

**ЭТА ПУБЛИКАЦИЯ ПРЕДСТАВЛЯЕТ СОБОЙ ВТОРОЕ  
ИСПРАВЛЕННОЕ ИЗДАНИЕ КНИГИ**

Шкуратов Ю. Г. Луна далекая и близкая – Харьков: ХНУ, 2006. – 182 с.

*Отзывы о книге можно направлять по адресу:*

[shkuratov@astron.kharkov.ua](mailto:shkuratov@astron.kharkov.ua)

ХАРЬКОВ

2008 г.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ РЕДАКТОРА.....	3
ПРЕДИСЛОВИЕ АВТОРА .....	4
ВВЕДЕНИЕ.....	7
1. ЛУНА, КАКОЙ ОНА ВИДНА ИЗДАЛЕКА.....	12
1.1. Начало селенографии.....	12
1.2. Описание поверхности с помощью телескопа.....	25
1.3. Нестационарные явления.....	37
2. ИССЛЕДОВАНИЯ ЛУНЫ КОСМИЧЕСКИМИ ЗОНДАМИ И ЭКСПЕДИЦИЯМИ.....	45
2.1. Хронология запусков беспилотных аппаратов.....	46
2.2. Цели и результаты полетов автоматических станций.....	61
2.3. Очерк истории пилотируемых полетов к Луне.....	87
2.4. Результаты и уроки экспедиций «Аполлон».....	102
3. КЛАССИЧЕСКАЯ ОПТИКА ЛУНЫ.....	127
3.1. Фотометрия .....	128
3.2. Спектрофотометрия и колориметрия.....	160
3.3. Поляриметрия .....	177
4. ПРОГНОЗИРОВАНИЕ СВОЙСТВ ПОВЕРХНОСТИ ПО КОЛОРИМЕТРИЧЕСКИМ ДАНЫМ.....	191
4.1. Химический состав реголита .....	191
4.2. Содержание минералов и зрелость реголита.....	203
4.3. Толщина реголитового слоя.....	211
4.4. Содержание гелия-3 в реголите.....	216
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	223
ЛИТЕРАТУРА .....	227

## ПРЕДИСЛОВИЕ РЕДАКТОРА

Эта книга – неординарное событие в развитии астрономии нашей страны. Она является уникальным экскурсом в историю исследований Луны и одновременно введением в современные задачи изучения оптических свойств лунной поверхности. В книге обсуждаются, в частности, результаты, полученные на Харьковской астрономической обсерватории (ныне НИИ Астрономии ХНУ им. В. Н. Каразина). Эта обсерватория долго лидировала в СССР в области астрофизических исследований Луны, которые проводились под руководством академика Н. П. Барабашова. Сейчас в старейшем научном учреждении Украины наблюдается своеобразный ренессанс лунной тематики, что отражает общее повышение интереса к Луне, как объекту, перспективному для будущего освоения человечеством. Книга публикуется очень своевременно. В 2008 году исполняется 200 лет астрономии в Харькове, а по большому счету, – астрономии всей Украины. Следует особо подчеркнуть, что книга написана крупным и авторитетным специалистом в области физики планетных поверхностей и рассеяния света объектами со сложной структурой, поэтому читатель получит из первых рук много новой, а главное, правильно взвешенной информации. Книга написана увлекательно, искренне, с большой любовью к нашему извечному спутнику, Луне, и людям, которые ее исследовали. Это не удивительно, ее автор был когда-то любителем астрономии, и первые свои наблюдения Луны провел, будучи еще школьником.

Еще несколько слов об авторе. Шкуратов Юрий Григорьевич является директором НИИ Астрономии ХНУ им. В. Н. Каразина, сотрудником РИ НАНУ, доктором физико-математических наук, профессором, автором более 500 научных работ, Лауреатом государственной премии Украины и премии НАН Украины, членом международного астрономического союза и американского астрономического общества, со-руководителем и участником нескольких международных научных проектов, включая проекты CRDF и INTAS, проект ESA SMART-1 (раздел: «Исследования Луны с помощью камеры AMIE») и проект NASA «Поляриметрия Марса с помощью космического телескопа Хаббла». Именем Shkuratov назван астероид номер 12234.

Харьков, сентябрь 2006 года.

Академик НАНУ Л. Н. Литвиненко

## ПРЕДИСЛОВИЕ АВТОРА

*"... Луна – это застывший, запечатленный в отвердевших массах лавы облик Мира, каким он был миллиарды лет назад, когда раскаленная Земля вместе со своим спутником проносилась сквозь тучи метеоритов, остатков планетообразования, когда град железа и камней неустанно молотил по тонкой коре Луны, дырявил ее, выпуская на поверхность потоки магмы. И когда через бесконечно долгий срок очистилось и опустело окружающее пространство, шар, лишенный воздушной оболочки, сохранился, как омертвелое поле боя, как немой свидетель эпохи горообразовательных катаклизмов. А потом его изуродованная бомбардировками каменная маска стала источником вдохновения для поэтов и лирическим фонарем для влюбленных."*

Станислав Лем *"Навигатор Пиркс"*

Ничто так не возвышает людей, делая их жизнь осмысленной и интересной, как стремление понять устройство Вселенной; понять, какие законы управляют Миром и почему Мир таков, каким мы его видим. Луна – наш вечный спутник – маленькая частица Вселенной, часть Мира, окружающего нас. Она интриговала многие поколения людей, пробуждая в них любознательность и вдохновляя на созидание.

В изучении Луны можно условно выделить три этапа. Первый из них – это этап наивных суждений, когда Луна была скорее предметом мифологии и гуманитарного творчества, чем объектом научных исследований. Второй этап связан с изобретением телескопа. В период телескопических исследований наши знания о Луне возросли во много раз. Луна стала объектом науки, правда, казавшимся вплоть до середины прошлого столетия безнадежно далеким. С началом космических полетов к Луне наши знания о ней вновь возросли не соизмеримо с теми, что были накоплены ранее; это опять была революция. Луна стала заметно «ближе» к нам. То, насколько «ближе», можно проиллюстрировать историей, свидетелем которой был автор этой книги.

В 1999 году мне довелось быть на ежегодной Хьюстоновской Лунно-планетной конференции. Слушая доклад о новом фотогеологическом исследовании места посадки космического корабля «Аполлон-17» по снимкам высокого разрешения, я обратил внимание на

человека, сидящего рядом, чье лицо мне показалось знакомым, и который воспринимал доклад как-то необычно и даже нервно. Ситуация прояснилась, когда началось обсуждение доклада. Мой сосед выступил первым. Он начал критическое выступление словами, обращенными к докладчику: «То, о чем вы сейчас говорили, я, будучи на Луне, не видел ...». После этих слов я вспомнил говорившего, это был Гаррисон Шмитт – первый астронавт-геолог, побывавший на Луне.

Сейчас, в сравнении с другими астрономическими объектами, Луна – наиболее изученное тело. Во многом это связано с тем, что к ее исследованию подключились ученые из смежных областей науки. Но во времена, когда Луну исследовали только телескопическими методами, т. е. до того, как там побывал человек, Луна была вотчиной только астрономов; другие ученые лишь скромно присматривались к возможностям применения своих знаний к ее изучению. Так, известный советский геолог А. Б. Хабаков, один из пионеров лунной геологии, писал в 1949 году в книге «Геология Луны» следующее: «Сейчас, больше чем когда бы то ни было, ощущается потребность найти мост между владениями геологии и астрофизики ...».

В настоящее время ситуация совсем иная. С одной стороны, в исследованиях Луны все дисциплины переплелись столь сильно, что образное понятие «мост» уже не кажется уместным. С другой стороны, исследованиями Луны занимаются ученые из настолько разных областей науки, что это порождает иногда трудности общения. Проиллюстрировать различия подходов (а может, и психологии!) специалистов разного профиля можно следующей шуткой. На вопрос «Сколько будет  $2+2$ ?» астрометрист ответит: «4,000000000», астрофизик: «порядка 1», геолог: «вероятно, больше 2», геохимик: « $4\pm 2$ », геофизик: «сколько вы хотите получить?», астробиолог: «все зависит от репродуктивной способности этих пар» и т. д. Это показывает насколько трудно сейчас в одном обзоре охватить разные аспекты современных знаний о Луне.

В настоящей книге кратко излагается лишь история и некоторые современные результаты изучения лунной поверхности с помощью телескопов и космических средств. При этом используется опыт многолетних исследований Луны, проводящихся в Научно-исследовательском институте астрономии Харьковского национального университета им. В. Н. Каразина. В 2008 году Харьковской астрономии исполнится 200 лет, из них последние 90 лет в Харькове развивается лунно-планетная тематика, начало которой было положено академиками В. Г. Фесенковым и Н. П. Барабашовым.

Одна из задач этой книги состоит в том, чтобы показать, что развитие космических исследований Луны не зачеркивает необходимость и возможность продолжения ее наземных наблюдений. В современной ситуации изменилась лишь роль телескопических исследований;

они стали частью большого арсенала методов дистанционного зондирования лунной поверхности.

Книга состоит из четырех глав. Первая из них посвящена описанию лунной поверхности и истории ее исследований с помощью наземных телескопов. Здесь же мы касаемся интригующей истории изобретения телескопа. В следующей главе описываются исследования Луны с помощью космических средств. В частности дан краткий очерк лунной гонки, соревнования СССР и США за приоритеты в космических исследованиях Луны. Последние две главы написаны на основе многолетнего опыта, приобретенного автором и его коллегами по институту, в изучении оптических характеристик Луны по данным ее телескопических и космических исследований. Эти главы могут рассматриваться как краткое современное введение в проблему; в них также сформулированы некоторые нерешенные задачи. Несмотря на то, что книга местами описывает самые новые научные достижения, автор старался сделать ее максимально доступной широкому кругу читателей.

Многие научные аспекты, отраженные в этой книге, автору довелось обсуждать с иностранными коллегами, Александром Базилевским, Горденом Вайдином, Андреем Ивановым, Карри Муйноненом, Ольгой Николаевой, Карли Питерс, Патриком Пине, Джеймсом Хэдом, Владиславом Шевченко и другими. Приятно вспоминать многочисленные беседы с сотрудником ИРЭ НАНУ Ю. В. Корниенко, который на протяжении длительного времени в неформальном общении оказывает большое влияние на научные исследования, которые проводятся в Харьковской астрономической обсерватории. Автор благодарит за помощь и поддержку своих коллег по институту, Л. А. Акимова, Н. В. Бондаренко, С. Ю. Бондаренко, Ю. И. Великодского, Е. С. Гринько, Е. С. Зубко, В. Г. Кайдаша, В. В. Корохина, М. А. Креславского, А. А. Овчаренко, Н. В. Опанасенко, Д. В. Петрова, В. А. Псарева, Д. Г. Станкевича, Л. В. Старухину и др.; эта помощь способствовала улучшению книги.

Харьков, сентябрь 2006 года.

Ю. Г. Шкуратов

## ВВЕДЕНИЕ

Луна является единственным естественным спутником Земли. Она сформировалась немного позднее Земли. Согласно популярной сейчас гипотезе Камерона это произошло в результате столкновения Земли с телом размером с Марс. В результате такого столкновения большая часть образовавшихся фрагментов ударного выброса возвратилась на Землю, некоторая часть массы была потеряна из-за высоких скоростей фрагментов, а остатки выброшенного материала остались на орбите Земли, сформировав Луну, масса которой составляет всего 1/80 земной.

Луна проходила многоэтапную геологическую эволюцию. Некоторое представление об этом дают реконструкции облика Луны в разные эпохи, сделанные американскими геологами Вильгельмсом и Макколи. На рис. 1.1 показано видимое полушарие Луны, каким его можно было видеть (точнее, некому было видеть) примерно 3 миллиарда лет назад. На этом этапе образовались крупнейшие бассейны, которые, однако, к тому времени, еще не успели заполниться морской лавой. На рис. 1.2 показан вероятный вид Луны до ударных событий, приведших к образованию лучевых кратеров, таких как кратер Тихо, Аристарх и Коперник (их возраст несколько сотен миллионов лет). Такую Луну могли бы наблюдать с Земли древние живые организмы, если бы их интересовала астрономия. И, наконец, рис. 1.3 представляет современный облик Луны, который наблюдаем мы сейчас и который видели наши предки сотни и тысячи лет назад.



Рис. 1.1. Видимая сторона Луны, какой она могла быть в доморскую эпоху



Рис. 1.2. Видимая сторона Луны, какой она могла быть в эпоху до образования больших кратеров с яркими лучевыми системами



Рис. 1.3. Видимая сторона Луны в современную эпоху

Луна – синхронный спутник, т.е. период ее осевого вращения совпадает с периодом ее орбитального обращения вокруг Земли. Из-за этого Луна постоянно повернута к нам одной стороной. Это означает, что только около половины всей площади ее поверхности доступно наблюдениям с Земли. Благодаря либрации – небольшим периодическим вращательным

колебаниям Луны при ее обращении вокруг Земли – доля этой площади равна приблизительно 60%.

Современная орбита Луны отличается от первоначальной. В прошлом Луна была значительно ближе к Земле. Из-за приливного взаимодействия с Землей размер лунной орбиты увеличился, а вращение Луны стало синхронным. В таблице 1 приведены основные данные о Луне как о небесном теле в сравнении с Землей. Тесное взаимодействие этих двух небесных тел наиболее зримо проявляется в приливах в океанах Земли. Без Луны не было бы такой области земной биосферы, как полоса приливов и отливов вдоль берегов океанов; через нее вышли на сушу живые организмы. Не будет преувеличением сказать, что наша цивилизация обязана своим существованием приливам.

Таблица 1.

Сравнение характеристик Луны и Земли

Свойства	Луна	Земля
Масса	$7,353 \cdot 10^{22}$ кг	$5,976 \cdot 10^{24}$ кг
Радиус	1738 км	6371 км
Площадь поверхности	$37,9 \cdot 10^6$ км <sup>2</sup>	$510,1 \cdot 10^6$ км <sup>2</sup>
Сжатие	0,0005	0,0034
Средняя плотность	3,34 г/см <sup>3</sup>	5,517 г/см <sup>3</sup>
Ускорение на экваторе	1,62 м/сек <sup>2</sup>	9,81 м/сек <sup>2</sup>
Скорость убегания	2,38 км/сек	11,2 км/сек
Период вращения	27,322 дня	23,9345 час
Наклон экватора к плоскости эклиптики	1°32'	23°28'
Наклон экватора к плоскости орбиты	6°41'	23°28'
Средняя температура поверхности	-153°С, ночь – +107°С, день	22°С
Перепады температуры	-233 – +123°С	-89 – +58°С
Атмосфера	$\sim 10^4$ мол/см <sup>3</sup> , день $2 \cdot 10^5$ мол/см <sup>3</sup> , ночь	$2,5 \cdot 10^{19}$ мол/см <sup>3</sup>
Момент инерции	0,395	0,332
Средний тепловой поток	$\sim 29$ мватт/м <sup>2</sup>	63 мватт/м <sup>2</sup>
Магнитное поле	$\sim 0$	24-56 А/м

Луна обладает мощной корой (толщиной около 60 км), сравнительно однородной литосферой (60 – 1000 км), частично жидкой астеносферой (1000 – 1740 км) и возможно небольшим (железным?) ядром. Толщина коры больше на обратной стороне Луны. Некоторые породы обладают остаточной намагниченностью, что, вероятно, говорит о существовании в прошлом довольно сильного источника магнитного поля. Сейчас такого поля у Луны (или в ее окрестностях) нет. По изотопным отношениям определен возраст кристаллизации лунных

пород из мест посадок космических аппаратов. Он варьируется для разных мест. Самая старая найденная порода датируется примерно 3,8 миллиардами лет. Использование данных об абсолютном возрасте и параметров, описывающих распределение ударных кратеров, позволило создать надежный метод для оценок возраста твердой поверхности не только Луны, но других небесных тел, например, Меркурия, Венеры и Марса.

Луна сложена породами, большая часть которых прошла многочисленные этапы плавления и кристаллизации. Материковые породы представлены анортозитами (здесь доминирует полевой шпат), а морские – базальтами (в состав входит несколько минералов). Материал поверхности подвергся интенсивной метеоритной переработке, в результате которой образовался рыхлый слой (реголит) обломков пород и минералов, а также брекчий и агглютинатов. Лунные брекчии образовались в результате ударного литифицирования (окаменения) механических смесей фрагментов пород и минералов, включенных в матрицу более мелких частиц. Агглютинаты (спеки) появляются в результате ударов микрометеоритов. Частицы агглютинатов представляют собой обломки пород и минералов, сцементированные стеклами, которые образовались при ударном нагреве. Агглютинаты – наиболее измененная часть вещества лунной поверхности. Толщина реголитового слоя составляет примерно 4 метра в морях и 8 метров на материках. Средний размер реголитовых частиц составляет примерно 100 мкм. В реголитовом слое встречаются камни разных размеров, каменные поля часто наблюдаются и на самой поверхности.

