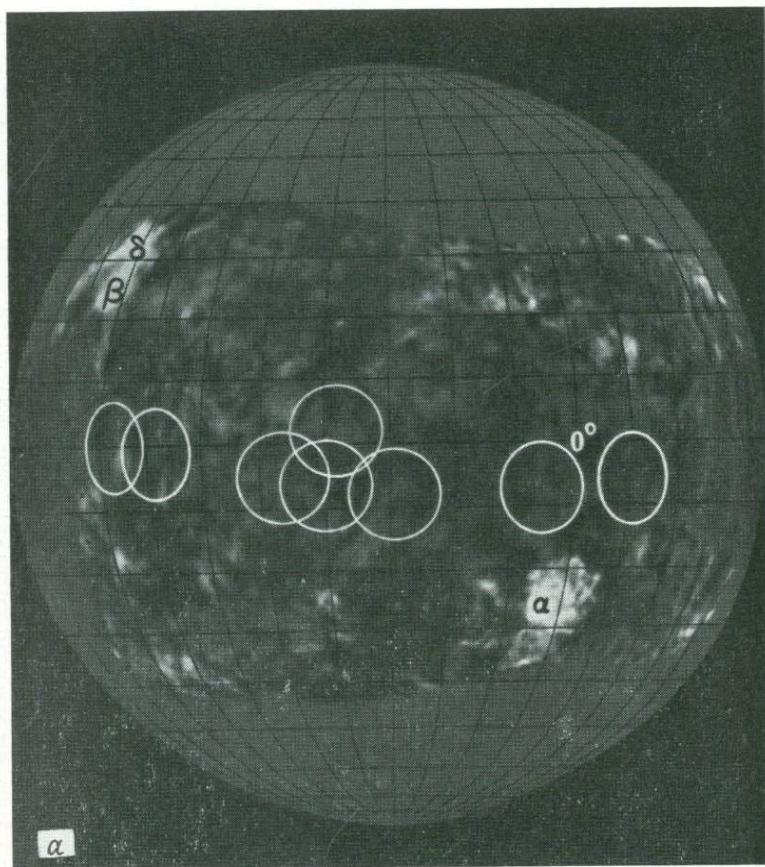
Фиг. 8. Сравнение интегральной величины спектрального альbedo диска Меркурия с данными по четырем различным типам лунной поверхности.

Типы лунной поверхности: А — материковые кратеры; В — яркие материковые кратеры; С — темные морские кратеры; D — яркие морские кратеры. Заимствовано из работы [4]. Авторские права 1972 г. Американской ассоциации развития науки.



Фиг. 9. Серия мозаичных изображений Венеры, переданная «Маринером-10» через двое суток после максимального приближения к планете.

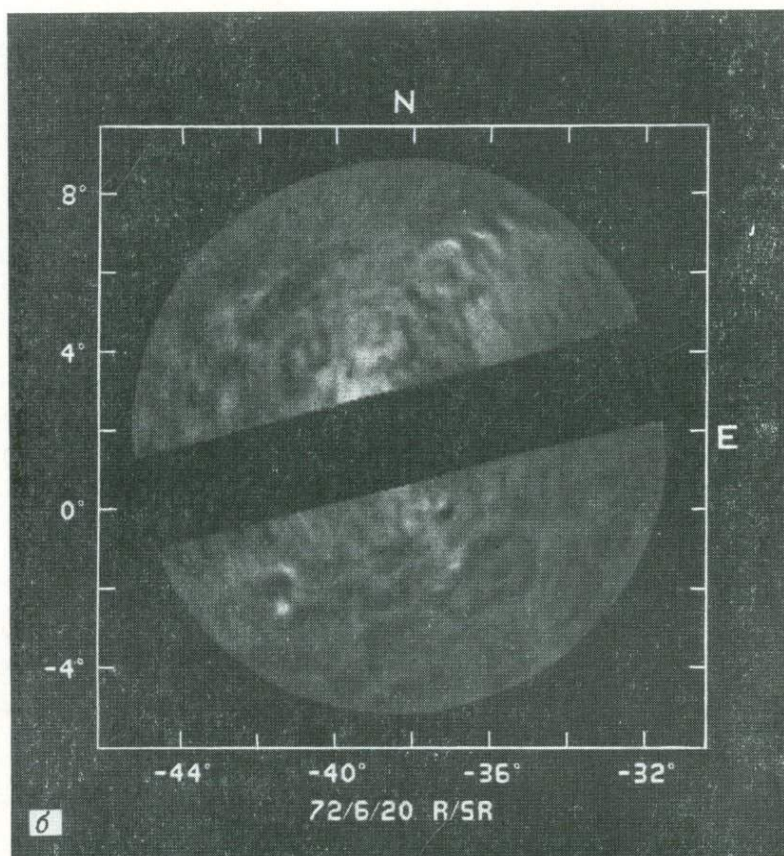
Изображения передавались с интервалом 7 часов. Использованы ультрафиолетовые фильтры, видно быстрое вращение мощного облачного покрова Венеры. Объект, показанный стрелкой, имеет диаметр примерно 1000 км. Предоставлено НАСА, Лабораторией реактивного движения.



Фиг. 10а. Яркое радарное изображение значительной части поверхности планеты Венера.

Координатная сетка нанесена с интервалом 10° как по широте, так и по долготе. Белыми кружками показаны районы, для которых имеются радиояркие снимки с более высоким разрешением, например снимок на фиг. 10б.

из углекислого газа, а температура поверхности достигает примерно 450°C . В атмосфере содержится облачный слой, имеющий значительную оптическую толщину, поэтому атмосфера прозрачна лишь для относительно длинных волн. Радиолокационные изображения поверхности планеты показали, что на ней присутствуют крупные кратеры (фиг. 10) [7]. Согласно данным, полученным советскими автоматическими станциями, измерения природной гамма-активности Венеры показали, что отноше-



Фиг. 106. Кратеры представляют собой доминирующий элемент топографии поверхности планеты Венера.

Крупнейший из наблюдающихся кратеров имеет диаметр примерно 160 км, а минимальный различимый кратер при данном разрешении должен иметь диаметр не менее 35 км. По Рамсею и др. [7]; предоставлено издательством «Академик Пресс».

ние U/Th должно быть аналогично земному. Средняя плотность планеты составляет $5,16 \text{ г/см}^3$.

Высокая температура поверхности и крайне плотная атмосфера Венеры не позволяют надеяться на успех попытки доставить образцы с Венеры в пределах следующего десятилетия; однако на панорамах, полученных «Венерой-9», видно, что поверхность района посадки покрыта многочисленными угловатыми и округлыми глыбами горных пород. Мы надеемся, что в будущем новая информация поступит при осуществлении

посадок спускаемых аппаратов, проведении усовершенствованной радарной съемки, в том числе с помощью искусственных спутников Венеры и при новых зондированиях атмосферы.

ЮПИТЕР

Исследование Юпитера и его спутников составляло цель нескольких последних полетов космических аппаратов. Великолепные изображения планеты-гиганта были получены с помо-



Фиг. 11. Переданное «Пионером-10» изображение Юпитера.

Видны сложные облачные структуры и тень спутника Ио, а близ терминатора слабо видно Большое красное пятно. Изображение получено с расстояния $2,5 \cdot 10^6$ км. Предоставлено центром Эймса, НАСА.



Фиг. 12. Переданное «Пионером-10» изображение Юпитера.

Видны Большое красное пятно и широтно ориентированные слоистые структуры облаков. Предоставлено исследовательским центром Эймса, НАСА.

щью автоматической межпланетной станции «Пионер-10» (фиг. 11 и 12)[8]. Эта колоссальная планета легко наблюдается с Земли и даже с помощью относительно небольших телескопов на ее поверхности можно разглядеть детали облачных полос и Большое красное пятно. Но изображения, полученные «Пионером-10», принесли существенно новую научную информацию. Юпитер обладает огромной массой, примерно $1,9 \cdot 10^{30}$ г, и поэтому осуществление «мягкой посадки» космического корабля на его «поверхности», а точнее в его атмосфере, представляет собой титаническую задачу, требующую для своего выполнения необычайных ракетных мощностей. Планеты группы Юпитера, или внешние планеты, отличны по своим характеристикам от планет земной группы, или внутренних планет. Внешние

планеты содержат большие количества летучих элементов, таких, как водород и гелий. По сравнению с планетами земной группы эти планеты намного больше (исключением является только Плутон), плотность их гораздо меньше, и у планет-гигантов гораздо больше спутников.

Внешние планеты не представляют первостепенного интереса с геологической точки зрения, но необыкновенно интересными могут быть некоторые спутники, которые, хотя бы частично, по-видимому, состоят из силикатов и рудных минералов. У Юпитера, как минимум, есть 14 спутников. Четыре внутренних спутника¹ — Ио, Европа, Ганимед и Каллисто — были открыты Галилеем и получили название «галилеевых» спутников. Размеры диаметров этих объектов лежат в пределах² от 2920 до 5100 км. Спектральные исследования этих спутников, проведенные Пилчером [9], привели к заключению о существовании замерзшей воды на Европе и Ганимеде, а также о возможном существовании замерзшей воды на Ио и Каллисто. В дальнейшем Пилчер и др. установили, что спектральная отражательная способность материала, находящегося под слоем замерзшей воды на Европе, Ганимеде и Каллисто, позволяет сделать вывод, что это силикаты. Еще в одном современном исследовании [10] было обнаружено наличие светящегося облака из паров натрия вокруг Ио. Кроме того, данные, полученные с «Пионера-10», говорят о существовании водородного³ облака, расположенного вдоль орбиты Ио [11]. В течение многих лет наблюдались изменчивые детали на поверхности Ио, были получены предварительные данные о свойствах поверхности спутника [12] и сделаны некоторые выводы. Имеется в распоряжении и другая, небольшая по объему геологическая информация о галилеевых спутниках⁴.

Происхождение внутренних спутников Юпитера остается неясным. Надо иметь в виду, что эти спутники относительно велики, близко расположены к планете и движутся по круговым орбитам, расположенным в плоскости экватора Юпитера. Кёйпер [13] выдвинул гипотезу, что внешние спутники

¹ Имеется еще один внутренний спутник Юпитера — JV Амальтея, расположенный ближе всего к планете, но открытый гораздо позже галилеевых спутников.

² По современным данным это величины от 3030 до 5270 км. — *Прим. перев.*

³ Наземными наблюдениями установлено, что Ио сопровождается светящимся шлейфом, спектральные характеристики которого соответствуют натрию (линии испускания 5890 и 5896 Å). — *Прим. ред.*

⁴ Последние фотометрические данные свидетельствуют о том, что на Каллисто преобладают темные участки — выходы скальных пород. Считается, что на Ио могут существовать обширные соляные отложения. — *Прим. перев.*

захвачены планетой. Проблема захвата для Юпитера была исследована Бейли [14], который также пришел к выводу, что внешние спутники, с VI по XII (нумерация спутников идет в порядке возрастания расстояний от планеты), были захвачены. Эти спутники расположены очень далеко от Юпитера, у их орбит большие наклонения и эксцентриситеты, а у некоторых обратное движение по орбите. Вероятно, что эти внешние спутники являются захваченными астероидами или даже кометами.

САТУРН

Эта гигантская планета расположена очень далеко от Земли, и поэтому ее наблюдения с помощью наземных телескопов представляют значительные трудности. Считается, что планета, как и Юпитер, содержит много легких элементов, таких, как водород и гелий. У планеты есть уникальная система колец¹, в которых содержится замерзшая вода [15], но кроме этого и еще некоторых сведений о спутниках другой информации, представляющей геологический интерес, почти нет. У Сатурна есть 10 спутников, самый большой из них называется Титан. Размеры Титана примерно равны размерам Меркурия, и у него есть собственная атмосфера, в которой наблюдаются полосы поглощения метана. Последний из обнаруженных спутников Сатурна был открыт в 1966 г. французским астрономом Дольфюсом и назван Янусом.

УРАН, НЕПТУН И ПЛУТОН

Самые внешние планеты Солнечной системы находятся от нас на действительно гигантских расстояниях. Об этих планетах известно очень мало, за исключением общих сведений об их движении и приблизительных размерах. Известно, что у Урана есть пять спутников, у Нептуна — два, но, каковы хотя бы приблизительно их размеры, остается неясным. Считается, что Тритон, самый близкий к Нептуну спутник, имеет примерно 4000 км в диаметре. У Плутона спутники не обнаружены, и высказывается мнение, что сам Плутон может быть захваченной кометой или потерявшимся спутником Нептуна, который начал двигаться по гелиоцентрической орбите.

¹ В 1977 г. система колец была обнаружена и у Урана. — *Прим. перев.*

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Murray B. C., Belton M. J. S., Danielson G. E., Davies M. E., Gault D. E., Hapke B., O'Leary B., Strom R. G., Suomi V., Trask N.*, Mercury's surface, Preliminary description and interpretation from Mariner 10 pictures, *Science*, **185**, p. 169—179, 1974; см. также другие статьи в этом же выпуске. См. также *Jour. Geophys. Res.*, **80**, No. 17, p. 2341—2514 (интерпретация снимков планеты Меркурий, выполненных до первых месяцев 1975 г. включительно).
2. *Kaula W. M.*, An introduction to planetary physics, *The terrestrial planets*, Wiley, New York, 490 p., 1968. См. также *Reynolds R. T., Summers A. L.*, Calculations on the composition of the terrestrial planets, *Jour. Geophys. Res.*, **74**, p. 2494—2511, 1969.
3. *Klaasen K. P.*, Mercury rotation period determined from Mariner 10 photography, *Jour. Geophys. Res.*, **80**, p. 2415—2416, 1975.
4. *Gault D. E., Guest J. E., Murray J. B., Dzurisin D., Malin M. C.*, Some comparisons of impact craters on Mercury and the Moon, *Jour. Geophys. Res.*, **80**, p. 2444—2460, 1975.
5. *McCord T. B., Adams J. B.*, Mercury: Surface composition from the reflection spectrum, *Science*, **178**, p. 745—747, 1972.
6. *Murray B. C., Belton M. J. S., Danielson G. E., Davies M. E., Gault D., Hapke B., O'Leary B., Strom R. G., Suomi V., Trask N.*, Venus: Atmospheric motion and structure from Mariner 10 pictures, *Science*, **183**, p. 1307—1315, 1974. См. также другие статьи в этом же выпуске, p. 1289—1321.
7. *Rumsey H. C., Morris F. A., Green R. R., Goldstein R. M.*, A radar brightness and altitude image of a portion of Venenus, *Icarus*, **23**, p. 1—7, 1974.
8. См. ряд статей, посвященных результатам, полученным «Пионером-10», в *Science*, **183**, No. 4122, 25 January, 1974; см. также цветное изображение Юпитера на обложке этого выпуска.
9. *Pilcher C. B., Ridgway S. T., McCord T. B.*, Galilean satellites, Identification of water frost, *Science*, **178**, p. 1087—1089, 1972.
10. *Brown R. A., Chaffee F. H.*, High resolution spectra of sodium emission from Io, *Astrophys. Jour.*, No. **187**, p. L125—L126, 1974.
11. *Judge D. L., Carlson R. L.*, Pioneer 10 observations of the ultraviolet glow in the vicinity of Jupiter, *Science*, **183**, p. 317—318, 1974.
12. *Katterfield G. N., Nesterovitch E. I.*, Nature and topography of the Galilean moons of Jupiter, *Modern Geology*, **2**, p. 41—48, 1971.
13. *Kuiper G. P.*, Satellites of the outer planets, *Vistas Astron.*, **2**, p. 1631, 1956.
14. *Bailey J. M.*, Origin of the outer satellites of Jupiter, *Jour. Geophys. Res.*, **76**, p. 7827—7832, 1971.
15. *Pilcher C. B., Chapman C. R., Lebofsky L. A., Kieffer H.*, Saturn's rings: Identification of water frost, *Science*, **167**, p. 1372—1373, 1970. См. также *Kieffer H. H.*, Ring particle sizes and composition derived from eclipse cooling curves and reflection spectra, in *The Rings of Saturn*, *Palluconi F. D., Pettengill G. H.*, eds., NASA, Spec. Pub., SP-343, p. 51—63, 1974.

РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА ПО ОБЩИМ ВОПРОСАМ

16. Journal of Geophysical Research, 80, No. 17, p. 2341—2514, June 10, 1975. Здесь опубликован отчет группы по изучению планеты Меркурий по результатам полета «Маринера-10». Предварительный отчет напечатан в Science, 185, No. 4146, p. 141—180, July 12, 1974.
17. Science, 183, No. 4131, p. 1289—1321, March 19, 1974. Предварительный отчет группы по изучению планеты Венера по результатам, полученным пролетным космическим аппаратом «Маринер-10».
18. Science, 188, No. 4187, p. 445—477, May 2, 1975. В этом номере журнала приведены данные изучения Юпитера с помощью космических аппаратов «Пионер-10» и «Пионер-11». Science, 183, No. 4122, January 25, 1974 (помещены статьи, где приводятся только данные, полученные «Пионером-10»).
19. Hartmann W. K., Moons and planets: An introduction to planetary science, Bowden and Quigley, Belmont, Calif., 404 p., 1972.
20. Glasstone S., Sourcebook on the Space Sciences, D. Van Nostrand, Princeton, N. J., 937 p., 1965. Книга несколько устарела, но может служить хорошим исходным материалом при изучении ранних работ.
21. Kaula W. M., An Introduction to Planetary Physics, The Terrestrial Planets, Wiley, New York, 490 p., 1968.
22. Palluconi F. D., Pettengill G. H., eds., The rings of Saturn, NASA, Special Publication, SP—343, 222 p., 1974.
23. Scientific American, 233, No. 3, p. 22—173, September, 1975. В этом выпуске в легкодоступной для чтения форме суммированы современная информация и представления о различных объектах Солнечной системы.

Нынешний уровень наших знаний наряду с точным количественным подходом к установлению взаимосвязей не позволяет пока познать прошлое состояние планет или ясно понять обстановку, в которой они возникли. Однако лишь на этом основании условия происхождения нельзя относить к разряду случайных, как люди называют все явления, происхождение которых они не в состоянии объяснить.

А. Гумбольдт, 1850 г.

II. Сравнительная планетология

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время в нашем распоряжении есть хорошие фотографии и набор измерений геофизических параметров для всех планет земной группы и одного их крупного спутника — Луны. Существует четко выраженная тенденция разработать общую теорию для объяснения многих из наблюдаемых особенностей и черт строения планет. Однако эта развивающаяся отрасль знания, планетология, находится пока еще в стадии становления. Исчерпывающая интерпретация планетологической информации затруднительна из-за неполноты и новизны имеющихся данных. Существует огромное количество возможных параметров, например: неоднородность строения протопланетного облака, положение тел в Солнечной системе, их средняя плотность и средний состав, степень дифференциации, размеры, моменты инерции, интенсивность и природа магнитных полей, содержание радиоактивных элементов, возрасты поверхности, история метеоритной бомбардировки, тектоническое строение и т. д. Многие из перечисленных (и иных) параметров взаимосвязаны (или должны быть взаимосвязаны), причем тип таких соотношений может быть и очень простым, и исключительно сложным. Однако имеющиеся в распоряжении

данные далеко не полностью удовлетворительны и всеобъемлющи, а общее количество доступных для опробования планет, т. е. в пределах достижимости, в настоящее время невелико. Приводимые ниже сведения качественного характера дают представление о том, *какого рода* проблемы нам предстоит разрешить.

СРЕДНИЙ СОСТАВ

Наши данные о составе Земли и Луны намного полнее, чем подобные сведения о других планетах, однако и они до сих пор достаточно приблизительны. Следует помнить, что состав глубоких недр Земли пока еще недоступен для изучения с помощью прямых наблюдений или отбора образцов; эти данные мы получаем косвенным путем, исходя из скоростей распространения сейсмических волн и других сейсмических параметров и используя величины распространенности химических элементов на Солнце и аналогии с некоторыми типами метеоритов. Обширная область глубоких недр Земли находится в таком интервале давлений, при котором фазовые изменения, состав пород и их типы не поддаются интерпретации или пониманию в рамках современной технологии экспериментальных исследований. Каким же образом мы можем надеяться сравнивать средние составы планет, если даже имеющиеся данные о составе Земли столь несовершенны? К счастью, положение не так безнадежно для сопоставлений в первом приближении. С помощью небесной механики удалось определить массы планет; прямые телескопические наблюдения и снимки, выполненные космическими аппаратами, дали возможность установить диаметры планет, поэтому с довольно большой точностью определена их средняя плотность (табл. I).

Таблица I Диаметры, массы и средняя плотность планет земной группы [4]

Планета	Диаметр, км	Масса, г	Средняя плотность, г/см ³
Меркурий	4 864	$3,30 \cdot 10^{26}$	5,5
Венера	12 100	$4,87 \cdot 10^{27}$	5,2
Земля	12 756	$5,98 \cdot 10^{27}$	5,52
Луна	3 476	$7,35 \cdot 10^{25}$	3,34
Марс	6 788	$6,44 \cdot 10^{26}$	3,9

Чаще всего приходится вводить большое число допущений с целью упростить решение задачи. Многие исследователи используют величины средней плотности планет земной группы для оценки отношения количества железа и силикатов. Это основано на предполагаемых величинах распространенности железа, кремния и кислорода в протопланетном облаке, которые в свою очередь опираются на принятый в настоящее время химический состав Солнца и результаты анализов примитивных в химическом смысле метеоритов, таких, как углистые хондриты типа I. Таким образом, из двух планет сопоставимых размеров та из них, которая имеет большую среднюю плотность, должна иметь большее отношение количества железа к силикатам по сравнению с планетой меньшей плотности и т. д. Среди планет земной группы наименьшим телом является Луна, которая имеет и минимальную среднюю плотность. Следовательно, относительное количество железа в составе Луны должно быть намного меньше, чем в более крупных планетах земной группы, таких, как Меркурий, Венера и Земля. Если основываться только на величине средней плотности, то окажется, что Луна и Марс относятся к одному химическому классу небесных тел, а Земля, Венера и Меркурий — к другому. Средний химический состав Земли и Венеры может оказаться вполне сопоставимым, поскольку эти планеты очень близки по размерам и средней плотности, особенно если учесть, что вследствие разницы в массах в величину плотностей при сравнении можно ввести поправки. Меркурий, по-видимому, относится к уникальным планетам из-за достаточно высокой средней плотности и малых размеров. Поэтому по отношению к остальным планетам земной группы Меркурий должен иметь самое высокое отношение железа к силикатам и, возможно, наибольший относительный объем ядра по сравнению с корой (если планета подверглась значительной дифференциации).