Минералогия Луны сравнительно проста, поскольку минералы образовывались в отсутствие воды в резко восстановительных условиях. Основных минералов на лунной поверхности четыре: плагиоклаз ( $\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_8$ ), пироксен ( $(\text{Ca},\text{Mg},\text{Fe})_2\text{Si}_2\text{O}_6$ ), оливин ( $(\text{Mg},\text{Fe})_2\text{SiO}_4$ ) и ильменит ( $\text{FeTiO}_3$ ) (формулы для плагиоклаза, пироксена и оливина даны приблизительные; эти минералы образуют серии, в каждую входят минералы разного состава). Пропорция минералов сильно варьируется по поверхности, в частности, как уже отмечалось, плагиоклаз (полевой шпат) доминирует в материковом материале. В породах встречается металлическое железо, часть его имеет, вероятно, метеоритное происхождение. В лунных образцах обнаружено несколько новых минералов (ранее не известных на Земле), среди них минерал армолколит, названный так по именам первых лунных астронавтов: Армстронг, Олдридж и Коллинз. Его химическая формула имеет вид  $(\text{Fe}_{0,5}\text{Mg}_{0,5})\text{Ti}_2\text{O}_5$ .

Луна не имеет атмосферы, в том смысле, в каком говорят об этом применительно к Земле. Однако пространство вокруг Луны не пусто. В окрестности Луны имеется плазма, поля и пыль. Содержание  $\text{H}_2$  в атмосфере Луны может достигать  $10^5$  молекул на  $\text{см}^3$  на высотах порядка сотни километров.

Основной целью современных исследований лунной поверхности является получение информации, необходимой для понимания происхождения и эволюции Луны как небесного тела, а также для описания состояния материала ее поверхности и его взаимодействия с внешней средой. Сейчас активно изучаются перспективы колонизации Луны.

Луна исследуется с помощью большого арсенала дистанционных методов. Сутью дистанционных исследований Луны является измерение характеристик пространственных распределений статических полей, потоков частиц и электромагнитного излучения, порожденных в результате взаимодействия ее поверхности с соответствующими внешними или внутренними источниками. Примером статических полей является гравитационное и магнитное поля, потоков частиц – электроны и  $\alpha$ -частицы, электромагнитного излучения – свет, радиоволны, рентгеновское и гамма излучения.

До начала космических полетов дистанционное зондирование Луны практически сводилось к исследованию свойств рассеянного солнечного излучения в видимом и близком инфракрасном диапазонах длин волн. Однако даже такой довольно узкий спектр возможностей позволил в целом правильно предсказать физическое состояние поверхности и то, что эта поверхность сложена породами основного и ультраосновного состава.

Современные методы дистанционного исследования Луны ориентированы на использование космических аппаратов (далее КА). С помощью этих методов уже получено огромное количество информации о лунной поверхности. Тем не менее, эта информация, в сочетании с результатами продолжающихся традиционных наземных наблюдений и данных лабораторных исследований лунного грунта, является в значительной мере предварительной и далеко не полной. Ее следует рассматривать скорее как базу для постановки новых комплексных экспериментов по дистанционному зондированию. Наибольший объем информации о Луне был получен американскими астронавтами на космических кораблях (далее КК) серии «Аполлон». Эти экспедиции, которые даже сейчас, по прошествии 30 лет, кажутся фантастическими, позволили доставить на Землю более 400 кг лунного вещества.

Огромный объем данных о Луне был собран по крупицам многими поколениями ученых; каждая приведенная цифра, каждый установленный факт, как правило, имеет длинную, иногда драматическую историю. Некоторые эпизоды этой истории мы рассмотрим в следующих главах.

## 1. ЛУНА, КАКОЙ ОНА ВИДНА ИЗДАЛЕКА

Для Луны характерна смена фаз. Она вызвана изменением взаимного расположения Луны и Земли при их движении относительно Солнца. Угловое расстояние между направлениями Луна-Земля и Луна-Солнце принято называть фазовым углом. Это один из самых важных параметров в фотометрических исследованиях Луны. Условия освещения, определяющиеся, в частности, фазовым углом, сильно сказываются не только на внешнем виде деталей лунной поверхности, но иногда определяют возможность применения того или иного метода исследования ее оптических характеристик.

В этой главе для иллюстрации мы будем, в основном, использовать снимки, полученные наземными телескопами. Большинство космических изображений Луны дано в следующих главах.

### 1.1. Начало селенографии

Селенография – наука, изучающая лунную поверхность, – зародилась задолго до изобретения телескопа; ведь на лунном диске много деталей видно невооруженным глазом.

Наскальные рисунки, интерпретирующиеся как первые изображения Луны, относятся к очень древней эпохе. Они были найдены в Ирландии; их возраст составляет более 5000 лет. Вероятно, в доисторические времена и античный период предпринималось множество попыток изображать Луну, однако документированных данных об этом нет. Сохранились словесные «карты» Луны древних китайцев и американских индейцев. Интересно, что и те, и другие народы, несмотря на огромное расстояние, разделяющее их, видели в очертании лунных морей кролика. Это, вероятно, первый пример «астрономического открытия», сделанного независимо на разных континентах.

Суждения о природе деталей лунного диска у древних греков также были довольно наивными. Так, древнегреческий философ Аристотель (IV до н.э.) полагал, что поверхность Луны зеркальна, а пятна на ее диске являются отражением земных морей и суши. Отметим, что эта точка зрения, в том или ином виде, продержалась до начала 17 века. Здесь, однако, нельзя не сказать, что в трудах других древнегреческих философов, например, Эпименида (VI до н.э.), Фалеса (VI до н.э.), Анаксагора (VI до н.э.), говорится о Луне как о «горной земле». Также почти на два века раньше Аристотеля, философ-математик Пифагор и его последователи допускали мысль о том, что Луна во многом подобна Земле. В частности, пифагорец

Демокрит (V-IV до н.э.) считал, что причиной видимых различий на Луне являются тени, создаваемые неровностями ее поверхности.

Первые (из того, что сохранилось) качественные зарисовки Луны в полной фазе были сделаны Леонардо да Винчи в период между 1505 – 1508 годами (после того, когда он написал портрет Джоконды). На них хорошо отождествляются крупные моря восточной части лунного диска. Ни кратеров, ни лучевых систем на зарисовках да Винчи нет. Это означает, что Леонардо да Винчи никогда не видел Луны в телескоп. Такое замечание не кажется излишним, несмотря на то, что да Винчи жил на столетие ранее, чем Галилео Галилей, которому часто приписывают изобретение телескопа.

Действительно, история изобретения телескопа довольно запутана. Все необходимое для такого изобретения уже было в наличии задолго до начала 17 столетия – времени, когда, как считается, и был изобретен этот инструмент. Увеличительные и уменьшительные свойства, соответственно, выпуклых и вогнутых стекол были известны с античных времен. В конце тринадцатого века мастера Венеции и Флоренции научились делать линзы достаточно хорошего качества; появились очки для коррекции дальновзоркости. В середине 15 столетия в Италии стали делать очки с вогнутыми линзами для исправления близорукости. С этого времени телескоп, как простая комбинация выпуклого и вогнутого стекол, мог быть изобретен. Вероятно, это случалось неоднократно в разных местах Европы, однако такие изобретения, не получив должной оценки и применения, забывались. В частности, в семидесятых годах 16 столетия в Англии Леонард и Томас Диггесы сделали инструмент, состоящий из выпуклой линзы и зеркала, который можно рассматривать, как прототип телескопа (уже в наше время некто Колин Ронин умудрился даже воссоздать такой инструмент по чертежам Томаса Диггеса). Не исключено, что в конце 16 века в Италии также были мастера, владевшие секретом телескопа. В частности, некоторые историки считают, что телескопическое свойство линз было открыто в 1589 году Джамбатиста делла Порта из Неаполя.

По критериям патентования изобретателем телескопа должен считаться Ганс Липперсгей (см. рис. 1.4), голландский очков дел мастер из Миддельбурга. В конце сентября 1608 года он пытался официально зарегистрировать свое открытие зрительной трубы в правительстве Соединенных Штатов Нидерландов. За поддержание патента он соглашался платить немалые деньги. Претензии Липперсгея, правда, вызвали протесты нескольких мастеров-оптиков, которые сообщали в Гаагу – столицу Нидерландов, – что они также владеют этим секретом. В частности, некто Яков Метиус всего несколькими днями позднее Г. Липперсгея подал аналогичное прошение в Гаагу на выдачу патента. (Интересно отметить, что ни Г. Липперсгей, ни Я. Метиус не получили патента; официальный ответ был таков: «это

слишком просто для того, чтобы быть сохраненным в секрете»!). В архивах сохранились документы, из которых следует, что другой гражданин Миддельбурга, Захариас Жансен, примерно в тоже время пытался без лишнего шума продать телескоп на Франкфуртской ярмарке. Липперсгей был знаком с Жансеном, что дало повод некоторым современникам утверждать, что Липперсгей украл идею телескопа у Жансена. Сам же Липперсгей говорил, что на эту идею его случайно натолкнули дети, игравшие линзами в его оптическом магазине.



Рис. 1.4. Ганс Липперсгей (1570 – 1619), изобретатель телескопа

Начало исследований Луны с помощью телескопов относят обычно к 1609-10 годам. Однако история первых наблюдений Луны столь же не проста, как и история изобретения телескопа. Взглянуть на Луну через телескоп могли значительно раньше. Разве нельзя предположить, что первым на Луну посмотрел еще в 1589 году итальянский ученый Джамбатиста делла Порта, на которого ссылается один из современников Липперсгея, как на «истинного» изобретателя телескопа? Это мог быть и Ганс Липперсгей, и Яков Метиус, и Захариас Жансен или другие мастера-оптики, чьи имена не сохранились. Наконец, это мог быть и граф Мауриц – глава федерального правительства, командующий вооруженными силами Нидерландов, которому Ганс Липперсгей в сентябре 1608 года и привез свой телескоп для демонстрации полезности своего изобретения в военном деле.

Следует добавить, что в конце 1608 года Липперсгейем и другими мастерами было изготовлено несколько телескопов, которые быстро разошлись по Европе. В частности, один из них, вероятно в апреле 1609 года, попал в Италию в качестве подарка Папе Римскому Павлу V.

В то время в Риме существовала коллегия ученых-иезуитов, одной из задач которой было давать заключения по поводу важнейших научных достижений с точки зрения их соответствия церковным догмам. Известно, что упомянутый телескоп Липперсгея оказался в руках ученых этой коллегии, и они немедленно начали наблюдения неба. В их числе оказался иезуит Кристоффер Клавий. Это был известный ученый и преподаватель, которого современники называли Эвклидом своего времени, поскольку его книга «Геометрия» была наиболее распространенным учебником в школах западной Европы 16 – 17 столетия (Клавий также был одним из инициаторов замены Юлианского календаря Григорианским).

Естественно, что наблюдения иезуитов не сильно афишировались – они занимались не научными исследованиями, а выполняли конфиденциальное поручение Папы. Существуют указания, что астрономы-иезуиты открыли неровности на лунной поверхности раньше, чем это сделал Галилей, однако никаких зарисовок лунной поверхности того периода пока не найдено.

Неизвестно, сколько инструментов, сделанных Липперсгеем и, возможно, другими голландскими мастерами, разошлось в конце 1608 начале 1609 года по территории Европы «неофициально». В частности, главный астроном Ансбаха, Симон Мариус, пишет, что приобрел телескоп у некоего голландца и с лета 1609 года начал исследовать небо. Однако никаких результатов этих исследований пока не найдено.

Перечисленные сведения относительно возможных наблюдений Луны с помощью телескопа носят в большой степени предположительный характер. Кроме того, следует различать ситуации, когда человек просто взглянул на Луну через телескоп первым и когда он первым начал изучать ее систематически (например, делать зарисовки увиденного).

Первые документированные наблюдения Луны были проведены 26 июля 1609 года (по нашему календарю это было 5 августа 1609 года) английским математиком Томасом Хэрриотом и его помощником Кристоффером Туком. Слухи об изобретении Г. Липперсгея, дошедшие из Голландии осенью 1608 года, побудили Томаса Хэрриота (как и Галилео Галилея) построить собственный телескоп. Хотя Томас Хэрриот узнал об изобретении телескопа почти на полгода раньше Галилео Галилея, однако оба этих ученых построили собственные инструменты почти одновременно, в начале лета 1609 года. Это несколько странно, поскольку Томас Хэрриот, в отличие от Галилео Галилея, был оптиком с большим практическим опытом. Им (раньше Снеллиуса) был открыт закон преломления света. Он рассчитал положение первой радуги у водяных капель и измерил показатели преломления воды, стекла, спирта и некоторых других веществ, составив подробные таблицы. Об этом он писал в своих письмах Иоганну Кеплеру еще в 1606 году.



Рис. 1.5. Томас Хэрриот (1560–1621), английский математик, который провел первые документированные наблюдения Луны с помощью телескопа

Роль Хэрриота в первых телескопических исследованиях Луны малоизвестна. В основном, это связано с тем, что он почти не публиковал своих трудов, хотя и оставил большой научный архив (около 10000 страниц); между прочим, Хэрриоту мы обязаны математическими символами  $>$  и  $<$ , больше и меньше. Телескоп, с помощью которого он начал наблюдения Луны, был, вероятно, не очень совершенным. Во всяком случае, он был рассчитан на оптимальное увеличение не более 5 – 7 раз. Первая зарисовка Луны, сделанная Хэрриотом 26 июля 1609 года, почти не содержит деталей. Кратеров на ней не нарисовано, хотя линия терминатора изображена неровной, с несколькими выступами. Это говорит о том, что Хэрриот, вероятно, видел лунные горы. Томас Хэрриот возобновил телескопические наблюдения и зарисовки Луны только через год и то, возможно, под влиянием слухов о замечательных открытиях Галилея.

Галилео Галилей узнал об изобретении телескопа голландцами в июне 1609 года, о чем он пишет в своем «Звездном Вестнике». Галилей быстро разобрался в сути открытия и уже в июле начал создавать свои первые инструменты; Галилей был владельцем небольшой мастерской. В конце августа 1609 года он демонстрирует свой телескоп в Венеции знатным гражданам города и главе правительства, дожу Леонардо Донато. Свои первые регулярные наблюдения Луны Галилей, вероятно, начал вести, начиная с 30 ноября 1609 года, хотя в «Звездном Вестнике» он указывает дату первых наблюдений 7 января 1610 года. К тому времени он уже имел инструмент, позволяющий достичь примерно двадцатикратного увеличения.



Рис. 1.6. Одна из первых зарисовок Луны, сделанная Галилео Галилеем. В центре, вероятно, изображен кратер Альбатениус или Птолемей. В любом случае относительный размер этого кратера преувеличен

Важно, когда ученый, делающий открытие, профессионально и психологически подготовлен к нему. Возможно, подобное имело место с открытием Галилеем лунных кратеров. Галилео Галилею не были чужды изящные искусства; он был сыном Винченцо Галилея – музыканта и композитора, чьи произведения исполняются и в наше время. Галилео Галилей изучал теорию перспективы и тени по книге Альбрехта Дюрера «Обучение системе мер» (1528 год), был членом академии художеств Флоренции и имел множество друзей среди художников. Его способности к рисованию помогли ему правильно понять и квалифицированно отобразить на бумаге то, что он увидел на поверхности Луны. То, как непросто было изобразить Галилею увиденное, говорит одна из первых его зарисовок Луны, представленная на рис. 1.6. Здесь, вероятно, изображен кратер Альбатениус (некоторые считают, что это Птолемей), его относительный размер на рисунке заметно больше того, который должен быть. Дело в том, что поле зрения телескопа Галилея было слишком малым, чтобы наблюдать всю Луну; он мог только приблизительно соразмерить увиденное в телескоп с полным диском Луны.

Галилей не только открыл неровности лунной поверхности; он также, говоря современным языком, сделал этому открытию и другим своим астрономическим результатам быструю и солидную рекламу, опубликовав спустя всего несколько месяцев после начала наблюдений книгу «Звездный Вестник». Галилей первый описал лунные кратеры – наиболее распространенный тип поверхностных структур не только Луны, но и других тел без

атмосферы. Он считал, что хорошо видимые на Луне даже без телескопа темные пятна могут быть участками безводных низин. Он первым использовал метод определения высоты возвышенности по длине тени, применительно к лунным горам, и дал правильное объяснение тому, что Луна в полной фазе выглядит плоской за счет шероховатости ее поверхности.

В некоторых источниках утверждается, что применительно к Луне слова «море» и «материк» были впервые использованы Йоганном Кеплером. Однако можно определенно говорить, что эти названия стали применяться значительно раньше, со времен Древней Греции. До сих пор темные участки лунной поверхности традиционно называются «морями», а более светлые области «материками», хотя все понимают условность этой терминологии.

Начала лунной картографии теряются в веках. Если картой считать схематическое изображение крупнейших альбедных неоднородностей лунного диска с данными им названиями, то можно говорить, что первые карты Луны появились до изобретения телескопа. Известны зарисовки полной Луны с названиями нескольких образований, сделанные примерно в 1603 году Вильямом Гильбертом – первооткрывателем земного магнетизма. К сожалению, эти зарисовки были опубликованы лишь в 1651 году. На рисунках Гильберта можно угадать знакомые очертания лунных морей. Некоторым из них Гильберт дал названия. Например, область «*Regio Magma Orientalis*» хорошо отождествляется с Морем Дождей, а «*Britannia*» – с Морем Кризисов.

Первыми удачными попытками составить карты Луны в разных фазах по зарисовкам с помощью телескопа являются попытки фламандского математика Мишеля ван Лангрена и польского астронома Яна Гевелия. Оба этих ученых положили начало номенклатуре лунных образований. Однако до наших дней сохранилась только номенклатура Яна Гевелия, и то всего лишь шесть названий. В частности, им названы крупнейшие горные образования на видимом полушарии Луны – Апеннины, Альпы, Кавказ и Карпаты. На рис. 1.7 изображены Море Ясности и Море Спокойствия, которые на карте Яна Гевелия имеют общее название *Pontus Euxinus*, это латинское название Черного Моря.

Современная номенклатура лунных кратеров восходит к итальянскому астроному-иезуиту Джамбатиста Риччиоли. Используя довольно подробную карту Луны, вычерченную Франческо Гримальди, Риччиоли присвоил многим кратерам имена ученых Древней Греции и своих современников. Карта Гримальди – уникальный исторический документ. В частности, в верхней ее части имеется надпись: «Луна не обитаема, ни одна душа не бродит там»; это, вероятно, наиболее надежный научный факт, установленный селенологами за последние 360 лет.



Рис. 1.7. Фрагмент карты Яна Гевелия, опубликованной в 1647 году

Сохранилось около 200 наименований, данных Риччиоли. Им, в частности, был назван в честь Клавия огромный лунный кратер диаметром около 230 км. Кроме того, Риччиоли дал имя опального Коперника одному из самых красивых кратеров на Луне, обладающему яркой лучевой системой. Однако некоторые современники той эпохи оказались незаслуженно забытыми. Сейчас кажется странным, что в честь Галилео Галилея назван лишь небольшой кратер, диаметром около 15 км, расположенный, кстати, неподалеку от кратеров Риччиоли (диаметр 165 км) и Гримальди (диаметр 222 км). Ганс Липперсгей и Томас Хэрриот пострадали еще больше: именем первого назван скромный 7 км кратер (он расположен юго-западнее Прямой стены), а второй и того не имеет.

Надежные топографические карты Луны появились лишь в 19 столетии. Отметим карту Медлера, на которой нанесено около 6000 деталей. Эта карта была построена по результатам визуальных наблюдений, равно как и более поздняя карта Юлиуса Шмидта, содержащая более 34000 деталей. Много названий лунных деталей было дано в начале XIX столетия известным немецким астрономом Шретером (его обсерватория была сожжена войсками Наполеона в 1813 году) и Медлером.

Решение об упорядочении номенклатуры объектов лунной поверхности было принято Международным астрономическим союзом (МАС) в 1929 году. Результатом этого стал каталог лунных деталей Мэри Блэгг и Карла Мюллера. Позднее этот каталог не раз дополнялся и расширялся, в частности, за счет наименований объектов на обратной стороне Луны. В настоящее время имеют собственные имена несколько тысяч лунных деталей. Создано много топографических карт Луны с хорошей селенографической (координатной) привязкой, например, это Полная карта Луны ГАИШ МГУ, созданная под редакцией В. В. Шевченко. Следует отметить, что до сих пор существует проблема, связанная с точностью координатных систем различных топографических карт Луны. В частности, координатная система мозаик изображений, созданных по данным съемки КА «Клементина», в отдельных районах расходится с координатами существующих карт на десятки километров.

Здесь уместно сделать замечание об исчислении селенографических долгот. За начальный принимается меридиан, проходящий через центр видимого полушария Луны. Вправо от него идут восточные долготы, а влево западные, пока не встретятся в центре обратного полушария на меридиане  $180^\circ$ .

Историческим моментом в исследованиях Луны (в том числе картографических) было начало применения фотографии. Первый фотографический снимок Луны был сделан 23 января 1840 года англичанином Джоном Дрэпером с помощью 12 см рефлектора, время экспозиции было около 20 минут. С тех пор получение изображений, передающих распределение того или иного физического параметра лунной поверхности, например, яркости (обычная фотография), является важнейшим методом исследования Луны. Применение фотографии дало сильный импульс развитию лунной картографии. Были созданы фотографические атласы Луны – например, знаменитый атлас Пиккеринга. Вершиной фотографических исследований Луны с помощью наземного телескопа является фотографический атлас, изданный под редакцией Джерарда Койпера в 1960 году. Участки, покрывающие все видимое полушарие Луны (их около 40), сняты при разных условиях освещения. Пространственное разрешение некоторых изображений доходит до 800 м. Более высокой четкости изображений, полученных с Земли, добиться очень сложно из-за атмосферного дрожания изображений. В свое время атлас Койпера сыграл большую роль в развитии селенографии и космических исследованиях Луны. На рис. 1.8 показан фрагмент изображения из атласа Койпера, который включает кратер Платон с ровным дном. Диаметр этого кратера около 100 км; внутри него видны детали размером около километра.



Рис. 1.8. Изображение участка лунной поверхности, включающее кратер Платон, заимствованное из фотографического атласа Койпера

В последние годы, благодаря появлению цифровых панорамных приемников высокого качества (ПЗС матрицы и т. п.) и развитию методов обработки изображений, получение снимков высокого разрешения стало доступным любителям астрономии. Некоторые из любительских снимков превосходят по качеству даже фотографии из атласа Койпера. Так, на рис. 1.9 показано изображение кратера Платон, полученное любителем астрономии Крэйгом Зербе (он профессиональный дирижер) с помощью цифровой фотокамеры и небольшого телескопа. Это изображение является результатом суммирования нескольких десятков снимков высокого качества, отобранных из большой серии, и небольшой корректировки пространственного спектра результирующего изображения; оно действительно имеет более высокое пространственное разрешение, чем фотографии из атласа Койпера.

Справедливости ради отметим, что и до появления цифровых камер любителям астрономии часто удавалось получать изображения довольно высокого качества. На рис. 1.10 показан один из примеров. Это снимок южного материка (кратер Клавий виден в верхней половине изображения), сделанный автором этой книги летом 1969 года с помощью самодельного кассегреновского рефлектора с диаметром главного зеркала 26 см (Пиркули, ШАО АН Азербайджана). В то время автор был молодым любителем астрономии, занимавшимся в астрономическом кружке Дворца пионеров и школьников в Баку под руководством Сергея Ивановича Сорина (см. рис. 1.11) – замечательного учителя, прекрасного человека и ученого, много сделавшего для становления астрономии в Азербайджане и любительской астрономии в СССР; его именем названа малая планета 5989.

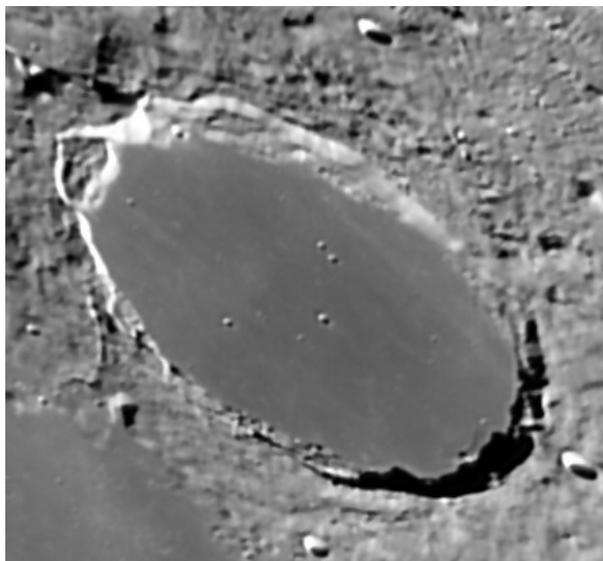


Рис. 1.9. Изображение кратера Платон, полученное американским любителем астрономии  
Крэйгом Зербе

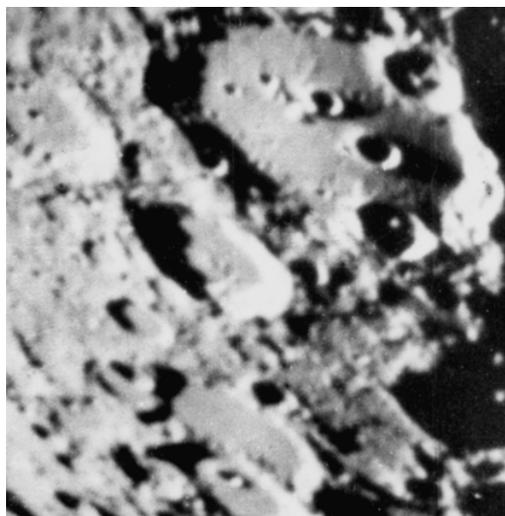


Рис. 1.10. Любительский снимок кратера Клавий

Вернемся к лунной номенклатуре. Имена лунным деталям продолжают присваиваться и в наши дни. Причем иногда речь идет о присвоении новых имен даже крупным образованиям. Так, недавно, в номенклатурной группе МАС, членом которой является автор книги, обсуждался вопрос о переименовании самого крупного ударного бассейна на Луне. Это бассейн Южный полюс – кратер Эйткен. Это длинное и довольно неуклюжее название предлагалось заменить названием Бассейн Шумейкера, по имени Юджина Шумейкера (см. рис. 1.12) – известного астронома и геолога, который, в частности, много сделал для подготовки научных программ космических экспедиций «Аполлон». Ю. Шумейкер трагически погиб в

Австралии в нелепой автомобильной катастрофе; небольшая часть его праха в капсуле была отправлена на Луну на борту аппарата «Лунар Проспектор». Этот аппарат завершил свою научную программу падением в кратер вблизи южного полюса. Таким образом, Ю. Шумейкер оказался первым человеком, похороненным на Луне. По ряду причин бассейн Южный полюс – кратер Эйткен так и не был переименован в его честь.



Рис. 1.11. Сергей Иванович Сорин (1918 – 1995), известный советский астроном-любитель, существенно повлиявший на формирование научных интересов автора этой книги

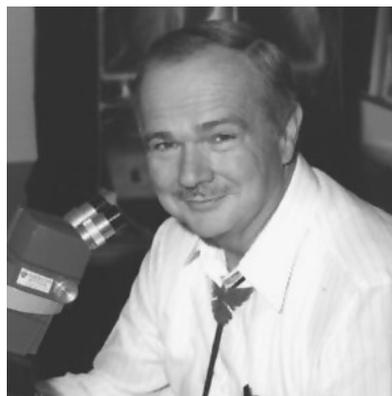


Рис. 1.12. Юджин Шумейкер (1928-1997), известный американский планетолог

До полетов космических аппаратов к Луне человечество не знало, как выглядит обратная сторона Луны. Существовало много различных прогнозов на этот счет – от совершенно спекулятивных до методически корректных, основанных на экстраполяции «узора» деталей, видимых на обращенной к нам стороне Луны в зоне лимба.

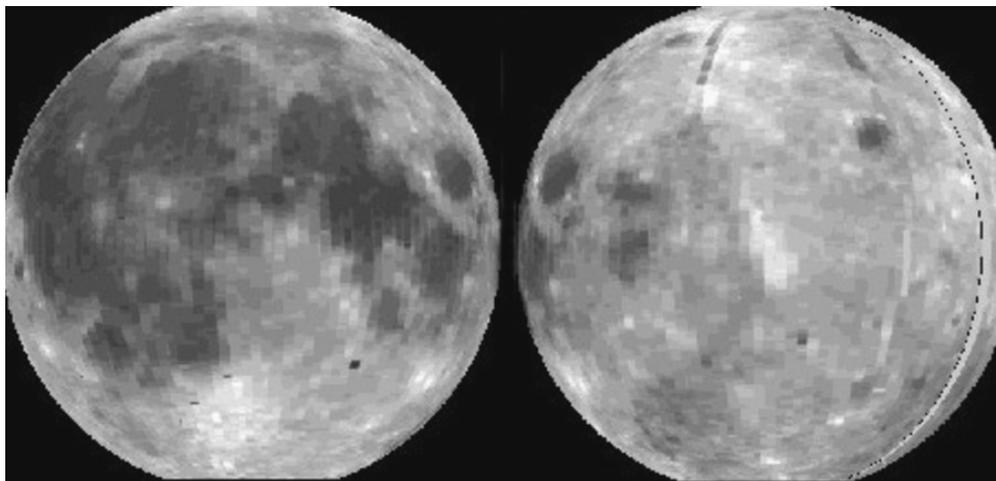


Рис. 1.13. Видимая (слева) и обратная (справа) стороны Луны по данным КА «Клементина». Данные представлены в прямой ортографической проекции (т.е., лунный шар виден, примерно, так, как если на него смотреть с Земли). Разрешение изображения определяется размером кадра (примерно  $30 \times 30$  км). Заметная полосатость изображений в ориентировке север-юг отражает условия съемки лунной поверхности с полярной орбиты от витка к витку

Интересно напомнить некоторые из наиболее интересных предположений относительно вида обратной стороны Луны. Так, известный исследователь Луны Юлиус Франц (1923 год) писал: «... на задней стороне Луны ... находится обширная, светлая, богатая кратерами возвышенность, лишенная морей». Это предсказание оказалось правильным. Правда, тот же автор писал, что за юго-восточным лимбом Луны возможно расположено большое морское образование, частью которого является Море Смита. Этот прогноз подтвердился не полностью.

Поверхность обратной стороны Луны была впервые сфотографирована КА «Луна-3» в 1959 году. Это была большая победа советской науки. В настоящее время, благодаря снимкам, сделанным астронавтами в ходе экспедиций «Аполлон», а также данным съемки КА «Клементина», обратная сторона Луны изучена топографически не хуже, чем видимая. Для сравнения на рис. 1.13 приведены мозаики изображений, полученных КА «Клементина», которые представляют с низким разрешением видимую и обратную сторону Луны; они даны в прямой ортографической проекции. Хорошо видно, в частности, что морей на обратной стороне Луны значительно меньше по сравнению с видимой стороной. Изображения представляют собой мозаики (сшивки) многих полос изображений, полученных по мере движения аппарата по полярной орбите. Каждая полоса – это один виток орбиты. Более подробно о результатах работы КА «Клементина» будет рассказано во второй и четвертой главах.

## 1.2. Описание поверхности с помощью телескопа

Невооруженный глаз хорошо различает на лунном диске такие образования как Океан Бурь, Море Дождей, Море Ясности, Море Спокойствия, Море Кризисов и некоторые другие крупные детали. С помощью даже слабого телескопа или бинокля на лунном диске становится видимым множество деталей; прежде всего, глаз замечает крупные кратеры. На рис. 1.14 приведено изображение лунного диска с обозначением некоторых деталей. Оно составлено из фотографий первой и последней четверти Луны. Это сделано для того, чтобы был лучше виден кратерный рельеф, который проявляется вблизи терминатора.