Средняя плотность больших планет (которая изменяется в пределах $0,7 - 1,6 \text{ г/см}^3$) намного меньше, чем плотность планет земной группы, за вероятным исключением Плутона, но его огромная удаленность может служить причиной существенной погрешности при вычислении его плотности. Величина средней плотности больших планет в общем виде может отражать отношение количества железа и силикатов в их составе к количеству водорода, гелия, клатратов, льдов и других летучих компонентов. Однако некоторые из спутников больших планет, по-видимому, имеют среднюю плотность, аналогичную известной для планет земной группы.

СТЕПЕНЬ ДИФФЕРЕНЦИАЦИИ

Если есть основания предполагать, что планетное тело имеет вполне определенный средний химический состав, а поверхностные породы имеют *иной* состав, то такие наблюдения почти наверняка показывают, что данное тело подвергалось по меньшей мере частичной дифференциации. Степень дифференциации планеты находится в тесной зависимости от температуры ее недр и тепловой истории, содержания радиоактивных элементов, скорости, однородности и продолжительности аккреции, а также ряда других возможных факторов. Удобной мерой изменения плотности с глубиной в недрах планеты и функцией степени ее дифференциации должна служить величина отношения моментов инерции I/MR^2 , где I — средний момент инерции, M — масса планеты, R — ее радиус. Данные о химическом составе лунной поверхности и результаты изучения ее сейсмических свойств позволили Каула и др. [2] прийти к выводу о том, что отношение моментов инерции для Луны равно приблизительно 0,395. Эта величина не слишком сильно отличается от аналогичного параметра, характеризующего сферу с однородным распределением плотности (0,4). Поэтому Луна не должна иметь железного ядра, радиус которого превышает 400 км ($< 3\%$ массы Луны), а согласно оптимальной модели указанных авторов [2], Луна вообще лишена железного ядра. Далее эти авторы замечают, что существующий комплекс данных о химическом составе Луны накладывает большие ограничения на величину наблюдаемого момента инерции, чем последняя на диапазон химических составов.

Наряду с этим на основании многочисленных данных о строении поверхности и близповерхностной области коры, а также сведений о глубинном сейсмическом строении Земли и ее средней плотности сделан однозначный вывод о высокой степени дифференциации Земли. Поэтому сама величина момента инерции Земли (0,33) не может служить главным критерием, а лишь подтверждает выявленную закономерность существенного возрастания плотности по направлению к центру Земли. Однако столь детальная информация о других планетах пока еще не накоплена, поэтому величина момента инерции, вероятно, может быть основой при оценке примерной степени дифференциации планет.

ВНУТРЕННЕЕ СОСТОЯНИЕ

Измерение многих параметров позволяет подойти к пониманию состояния недр планеты. Такие данные, как величина теплового потока, представляют особую ценность, если их можно рассматривать в комплексе с информацией о породах поверхности, сейсмическими характеристиками и определениями возраста. В таком случае можно пытаться решать такие проблемы, как тепловая история планеты, содержание радиоактивных элементов, периоды интенсивной генерации магм, скорость аккреции и история становления планеты как твердого тела. Отличным примером такого комплексного подхода вновь может служить Луна. Согласно измерениям, осуществленным экспедицией «Аполлона-15», тепловой поток из недр Луны равен примерно $3,3 \cdot 10^{-6}$ ватт/см² (см. гл. 6, стр. 254), аналогичные данные были получены в районе посадки «Аполлона-17». Эти значения лишь вдвое меньше величины теплового потока Земли и удивительно велики для такого небольшого небесного тела, как Луна.

Лангсет и др. [3] пришли к выводу, что если приведенные данные достаточно представительны для большей части лунной поверхности, то содержание радиоактивных элементов в Луне должно превышать их концентрацию в Земле или хондритах. Эти факты наряду с данными сейсмических наблюдений (см. гл. 6, стр. 255) согласуются с представлением о высокой температуре недр Луны, причем на глубине примерно 1000 км и более может происходить частичное плавление силикатов. Однако наблюдения показали неполноту изостатической компенсации масконов, несмотря на то что формирование кольцевых структур морских бассейнов и заполнение их лавами принадлежит к древним геологическим событиям. Такая закономерность может служить указанием на достаточную прочность внешней оболочки Луны.

Тепловой поток Земли измерялся достаточно интенсивно, а сейсмически активная Земля служит энергетическим источником многих природных явлений, которые можно использовать для познания глубинного строения планеты. В большинстве учебных пособий по геологии и геофизике можно найти детальные модельные разрезы, показывающие строение земных недр и примерную величину геотермического градиента. Наблюдения над действующими вулканами на поверхности Земли показывают, что существует ряд районов, где поверхностный тепловой поток действительно очень высок по сравнению с наблюдаемым на поверхности Луны.

ТЕКТОНИЧЕСКОЕ СТРОЕНИЕ

Снимки поверхности и геофизические исследования показали, что в тектоническом строении Земли, Луны, Меркурия и Марса наблюдаются весьма существенные отличия. Плотная атмосфера и наличие облачного покрова пока еще не позволяют сделать аналогичного вывода в отношении планеты Венеры.

По прошествии многих лет и завершении утомительных и трудных циклов наблюдений и дискуссий стало очевидно, что физические результаты дрейфа континентов и разрастание океанского дна представляют собой неотъемлемые черты строения коры и мантии Земли. Вероятно, эти процессы наряду с сопутствующим формированием горных цепей складчатых поясов и островных дуг не проявлены в такой же степени ни на одной из планет земной группы. Тем не менее дихотомический план строения континенты — океанические бассейны вряд ли присущ одной лишь Земле. В какой-то мере тот же план строения наблюдается и на Марсе, где сравнительно пониженная и гладкая поверхность северного полушария сочетается со сравнительно возвышенными и кратерированными южными «материками». На Марсе нельзя исключать и активную тектонику плит, однако эту проблему еще предстоит решать. Тип тектонического строения Луны, который характеризуется совместным нахождением материков и бассейнов, заполненных лавами, может быть проявлен в меньшей степени и на Марсе. Крупные щитовые вулканы и гигантские каньоны, вероятно, присущи только планете Марс. Исключительно длинные и непрерывные уступы Меркурия не похожи на марсианские и не наблюдались больше ни на одной планете. К немногим общим элементам строения планет земной группы можно отнести вездесущие ударные кратеры на поверхности всех планет, хотя даже и они отчасти стерты с земной поверхности. По-видимому, планеты земной группы, так же как и большие планеты, имеют общие черты в своем химическом составе. Каковы же основные физико-химические черты, обуславливающие наблюдаемые сходства и различия?

Очевидно, история образования и общие принципы эволюционного развития планет взаимосвязаны с рядом упомянутых во введении к данной главе переменных факторов (и многих неупомянутых). Для установления таких взаимосвязей между факторами, а также выявления и применения общих принципов планетологии, которые в настоящее время еще не совсем понятны, потребуются геологи и геофизики высокой квалификации, с большой широтой научных интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Hartmann W. K.*, Moons and Planets: An Introduction to Planetary Science, Bowden and Quigley, Belmont, Calif., 404 p., 1972.
2. *Kaula W. M.*, *Schubert G.*, *Lingenfelter R. E.*, *Sjogren W. L.*, *Wollenhaupt W. R.*, Apollo laser altimetry and inferences as to lunar structure, Proc. Fifth Lunar Sci. Conf., Geochim. et Cosmochim. Acta, Suppl. 5, 3, Pergamon Press, p. 3049—3058, 1974.
3. *Langseth M. G., Jr.*, *Clark S. P., Jr.*, *Chute J., Jr.*, *Keihm S.*, The Apollo 15 lunar heat flow measurement, Lunar Sci. III, *Watkins C.*, ed., Lunar Sci. Inst. Contr. No. 88, p. 475—477, 1972. Кроме того, *Langseth M. G.*, *Chute J. L.*, *Keihm S.*, Direct measurement of heat flow from the Moon, Lunar Sci. IV, *Chamberlain J. W.*, *Watkins C.*, eds., Lunar Sci. Inst., p. 455—456, 1973.

СЛОВАРЬ

Цель этого краткого словаря — оказать помощь тем читателям книги, которые не имеют достаточной технической подготовки. Многие из приводимых определений не претендуют на полноту, а в отдельных случаях даже и на *строгость*. Более исчерпывающие определения терминов читатель сможет найти в обычных геологических словарях и другой цитируемой литературе. Толкование дополнительных терминов приводится в тексте там, где они впервые используются.

Автометаморфизм (autometamorphism) — метаморфизм, проявление которого происходит без привноса тепла извне; метаморфизм, обусловленный теплом, содержащимся в той или иной формации горных пород, и связанный со способом происхождения этих пород; например, в туфах пепловых потоков или отложениях ударной базисной волны, обратных выпадениях.

Агглютинат (лунный) [agglutinate (lunar)] — термин для обозначения некоторых частиц в составе лунного реголита, образующих слипшиеся агрегаты; в основном — это частицы стекол (возникновение которых, вероятно, связано с плавлением и разбрызгиванием выбросов при ударах мельчайших высокоскоростных частиц), а также зерен минералов и мелких фрагментов горных пород.

А.е. (A.U.) — сокращенное обозначение астрономической единицы; мера длины, равная среднему расстоянию от Земли до Солнца: примерно $1,496 \cdot 10^8$ км или 93 млн. миль.

Аккреция (accretion) — процесс, протекающий в протопланетном облаке и приводящий к объединению мелких твердых и газовых частиц в крупные небесные тела, достигающие в конечном итоге планетных размеров.

Алифатический (aliphatic) — класс органических соединений со сравнительно высоким молекулярным весом, структуры которых представлены незамкнутыми цепями, например парафины.

Алмаз (diamond) — природная кубическая полиморфная модификация углерода: имеет высокую твердость, устойчива при высоких температурах и давлениях.

- Альbedo** (albedo) — количество света, отраженного от некоторой поверхности; характеристика отражательной способности.
- Аморфный** (amorphous) — относящийся к веществу, для структуры которого не характерен дальний порядок, т. е. кристаллическая структура отсутствует; бесформенный.
- Анортит** (anorthite) — см. плагиоклаз; минерал из группы полевых шпатов с составом, близким к $\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$.
- Анортозит** (anorthosite) — изверженная порода, сложенная почти нацело анортитом.
- Антиклиналь** (anticline) — геологическая структура, сложенная пластинами горных пород, деформация которых привела к изгибанию первичного горизонтального залегания с образованием выпуклой кверху складки.
- Апатит** (apatite) — минерал, встречающийся в качестве аксессуория во многих земных и лунных породах; фосфат кальция, содержит много второстепенных компонентов.
- Ароматический** (aromatic) — класс органических соединений, структуры которых содержат ненасыщенные кольца атомов углерода; например бензол и нафталин.
- Астеризм** (asterism) — увеличение размеров (особенно удлинение) дифракционных пятен на рентгенограмме, обусловленное мелкими деформациями кристаллической структуры.
- Астролема** (astrobleme) — ударная структура; геологическая структура, возникновение которой обусловлено высокоскоростным ударом метеороида, астероида или кометы.
- Астрогеология** (astrogeology) — термин, принятый для обозначения круга знаний о Луне и планетах, связанных с их геологией; космический аспект геологических наук; синоним космическая геология, планетология.
- Афелий** (aphelion) — точка на орбите планеты, астероида, кометы или иного спутника Солнца, соответствующая наибольшему удалению этого тела от Солнца.
- Баделейт** (baddeleyite) — моноклинная модификация ZrO_2 ; образуется в импактилах, продукт разложения циркона.
- Базальт** (basalt) — мелкозернистая эффузивная или приповерхностная интрузивная порода, минеральный состав которой аналогичен составу габбро; сложена в основном плагиоклазом и клинопироксеном, оливином (может отсутствовать) и подчиненным количеством других минералов.
- Базисная волна** (base surge) — сравнительно низкоскоростные выбросы из ударного или вулканического взрывного кратера; эти выбросы перемещаются в радиальных направлениях от кратера в форме потоков поверхностных обломочных образований.
- Борозда** (rille) — прямолинейная или криволинейная желобообразная протяженная депрессия.
- Брекчия** (breccia) — обломочная горная порода, состоящая из угловатых фрагментов пород и (или) минералов, заключенных в более мелкозернистой основной массе.
- Бронзит** (bronzite) — ортопироксен, состав которого в основном отвечает MgSiO_3 ; содержит значительное количество Fe, изоморфно замещающего Mg; название связано с «бронзовой» окраской этих минералов.
- Вариолитовая** (variolitic) — структура горной породы, сложенной мелкими радиально-лучистыми сростками кристаллов в более мелкозернистой основной массе.
- Видманштетеновы фигуры** (Widmanstätten figure, Widmanstätten structure, pattern) — структура прорастания минеральных металлических

фаз, богатых и бедных никелем, наблюдаемых на свежей полированной поверхности большинства железных метеоритов после травления разбавленной азотной кислотой.

- Витрофир** (vitreophyre) — общий термин для обозначения горных пород, состоящих преимущественно из стекла.
- Внеземной** (extraterrestrial) — находящийся вне Земли, не имеющий отношения к Земле или земному веществу.
- Волна разрежения** (rarefaction wave) — волна расширения, следующая мгновенно вслед за волной сжатия или ударной волной.
- Вращение** (rotation) — перемещение планетного тела вокруг собственной оси, подобно цыпленку на вертеле или вращению Земли вокруг оси, проходящей через ее полюсы.
- Вторичный кратер** (secondary crater) — кратер, образовавшийся при выбросе блока или массы пород, представляющих собой выбросы другого кратера.
- Высокоскоростной** (hypervelocity) — превышающий обычные скорости; очень высокая скорость, достаточная для образования взрывного кратера при падении небесного тела на поверхность планеты; обычно нижний предел высокоскоростных явлений определяют в 5 км/с.
- Габбро** (gabbro) — изверженная порода, сложенная в основном богатым кальцием плагиоклазом и клинопироксеном; кроме того, может содержать оливин, ортопироксен и подчиненные количества других минералов.
- Габитуэ кристаллов** (crystal habit) — форма кристаллических индивидов; описывается такими терминами, как таблитчатый, футляровидный, пластинчатый, изометрический, радиально-лучистый и т. п.
- Газовый хроматограф** (gas chromatograph) — аналитический прибор для определения газов и летучих молекул по времени их пребывания в адсорбционных колонках разной длины и диаметра и выполненных из различных материалов.
- Геденбергит** (hedenbergite) — минерал группы клинопироксенов с примерной формулой $\text{CaFe}(\text{SiO}_3)_2$.
- Гиперстен** (hypersthene) — минерал группы ортопироксенов с примерной формулой $(\text{Mg, Fe})\text{SiO}_3$.
- Грабен** (graben) — протяженный, опущенный по разломам блок горных пород, расположенный между двумя взброшенными блоками или стабильными участками коры.
- Графит** (graphite) — полиморфная модификация углерода, мягкий минерал черного цвета.
- Гроссуляр** (grossularite) — минерал группы граната, состав которого близок к $\text{Ca}_3\text{Al}_2(\text{SiO}_4)_3$.
- Грунт** (лунный) [soil (lunar)] — термин, широко применяемый для обозначения мелкозернистого материала, состоящего из фрагментов горных пород и минералов и слагающего поверхностный слой Луны; лунный грунт не имеет ничего общего с земными грунтами ни по происхождению, ни по составу; синоним: реголит.
- Диабаз** (diabase) — изверженная порода, состоящая главным образом из богатого кальцием плагиоклаза (обычно лабрадора) и клинопироксена; характерна офитовая структура.
- Диаплектовое стекло** (diaplectic glass) — стекло, образующееся в твердом состоянии в результате превращения минеральной фазы под воздействием ударной волны.
- Диктитакситовая** (diktytaxitic) — структура изверженных горных пород, представлена сетчатым агрегатом кристаллов с небольшим количеством основной массы и многочисленными полостями неправильной формы; изверженная порода, содержащая неправильной формы полоски, которые частично пронизаны многочисленными кристаллами.

- Диопсид** (diopside) — минерал группы клинопироксенов, приблизительная формула $\text{CaMg}(\text{SiO}_3)_2$.
- Дифференциация** (магматическая) [differentiation (magmatic)] — общий процесс разделения однородной силикатной магмы на отдельные фракции различного валового состава; (планетарная) процесс, в результате которого сравнительно однородное планетное тело приобретает неоднородность в радиальном направлении, например, образуется ядро и (или) кора, или слои различного валового состава.
- Добреелит** (daubreelite) — второстепенный минерал во многих метеоритах, состав FeCr_2S_4 .
- Дунит** (dunite) — изверженная порода, почти полностью сложенная оливином; могут присутствовать в небольшом количестве пироксен, магнетит, хромит и другие минералы.
- Земной** (terrestrial) — относящийся к планете Земля, напоминающий Землю; внутренние планеты Солнечной системы (Меркурий, Венера, Земля, Луна, Марс), похожие по своему составу (в основном железо и силикаты) на Землю.
- Зернистый** (granular) — в петрологии термин для обозначения структуры горной породы, сложенной зернистым агрегатом минералов, зерна обычно имеют примерно одинаковые размеры и достаточно изометрические очертания.
- Зювит** (suevite) — ударная брекчия, в частности брекчированные выбросы; содержит стекловатые включения (импактиты) наряду с ударнометаморфизованными фрагментами ранее существовавших вмещающих пород; термин впервые был применен при описании пород кратера Рис, в настоящее время общепринят.
- Идиоморфный** (euhedral) — имеющий хорошую кристаллографическую огранку, когда развито большинство кристаллических граней и углов.
- Изверженная горная порода** (igneous rock) — горная порода, сформировавшаяся при охлаждении магмы.
- Изостатическое выравнивание** (isostatic compensation) — процесс, приводящий к достижению подвижного равновесия между горными породами с различной плотностью и (или) различной топографией поверхности; состояние баланса масс и плотности горных пород, аналогичное плавучести льда в воде.
- Изотропный** (isotropic) — минерал или иное вещество, которое не пропускает света в любом положении столика микроскопа при скрещенных николях.
- Изохрона** (isochron) — линия на графике, проведенная через точки изотопных отношений, связывающая разновозрастные объекты; наклон изохроны несет в себе информацию о времени последней гомогенизации изотопного состава анализируемого материала.
- Изоэнтропийный** (isentropic) — характеризующийся одинаковой энтропией.
- Ильменит** (ilmenite) — слабомагнитный минерал, состав FeTiO_3 ; широко распространен на Луне, на Земле встречается в меньшем количестве, но достаточно обычен.
- Импактит** (impactite) — стекловатая, полностью или частично переплавленная горная порода, образовавшаяся в результате ударного метаморфизма, сопровождающего метеоритный удар.
- Интерсертальная** (intersertal) — структура изверженной породы, в которой основная масса (или мезостазис) располагается в промежутках между более крупными кристаллами, слагающими большую часть породы, особенно в случае, если более крупные кристаллы представлены беспорядочно ориентированными полевыми шпатами.
- Интрафасцикулярный** (intrafasciculate) — о кристалле плагиоклаза, содержащем удлиненное ядро зерна пироксена.

- Кальдера** (caldera) — вулканический кратер обрушения, развивающийся, как правило, в пределах центральной части вулканической постройки; например, сложный кратер обрушения центрального типа на Марсе Olympus Mons или озеро Крейтер в штате Орегон, США.
- Камасит** (kamacite) — природная кубическая модификация самородного железа с объемно-центрированной решеткой (α -железо); синоним: феррит; обычно присутствует в метеоритах.
- Кварц** (quartz) — наиболее обычная полиморфная модификация двуоксида кремния в породах земной коры. Кроме того, встречен в некоторых метеоритах в виде второстепенного компонента.
- Килобар** (kilobar) — тысяча бар; единица давления, обычно применяемая при описании явлений ударного метаморфизма и в механике кратерообразования.
- Кластический** (clastic) — обломочный, содержащий обломки или фрагменты (иногда метаморфизованные) ранее существовавших горных пород, как, например, в обломочных породах.
- Клатрат** (clathrate) — химическая структура, напоминающая решетку, в которой одна молекулярная группа окружена другими или заключена среди них, например H_2O среди CO_2 .
- Клинопироксены** (clinopyroxene) — подгруппа пироксенов моноклинной сингонии: диопсид, геденбергит, пизонит и авгит.
- Когенит** (cohenite) — акцессорный минерал некоторых метеоритов, $(Fe, Ni, Co)_3C$; синоним: цементит (искусственный эквивалент).
- Конусы разрушения** (shatter cones) — конусовидные образования в горных породах, размеры которых варьируют от сантиметров до нескольких метров, характерна ветвящаяся штриховка, направленная от вершины конуса к его основанию; образуются в соответствующих условиях при воздействии ударных волн на породы самого различного литологического состава.
- Кора плавления** (fusion crust) — внешняя оболочка метеорита, подвергшаяся переплавлению и охлаждению в результате трения в атмосфере; мощность коры плавления достигает всего нескольких миллиметров, на свежих образцах это кора черного цвета, а на выветрелых — также бурого; кора абляции.
- Козсит** (coesite) — высокобарная полиморфная модификация двуоксида кремния; обычно образуется из кварца при скоротечном действии сверхвысоких давлений, возникающих при высокоскоростных ударах; впервые в природе найден в Аризонском метеоритном кратере.
- Кривая метеоритного потока** (flux curve) — (метеороиды) кривая, иллюстрирующая распределение метеороидов по размерам; строится по размерам либо метеороидов, либо образовавшихся ударных кратеров, приходящихся на единицу площади за определенный интервал времени экспозиции.
- Криптовулканический** (cryptovolcanic) — о геологических структурах, происхождение которых некоторые исследователи связывают с неизвестными взрывными вулканическими процессами; применяется для обозначения структур с нарушенным залеганием пластов и (или) крупными блоками брекчий, происхождение которых неизвестно или не доказано.
- Кристаллографический двойник** (twinned crystal) — кристалл, отдельные части которого имеют различную ориентировку кристаллической структуры, что обыкновенно связано с несложным изменением симметрии.
- Кристобалит** (cristobalite) — полиморфная модификация двуоксида кремния; встречается в основном в некоторых типах земных вулканических горных пород и в качестве второстепенного компонента некоторых метеоритов и лунных пород. †