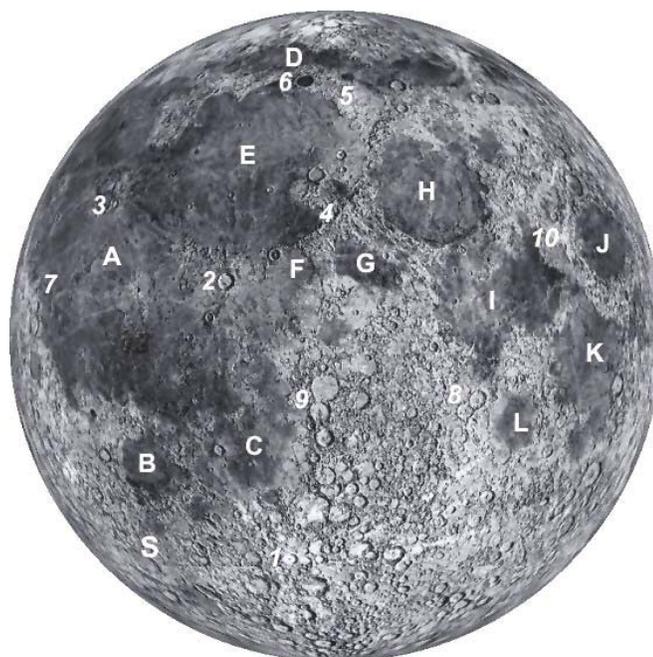


Рис. 1.14. Составное изображение лунного диска с обозначениями некоторых образований: **A** – Океан Бурь, **B** – Море Влажности, **C** – Море Облаков, **D** – Море Холода, **E** – Море Дождей, **F** – Залив Зноя, **G** – Море Паров, **H** – Море Ясности, **I** – Море Спокойствия, **J** – Море Кризисов, **K** – Море Изобилия, **L** – Море Нектара, **S** – Криптоморе (кратер Шикард). **1** – кратер Тихо, **2** – кратер Коперник, **3** – кратер Аристарх, **4** – горы Апеннины, **5** – горы Альпы, **6** – кратер Платон, **7** – образование Рейнер-гамма, **8** – кратеры Теофил, Кирилл и Катарина (сверху вниз), **9** – кратеры Птолемей, Альфонс и Арзахель (сверху вниз), **10** – кратер Прокл

В западной части лунного диска расположен Океан Бурь – крупнейшее на Луне образование морского типа (обозначен буквой **A** на рис. 1.14). Его площадь  $S$  составляет 2100 тыс. км<sup>2</sup>. К югу от Океана Бурь расположены два моря – Море Влажности ( $S = 110$  тыс. км<sup>2</sup>) и

Море Облаков ( $S = 250$  тыс. км<sup>2</sup>), соответственно, **В** и **С**. На севере Океан Бурь граничит с Морем Холода ( $S = 430$  тыс. км<sup>2</sup>), **Д**, и Морем Дождей ( $S = 830$  тыс. км<sup>2</sup>), **Е**. Море Дождей очень неоднородно по цвету, а значит и по составу. В центре лунного диска находятся небольшие образования морского типа – Залив Зноя ( $S = 40$  тыс. км<sup>2</sup>), **Ф**, и Море Паров ( $S = 80$  тыс. км<sup>2</sup>), **Г**. Восточную часть диска украшают Море Ясности ( $S = 300$  тыс. км<sup>2</sup>), **Н**, и Море Спокойствия ( $S = 420$  тыс. км<sup>2</sup>), **И**. У восточного лимба расположено Море Кризисов ( $S = 180$  тыс. км<sup>2</sup>), **Ж**. На юг от Моря Спокойствия находятся Море Изобилия ( $S = 330$  тыс. км<sup>2</sup>), **К**, и Море Нектара ( $S = 100$  тыс. км<sup>2</sup>), **Л**. Все лунные моря представляют собой впадины, заполненные застывшими лавами. Их темный цвет обусловлен отличием химического состава лав от окружающего материкового вещества; в морских лавах содержится большее количество хромофорных (поглощающих свет) элементов, главным образом, железа и титана. Моря заполнялись не одновременно. Из оценок количества кратеров на единицу площади (кратерной плотности) следует, что самым старым морем является Море Спокойствия (около 3,5 миллиардов лет). Океан Бурь наиболее молодой (около 2,5 миллиардов лет).

На Луне были найдены так называемые криптоморя. Это очень древние морские образования, которые были скрыты материалом выбросов при образовании крупных бассейнов, например, бассейна Моря Восточного. Признаками криптоморя являются кратеры, имеющие темные гало, что является признаком наличия на некоторой глубине темного вещества, вероятно, базальтового состава. Классическим примером криптоморя является область, включающая кратер Шиккард (см. **С** на рис. 1.14).

Опишем детальнее некоторые интересные кратеры. Это самая распространенная форма рельефа на Луне. Старых кратеров очень много; они зачастую накладываются друг на друга. Молодые кратеры представляют наибольший интерес для изучения.

В южной части диска видимой стороны Луны расположен кратер Тихо (диаметр  $D = 80$  км, глубина 3500 м, высота вала около 2000 м), он показан цифрой **1** на рис. 1.3 и 1.14. При большом фазовом угле этот молодой кратер ничем не отличается от соседних кратеров, однако в полнолуние он обнаруживает яркую лучевую систему. Эта система самая мощная на Луне; один из его лучей хорошо прослеживается даже в Море Ясности (см. рис. 1.3). Лучевая система Тихо возникла при образовании кратера, в результате взаимодействия ударных выбросов с лунной поверхностью. Причиной необычных фотометрических свойств лучевых систем молодых кратеров является, в основном, вскрытие нижележащего (более светлого) материала вторичными ударами, сопутствующими выбросам. Кратер Тихо окружен темным кольцом-

ореолом, хорошо заметным вблизи полнолуния (см. рис. 1.3 и 1.15). Это кольцо имеет также небольшой избыток красного цвета. Снимки более высокого разрешения показывают, что вал этого кратера заметно разрушен, хорошо видны террасы, рельеф в окрестности кратера в масштабе десятков и сотен метров очень сложный.



Рис. 1.15. Изображение кратера Тихо, заимствованное из фотографического атласа Койпера

Кратер Коперник ( $D = 90$  км), показанный на рис. 1.3 и 1.14 цифрой **2**, также является очень заметным образованием на лунном диске. Этот кратер старше кратера Тихо. Он имеет лучевую систему, но более слабую, чем у кратера Тихо. Эта система наилучшим образом видна при малых фазовых углах, т.е. вблизи полнолуния (рис. 1.3). Глубина ровного дна и высота вала кратера Коперник относительно окружающей местности составляют, соответственно, 1600 и 2200 м. Изображение высокого разрешения показывают, что вал этого кратера сильно террасирован. Как в случае кратера Тихо, это террасирование имеет гравитационно-тектоническую природу. Террасы представляют собой гигантские осы (мегаоползни) шириной в километры и протяженностью в десятки километров, смещенные друг относительно друга по вертикали на сотни метров. С помощью спектральных измерений в материале вала и дна кратера Коперник были обнаружены типичные для лунного материкового вещества ассоциации минералов: полевошпатовый материал с преобладанием низко-кальциевого пироксена. Однако на трех участках довольно разрушенной центральной горки пироксен не был найден (по крайней мере, его меньше 5 %); в качестве главного компонента здесь выявлен оливин. Источник материала центральной горки, по-видимому, находится глубже, чем источники материала других частей кратера.

Рассмотрим еще несколько замечательных образований на лунной поверхности, которые хорошо видны в телескоп даже небольших размеров.

Начнем с района, который содержит знаменитый кратер Аристарх ( $D = 35$  км) – см. рис. 1.3 и 1.14, цифра 3. Этот кратер является сравнительно молодым. Он образовался на морской поверхности. При его образовании был пробит слой затопления морским материалом и вскрылась материковая подложка, т.е. более яркое материковое вещество было вынесено на морскую поверхность. Благодаря этому кратер Аристарх имеет сравнительно высокое альbedo и образует очень контрастную деталь на лунном диске. Поверхность внутри кратера неоднородна по составу и имеет сложную структуру. Возможно, из-за этого вид деталей внутри этого кратера очень изменчив – он сильно зависит от условий освещения кратера. Ранее такая изменчивость часто интерпретировалась как свидетельство проявления современной активности Луны. На рис. 1.16 приведена телескопическая фотография кратера Аристарх (он справа). Левее вниз расположен кратер Геродот; хорошо видна извилистая структура, это долина Шретера.

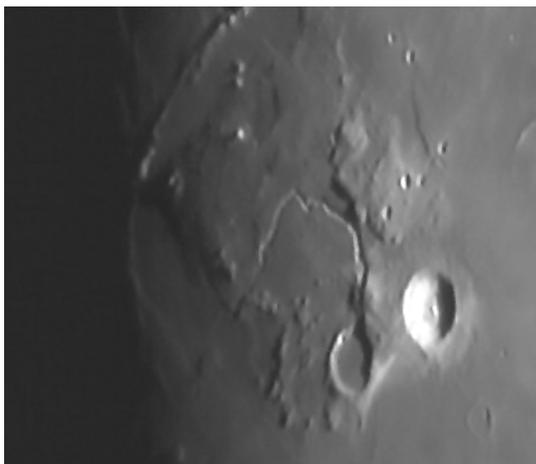


Рис. 1.16. Любительский снимок кратеров Аристарх (справа) и Геродот (слева) вблизи терминатора. Хорошо виден рельеф плато Аристарх

Значительно более детальные изображения района кратера Аристарх получены с помощью космического телескопа Хаббла. Он позволяет «издалека» делать снимки Луны очень высокого разрешения. Заманчиво было бы использовать телескоп Хаббла для спектральной съемки всей площади видимого полушария Луны, однако специалисты, контролирующие распределение времени на этом телескопе, избегают наблюдать Луну, это слишком яркий объект для такого телескопа. Кроме того, исследования далеких объектов Вселенной имеют гораздо более высокие приоритеты для этого инструмента. Космический телескоп Хаббла находится на земной орбите около 15 лет. За это время он исследовал Луну лишь два раза. На рис. 1.17 показан снимок кратера Аристарх, сделанный с помощью телескопа

Хаббла в синих лучах при малом фазовом угле; пространственное разрешение около 200 м. Внутри кратера видно много ярких деталей. Яркими являются края долины Шретера.

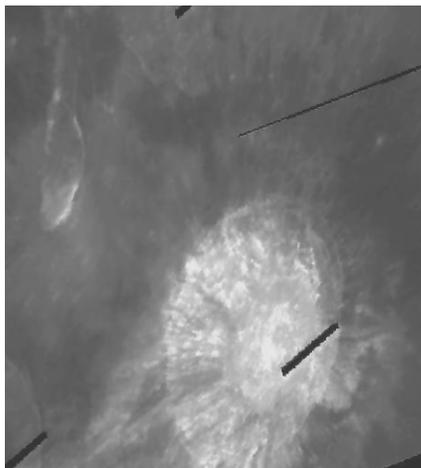


Рис. 1.17. Изображение кратера Аристарх, полученное с околоземной орбиты космическим телескопом Хаббла

Кратер Аристарх образовался рядом с замечательной областью, которая называется плато Аристарх или пятно Вуда (см. рис. 1.16, правее и выше кратера Аристарх). Предполагается, что эта область является останцом, сохранившимся при затоплении лавами бассейна Океана Бурь. Об этом говорит приподнятость плато Аристарх над уровнем окружающего моря (это хорошо видно на рис. 1.16) и сравнительно больший возраст (определенный по плотности кратеров) некоторых участков поверхности этого образования. Плато Аристарх пересекает долина Шретера. Ее длина составляет примерно 170 км, а ширина около 7 км. Было множество сообщений о нестационарных (преходящих) явлениях в долине Шретера. Однако их достоверность трудно оценить.

Необычным является материал, покрывающий поверхность плато Аристарх. Его альbedo довольно низкое в видимой части спектра. Этот материал имеет аномально сильное ультрафиолетовое (УФ) поглощение. Это заметил еще известный физик Роберт Вуд в 1911 году, когда получил свои первые фотографии Луны в УФ диапазоне спектра. На фотографиях Вуда плато Аристарх выделяется очень сильно. Иногда это образование называют пятном Вуда. Рыжеватый оттенок этого образования отмечался гораздо раньше Яном Гевелием. Отметим, однако, что границы ультрафиолетового пятна Вуда не всегда буквально следуют топографическим границам плато Аристарх. Роберт Вуд предполагал, что причиной возникновения УФ поглощения в пятне являются отложения серы или ее соединений, сопровождающие вулканическую деятельность. Сейчас считается, что аналогом материала поверхности пятна Вуда является необычный грунт, найденный в районе посадки КК

«Аполлон-17». Этот грунт содержит большое количество стеклянных шариков оранжевого цвета. Образцы такого грунта показывают сильное УФ поглощение. Предполагается, что оранжевые шарики имеют вулканическую природу – они возникли при распылении в вакууме фонтанирующей лавы в окрестности места ее выхода на поверхность. Сейчас среди геологов нет согласия в том, когда могли происходить такие извержения, но, скорее всего, их возраст велик. На снимках плато Аристарх, сделанных современными цифровыми фотокамерами, хорошо различаются цвета; плато Аристарх имеет выраженный рыжеватый оттенок в сравнении с окружающими морскими областями.

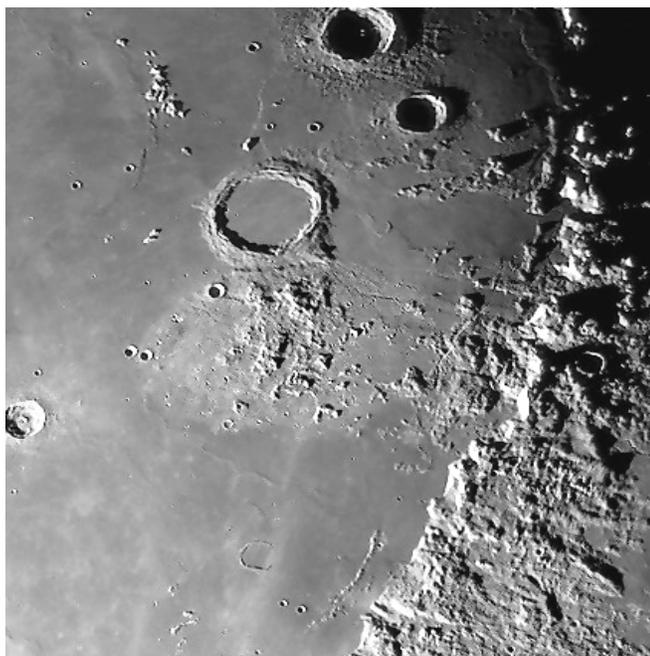


Рис. 1.18. Телескопическое изображение горной системы лунных Апеннин

Следующими объектами рассмотрения будут лунные горы. Горная цепь Апеннин является одной из самых мощных горных систем на Луне (см. 4 на рис. 1.14). Высота некоторых пиков достигает до 5 – 6 км. Эта цепь обрамляет Море Дождей с юга и юго-востока. Ее происхождение связано с ударным образованием бассейна этого моря. Северные склоны Апеннин, обращенные к Моря Дождей, более крутые, чем южные (рис. 1.18). Однако эта крутизна относительна – типичные наклоны поверхности на севере Апеннин редко превышают  $10^\circ$  на базе 1 км. У северо-западного подножия Апеннин находится извилистая Борозда Хэдли, имеющая длину около 100 км, среднюю ширину 1,5 км и глубину 300 – 400 м. В районе этой борозды совершил посадку КК «Аполлон-15».

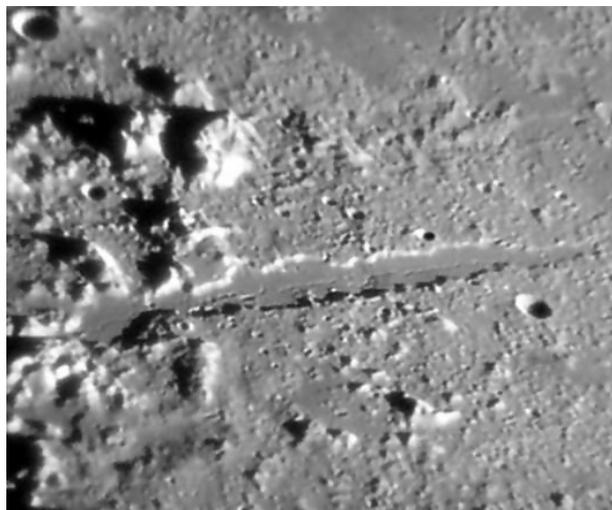


Рис. 1.19. Изображение долины Альп, полученное Крэйгом Зербе с помощью цифровой камеры

Альпы – менее мощная горная система, обрамляющая Море Дождей с северо-востока (см. 5 на рис. 1.14). Здесь самая высокая вершина (конечно, Монблан) имеет высоту около 3500 км. Удивительным образованием в этом районе Луны является долина Альп, которая как бы прорезает горную систему Альп от Моря Холода до Моря Дождей (см. рис. 1.19). Эта долина прямолинейна; ее длина составляет около 150 км, а средняя ширина примерно равна 10 км. Когда-то допускалось, что такая структура могла образоваться при косом ударе (скольжении) крупного тела о лунную поверхность. Простые оценки показывают невозможность такого сценария. В данном случае мы имеем дело, вероятно, с древним разломом, залитым лавой. На снимке Крэйга Зербе хорошо видна узкая трещина в середине долины. На космических изображениях высокого разрешения на этой трещине видны кратеры. Вероятно, они моложе трещины и спроектировались на нее случайно; хотя следует отметить, что на трещинах могут возникать так называемые димпловые кратеры, когда за счет просыпки грунта в трещину образуется воронка.