- Ксеноморфный** (anhedral) — не имеющий кристаллической грани; грани кристаллов и углы кристаллических многогранников отсутствуют.
- Кумулат** (cumulate) — горная порода, образовавшаяся при аккумуляции кристаллов в магматическом расплаве; обычно этот процесс обусловлен различиями в плотности: происходит либо оседание, либо всплытие кристаллов, что нередко можно установить по структурным признакам.
- Лешательерит** (lechatelierite) — природное стекло, состоящее из кремнезема, аморфная двуокись кремния.
- Либрация** (libration) — слабое перемещение (физическая либрация) планетного тела; кажущееся перемещение (геометрическая либрация), вызванное (например, в случае Луны) незначительной величиной эксцентриситета ее орбиты относительно Земли.
- Ликвидус** (liquidus) — линия на фазовой диаграмме температура — состав бинарной смеси, обычно при заданном давлении; показывает, при какой температуре начинается выпадение кристаллов минеральной фазы определенного состава при равновесных условиях. На тройной фазовой диаграмме ликвидус имеет форму искривленной поверхности; кривая, разделяющая область стабильности жидкости от области устойчивости смеси жидкости и кристаллов.
- Лучи** (ray) — на поверхности планет протяженные отложения выбросов, располагающиеся по радиусам от ударного кратера в виде более светлых полос или полос с более высоким альбедо; прекрасно развиты вокруг лунного кратера Тихо и наблюдаются при высоких углах Солнца.
- Магма** (magma) — полностью или частично расплавленное природное вещество, из которого кристаллизуются изверженные породы при понижении температуры расплава; обычно содержит много кремнезема и растворенные газы.
- Магнетит** (magnetite) — непрозрачный черный минерал с металлическим блеском; относится к группе шпинели, по составу близок к Fe_3O_4 , сильно ферромагнитен.
- Магнитометр** (magnetometer) — геофизический прибор, предназначенный для измерения интенсивности и направленности планетарного магнитного поля, а также частей или компонентов этих параметров.
- Маскелинит** (maskelynite) — диалектовое плагноклазовое стекло; в настоящее время обнаружено в ассоциации с земными и лунными ударными кратерами и в метеоритах, сильно измененных ударными процессами.
- Маскон** (mascon) — концентрация масс.
- Масс-спектрометр** (mass spectrometer) — аналитический прибор, предназначенный для определения содержания различных изотопов и типов молекул, присутствующих в данном образце; принцип его работы заключается в разделении изотопов в соответствии с величиной отношения их масс к заряду при движении ионов в сильном магнитном поле.
- Материнское тело** (parent body) — родоначальное небесное тело, которое служит источником происхождения более мелких объектов (термин применяется особенно часто по отношению к метеоритам); планета, астероид, комета или более крупный метеороид, с которым связано происхождение метеорита или другого объекта.
- Мегабар** (megabar) — миллион бар; единица измерения давления, обычно применяемая при описании процессов ударного метаморфизма и в механике кратерообразования.
- Мезостази** (mesostasis) — стекловатый и тонкозернистый интерстициальный материал, заполняющий пространство между более крупными кристаллами в некоторых изверженных породах.

- Мелилиты** (melilite) — группа минералов, представленных алюмосиликатами натрия, кальция и магния; сюда входят акерманит и геленит.
- Мелкозернистый материал** (fines) — термин для обозначения фракции <1 мм вещества в лунном реголите; обычно представлен мелкими частицами¹.
- Метаморфизм** (metamorphism) — природный процесс, связанный с изменением температуры и (или) давления, в ходе которого происходит изменение структуры горных пород или преобразование минералов с появлением новых фаз или их ассоциаций, устойчивых в новых физико-химических условиях; форма каких-либо изменений.
- Метеор** (meteor) — полоса яркого свечения, наблюдающаяся непродолжительное время на небе; появление метеора обусловлено нагреванием мелких метеороидов до белого каления в результате трения при прохождении сквозь земную атмосферу.
- Метеорит** (meteorite) — обломок метеороида, состоящий из железа или каменного материала, сохранившийся при прохождении сквозь атмосферу и достигший земной поверхности; фрагмент метеороида, сохранившийся при его прохождении сквозь атмосферу и ударе о поверхность планеты.
- Метеороид** (meteoroid) — твердое тело, находящееся в межпланетном пространстве Солнечной системы; вероятно, представляет собой фрагмент астероида или кометы.
- Микроклин** (microcline) — калиевый полевой шпат, состав которого близок к $KAlSi_3O_8$; обычно содержит небольшое количество натрия и еще меньше — кальция; триклинный.
- Минерал** (mineral) — природное неорганическое вещество, характеризуется определенным диапазоном химического состава и определенным типом кристаллической структуры дальнего порядка. Синоним: минеральная фаза.
- Мономиктовый** (monomict) — состоящий из односторонних обломков; состоящий из одних и тех же компонентов; например, мономиктовая брекчия представляет собой обломочную породу, сложенную угловатыми фрагментами одной и той же исходной породы.
- Наклонение** (inclination) — в общей астрономии угол, образованный орбитальной плоскостью спутника с орбитальной плоскостью или экваториальной плоскостью вращения центрального тела.
- Находка** (find) — метеорит, диагностика которого проведена на основании физических свойств, по внешнему виду или в связи с особенностями его расположения на поверхности Земли; при этом точное время его падения неизвестно или падение вообще не наблюдалось.
- Никелистое железо** (nickel-iron) — самородное железо в метеоритах; присутствует в форме камасита и тэнита. Чаще всего содержит несколько процентов никеля, однако изредка его содержание достигает или даже превышает 50%.
- Николь** (nicol) — специальная двухкомпонентная призма, которая пропускает плоскополяризованный свет в одном направлении; поляририд.
- Норит** (norite) — изверженная горная порода, в основном сложенная богатым кальцием плагноклазом и ортопироксеном, чаще всего гипертеном.
- Обратное** (retrograde) — движение небесного тела по орбите в направлении, противоположном общему направлению движения Солнечной системы; если точка наблюдения над Солнечной системой находится на севере, то планеты движутся против часовой стрелки. Однако некоторые

¹ См. сноску к разделу «Несвязный рыхлый материал» в гл. 6.—
Прим. ред.

более мелкие тела обращаются по часовой стрелке относительно движения главных планет. Такое направление обращения называют обратным.

- Обратные выпадения** (fallback) — выбросы из ударных взрывных кратеров, которые поступают в атмосферу или околопланетное космическое пространство со скоростью, не достигающей скорости убегания, и падают обратно в кратер или в непосредственной близости от него; иногда для обозначения выбросов, отложенных вне кратера, применяют термин throwout¹.
- Обращение** (revolution) — движение захваченного планетного тела относительно центрального тела, например обращение Луны вокруг Земли или Земли вокруг Солнца.
- Огранка на конце** (termination) — вытянутый кристалл, конец которого оформлен в виде плоских поверхностей или кристаллических граней; кристаллы, оба конца которых имеют такую огранку, называют double terminated.
- Оливин** (olivine) — минерал, отвечающий по составу формуле $(Mg, Fe)_2SiO_4$; содержание магния и закисного железа может изменяться в любых соотношениях; ряд твердых растворов типа Mg_2SiO_4 (форстерит) — Fe_2SiO_4 (фаялит), в котором содержание компонентов, представляющих конечные члены ряда, может изменяться в любых соотношениях; обычно применяют следующие обозначения: Fo_{85} , т. е. 85 молекулярных процентов форстерита, или Fa_{15} , т. е. 15 молекулярных процентов фаялита для минерала того же состава.
- Олигоклаз** (oligoclase) — полевой шпат из группы плагиоклазов, химический состав которого варьирует в диапазоне An_{10} — An_{30} ; см. плагиоклаз.
- Орбита** (orbit) — постоянная криволинейная траектория движения твердого тела в Солнечной системе, определяемая гравитационным воздействием Солнца и (или) других крупных небесных тел.
- Орографический** (orographic) — имеющий отношение к горам и их влиянию на природные процессы.
- Ортоклаз** (orthoclase) — калиевый полевой шпат, состав которого близок к $KAlSi_3O_8$; обычно содержит небольшое количество натрия и еще меньшее — кальция; моноклинный.
- Ортопироксены** (orthopyroxene) — подгруппа пироксенов ромбической сингонии: энстатит, бронзит и гиперстен.
- Основная масса** (groundmass) — мелкозернистый материал, матрица, в которую включены более крупные кристаллы или обломки.
- Остаточная намагниченность** (remanent magnetization) — компонент магнетизма горных пород, не связанный с недавно образованным или реликтовым планетарным магнитным полем умеренной силы; компонент магнетизма горных пород, «законсервированный» в магматическом или ударном расплаве горной породы, поскольку охлаждение ферромагнитных минеральных компонентов пород происходило с переходом через их точки Кюри.
- Отклонение** (skewness) — мера симметрии кривой распределения; например, в гранулометрическом статистическом анализе положительное отклонение соответствует преобладанию мелких фракций, а отрицательное отражает противоположную ситуацию; малое отклонение

¹ По традиции в геологической литературе США по Луне термин fallback употребляется для обозначения той части выбросов из кратера, которая при обратном падении на поверхность оказалась в пределах периметра кратера. Часть выбросов такого же типа, упавших на поверхность вне кратера, обычно обозначают термином ejecta.— *Прим. перев.*

- означает, что крупный и мелкий материал содержится примерно в равных количествах, обычно выраженных в весовых %.
- Офитовая (orbhitic)** — структура изверженных горных пород, которая характеризуется тем, что кристаллы одного минерала полностью заключены в кристаллы другого; наиболее типичным примером является содержание кристаллов плагиоклаза в клинопироксене.
- Падение (fall)** — метеорит, падение (или явления, сопутствующие падению) которого наблюдалось либо при его прохождении сквозь земную атмосферу, либо при его ударе о поверхность Земли.
- Парагенезис (paragenesis)** — хронологический порядок формирования природных объектов, особенно минералов; временные, химико-минералогические соотношения минералов или типов горных пород.
- Переохлаждение (supercooling)** — процесс, при котором охлаждение происходит за время, недостаточное для протекания равновесных реакций или равновесной кристаллизации при соответствующих температурах.
- Перигелий (perihelion)** — ближайшая к Солнцу точка на орбите планеты, астероида, кометы или иного спутника Солнца.
- Перовскит (perovskite)** — минерал; по составу близок к CaTiO_3 .
- Петрогенезис (petrogenesis)** — происхождение горных пород, характеристика взаимоотношений между различными типами пород и способами их формирования.
- Пироксены (pyroxenes)** — обширная группа минералов, к которым прежде всего относятся силикаты магния, железа и кальция; к наиболее обычным пироксенам принадлежат энстатит, авгит, гиперстен, диопсид и пизонит. Подразделяются на подгруппы моноклинных (клинопироксены) и ромбических (ортопироксены) пироксенов.
- Плагиоклаз (plagioclase)** — группа полевых шпатов, химический состав которых варьирует в диапазоне от $\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$ до $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$, образуя полный ряд твердых растворов в высокотемпературных условиях. Анортит представляет собой наиболее обогащенный кальцием конечный член указанного ряда твердых растворов; натровый конечный член называют альбитом. Промежуточные члены ряда получили следующие минералогические названия: лабрадор, битовнит, олигоклаз и андезин. Состав плагиоклаза обычно обозначают так: An_{35} , An_{60} , Ab_{21} , Ab_{90} и так далее, индексы указывают содержание того или иного конечного члена ряда твердых растворов в молекулярных процентах. Так, например, если состав плагиоклаза обозначен как An_{65} или Ab_{35} , то он содержит 65 мол. % анортита ($\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$) и 35 мол. % альбита ($\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$).
- Планетезималь (planetesimal)** — гипотетический тип твердых небесных тел, размеры которых близки к размерам планет; аккреция тел этого типа приводила к формированию планет.
- Плессит (plessite)** — мелкозернистые прорастания камасита и танита в метеоритах; ранее считался самостоятельным минералом.
- Плотность кратеров (crater density)** — число кратеров (диаметры которых обычно строго определены) на единицу площади; если подсчитываются только первичные ударные кратеры и метод подсчета правилен, плотность кратеров используется в качестве индикатора относительного возраста участков поверхности планеты.
- Погасание (extinction)** — в минералогии свойство прозрачных минералов, проявляющееся в затемнении при скрещенных николях в ориентированном или произвольном сечении; зависит от кристаллической структуры и состава минерала. Погасание называют нормальным, если при вращении столика микроскопа происходит постепенное и закономерное просветление; в случае если просветление происходит нерав-

- номерно (пятнами) и незакономерно, то такое погасание называют «волнистым».
- Пойкилитовая (poikilitic)** — структура изверженных пород, в которых кристалл одного из минералов содержит включения мелких кристаллов другого.
- Покров выбросов (ejecta blanket)** — слой обратных выпадений, отложений базисной волны и других типов выбросов, залегающий вокруг ударного кратера или внутри него, а также в связи с ассоциирующими с кратером структурами; в пределах кратерного вала мощность покрыва обычно увеличивается, а при удалении от кратера уменьшается.
- Покрытие (occult)** — в астрономии положение, в котором между наблюдателем и небесным телом находится третье тело; например, во время солнечного затмения происходит покрытие Солнца Луной.
- Полевой шпат (feldspar)** — название широко распространенной большой группы силикатов, в которых к главным компонентам относятся также алюминий и различные одновалентные и двухвалентные катионы. Наиболее обычные полевые шпаты относятся к группе плагиоклазов и калиевых полевых шпатов, представленных несколькими минералами (ортоклаз, микроклин, санидин). Наиболее широко распространенная группа минералов земной коры.
- Полимиктовый (polymict)** — состоящий из разнотипных обломков; например, полимиктовая брекчия представляет собой обломочную породу, сложенную угловатыми фрагментами различных исходных пород.
- Полиморфы (polymorphs)** — проявления нескольких модификаций кристаллической структуры вещества, имеющего один и тот же химический состав, например кварц, стишовит, тридимит, кристобалит и коэсит. Все эти минералы представляют собой двуокись кремния, однако имеют различную кристаллическую структуру, обуславливающую различия их физических и оптических свойств.
- Полосы излома, кинкбанды (kinkbands)** — угловые дислокации на плоской поверхности минералов с совершенной спайностью, особенно в слюдах; полосы излома выражаются в смещении следов спайности в виде повторяющегося рисунка ломаных параллельных линий.
- Поляризация (polarization)** — особые свойства света, отражаемого от поверхности; используется для выявления физических свойств поверхности.
- Порфировая (porphyritic)** — структура изверженных пород, в которых крупные кристаллы заключены в основной массе (матрице), сложенной гораздо более мелкими кристаллами или стеклом.
- Предел Роша (Roche limit)** — расстояние от поверхности крупного планетного тела до более мелкого тела, при котором приливные силы в последнем достигают предела его прочности. Назван в честь французского математика Эдуарда Роша, который вычислил этот предел, взяв за основу тело, не имеющее предела прочности на расстоянии; следовательно, реальное тело к моменту своего разрушения должно находиться внутри предела Роша.
- Промежуточная фаза между 2-й четвертью и полнолунием (gibbous)** — фаза наблюдения планеты или спутника, в которой ее (его) освещенный диск виден не полностью, но больше чем наполовину.
- Протопланетное облако (Solar Nebula)** — облако, состоящее из газов и диспергированных твердых частиц, из которых сформировалось Солнце и другие тела Солнечной системы в процессе их конденсации и (или) аккреции.
- Псевдотрахилит (pseudotachylite)** — порода, похожая на базальтовое стекло; стекловатый или мелкокристаллический темный ударный расплав; обычно образует жилы по трещинам во вмещающих породах;

- в псевдотахилитах встречаются обломки горных пород и минеральные зерна, в которых могут быть найдены проявления ударных деформаций.
- Пузырек, пора (vesicle)** — газовый пузырек или полость, варьирующая по форме от сферической до неправильной.
- Разрывное нарушение (fault)** — нарушение сплошности горных пород, трещина, по которой происходит сдвиг одного блока пород относительно другого.
- Реголит (regolith)** — слой фрагментарных нелитифицированных обломочных образований, который может перекрывать поверхность планеты, например Луны.
- Рентгеновская дифракция (X-ray diffraction)** — явление рассеяния рентгеновских лучей плоскостями с высокой электронной, а следовательно, и атомной плотностью; при этом происходит интерференция рентгеновских лучей, что позволяет диагностировать минерал и определить его кристаллическую структуру, а в некоторых случаях также установить точный химический состав минералов переменного состава.
- Сейсмическая скорость (seismic velocity)** — скорость прохождения сейсмических волн сквозь толщу горных пород; обычно коррелируется с типом пород, их структурами, литостатическим давлением и другими геологическими факторами.
- Серпентин (serpentine)** — немногочисленная группа минералов, состоящая преимущественно из гидросиликатов магния и железа; породы, сложенные этими минералами, называют серпентинитами. Обычно образуются при гидратации оливина или горных пород, обогащенных оливином.
- Синхронное вращение (synchronous rotation)** — движение планеты, при котором период ее вращения равен периоду обращения, так что к объекту, вокруг которого происходит обращение, повернута всегда одна и та же сторона планеты; например, Луна характеризуется синхронным вращением вокруг Земли.
- Сканирующий электронный микроскоп (scanning electron microscope)** — прибор, в котором тщательно сфокусированный и контролируемый пучок электронов создает изображение путем воспроизведения на катодно-лучевой трубке отраженных и испускаемых с различной интенсивностью электронов; применяется при исследовании детальной морфологии поверхности.
- Складка (fold)** — изгиб или искривление пласта горных пород и плоскостного структурного элемента.
- Склоновые процессы (mass wasting)** — термин для обозначения ряда природных процессов, при которых происходит перемещение обломочного материала вниз по склону под влиянием гравитационных сил.
- Скорость убегания (escape velocity)** — скорость, необходимая для выхода данного объекта за пределы сферы притяжения планетного тела; скорость, необходимая для изменения планетной орбиты.
- Солнечная система (Solar System)** — вся материя и все космическое пространство в сфере притяжения Солнца.
- Стекло (glass)** — твердое вещество, состав которого может изменяться в широком диапазоне; дальний структурный порядок отсутствует.
- СТИШОВИТ (stishovite)** — крайне высокобарная полиморфная модификация двуокси кремния, которая обычно образуется при преобразовании кварца в условиях кратковременного, но очень высокого давления, вызванного ударной волной при высокоскоростном ударе. Впервые синтезирован в лаборатории советскими экспериментаторами; в настоящее время обнаружен в некоторых земных ударных кратерах, в том числе в Аризонском метеоритном кратере и кратере Рис в ФРГ.

- Стратиграфия** (stratigraphy) — ветвь геологической науки, изучающая последовательность формирования слоистых геологических тел и хронологию геологических событий.
- Субофитовая** (subophitic) — не вполне офитовая; слабо выраженная офитовая структура; структура горных пород, в которых выделения клинопироксена частично выполняют промежутки между кристаллами плагноклаза, поскольку обычно эти кристаллы имеют примерно одинаковые размеры.
- С эксцессом меньше нормального** (platykurtic) — термин, применяемый для описания эксцесса гранулометрической кривой распределения; означает сильную сглаженность этой кривой.
- Тетоморфный** (thetomorph) — кристалл минерала, утративший дальний порядок своей структуры (превратившийся в стекло) при воздействии ударной волны без изменения своего агрегатного состояния с сохранением кристаллографического габитуса. Иногда употребляется в качестве синонима термина «диаплектовое стекло»; идиоморфное диаплектовое стекло.
- Трещина** (joint) — нарушение физической сплошности горных пород без относительного перемещения их блоков.
- Тридимит** (tridymite) — полиморфная модификация двуокиси кремния, обычно встречается в некоторых земных вулканических породах и в качестве второстепенного минерала в некоторых метеоритах.
- Троилит** (troilite) — минерал, отвечающий по составу FeS , аналогичный пирротину, но практически соответствующий стехиометрической формуле. Обычный акцессорный минерал железных и большинства каменных метеоритов.
- Троктолит** (troctolite) — изверженная порода, состоящая в основном из кальциевого плагноклаза и оливина с небольшой примесью пироксена; последний может отсутствовать.
- Туф** (вулканический) [tuff (volcanic)] — пирокластическая вулканическая порода, в которой могут содержаться обломки горных пород самых разных размеров; обломки могут быть из сопутствующих вулканических и иных вмещающих пород.
- Тэнит** (taenite) — природная кубическая модификация самородного железа (γ — железо) с гранцентрированной решеткой; синоним: аустенит; обычно встречается в метеоритах.
- Ударная волна** (shock wave) — волна сжатия, воздействие которой ограничено чрезвычайно коротким промежутком времени, причем развивается очень высокое давление; возникает при высокоскоростном ударе или взрыве.
- Ударные плоскости** (planar features; синоним: planar structures, planar elements) — системы параллельных, закономерно ориентированных плоскостей, развивающихся в результате ударного метаморфизма в таких минералах, как кварц и полевой шпат; вероятнее всего, представлены стекловатой фазой, образующейся при трансформации минерала-хозяина или «короткоживущей» фазы, возникающей в результате прохождения ударной волны.
- Ударный расплав** (impact melt) — часть материала мишени, плавление которого вызвано высокоскоростным ударником; расплав горных пород, сформированный на поверхности планеты или в ее недрах при высокоскоростном ударе метеорита, астероида или кометы.
- Ульвошпинель** (ulvöspinel) — минерал, отвечающий по составу формуле Fe_2TiO_4 , обычно встречается в виде мелких пластинок распада твердого раствора в магнетите.
- Фаза** (phase) — вещество с определенным диапазоном изменения химического состава и определенной кристаллической структурой. Природные фазы называют минеральными фазами или просто минералами.