В Море Дождей имеются структуры останцового типа, – например, Прямой хребет длиной 80 км или пик Тенериф. При взгляде в телескоп, когда эти структуры освещены скользящими лучами, они кажутся грандиозными крутыми горами (см. рис. 1.20). На самом деле, все обстоит не столь уж драматично. Например, пик Тенериф при высоте чуть более 2,4 км имеет размер у основания  $15 \times 20$  км, что дает средний наклон поверхности пика менее чем  $1/6$ . Конечно, локальные наклоны могут здесь быть большими.



Рис. 1.20. Изображение участка Моря Дождей, включающего пик Тенериф и Прямой хребет

Примечательным объектом лунной поверхности является также Прямая Стена (см. рис. 1.21). Это линейная сбросовая структура. Ее длина составляет 110 км. Большая часть стены возвышается на 600 м над равниной. Стена асимметрична – ее западный склон гораздо более крутой. Однако даже здесь крутизна склонов редко превосходит  $30^\circ$  на базе сотни метров.



Рис. 1.21. Телескопическое изображение района Прямой Стены

Среди уникальных образований на поверхности Луны особое место занимает кратер Варгентин ( $D = 85$  км). Его часто называют столовой горой Варгентин. Он находится вблизи юго-западного лимба недалеко от кратера Шиккард (см. рис. 1.22). Кратер Варгентин заполнен лавой до уровня вала. Поверхность этого лавового поля сравнительно ровная. Это

удивительный пример затопления кратера без прорыва вала – мощности лавового источника хватило ровно на то, чтобы заполнить чашу до краев, не разрушив ее.



Рис. 1.22. Изображение кратера Варгентин, заимствованное из атласа Койпера



Рис. 1.23. Изображение района Рейнер-гамма, телескопический снимок

Отметим еще раз замечательный кратер Платон, залитый лавой ( $D = 100$  км) – см. **6** на рис. 1.14 Его очень легко найти на Луне вблизи полной фазы с помощью телескопа, поэтому этот кратер иногда используют в качестве стандартной детали для спектрофотометрических привязок при наблюдениях планет. Высота вала этого кратера достигает 2 км, однако, из-за кривизны лунной поверхности, даже такой вал не будет виден из центра этого кратера (см. рис. 1.8 и 1.9). Заметим также, что вещество этого вала и примыкающих к нему с севера внешних

областей необычно по составу, о чем свидетельствует нетипичный для таких образований избыток красного цвета.

В Океане Бурь расположена небольшая формация, именуемая Рейнер-гамма (см. рис. 1.14 (7) и рис. 1.23). Она имеет форму вытянутого кольца, но это не кратер. Рис. 1.23 позволяет сравнить это образование с кратером Рейнер, который находится в правой части изображения. Образование Рейнер-гамма считается классическим примером свирла – структуры, возникающей при падении распавшейся кометы или метеороидного роя на лунную поверхность. В рельефе эта область не выделяется – это чисто альбедное образование, имеющее детали причудливой формы. С этой формацией связана также магнитная аномалия. Формация Рейнер-гамма имеет необычные фотометрические свойства, они указывают на то, что поверхность этого образования очень молодая, а ее микрорельеф более сложный, чем в окружающих морских областях.

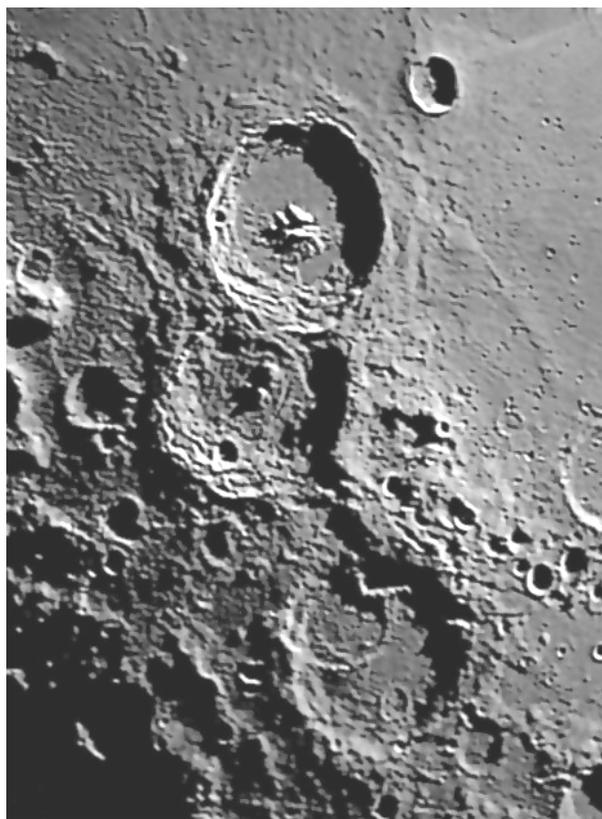


Рис. 1.24. Телескопическое изображение кратеров Теофил, Кирилл и Катарина

На западном побережье Моря Нектара расположена последовательность крупных кратеров Теофил ( $D = 100$  км), Кирилл ( $D = 90$  км) и Катарина ( $D = 100$  км) – см. рис. 1.14 (8) и рис. 1.24. Кратер Теофил – более молодой; он перекрыл вал кратера Кирилл. Замечательной

особенностью кратера Теофил является его центральная горка – она имеет нескольких вершин. Иногда астрономы-любители проверяют качество телескопического изображения по тому, разрешатся ли горка кратера Теофил или нет: если не разрешается, то наблюдать на небе что-либо точно не стоит.

Кратер Птолемей один из самых крупных на Луне ( $D = 225$  км) – см. **9** на рис 1.14. Кривизна его заполненного лавой днаща хорошо видна на изображениях, близких к терминатору (см. рис. 1.25). Дно этого кратера имеет неровности, которые, вероятно, обусловлены рельефом подстилающей поверхности или связаны с многоэтапностью заливки морской лавой этого небольшого бассейна. Правее и немного ниже кратера Птолемей находится кратер Альбатениус, который, как считается, изображен на одной из первых зарисовок Луны, сделанных Галилео Галилеем (см. рис. 1.6).

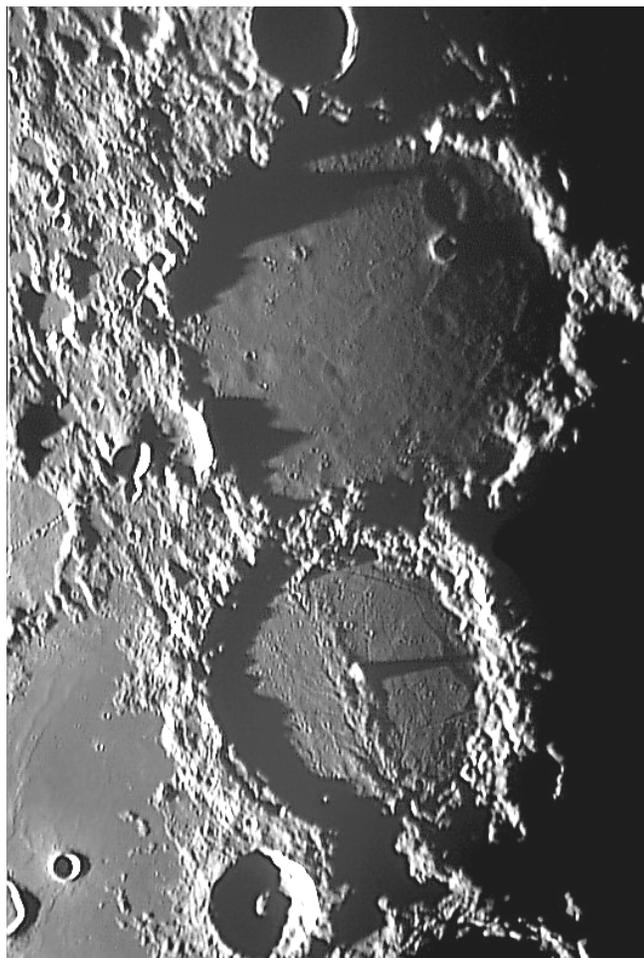


Рис. 1.25. Изображение кратера Птолемей и Альфонс вблизи терминатора



Рис. 1.26. Изображение кратера Птолемей и Альфонс при малом фазовом угле

По своему уникален кратер Альфонс ( $D = 125$  км) – см. рис. 1.25 и 1.26. Его центральная горка возвышается почти на километр. У вала хорошо заметны признаки внутреннего обрушения (он как бы двоится). Через середину кратера проходит геологический разлом. В кратере расположено несколько темных пятен, заметных в телескоп средних размеров при хорошем качестве изображения. Это мелкие кратеры с темными ореолами; некоторые из них ассоциированы с трещинами того же простирания, что и центральный разлом. Происхождение темных ореолов не совсем понятно. Вероятно, здесь произошло ударное вскрытие темного материала. Нельзя не отметить, что в кратере Альфонс, возможно, наблюдались нестационарные явления (см. ниже).

Интересен кратер Прокл, находящийся в восточной части лунного диска. Это молодой кратер. В полнолуние хорошо видна его лучевая система; она асимметрична (см. **10** на рис. 1.14). Такое возможно при очень косом ударе налетающего тела в лунную поверхность.

\*\*\*

В заключение этого раздела, отметим следующее. Каждый район и каждая деталь лунной поверхности, имея общие для всей Луны особенности формирования и эволюции, почти всегда демонстрируют также и замечательные индивидуальные черты. Это делает интересным и захватывающим изучение практически любого района лунной поверхности.

Описание таких районов можно проводить еще очень долго. Однако для предварительного знакомства с лунной поверхностью нам представляется достаточным того, что представлено выше. Далее у нас еще не раз будет повод и возможность вернуться к описанию отдельных лунных образований.

### 1.3. Нестационарные явления

Исследованию нестационарных (преходящих) явлений на лунной поверхности и окружающем ее пространстве уделялось некогда большое внимание. Это было в период подготовки космических программ изучения Луны. Сейчас такого рода наблюдения чаще проводятся любителями астрономии, хотя встречаются публикации на эту тему авторитетных профессиональных наблюдателей, таких как французский астроном Одуэн Дольфюс. В последнее время интерес к этой проблеме несколько возрос в связи с обнаружением на ночной стороне Луны вспышек, вызванных ударами метеоритных тел.

Как правило, сообщения о преходящих явлениях мало доказательны. Можно думать, что подавляющая часть таких сообщений вообще не является достоверной. При проведении новых исследований следует иметь в виду, что проблема доказательства реальности нестационарных явлений и скептицизм научной общественности будут постоянно сопутствовать работам, ведущимся в этой области. Данный раздел посвящен обзору наиболее достоверных результатов.

Проблема поиска возможных изменений, происходящих на лунной поверхности, очень старая. Такие изменения пытались обнаружить многие астрономы-наблюдатели, начиная с Галилея. Известный английский астроном Джон Гершель сообщал в позапрошлом столетии о видимых им на затененной части лунного диска ярких точках, которые он считал лунными вулканическими извержениями. Сейчас понятно, что никаких действующих вулканов на Луне нет, но тогда эти сообщения авторитетнейшего наблюдателя будоражило умы. Следует отметить, что и до изобретения телескопа проблема нестационарных явлений на Луне была актуальна. В частности, лет 20 назад на страницах очень уважаемого научного журнала «Nature» обсуждался вопрос о том, что в 1178 году, возможно, были очевидцы событий, связанных с образованием на обратной стороне Луны вблизи лимба кратера Джордано Бруно. Дело в том, что в Англии (Кентербери) в церковных архивах, датированных 12 столетием, были найдены записи свидетельств пяти человек о «странном» поведении Луны. На ней наблюдались искры, верхний конец ее серпа вдруг раскололся на две части (тень от выброса?).

Кто знает, не отмечали ли слишком усердно эти люди семейный праздник? А может быть, они видели случайно спроектированный на Луну болид, сгоревший в атмосфере Земли? Или, все же, это событие связано с Луной? Кратер Джордано Бруно ( $D = 20$  км) действительно является одним из самых молодых на Луне. Однако его изображения, полученные с высоким разрешением, показывают, что в нем присутствует достаточно много мелких кратеров. Это означает, что молодость этого объекта относительна – его образование едва ли можно датировать 12 столетием.

Существуют каталоги нестационарных явлений поверхности Луны. В частности, в 60-е годы прошлого столетия Берли и Миддлхерст изучили литературу, охватывающую несколько сотен лет, в которой упоминается о примерно 200 случаях наблюдений на Луне ярких вспышек, изменений цвета и прочих преходящих явлений. Эти наблюдения были сопоставлены с солнечной активностью (зависимости не обнаружено) и с приливным действием Земли. Оказалось, максимальное число явлений приходится на перигей и апогей. Отсюда был сделан вывод, что явления, наблюдаемые на Луне, возможно, вызваны внутренними причинами, происходящими в Луне в периоды максимальных изменений приливных напряжений.

Позднее Камерон составил каталог более 1500 лунных временных явлений. Они связаны с примерно 100 объектами лунной поверхности; интересно, что на область кратера Аристарх попадает 30% всех явлений. Распределение этих объектов показывает, что преходящие явления чаще наблюдаются по краям морей. Обработка каталога не дала корреляции этих явлений ни с одним физическим фактором. Корреляция с приливами, указанная ранее Берли и Миддлхерст, оказалась выраженной очень слабо. Вероятно, большинство событий в каталогах Миддлхерст и Камерон не являются достоверными.

Особенно интенсивно проблема нестационарных явлений изучалась перед началом реализации космической программы «Аполлон». Например, для выявления кратковременных цветовых явлений на Луне в конце 60-х годов была создана сеть из 12 станций в США и двух в Англии. Выполнялось «блинквание» Луны – быстрое сравнение двух изображений, позволяющее выделить их различия. Это делалось при помощи небольших телескопов, снабженных вращающимися обтюраторами, которые имели красный и синий светофильтры. Станции работали в течение нескольких лет, однако не дали результатов, которые бы достоверно подтверждали нестационарные цветовые эффекты. Позднее к явлениям такого рода возникло устойчивое скептическое отношение. Появились работы, в которых разбирается ошибочность некоторых данных о временных явлениях на Луне. Например, это касалось сообщений, появившихся 22 – 28 февраля 1975 года, когда в Западной Европе господствовал

глубокий антициклон с температурной инверсией. Дисперсия света при преломлении в такой атмосфере могла дать окраску альбедно контрастных лунных деталей.

Согласно работе Яна, опубликованной в 1972 году, все наблюдавшиеся временные явления на Луне бывают следующих трех типов: (1) очень быстро проходящие яркие вспышки; (2) длительные, до нескольких часов, бесцветные свечения или затемнения районов размером во многие квадратные километры; (3) красные или голубые свечения.

Первая группа явлений может быть как лунного, так и не лунного происхождения. В последнем случае вспышки могут объясняться случайным проектированием на лунный диск картины сгорания метеоров в земной атмосфере. Другим «не лунным» объяснением вспышек, наблюдаемых в наше время, могут быть блики от солнечных панелей искусственных спутников, в большинстве своем уже утерянных и потому находящихся в неконтрольном полете. Однако теоретически возможны и вспышки, связанные с Луной. В частности, в некоторых работах 70–80-х годов прошлого века обсуждается механизм электрического разряда в разреженном газе, который, как считается, может выделяться из трещин в лунной поверхности при освобождении напряжений. То, что процесс выделения газов из недр Луны реален, сомнений не вызывает – это экспериментальный факт, установленный в ходе орбитальной съемки лунной поверхности, проведенной на КК «Аполлон-16» с помощью  $\alpha$ -спектрометра; были обнаружены вариации потока  $\alpha$ -частиц, порождаемых радиоактивным распадом очень летучего газа радона, который выделяется из лунных недр вместе с другими компонентами. Проблема состоит в количестве газа, необходимого для поддержания разряда – согласно измерениям КК «Аполлон-16» его на много порядков меньше, чем необходимо.