- Фазовый угол** (phase angle) — обычно это угол между направлением от светила на отражающую поверхность и от этой поверхности на наблюдателя, например Солнце — Луна — Земля.
- Фаялит** (fayalite) — оливин, обогащенный железом. См. *оливин*.
- Фи-шкала** (φ-scale) — логарифмическая шкала измерения размеров (диаметров) частиц, в которой принято: $0\phi = 1$ мм, $1\phi = 500$ мкм, $2\phi = 250$ мкм, $4\phi = 62,5$ мкм и т. д.; обычно применяется для измерения размеров частиц как в земных, так и лунных образцах; размер в фи-единицах соответствует логарифму диаметра в мм при основании 2 (\log_2).
- Фладен** (fladen) — выбросы, представленные стекловатым материалом ударного происхождения, сохранившим достаточную для деформаций пластичность при обратном выпадении на поверхность.
- Форстерит** (forsterite) — оливин, обогащенный магнием; см. *оливин*.
- Фульгурит** (fulgurite) — стекловатые продукты плавления земных пород, возникновение которых вызвано разрядом молний; обычно полые трубчатые образования или корочки на поверхности горных пород.
- Харризитовая** (harrisitic) — изверженная горная порода с кристаллами оливина, размеры которых превышают размеры выделений остальных компонентов породы; длинные оси этих кристаллов ориентированы примерно перпендикулярно кумулятивному агрегату данной породы.
- Хондрит** (chondrite) — тип каменных метеоритов, характеризующийся наличием хондр; сюда же в соответствии с геохимическими критериями относятся углистые хондриты типа I, в которых хондры отсутствуют.
- Хондры** (chondrules) — сферические и полусферические силикатные образования, характерные для каменных метеоритов определенного типа; встречены в некоторых лунных образцах. Размеры хондр варьируют от 10 мм до 1 мм; в основном сложены стеклом, оливином, пироксеном, плагиоклазом или агрегатом этих минералов.
- Хромит** (chromite) — шпинель с высоким содержанием хрома; см. *шпинель*.
- Циркон** (zircon) — минерал тетрагональной сингонии, состав которого соответствует $ZrSiO_4$. Обычный акцессорный минерал гранитоидов, встречается также и в некоторых метеоритах. При низких температурах и давлениях характеризуется высокой химической устойчивостью и относится к широко распространенным второстепенным компонентам многих земных обломочных осадочных пород.
- Шлиры** (schlieren) — полосы (особенно состоящие из стекла), отличающиеся от окружающей среды по цвету и (или) величине показателя преломления.
- Шпинель** (spinel) — группа минералов с общей формулой вида AB_2O_4 ; сюда входят магнетит ($FeFe_2O_4$), $MgAl_2O_4$ (иногда этот минерал называют «шпинелью») и многие другие минералы.
- Шрейберзит** (schreibersite) — обычный минерал метеоритов, особенно железных; цвет белый до светло-желтого (Fe, Ni) $_3P$; в старых литературных источниках называют рабдитом.
- Щит** (shield). 1. В земной коре крупный блок континентального корового материала, состав которого отвечает гранитам; в течение длительного периода геологического времени остается сравнительно стабильным и недеформированным. 2. Вулканическая постройка занимает обширную площадь, характеризуется в основном пологими склонами; к типичным щитам относятся крупные базальтовые вулканы, такие, как Мауна-Лоа и Мауна-Кеа.
- Щитовой вулкан** (shield volcano) — обширная вулканическая постройка, характеризуется пологими склонами (обычно углы склонов составляют несколько градусов); общая форма напоминает щит бойцов древних эпох; обычно щитовые вулканы сложены многочисленными базаль-

товыми потоками с низкой вязкостью, например Мауна-Лоа на Гавайских островах.

Эксцентриситет (eccentricity) — в общей астрономии отклонение формы орбиты от правильного круга; орбиту, имеющую эллиптическую вытянутую форму, называют орбитой с «высоким» эксцентриситетом, почти круговая орбита — это орбита с «низким» эксцентриситетом.

Экцесс (kurtosis) — мера сглаженности кривой распределения. Обычно используют термины leptokurtic (экцесс, превышающий экцесс нормального распределения), mesokurtic (имеющий нормальный экцесс) и platykurtic (экцесс меньше нормального).

Электронный микрозонд (electron microprobe) — анализатор, применяемый для определения минералов на небольшом участке в полированных шлифах. В приборе происходит тонкая фокусировка электронного пучка на минеральное зерно и возбуждается характеристическое рентгеновское излучение элементов, входящих в состав минерала. Длины волн флуоресцентных рентгеновских лучей определяют с помощью спектрометра или детектора, а их интенсивность сравнивается с эталонным образцом; химический состав может быть вычислен непосредственно путем ввода поправок в величины интенсивности.

Энстатит (enstatite) — минерал из группы ортопироксенов с приближительной формулой $MgSiO_3$.

Эоловый (aeolian, eolian) — относится к деятельности ветра, обычно к осадкам, отложение которых обусловлено деятельностью ветра, а также к формам поверхности, образовавшимся под действием ветропесчаного потока.

P-волна (P-wave) — продольная сейсмическая волна, «первичная» сейсмическая волна.

S-волна (S-wave) — поперечная сейсмическая волна.

ПРЕДМЕТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ

- Австралиты 88
Агглютинаты стекловатые 231
Алмаз в железном метеорите 64
Амальтея JV 348
Аминокислоты в метеорите *Murchison* 35
Амфотериты 37
Ангриты 50, 52
Армалколит 206
Астероиды, гипотеза «струйных потоков» 318
— новые семейства 317
— определение размеров 318
— полупериод жизни 316
— распределение по массам 321
Атаксит 61
— Тласотерес 57
Атамантис 322
Атмосфера Венеры 341
— Луны 178
— Марса 302—304
— — давление 303
Ахондриты 49
— базальтовые 50
— классификация 50
— лунного происхождения 55
— происхождение 53
— Cumberland Falls 53
Бадделеит 91, 156—158
Базальты Фра-Мауро 213
— KREEP 215
Барринджер 115
Бедназит 85
Болид 10, 330
Большое красное пятно 346, 347
Венера 341—345
Веста 312, 322
Видманштеттеновы фигуры 58, 59, 66, 68
Вода на Марсе, содержание 303
Возраст кристаллизации лунных пород 219
— лунного грунта 246
— лунных пород 220
— метеоритов 74
— поверхности Луны 191
— хондритов 75
Волнистое погасание 165
Воронки проникновения 121
Временные явления на лунной поверхности 194
Время остывания волокнистых выбросов 107
Вулканизм Марса 284

- «Галилеевы» спутники 348
 Галлий в метеоритах 62
 Ганимед 348
 Гексаэдрит 57, 61
 — Coya Norte 57
 Гектор 320
 Гематит 159
 Геолого-геоморфологическая карта
 Марса 300, 301
 Геофизика Марса 299
 Германий в метеоритах 62
 Гидратированные минералы лун-
 ных образцов 221
 Говардиты 50, 52, 53
 — химический состав 54
 Группа Хильды 317
- «Двойной планеты», гипотеза 264
 Деймос 304, 306
 Дембовска 322
 Диаплектовые стекла 161
 Диогениты 50
 Дифференциация планет 355
- Европа 348
- Железные метеориты** 55
 — — классификация 58
 — — скорость остывания 64
 — — химический состав 57
Железный метеорит Turtle River
 60
 — — *Xiquipilco* 60
Железокаменные метеориты 66—72
Жизнь на Марсе 308
- Закон Бодэ** 311, 313
Зандровые отложения на Марсе
 294
Захвата, гипотеза 263
Звездная величина 320
Зювит 131, 138, 168
- Идуна** 322
Изотопные отношения стронция
 в метеорите Allende 31
 — — — в стеклах тектитов 91
«Изъеденные» равнины 295, 296
Ильменит 159, 211
Имбрийское ударное событие 220,
 248
Импактиты 140, 165
Индошиниты 87
Ио 348
«Исчезнувшая планета» 312
- Каллисто** 348
Камасит 24
«Каналы» Марса 279, 281
Каньоны 291
Кома 332
Комета Аренда-Роланда 331
 — Галлея 327, 328
 — Когоутека 328
Кометы «долгопериодические»
 329
 — «ежегодные» 329
 — короткопериодические 329
 — происхождение 330-332
 — размеры 330-332
 — состав 330
 — структура 330
Континентальный дрейф на Марсе
 291
Конусы разрушения 169
Коэсит 152-155
Кратер Аризонский, метеоритный
 101, 107, 114—119, 152, 153
 — Боксхол 135
 — Босумтви 91
 — Брент 122
 — Вольтер 306
 — Вулф-Крик 133
 — Госсес-Блафф 135, 137
 — Далгаранга 135
 — Дип-Бэй 127, 128
 — Кун-Бютт 115
 — Кун-Маунтин 115

- Кэньон-Дьябло 115
- Маникуаган 103
- Маунд 115
- Нью-Квебек 122
- Одесса 119-121
- озеро Клируотер 129
- озеро Кутюр 130
- Рис 91, 131
- Рис-Кессель 131
- Свифт 306
- Седан 98
- Унгава 122
- Хэвиленд 121, 122
- Чабб 122
- Кратеры Вабар 140
- Канады, перечень 123
- Кратеры Марса 296-298
- Хенбери 138
- Эль-Хадида 140, 142
- Кривая Гюгонио 105
- Криповзрывы 111

- Лёсс на Марсе 294, 295
- Лешательерит 158, 159
- Либрация 178
- Лодраниты 66
- Луна, автометаморфизованные
брекчии 241
- брекчии 239
- включения расплава в породах
222
- возраст 219, 220, 246
- временные явления на поверх-
ности 194
- гамма-излучение валовых проб
218
- геофизическая модель 234
- геохимия, возраст, физические
свойства брекчии и грунта 246
- гипотеза отделения 262
- давление атмосферы 178
- история кристаллизации пород
220
- когезия грунта 238
- кристаллические породы со
структурой изверженных пород
198
- лазерная альтиметрия 260
- микробрекчии 239
- органические и биологические
анализы образцов 251
- остаточная намагниченность
250
- отношение масс U/Th в породах
219
- — — K/U в породах 219
- Луна, плотность 195
- — базальтовых пород 259
- пористость грунта 238
- породообразующие минералы
207
- происхождение 262
- — магм 225
- размеры ядра 261
- скорость распространения сейс-
мических волн 252
- состав брекчии 250
- — минералов 205
- — пород 213
- — реголита 250
- структуры морских пород 200
- тектоника 255
- температура ядра 255
- тепловой поток на поверхности
254
- Лунотрясения 255

- Магнетит 159
- Марс, общая характеристика
283
- Маскелинит 161, 162
- Масконы 255, 259-261
- Массы планет земной группы 353
- Мезосидерит в лунных брекчиях
249
- Mt. Padbury 71
- Мезосидериты 70
- скорость остывания 72
- Меркурий 334—340

- Метеорит Brenham 121
 — Canyon Diablo 54
 Метеорит Cape York 57
 — Cumberland Falls 52
 — Faucett 40
 — Grant 63
 — Henville 56, 65
 — Нова 55
 — Hvittis 39, 46
 — Lodran 66
 — Lost City 76
 — Nakhla 52
 — Prigram 76
 — Pueblito de Allende 23, 28-33
 — Steinваск 66
 Метеориты, возраст 74
 — классификация Розе-Чермака-Бржезины 22
 — содержащие свободный кремнезем, 46
 Микрометеориты 72
 Минералы метеоритов, перечень 13
 Молдавиты 84, 91
- Наклиты 50, 52
 Находка 10, 12
 Неймановы линии 64
 Нептун 349
 Никелистое железо в паласитах 67
- «Облако Оорта» 332
 Обрит Рея Blanca Springs 52
 Обриты 50, 52
 Окна Кирквуда 313, 314
 Октаэдрит Canyon Diablo 57
 — Carthage 56
 — Henville 56
 — Odessa 58
 Октаэдриты 57, 59, 120
 Оливины лунных пород 211
 — мезосидеритов 70
 — обыкновенных хондритов 36
 — паласитов 69
- Орбитальная гамма-спектрометрия и рентгенометрия 261
 Органические и биологические анализы лунных образцов 251
 — соединения в углистых хондритах 33
 Откосы на Марсе 292
 Отложения обратных выпадений 131
 Отношения масс элементов в лунных породах 219
- Падение 10, 12, 26
 — Alais 26
 — Revelstoke 26
 Паллада 312, 322
 Палласит Brenham 69
 — Salta 68
 — Ollague 67
 Палласиты 66, 68, 69, 121
 Пепельный свет 176
 Пироксены лунных пород 209
 Пироксферроит 200, 205
 Плагноклаз лунный 208
 Планеты, внутреннее состояние 356
 Планеты, тектоническое строение 357
 Плессит 61
 Плоскостные элементы 161
 Плотность Земли средняя 263
 — Луны средняя 262
 — планет земной группы 353
 — реголита 237
 Плутон 349
 Полосы излома 164, 165
 Полярные шапки Марса 293
 Пояс астероидов 312—314
 Правило Прайора 22
 Предел Роша 307
 Псевдобрукит 159
 Псевдотахилиты 169
 «Пуговицы» 86
 Пустоты и пузырьки в хондрах 31, 32

- Реголит Луны 190, 215
 — — гранулометрический анализ 235
 — — модальные анализы 232
 — — мощность 191
 — — плотность 237
 — — состав 228
 — — физические свойства 237
 Реголит Меркурия 340
 Реголитовые брекчии 241
 Руслы 289, 290
 Рутил 159
 Сатурн 349
 Семейства Брауэра 316
 — Флоры 317
 — Хираямы 316
 Сидерофилы 66
 Скорость остывания мезосидеритов 72
 Слоистые отложения на Марсе 292, 295
 «Соизмеримости» 313
 Состав лунного реголита 228
 — лунных пород 200, 213
 — Марса 299
 — минералов Луны 205
 — планет 353, 354
 — поверхностного слоя Марса 299
 — тектитов 90
 — хондритов 18
 — — обыкновенных 37
 — — углистых 27
 — эвкритов 54
 Спутники Марса 304-307
 — Юпитера 348
 Стекло Ливийской пустыни 158, 159
 Стекланные частицы правильной формы 229
 Стишовит 155, 156
 Тектиты 91, 215
 — основные группы 86
 — происхождение 90-94
 — химический состав 90
 Тирренская патера, вулкан 286, 287
 Торо 321
 Транквиллитит 206, 207
 Трансформные разломы на Марсе 291
 Тритон 349
 Троянцы 314, 315
 Тэнит 24
 Углеводороды в метеорите Murchison 35
 Ударная структура Brent 126
 — — Садбери 124, 125
 — — Уэст-Хок-Лейк 129
 — — Халлефорд 127
 Ударно-метаморфизованные породы и ударные дефекты, классификация 173
 Ударные брекчии 167
 — кратеры земные, перечень 113, 123
 — — — критерии распознавания 143
 — — микрометеороидные 72
 — ламели 161
 — плоскости 161
 — стекла 166
 Ударный метаморфизм 151, 225
 — — классификация стадий 172
 Удельный вес оливин-гиперстеновых хондритов 38
 — — энстатитовых хондритов 41
 Уравнение Рэнкина-Гюгонио 104
 Уран 349
 — открытие планеты 312
 Уреилиты 50
 Уступы на Марсе 292, 294
 Фарсид, хребет 297
 Фладены 131, 172
 Фобос 304, 305
 Фра-Мауро, формация 241
 Фульгуриты 84, 158, 167

- Халькопирит 159
 «Хаотический рельеф» 291, 294
 Хондрит Murchison 29
 — эвстатитовый 39, 41, 44, 45
 Хондриты, классификация 18
 — — Ван-Шмуса и Вуда 23—25
 — модель прогрессивного метаморфизма 23
 — неравновесные 39, 42
 — обыкновенные 35
 — — модальный состав 37
 — равновесные 39, 42, 321
 — радиационный возраст 75
 — средний химический состав 18
 — углистые 215, 217
 — — классификация 26
 — — химический состав 27
 — удельный вес 38
 Хондронды 243
 Хондры 17, 19
 — лунные 243
 — происхождение 43
- Центральные горки 103
 Церера 312
- Черный камень Кааба 9
- Шассиньбиты 50, 52
 «Шип» 332
 Шпинель 159
 Штейнхем, бассейн 133
 Штопфенхейм, купол 133
- Эвкрит Pasamonte 51
 — Shergotty 54, 162
 Эвкриты 50-53, 215
 — химический состав 54
 Эллада 297, 304
 Эоловые наносы Марса 287, 297
 — процессы атмосферы Марса 286
 Эос 322
 Эффект Агрелла 63
- Южное пятно Марса 285
 Юнона 312
 Юпитер 346—348

Оглавление

ПРЕДИСЛОВИЕ РЕДАКТОРА ПЕРЕВОДА	5
ПРЕДИСЛОВИЕ	7
1. МЕТЕОРИТЫ	9
2. ТЕКТИТЫ	84
3. КРАТЕРЫ	96
4. ЗЕМНЫЕ УДАРНЫЕ КРАТЕРЫ	111
5. УДАРНЫЙ МЕТАМОРФИЗМ	151
6. ЛУНА	176
7. МАРС	278
8. АСТЕРОИДЫ	312
9. КОМЕТЫ	326
10. ДРУГИЕ ПЛАНЕТЫ И ИХ СПУТНИКИ	334
II. СРАВНИТЕЛЬНАЯ ПЛАНЕТОЛОГИЯ	352
СЛОВАРЬ	359
ПРЕДМЕТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ	373

УВАЖАЕМЫЙ ЧИТАТЕЛЬ!

Ваши замечания о содержании книги, ее оформлении, качестве перевода и другие просим присылать по адресу: 129820, Москва, И-110, ГСП, 1-й Рижский пер., 2, издательство «Мир».

Э. Кинг

КОСМИЧЕСКАЯ ГЕОЛОГИЯ

ВВЕДЕНИЕ

Научный редактор В. Краснова
Младший редактор Г. Кустрей
Художник В. Чернецов
Художественный редактор Б. Юдкин
Технический редактор Л. Чуркина
Корректор В. Киселева

ИБ № 1533

Сдано в набор 25.09.78.
Подписано к печати 15.03.79.
Формат 60×90^{1/16}.
Бумага мелованная.
Гарнитура обыкновенная. Печать высокая.
Объем 12 бум. л. 24 печ. л. Уч.-изд. л. 24,46
Изд. № 5/9770. Тираж 2800 экз. Зак. № 0923. Цена 4 руб.

Издательство «Мир»
Москва, 1-й Рижский пер., 2.

Ордена Трудового Красного Знамени Московская типография № 7
«Искра революции» Союзполиграфпрома Государственного
комитета СССР по делам издательств, полиграфии и книжной торговли.
Москва, 103001, Трехпрудный пер., 9

**Издательство «Мир»
выпускает в 1979 году
книги зарубежных ученых по геологии**

ЙОДЕР Х. Образование базальтовой магмы: Пер. с англ. — 15 л. — 2 р. 10 к.

Крупное научное обобщение экспериментальных и геохимических данных, охватывающее все главные вопросы генерации базальтовых расплавов: источники магмы, глубина выплавления, физико-химические условия дифференциации, энергетические и тектонофизические аспекты, состав главных типов базальтовых магм и т.п.

Высокий научный уровень монографии, критическая оценка различных экспериментальных данных, четкий и непринужденный стиль изложения делают эту книгу чрезвычайно полезной для широкого круга геологов, петрологов, геохимиков, а также преподавателей и студентов соответствующих специальностей.

План 1979 г., № 138

КИНГ Ф. Докембрийская геология США: Пер. с англ. — 12 л. — 1 р. 80 к.

Краткий сводный очерк по геологии докембрия США. Рассматривается региональное распространение докембрийских пород, их расчленение, корреляция, литологические особенности. Все это представляет ценный материал для сравнительной характеристики этих древнейших образований в различных районах мира. В заключение дан обзор истории геологического развития Северо-Американского материка в докембрии.

Книга представляет интерес для широкого круга геологов научно-исследовательских и производственных организаций.

План 1979 г., № 139

КОЛМАН Р. Офиолиты: Пер. с англ. — 18 л. — 2 р. 90 к.

В книге впервые всесторонне рассматриваются строение и состав офиолитовых комплексов мира и проводится их сопоставление с корой современных океанов. Дана подробная характеристика петрологии офиолитов, их геохимии, геологических условий формирования, связанных с этими породами рудных месторождений.

Большая актуальность проблемы офиолитов и отсутствие подобного руководства в отечественной литературе делают книгу весьма полезной для широкого круга геологов, петрографов, геохимиков научно-исследовательских и производственных организаций, а также преподавателей и студентов геологических учебных заведений.

План 1979 г., № 141

МАЙСЕН Б., БЕТТЧЕР А. Плавление водосодержащей мантии: Пер. с англ. — 10 л. — 1 р. 80 к.

Первое крупное обобщение экспериментальных исследований плавления горных пород при высоких давлениях и температурах в присутствии летучих компонентов, в первую очередь воды. На современном уровне развития геологической науки такие исследования представляют основу для построения петрологических моделей образования магматических расплавов в условиях верхней мантии.

Большой фактический материал, важные петрогенетические выводы, описание деталей техники эксперимента представляют большой интерес для широкого круга геологов, особенно специалистов в области физико-химической петрологии, минералогов-экспериментаторов, геофизиков и геохимиков.

План 1979 г., № 142

БАУМАН Л., ТИШЕНДОРФ Г. Введение в металлогению — минерогению: Пер. с нем. — 30 л. — 4 р. 30 к.

В книге изложены основы анализа региональных закономерностей формирования и размещения месторождений полезных ископаемых с позиций геотектоники, магматизма, литологии, метаморфизма, геохимии, характеристика металлогенических эпох и провинций, а также минерогения ископаемых солей, горючего сырья и подземных вод. Рассмотрены типы минерогенических карт и методы их составления.

Написанная как учебное пособие, книга по своему научному уровню и актуальности рассматриваемых проблем относится к произведениям, представляющим большой интерес для широких кругов геологов производственных и научно-исследовательских организаций.

План 1979 г., № 143

ЗАРУБА К., МЕНЦЛ В. Инженерная геология: Пер. с англ. — 35 л. — 4 р. 90 к.

В монографии приводится большой и интересный материал теоретического и методического плана, характеризующий инженерно-геологические исследования при строительстве плотин, водохранилищ, гидроэлектростанций, тоннелей, дорог, городских и других сооружений. Рассмотрены механические свойства пород, их выветривание, движение склонов и т. п.

Книга с большим успехом будет использована как учебное пособие в высших геологических и инженерно-строительных учебных заведениях. В то же время это — ценная монография, знакомящая специалистов с зарубежным опытом решения инженерно-геологических проблем при строительстве различных сооружений.

План 1979 г., № 144

2868

КОСМИЧЕСКАЯ ГЕОЛОГИЯ

ИЗДАТЕЛЬСТВО «МИР»