В последнее время заметный импульс получили исследования вспышек на лунной поверхности, которые вызваны ударами метеоритов. Такие вспышки надежно наблюдались в 1999 – 2002 годах, когда Луна пересекала метеорный поток Леониды. Однако этим наблюдениям предшествовали теоретические работы, которые стимулировали экспериментальные исследования. В частности, расчеты, выполненные российским физиком И. В. Немчиновым и его коллегами, показали, что удар о лунную поверхность метрового метеороидного тела, летящего со скоростью 15 – 30 км/с, может дать вспышку, регистрируемую с Земли. Наибольший интерес в таких исследованиях представляли бы детальные спектры вспышек. Они могут дать информацию о составе материала, вовлеченного в ударное испарение. Однако ограничения по световому потоку делают такие исследования проблематичными. Доля энергии импактной (ударной) вспышки от кинетической энергии ударника невелика, всего  $10^{-4}$  –  $10^{-5}$ , однако удары тел размером порядка 1 метра могут быть зарегистрированы с помощью телескопов с диаметром зеркала около 1 метра.

Серьезной проблемой, ограничивающей наблюдательные возможности, является длительность вспышек. Чем меньше упавшее на Луну тело, тем короче вспышка. Для тел с размером 1 метр, длительность вспышки составляет всего одну секунду. Тем не менее, детектирование таких вспышек вполне возможно, что, как уже отмечалось, было подтверждено с помощью наблюдений Луны во время ее пересечения метеорного потока Леониды.

Патрулирование импактных вспышек проводилось синхронно с использованием инструментов, находящихся на значительном расстоянии друг от друга, для того чтобы отделить вспышки на поверхности Луны от вспышек, вызванных спутниковыми рефлексиями или сгоранием метеоров в земной атмосфере. Удивительные случайные проекции действительно происходят при наблюдениях Луны. Так, на любительской фотографии, приведенной на рис. 1.27, можно видеть лунный диск, на который спроектировался летящий самолет.



Рис. 1.27. Любительская фотография лунного диска со случайно спроектировавшимся самолетом

Метеорный поток Леониды возникает каждый год примерно 17 – 18 ноября, когда Земля пересекает орбиту кометы Темпел-Таттл; на этой орбите находится множество пылевых и более крупных фрагментов этой кометы. Движение потока по отношению к движению Земли почти встречное, поэтому скорость соударения частиц потока с Луной очень высока, примерно 70 км/сек. Поток неоднороден, и поэтому количество ударных событий может год от года сильно варьироваться. Ноябрь 2001 года был очень благоприятным для регистрации вспышек на ночной стороне Луны. Американскими любителями астрономии и астрономами профессионалами было надежно зарегистрировано не менее шести вспышек на темной части

лунного диска. Это были одновременные наблюдения из разных мест, документированные видеосъемкой, причем измерение проводились в такое время, когда большинство спутников, способных дать случайно проектирующийся блик, находились в глубокой тени.

Пересечение Луной потока Леонид в ноябре 2002 происходило при полнолунии, что плохо для решения задачи регистрации вспышек. Ближайшее, благоприятное пересечение Луны с потоком состоится только в 2099 году; придется терпеливо ожидать новых результатов.

Отметим сравнительно свежее ударное событие в Море Облаков, которое произошло 2 мая 2006 года. Вспышку удалось снять на видеофильм ученым НАСА, ведущим патрульные наблюдения Луны. Вспышка длилась четыре десятых секунды; мощность взрыва оценивается эквивалентом 4 тонн тротила. Расчеты показали, что лунную поверхность ударило тело диаметром около 25 см, которое двигалось со скоростью примерно 40 км/сек. Образовался кратер диаметром около 15 метров и глубиной около 3 метров.

Если причины вспышек на ночной стороне Луны довольно понятны, то глобальные изменения яркости (если они действительно существуют) на больших площадях освещенной части лунной поверхности интерпретировать довольно трудно. Действительно, поскольку яркость таких преходящих явлений должна быть сравнима с яркостью освещенной Солнцем лунной поверхности, механизм свечения должен быть очень мощным. В работе Гарлика и его коллег 1977 года предполагается, что это может быть связано с временными возмущениями поверхностного пылевого слоя, нарушающими когезию частиц, что усиливает диффузное отражение света. Причинами таких нарушений считаются: (1) спорадический выход газов; (2) лунотрясения; (3) электростатическая левитация пыли, типа той, что наблюдалась по свечению горизонта при заходе Солнца на снимках КА «Сервейер-7» и КА «Луноход-2». Применимость этих механизмов трудно анализировать, не имея достаточно надежных характеристик самих явлений. Понятно, однако, что при нынешней активности недр Луны первые два механизма едва ли можно обсуждать всерьез. Третий механизм, вероятно, также слишком слаб, чтобы создать эффекты, которые наблюдались бы с Земли. Однако он все же не кажется вовсе безнадежным, и его продолжают исследовать.

Недавно сотрудницей НИИ Астрономии ХНУ им. В.Н. Каразина Л. В. Старухиной вновь обсуждался вопрос о возможности временного потемнения лунной поверхности во время мощных солнечных вспышек. Под действием ионизирующих излучений, сопровождающих вспышку, в твердых материалах могут возникать дефекты, приводящие к дополнительному поглощению света в видимом и ультрафиолетовом диапазоне. Способность радиационно-индуцированных центров поглощения к термо- и фото-обесцвечиванию делает возможным последующее восстановление отражательной способности реголита. Расчеты показали, что

если радиационная чувствительность материала лунной поверхности равна максимальной чувствительности прозрачных силикатных стекол, то эффект потемнения может быть наблюдаем на пределе возможностей только при наиболее мощных солнечных вспышках – таких как события 1959-60 годов и августа 1972 года.

В связи с обсуждением нестационарных явлений на Луне нельзя не отметить открытие, сделанное Н. А. Козыревым совместно с В. И. Езерским при наблюдениях в Крымской астрофизической обсерватории (3 ноября 1958 года). Оно касается истечения газа в кратере Альфонс. Хотя авторов этого открытия двое, боролся за свою правоту в дальнейшем лишь Н. А. Козырев. В. И. Езерский, бывший в свое время директором Харьковской астрономической обсерватории, в доверительном разговоре с автором этой книги не раз эмоционально высказывал свое крайне скептическое отношение к полученным результатам, не приводя, впрочем, и никаких существенных доводов против них. Хотя спектрограммы Козырева выглядят более или менее убедительно (см. рис. 1.28), следует сказать, что имеется много работ, в которых они обоснованно критикуются. Так, известный наблюдатель комет Арпиньи критиковал отождествление полос в спектре кратера Альфонс с системой полос Свана  $C_2$ , наблюдающейся в кометных спектрах. В спектре кратера есть ряд деталей, отсутствующих в спектрах комет. Детали спектра кратера в отличие от полос системы Свана имеют резкие края с коротковолновой стороны. Все это заставляет сомневаться в отождествлении деталей в спектре кратера Альфонс с полосами Свана  $C_2$ . Позднее Н. А. Козырев не раз сообщал о своих наблюдениях подобных явлений, однако никто не подтвердил их достоверность независимо.

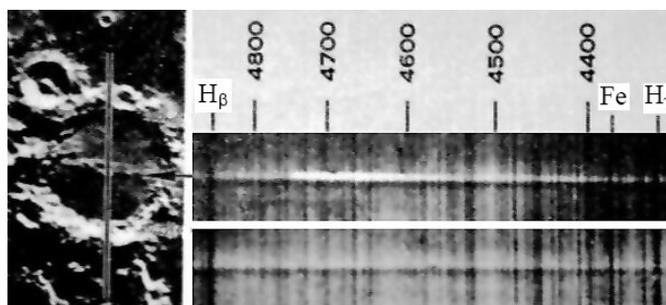


Рис. 1.28. Спектрограммы кратера Альфонс во время предполагаемого события (верхняя) и после него (нижняя)

Трудность и неоднозначность задачи детектирования нестационарных явлений на лунной поверхности может быть проиллюстрирована еще двумя курьезными историями, случившимися в эпоху первых космических полетов к Луне. Было заранее известно примерное время и место падения на лунную поверхность советской АМС «Луна-2». Однако исследования

Луны, выполненные независимыми наблюдателями, дали странные результаты. Оказалось, что темные (по другим данным, светлые) облака от падения аппарата наблюдались в разное время как минимум в четырех точках лунной поверхности, разделенных тысячами километров. Очевидно, что часть сообщений (а может, все?) просто недостоверна, хотя наблюдения проводились, в основном, профессиональными наблюдателями.

Другой пример связан с аналогичной попыткой наблюдать падение КА «Рейнджер-6» в 1964 году. Была выполнена специальная программа слежения за падением этого аппарата с помощью двух телескопов Ликской обсерватории. Она не дала положительных результатов – никаких надежных признаков падения зарегистрировано не было.

Следует рассказать и более свежую историю. Программу КА «Лунар Проспектор» было решено завершить ударом аппарата о поверхность вечно затененного участка, расположенного на южном полюсе Луны. Предполагалось, что такой удар позволит извлечь из слоя реголита лед  $H_2O$ , ударное испарение и последующая фотодиссоциация молекул которого даст обнаружимое с Земли свечение газа. К сожалению, проведенные наблюдения (в том числе с использованием космического телескопа Хаббла) дали отрицательный результат – никаких признаков падения аппарата обнаружено не было. Таким образом, даже когда заранее было известно о предстоящих нестационарных явлениях на Луне (удары космических аппаратов), их регистрация дала отрицательные или противоречивые результаты.

Миссия КА «Смарт-1» с этой точки зрения оказалась более результативной. Утром 3 сентября 2006 года этот аппарат завершил свою программу ударом о лунную поверхность в точке с координатами  $46,20^\circ$  з. д. и  $34,4^\circ$  ю. ш. Это вызвало короткую вспышку, которая была уверенно зарегистрирована инфракрасным Канадско-французским телескопом на Гавайях на длине волны 2,12 микрон. Было видно даже облако пыли, которое очень быстро рассеялось.

Недавно сотрудница знаменитой Лаборатории реактивного движения Бонни Буратти попыталась исследовать возможные нестационарные явления на лунной поверхности, используя изображения, полученные КА «Клементина». Для четырех участков поверхности в огромном массиве данных КА «Клементина» удалось найти изображения до и после нестационарных явлений, которые наблюдались на этих же участках с Земли любителями астрономии. Во всех случаях не было найдено никаких изменений поверхности, которые можно было бы отнести к проявлению нестационарных явлений. Этот скучный вывод дался Буратти нелегко, ведь ранее она же сообщала об открытии с помощью данных КА «Клементина» надежных признаков нестационарных явлений на Луне. Однако четыре года спустя, после критики коллег, Буратти признала, что результат ее ранней работы был ошибочным.

Представленный обзор показывает, что вопрос о реальности временных явлениях на лунной поверхности все еще не вышел за рамки научной дискуссии. Исключение составляют, пожалуй, работы последних лет, связанные с регистрацией ударных вспышек на ночной стороне.

Итак, с одной стороны, можно понять скептиков, которые ссылаются на плохую документированность преходящих явлений, не квалифицированность большинства наблюдений – когда возможны откровенные фальсификации данных и/или тенденциозные толкования понятных явлений, происходящих, например, в ближайшей окрестности Земли. С другой стороны, нет принципиальных запретов на то, чтобы нестационарные явления происходили на самой Луне и наблюдались бы с Земли.

Таким образом, дальнейший поиск преходящих явлений следует продолжать, хорошо, однако, понимая, что доказательство реальности этих явлений и их приуроченности к Луне требует не меньше усилий, чем само их обнаружение.

## 2. ИССЛЕДОВАНИЯ ЛУНЫ КОСМИЧЕСКИМИ ЗОНДАМИ И ЭКСПЕДИЦИЯМИ

Современные представления о Луне немислимы в отрыве от истории и результатов ее космических исследований. Каждый полет к Луне автоматических космических зондов или пилотируемых экспедиций приносил множество важных открытий. Соответственно, каждая неудача или сокращение объемов лунной космической программы лишала нас знаний, которые могут быть теперь получены только в будущем, возможно, довольно отдаленном. Наибольший объем научных знаний о Луне человечество получило благодаря пилотируемым экспедициям «Аполлон». С 1969 по 1972 год на Землю было доставлено около 400 кг образцов лунного вещества из разных районов Луны (см. рис. 2.1). Были проведены десятки уникальных экспериментов. Но даже сейчас это не кажется главным в сравнении с величиим самого факта высадки человека на Луну – демонстрацией почти неправдоподобных возможностей науки и техники почти сорокалетней давности. То, что задача высадки человека на Луну была отнюдь не тривиальна, видно из драматических, а порою, трагических, событий, связанных с советскими и американскими исследованиями нашего спутника.

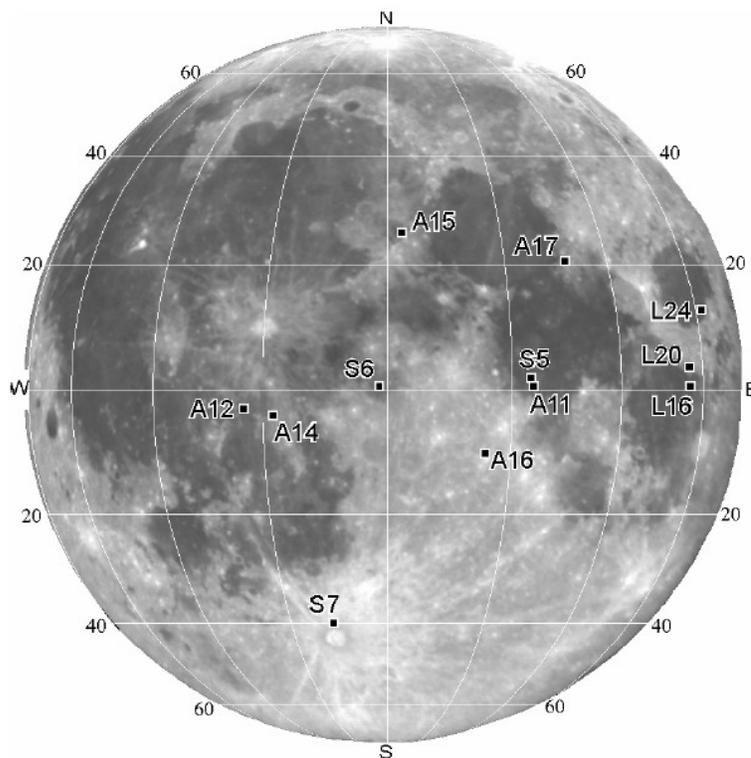


Рис. 2.1. Места посадок космических аппаратов, которые доставили пробы лунного грунта или проводили его химический анализ *in situ*

## 2.1. Хронология запусков беспилотных аппаратов

Историю космических исследований Луны обычно начинают с полета советского космического аппарата (КА) «Луна-1», который был запущен в самом начале 1959 года. Однако были и более ранние попытки запусков, причем первая из них была предпринята американцами; все запуски до полета КА «Луна-1» оказались неудачными. С тех пор к Луне было осуществлено более 100 полетов различных космических аппаратов, в основном, автоматических.

Первое время СССР явно опережал США в области космических исследований Луны. Среди приоритетных достижений раннего этапа советской программы следует отметить попадание на Луну КА «Луна-2», мягкую посадку на лунную поверхность КА «Луна-9», фотографирование обратной стороны Луны с помощью КА «Луна-3». Но с середины 60-х годов количество неудачных советских запусков стало возрастать, а американские полеты, напротив, стали заметно более удачными. Это видно из приведенного ниже перечня запусков автоматических космических аппаратов к Луне, который дан в хронологическом порядке. Из этого же перечня видно, что более половины всех запусков к Луне были неудачными.

- **КА «Пионер-0»** (США). Старт 17 августа 1958 года. Масса 38 кг. Амбициозная попытка вывода аппарата на лунную орбиту и передачи данных в течение двух недель. Запуск неудачный. На 77 секунде полета взорвалась первая ступень ракетносителя. Первоначально аппарат назывался интереснее: «Способный-1» («Able-1»). Он был оснащен научными приборами значительно лучше, чем КА «Луна-1». В частности, в состав научной аппаратуры КА «Пионер-0» входили телевизионная камера, магнетометр и микрометеоритный датчик.
- **КА «Луна 1958А»** (СССР). Старт осуществлен 23 сентября 1958 года. Попытка достижения лунной поверхности. Запуск неудачный.
- **КА «Пионер-1»** (США). Старт 11 октября 1958 года. Масса 38 кг. Попытка достижения лунной орбиты. Аппарат идентичный КА «Пионер-0». Запуск неудачный, раньше времени прекратила работу вторая ступень ракетносителя. Этот и все последующие запуски к Луне курировались НАСА.
- **КА «Луна 1958Б»** (СССР). Старт 12 октября 1958 года. Попытка достижения лунной поверхности. Хотя эта станция стартовала с Земли позже, чем КА «Пионер-1», она должна была попасть на Луну раньше. Запуск неудачный.

- **КА «Пионер-2»** (США). Старт 8 ноября 1958 года. Масса 39 кг. Попытка достижения лунной орбиты. Запуск неудачный.
- **КА «Луна 1958В»** (СССР). Старт 4 декабря 1958 года. Попытка достижения лунной поверхности. Запуск неудачный.
- **КА «Пионер-3»** (США). Старт 6 декабря 1958 года. Масса 6 кг (облегченный вариант КА «Пионер-0»). Попытка пролета вблизи Луны. Главная задача: исследование окололунной радиационной обстановки (на аппарате был установлен счетчик Гейгера). Запуск неудачный, аппарат не достиг скорости убегания, но открыл второй радиационный пояс Земли.
- **КА «Луна-1»** (СССР, официальное сообщение). Старт 2 января 1959 года. Масса 361 кг. Модель «Луна Е-1». Пролет вблизи Луны на расстоянии около 6000 км, а затем выход на гелиоцентрическую орбиту (предполагалось достижение поверхности Луны). Впервые отмечено отсутствие сильного магнитного поля Луны. Проведен эксперимент искусственная комета (идея И. С. Шкловского): на расстоянии 113000 км от Земли было выпущено облако паров натрия (около 1 кг), которое можно было наблюдать с Земли как оранжевый звездообразный объект шестой звездной величины. Этот эксперимент позволил уточнить траекторию полета станции.
- **КА «Пионер-4»** (США). Старт 3 марта 1959 года. Масса 6 кг. Первый американский спутник, который достиг скорости убегания. Пролетел мимо Луны на расстоянии 60000 км.
- **КА «Луна 1959А»** (СССР). Старт 16 июня 1959 года. Попытка достижения лунной поверхности. Запуск неудачный.
- **КА «Луна-2»** (СССР, официальное сообщение). Старт 12 сентября 1959 года. Масса 387 кг. Модель «Луна Е-1А». Первая удачная попытка достижения лунной поверхности. 13 сентября 1959 г., в 22<sup>h</sup>02'04" UT связь с аппаратом резко прервалась, что по совокупности поступивших данных было признано как попадание. Отмечено отсутствие радиационных поясов Луны и сильного магнитного поля. Прилунение произошло в восточной части Моря Дождей, между кратерами Архимед и Автолик, в точке с селенографическими координатами 30° сев. широты и нулевой долготы. Через 30 минут на Луну должна была упасть также третья ступень ракеты.
- **КА «Луна-3»** (СССР, официальное сообщение). Старт 4 октября 1959 года. Масса 279 кг. Модель «Луна Е-3». Пролет вблизи Луны на расстоянии около 6000 км. Первые фотографии обратной стороны лунной поверхности (примерно 2/3 площади) получены 7 октября 1959 года с расстояния 65200 – 68400 км.

- **КА «Пионер-Р3»** (США). Старт 26 ноября 1959 года. Масса 168 кг. Попытка выйти на орбиту вокруг Луны. Запуск неудачный.
- **КА «Луна 1960А»** (СССР). Старт 15 апреля 1960 года. Модель «Луна Е-3». Попытка пролета вблизи Луны. Запуск неудачный.
- **«Луна 1960Б»** (СССР). Старт 18 апреля 1960 года. Модель «Луна Е-3». Попытка пролета вблизи Луны. Запуск неудачный.
- **КА «Пионер-Р30»** (США). Старт 25 сентября 1960 года. Масса 175 кг. Попытка выйти на орбиту вокруг Луны. Запуск неудачный. Взорвалась вторая ступень ракеты.
- **КА «Пионер-Р31»** (США). Старт 15 декабря 1960 года. Масса 175 кг. Попытка выйти на орбиту вокруг Луны. Запуск неудачный. Ракета взорвалась на 70 секунде полета.
- **КА «Рейнджер-3»** (США). Старт 26 января 1962 года. Масса 327 кг. Неудачная попытка достижения лунной поверхности. Аппарат прошел на расстоянии 37000 км от Луны.
- **КА «Рейнджер-4»** (США). Старт 23 апреля 1962 года. Масса 328 кг. Аппарат не вышел на расчетную орбиту вокруг Луны из-за сбоя бортового компьютера. Неуправляемое падение на обратной стороне Луны.
- **КА «Рейнджер-5»** (США). Старт 18 октября 1962 года. Масса 340 кг. Аппарат не вышел на расчетную лунную орбиту из-за сбоя в системе управления двигателя. Прошел на расстоянии 725 км от Луны и вышел на гелиоцентрическую орбиту.
- **КА «Спутник-33»** (СССР, официальное сообщение). Старт 4 января 1963 года. Модель «Луна Е-6». Испытание систем мягкой посадки на Луну.
- **КА «Луна 1963А»** (СССР). Старт 2 февраля 1963 года. Модель «Луна Е-6». Испытание систем мягкой посадки на Луну. Запуск неудачный.
- **КА «Луна-4»** (СССР, официальное сообщение). Старт 2 апреля 1963 года. Масса 1422 кг. Модель «Луна Е-6». Неудачная попытка испытания систем мягкой посадки на Луну. Станция прошла на расстоянии 8500 км от Луны.
- **КА «Рейнджер-6»** (США). Старт 30 января 1964 года. Масса 364 кг. Станция упала в 30 км от расчетной точки. Фотокамеры не сработали.
- **КА «Луна-1964А»** (СССР). Старт 21 марта 1964 года. Модель «Луна Е-6». Испытание систем мягкой посадки на Луну. Запуск неудачный.
- **КА «Луна 1964Б»** (СССР). Старт 20 апреля 1964 года. Модель «Луна Е-6». Испытание систем мягкой посадки на Луну. Запуск неудачный.
- **КА «Зонд 1964А»** (СССР). Старт 4 июня 1964 года. Испытание систем мягкой посадки на Луну. Запуск неудачный.

- **КА «Рейнджер-7»** (США). Старт 28 июля 1964 года. Масса 362 кг. Управляемое падение на Луну с целью получения изображений ее поверхности (31 июля 1964 года). Передано 4308 снимков Луны с расстояния от 2110 км до 439 м. Северо-западный район Моря Облаков. На последних снимках различимы детали в несколько десятков сантиметров. Точка прилунения к западу от кратера Герике: 10°36' юж. широты, 20°36' зап. долготы.
- **КА «Рейнджер-8»** (США). Старт 17 февраля 1965 года. Масса 366 кг. Управляемое падение на Луну с целью получения изображений ее поверхности (20 февраля 1965 г.). Передано 7137 снимков Луны с расстояния от 2510 км до 160 м. Море Спокойствия. Точка прилунения между кратерами Ламонт и Мольтке: 2°36' сев. широты, 24°48' вост. долготы.
- **КА «Космос-60»** (СССР, официальное сообщение). Старт 12 марта 1965 года. Модель «Луна Е-6». Неудачное испытание систем мягкой посадки на Луну – ступень ракеты со станцией осталась на земной орбите.
- **КА «Рейнджер-9»** (США). Старт 21 марта 1965 года. Масса 366 кг. Управляемое падение на Луну с целью получения изображений ее поверхности (24 марта 1964 года). Передано 5814 снимков Луны с расстояния от 2363 км до 600 м. Кратер Альфонс. Точка прилунения: 12°54' юж. широты, 2°24' зап. долготы.
- **КА «Луна 1965А»** (СССР). Старт 10 апреля 1965 года. Модель «Луна Е-6». Испытание систем мягкой посадки на Луну. Запуск неудачный.
- **КА «Луна-5»** (СССР, официальное сообщение). Старт 9 мая 1965 года. Масса 1474 кг. Модель «Луна Е-6». Попытка мягкой посадки на Луну, приуроченная к праздничной дате, Дню победы. На последнем этапе посадки не сработала тормозная система. Станция упала в Море Облаков.
- **КА «Луна-6»** (СССР, официальное сообщение). Старт 8 июня 1965 года. Масса 1440 кг. Модель «Луна Е-6». Неудачная попытка мягкой посадки на Луну. Станция отклонилась от расчетной траектории, прошла на расстоянии 160000 км от Луны и вышла на гелиоцентрическую орбиту.
- **КА «Зонд-3»** (СССР, официальное сообщение). Старт 18 июля 1965 года. Пролет вблизи Луны и получение изображений обратной стороны с расстояния 11570 – 9220 км. Передано 25 снимков, включая снимки районов не отснятых ранее АМС «Луна-3».
- **КА «Сервейер 1965»** (США). 11 августа 1965 года. Масса 950 кг. Был выведен на геоцентрическую орбиту, охватывающую Луну. Отработка систем КА серии «Сервейер» (модель 1), научные эксперименты не проводились.

- **КА «Луна-7»** (СССР, официальное сообщение). Старт 4 октября 1965 года. Масса 1504 кг. Модель «Луна Е-6». Неудачная попытка мягкой посадки на Луну – тормозная система сработала слишком рано.
- **КА «Луна-8»** (СССР, официальное сообщение). Старт 3 декабря 1965 года. Масса 1550 кг. Модель «Луна Е-6». Неудачная попытка мягкой посадки на Луну – тормозная система сработала слишком поздно. Связь со станцией поддерживалась на всех этапах прилунения, поэтому координаты места ее посадки известны: Океан Бурь, к югу от кратера Галилей,  $9^{\circ}08'$  сев. широты,  $63^{\circ}18'$  зап. долготы.
- **КА «Луна-9»** (СССР, официальное сообщение). Старт 31 января 1966 года. Масса 1580 кг (прилунившаяся часть имела массу 99 кг). Модель «Луна Е-6» была изготовлена в НПО им. С. А. Лавочкина. Успешная мягкая посадка на Луну между кратерами Галилей и Кавальери,  $7^{\circ}08'$  сев. широты и  $64^{\circ}22'$  зап. долготы. Первые панорамы лунной поверхности с разрешением до 1 мм были переданы на Землю 3 февраля 1966 года (фототелевизионная камера с механическим сканированием была создана под руководством А. С. Селиванова). Станция работала трое земных суток.
- **КА «Космос-111»** (СССР, официальное сообщение). Старт 1 марта 1966 года. Модель «Луна Е-6С». Испытание систем лунного спутника. Станция осталась на земной орбите.
- **КА «Луна-10»** (СССР, официальное сообщение). Старт 31 марта 1966 года. Масса 1,6 т. Модель «Луна Е-6С». Первый искусственный спутник Луны (масса спутника без двигательной установки 240 кг). Орбита: 350 км – минимальное расстояние до поверхности, а 1017 км – максимальное расстояние. Наклон орбиты к лунному экватору  $72^{\circ}$ . Станция существовала 2 месяца. Исследование гравитационного поля, оценка состава лунных пород по измерениям гамма-спектрометра.
- **КА «Луна 1966А»** (СССР). Старт 30 апреля 1966 года. Испытание систем лунного спутника. Запуск неудачный.
- **КА «Сервейер-1»** (США). Старт 30 мая 1966 года. Масса посадочного аппарата 269 кг. Мягкая посадка на лунную поверхность в Океане Бурь, к северу от кратера Флемстид, в точке с координатами  $2^{\circ}28'$  юж. широты и  $43^{\circ}14'$  зап. долготы. Получено более 11000 снимков лунной поверхности в районе посадки, исследовались механические, термические и электрические свойства лунной поверхности. Станция работала до 7 января 1967 года.
- **КА «Эксплорер-33»** (США). Старт 1 июля 1966 года. Испытания систем лунного спутника. Вместо лунной орбиты спутник вышел на геоцентрическую, охватывающую Луну.

- **КА «Лунар Орбитер 1»** (США). Старт 10 августа 1966 года. Спутник Луны. Масса 386 кг. Передано на Землю 211 фотографий среднего разрешения с расстояния от 1472 км до 44 км. Фотографии высокого разрешения кроме нескольких не удались. Полученный материал позволил сделать предварительный отбор 9 мест посадок КК серии «Аполлон».
- **КА «Луна-11»** (СССР, официальное сообщение). Старт 24 августа 1966 года. Спутник Луны. Масса 1600 кг. Модель «Луна Е-6ЛФ». Радиоастрономические измерения Луны и Солнца. Исследовалось рентгеновское и гамма излучение Луны и аномалии ее гравитационного поля (теоретически этот спутник мог открыть масконы, концентрации массы, ассоциированные с некоторыми морями).
- **КА «Сервейер-2»** (США). Старт 20 сентября 1966 года. Масса посадочного аппарата 292 кг. Попытка посадки на лунную поверхность. 22 сентября 1966 года связь с КА прервалась; он упал на Луну.
- **КА «Луна-12»** (СССР, официальное сообщение). Старт 22 октября 1966 года. Лунный спутник. Масса 1620 кг. Модель «Луна Е-6ЛФ». Переданы на Землю фотографии поверхности Луны, полученные с высоты 340 – 100 км.
- **КА «Сервейер 1966»** (США) 26 октября 1966 года. Масса 951 кг. Отработка систем КА серии «Сервейер» (модель 3), научные эксперименты не проводились.
- **КА «Лунар Орбитер 2»** (США). Старт 6 ноября 1966 года. Спутник Луны. Масса 390 кг. Получено 209 фотографий среднего и 210 – высокого разрешения с расстояния от 1517 до 41 км. Предварительно отобрано 13 мест для экспедиций «Аполлон».
- **КА «Луна-13»** (СССР, официальное сообщение). Старт 21 декабря 1966 года. Масса 1700 кг. Модель «Луна Е-6М». Успешная мягкая посадка в Океане Бурь, к юго-востоку от кратера Селевк, 18°52' сев. широты и 62°03' зап. долготы. Переданы панорамы поверхности. Измерялись некоторые механические свойства грунта и альbedo лунной поверхности для космических лучей.
- **КА «Лунар Орбитер 3»** (США). Старт 4 февраля 1967 года. Спутник Луны. Масса 385 кг. Получено 329 фотографий разного разрешения с расстояния от 1530 до 44 км. Предварительно отобрано 8 площадок для экспедиций «Аполлон».
- **КА «Сервейер-3»** (США). Старт 17 апреля 1967 года. Масса посадочного аппарата 283 кг. Мягкая посадка в Океане Бурь, к юго-востоку от кратера Лансберг, 3°12' юж. широты и 23°23' зап. долготы. Получено более 6315 снимков лунной поверхности при разных высотах Солнца. Исследовались механические, термические и электрические свойства лунного грунта. Последний сеанс связи состоялся 4 мая 1967 года.

- **КА «Лунар Орбитер 4»** (США). Старт 8 мая 1967 года. Спутник Луны. Масса 390 кг. Получено 344 снимка разного разрешения с расстояния от 6147 до 2669 км. Снимки покрывают 98% видимого и 96% обратного полушария Луны. 24 июля 1967 года связь с аппаратом была потеряна.
- **КА «Сервейер-4»** (США). Старт 14 июля 1967 года. Масса посадочного аппарата 283 кг. Неудачная попытка посадки на лунную поверхность.
- **КА «Эксплорер-35»** (США). Старт 19 июля 1966 года. Лунный спутник. Исследовал характеристики плазмы в окололунном пространстве.
- **КА «Космос-146»** (СССР, официальное сообщение). Старт 10 марта 1967 года. Первый запуск лунного варианта корабля «Союз» («Союз 7К-Л1Р») ракетой «Протон». Испытания прошли успешно. Последний разгонный блок вывел аппарат на траекторию к Луне.
- **КА «Космос-154»** (СССР, официальное сообщение). Старт 8 апреля 1967 года. Неудачные испытания лунного корабля «Союз 7К-Л1Р». Разгонный блок не сработал.
- **КА «Космос-159»** (СССР, официальное сообщение). Старт 17 мая 1967 года. Масса 4490 кг. Модель «Луна Е-6ЛС». Высокая орбита. Испытания систем связи для лунного пилотируемого проекта Л1.
- **КА «Лунар Орбитер 5»** (США). Старт 1 августа 1967 года. Спутник Луны. Масса 389 кг. Получено 213 снимков разного разрешения с расстояния от 5755 до 96 км. Окончательно отобраны площадки для посадок КК серии «Аполлон». Последний сеанс 31 января 1968 года.
- **КА «Сервейер-5»** (США). Старт 8 сентября 1967 года. Масса посадочного аппарата 279 кг. Мягкая посадка на лунную поверхность в Море Спокойствия, к востоку от кратера Сабин, 1°25' сев. широты и 23°12' вост. долготы. Получено более 19054 снимков лунной поверхности при разных высотах Солнца. Изучались механические, термические и электрические свойства лунного грунта. Впервые исследовался химический состав лунного грунта *in situ*. Последний сеанс связи состоялся 17 декабря 1967 года.
- **КА «Зонд 1967А»** (СССР). Старт 27 сентября 1967 года. Первая попытка запуска КК «Союз 7К-Л1» вокруг Луны. Запуск неудачный. Ракета «Протон» упала и взорвалась в 65 км от стартовой площадки.
- **КА «Сервейер-6»** (США). Старт 7 ноября 1967 года. Масса посадочного аппарата 280 кг. Мягкая посадка на лунную поверхность в Заливе Центральном, 0°31' сев. широты и 1°23' вост. долготы. Получено более 6315 снимков лунной поверхности при разных высотах Солнца. Исследовались механические, термические и электрические свойства лунного

грунта. Изучался химический состав материала поверхности. Последний сеанс связи состоялся 14 декабря 1967 года.

- **КА «Зонд 1967Б» (СССР).** Старт 22 ноября 1967 года. Вторая попытка запуска КК «Союз 7К-Л1» вокруг Луны. Запуск неудачный. На четвертой секунде после включения второй ступени она вышла из-под контроля. Аварийная система отделила КК «Союз» от ракеты и он приземлился в 80 км к югу от Джекказгана.
- **КА «Сервейер-7» (США).** Старт 7 января 1968 года. Масса 306 кг. Мягкая посадка на лунную поверхность к северу от кратера Тихо, 40°53' юж. широты и 11°27' зап. долготы. Получено более 21038 снимков лунной поверхности при разных высотах Солнца. Исследовались механические, термические и электрические свойства лунного грунта. Изучался химический состав лунного грунта *in situ*. Впервые был проведен эксперимент по регистрации лазерного сигнала с Земли. Последний сеанс связи состоялся 21 февраля 1968 года.
- **КА «Луна-1968А» (СССР).** Старт 7 февраля 1968 года. Испытание систем лунного спутника. Запуск неудачный.
- **КА «Зонд 4» (СССР, официальное сообщение).** Старт 2 марта 1968 года. Испытания КК «Союз 7К-Л1». Запуск прошел неудачно. Корабль был выведен на высокую орбиту (апогей 330000 км), но в сторону противоположную той, в которой находилась Луна. При посадке на Землю не сработала система управления.
- **КА «Луна-14» (СССР, официальное сообщение).** Старт 7 апреля 1968 года. Масса 1700 кг. Спутник Луны подобный КА «Луна-10». Изучение гравитационного поля Луны и окололунного пространства, испытание систем связи для будущих пилотируемых полетов. Последний аппарат второго поколения КА серии «Луна», модель «Луна Е-6».
- **КА «Зонд 1968А» (СССР).** Старт 23 апреля 1968 года. Попытка запуска КК «Союз 7К-Л1». Запуск неудачный. На 260 секунде полета выключились двигатели второй ступени. Аварийная система отделила КК «Союз» от ракеты.
- **КА «Зонд 1968Б» (СССР).** Старт 21 июля 1968 года. Попытка запуска КК «Союз 7К-Л1». Запуск неудачный. Взорвалась ступень ракеты (три человека, которые обслуживали стартовую площадку, погибли).
- **КА «Зонд-5» (СССР, официальное сообщение).** Старт 15 сентября 1968 года. Запуск КК «Союз 7К-Л1». Пролет вблизи Луны на минимальном расстоянии 1950 км и возвращение на Землю. Приземление неудачное; как и в случае КК «Зонд-4», неправильно сработала

система управления посадкой. Посадка с перегрузкой в 20 G была совершена в Индийском Океане; спускаемая капсула была подобрана советскими кораблями.

- **КА «Зонд-6»** (СССР, официальное сообщение). Старт 10 ноября 1968 года. Запуск КК «Союз 7К-Л1». Пролет вблизи Луны на минимальном расстоянии 2420 км и возвращение на Землю с отснятыми фотографиями. На обратном пути кабина разгерметизировалась. При посадке аппарат повредился, из-за того, что парашютная система сработала слишком рано. Отснятая фотопленка получила механические повреждения и частично засветилась, однако некоторые фотографии оказались хорошего качества.
- **КА «Зонд 1969А»** (СССР). Старт 20 января 1969 года. Попытка запуска КК «Союз 7К-Л1» с целью облета Луны и возвращения на Землю уже после успешного полета КК «Аполлон-8». Запуск неудачный.
- **КА «Луна 1969А»** (СССР). Старт 19 февраля 1969 года. Первый запуск новой модели «Луна Е8» (проект Л2 был прототипом). Попытка посадки КА «Луноход». Запуск неудачный из-за халатности операторов.
- **КА «Зонд-Л1-С1»** (СССР). Старт 21 февраля 1969 года. Попытка создания лунной орбитальной станции для проведения съемки лунной поверхности с целью дальнейшего определения мест посадок пилотируемых кораблей. Запуск новой ракеты Н1 был неудачным.
- **КА «Луна-1969Б»**. (СССР). Старт 15 апреля 1969 года. Попытка возврата на Землю лунного грунта. Запуск неудачный.
- **КА «Луна-1969В»** (СССР). Старт 14 июня 1969 года. Попытка возврата на Землю лунного грунта. Запуск неудачный.
- **КА «Зонд-Л1-С2»** (СССР). Старт 3 июля 1969 года. Попытка создания лунной орбитальной станции с использованием ракеты Н1. Запуск неудачный – ракета взорвалась при старте.
- **КА «Луна-15»** (СССР, официальное сообщение). Старт 13 июля 1969 года. Масса 5600 кг. Модель «Луна-Е-8-5». Попытка возврата на Землю лунного грунта непосредственно перед посадкой КК «Аполлон-11». 20 июля 1969 года. аппарат начал снижение для мягкой посадки. Однако, по одной версии, из-за ошибок в командах управления, по другой версии, из-за неточности определения высоты до лунной поверхности (возможно, из-за того, что система управления не учитывала эффекта масконов) аппарат врезался в поверхность в районе Моря Кризисов.

- **КА «Зонд-7»** (СССР, официальное сообщение). Старт 7 августа 1969 года. Пролет вблизи Луны и возврат на Землю. Доставлены цветные фотографии Земли и Луны. Единственный полностью успешный запуск к Луне КК «Союз 7К-Л1».
- **КА «Космос-300»** (СССР, официальное сообщение). Старт 23 сентября 1969 года. Модель «Луна Е-8-5». Попытка доставки на Землю лунного грунта. Станция не смогла покинуть низкую околоземную орбиту из-за ошибки в работе разгонного блока.
- **КА «Космос-305»** (СССР, официальное сообщение). Старт 22 октября 1969 года. Модель «Луна Е-8-5». Попытка доставки на Землю лунного грунта. Станция не смогла покинуть низкую околоземную орбиту из-за ошибки в работе разгонного блока.
- **КА «Союз 7К-Л1Е»** (СССР) Старт 28 ноября 1969 года. Масса 10380 кг. Испытание верхней ступени ракеты Н1 с лунным кораблем «Союз 7К-Л1». Запуск неудачный. Полет корабля прошел успешно только через год как «Космос-382».
- **КА «Луна-1970А»** (СССР). Старт 6 февраля 1970 года. Масса 5600 кг. Модель «Луна-Е-8-5». Попытка возврата на Землю лунного грунта. Запуск неудачный.
- **КА «Луна-1970Б»** (СССР). Старт 19 февраля 1970 г. Попытка запуска спутника Луны. Запуск неудачный.
- **КА «Луна-16»** (СССР, официальное сообщение). Старт 12 сентября 1970 года. Масса 5600 кг. Модель «Луна Е-8-5». Доставка на Землю около 100 г лунного грунта из Моря Изобилия (к западу от кратера Уэбб, 0°41' юж. широты и 56°18' вост. долготы). Бурение лунной поверхности на глубину 35 см выполнено по команде с Земли. Капсула с лунным грунтом приземлилась на удалении 1 км от места старта КА «Луна-16».
- **КА «Зонд-8»** (СССР, официальное сообщение). Старт 20 октября 1970 года. Облет Луны и возврат на Землю КК «Союз 7К-Л1». Доставлены снимки Луны и Земли отличного качества. Система посадки сработала неправильно и спускаемый аппарат с перегрузкой в 20 G приземлился в Индийском Океане; спускаемая капсула была подобрана советскими кораблями.
- **КА «Луна-17»** (СССР, официальное сообщение). Старт 10 ноября 1970 года. Масса КА 5600 кг. Модель «Луна Е-8». Доставлен аппарат «Луноход-1»; масса 840 кг, габариты 135 см (высота), 170 см (длина) и 160 см (ширина). Доставка на поверхность Луны – район южнее мыса Гераклид в Море Дождей, 38°17' сев. широты и 35°00' зап. долготы, – самоходного аппарата «Луноход-1», который за 10,5 месяцев проехал по лунной поверхности 10540 м. Получено свыше 20000 снимков лунной поверхности и более 200 панорам.

- **КА «Космос-379»** (СССР, официальное сообщение). Старт 24 ноября 1970 года. Испытание на низкой земной орбите лунного посадочного модуля ЛЗ (масса 5500 кг). Полет прошел успешно.
- **КА «Космос-382»** (СССР, официальное сообщение). Старт 2 декабря 1970 года. Испытание верхней ступени ракеты Н1 с лунным кораблем «Союз 7К-Л1». Запуск был успешным. Ступень запускалась другой ракетой; все пуски Н1 были неудачными.
- **КА «Космос-398»** (СССР, официальное сообщение). Старт 26 февраля 1971 года. Второе испытание на земной орбите лунного посадочного модуля ЛЗ (масса 5500 кг). Полет прошел успешно.
- **КА «Космос-434»** (СССР, официальное сообщение). Старт 12 августа 1971 года. Последнее испытание на низкой земной орбите лунного посадочного модуля ЛЗ (масса 5500 кг). Полет прошел успешно.
- **КА «Луна-18»** (СССР, официальное сообщение). Старт 2 сентября 1971 года. Масса 5600 кг. Модель «Луна Е-8-5». Неудачная попытка доставить лунный грунт на Землю из материкового района. Станция разбилась при попытке осуществить посадку севернее Моря Изобилия.
- **КА «Луна-19»** (СССР, официальное сообщение). Старт 28 сентября 1971 года. Тяжелый спутник Луны. Масса 5810 кг. Модель «Луна Е-8-ЛС». Изучение гравитационного поля Луны (масконов) и окололунного пространства.
- **КА «Луна-20»** (СССР, официальное сообщение). Старт 14 февраля 1972 года. Масса 5600 кг. Модель «Луна Е-8-5». Доставка грунта на Землю из материкового района Луны (материк между Морем Изобилия и Морем Кризисов, к северо-западу от кратера Аполлоний С, 3°32' сев. широты и 56°33' вост. долготы). Доставлено около 50 г. лунного грунта.
- **КА «Союз-ЛЗ»** (СССР). Старт 23 ноября 1972 года. Попытка запуска КА «Союз 7К-Л1» (спутник Луны) совместно с имитатором лунного посадочного модуля. Запуск усовершенствованной ракеты Н1 оказался неудачным.
- **КА «Луна-21»** (СССР, официальное сообщение). Старт 8 января 1973 года. Масса 5567 кг. Модель «Луна-Е-8». Доставка на поверхность Луны КА «Луноход-2» в кратер Лемонье (25°55' сев. широты и 30°40' вост. долготы). Работал около 4 месяцев. Прошел 37 км, исследуя береговую зону Луны. Получил 86 панорам и более 80000 одиночных изображений. При очередной попытке включить станцию для выхода из ночного режима, отклика не последовало.

- **КА «Эксплорер-49»** (США). Старт 10 июня 1973 года. Лунный спутник для радиоастрономических исследований. Был оснащен четырьмя антеннами, длиной по 230 м каждая. Находясь на лунной орбите, аппарат регистрировал источники излучения в отсутствии шумового фона Земли.
- **КА «Маринер-10»** (США). Старт 4 ноября 1973 года к Венере и Меркурию. Сразу после запуска аппарат провел съемку Луны в синих и желтых лучах. В результате были получены первые цветоделительные изображения для участка обратной стороны Луны. Они оказались не высокого качества и были опубликованы только в 1992 году.
- **КА «Луна-22»** (СССР, официальное сообщение). Старт 2 июня 1974 года. Тяжелый спутник Луны. Масса 5835 кг. Модель «Луна Е-8-ЛС». Исследование гравитационного и магнитного полей. Маневры на лунной орбите. Съемка лунной поверхности с разрешением около 100 м.
- **КА «Луна-23»** (СССР, официальное сообщение). Старт 28 октября 1974 года. Масса 5300 кг. Попытка возврата на Землю лунного грунта. Станция прилунилась в заданном районе, но грунтозаборное устройство не сработало. Связь со станцией продолжалась 3 дня.
- **КА «Луна-1975А»** (СССР). Старт 16 октября 1975 года. Попытка возврата на Землю лунного грунта. Не сработал разгонный блок при переводе станции на окололунную орбиту.
- **КА «Луна-24»** (СССР, официальное сообщение). Старт 9 августа 1976 года. Масса 5306 кг. Бурение и возврат на Землю лунного грунта из юго-восточного района Моря Кризисов (12°45' сев. широты и 62°12' вост. долготы) в нескольких сотнях метров от КА «Луна-23». Бурение проведено до глубины 1,8 м. Доставлено 170 грамм лунного грунта.

Далее следовал длительный перерыв в космических исследованиях Луны, он длился почти четверть века. Затем полеты возобновились:

- **КА «Хайтен»** (Япония). Старт 24 января 1990 года. Спутник Луны, известный также как «Мюзес-А». Целью полета было проверка технических решений, связанных с управлением спутника.
- **КА «Галилео»** (США). Старт 18 октября 1989 года. Полет к системе Юпитера. В декабре 1990 и декабре 1992 годов во время гравитационных маневров была проведена съемка лунной поверхности. С пролетной траектории были получены изображения части обратного и видимого полушарий Луны в нескольких длинах волн (при втором пролете проводилась также съемка районов северного полюса Луны). Снимки были использованы для построения изображений, передающих распределение по лунной поверхности показателей цвета 0.41/0.76 мкм и 0.76/0.99 мкм (см. определения ниже). С помощью этих карт был

открыт как возможная химическая аномалия район огромного ударного бассейна Южный полюс – Эйткен.

- **КА «Клементина»** (США). С 19 февраля по 3 мая 1994 года аппарат проводил комплексные исследования Луны с лунной полярной орбиты. В частности, эксперимент по глобальной съемке лунной поверхности в разных участках спектра, проведенный в рамках этого проекта, позволил получить огромный объем изображений высокого пространственного разрешения (порядка 100 метров на элемент разрешения). Наиболее качественный материал получен с использованием UVVis камеры, которая работала на длинах волн 0.415, 0.750, 0.900, 0.950, 1.000 мкм (UVVis обозначает спектральный диапазон камеры: ультрафиолетовый (UV), визуальный (Vis)). Снимки, сделанные этой камерой, широко используются для геологического анализа отдельных участков лунной поверхности.
- **КА «АзияСат 3/HGS-1»** (США). Старт 24 декабря 1997 года. Пролет вблизи Луны. Исследование окололунного пространства.
- **КА «Кассини»** (США). Старт 15 октября 1997 года. Целью миссии является исследование системы Сатурна. В июле 1999 года станция совершила гравитационный маневр вблизи Земли и Луны и передала фотографии видимой и небольшой части обратной стороны Луны при большом угле фазы. Съемка носила тестовый характер, данные не представляют научного интереса из-за низкого разрешения.
- **КА «Лунар Проспектор»** (США). Старт состоялся 6 января 1998 года. Целью миссии являлась геохимическая съемка Луны. Предпринималась попытка обнаружить лед в полярных зонах с помощью нейтронного спектрометра. Полет прошел очень успешно и был завершён 31 июля 1999 года управляемым падением аппарата в зону постоянной тени на южном полюсе Луны. С помощью гамма- и нейтронного спектрометров было получено распределение по лунной поверхности таких элементов, как торий и железо; построенные карты, однако, имеют низкое пространственное разрешение, около 100 км/пиксель.
- **КА «Назоми (Планета-Б)»** (Япония). Старт 3 июля 1998 года. Цель – исследование Марса. Во время гравитационного маневра вблизи Луны 24 сентября и 18 декабря 1998 года проводил фотографирование Луны в нескольких длинах волн. Получены снимки очень высокого качества, однако для научных целей они до сих пор не использовались.
- **КА «Смарт-1»** (Европейское Космическое Агентство). Старт состоялся 29 сентября 2004 года. Масса 350 кг. Аппарат находился на полярной эллиптической орбите с перигеем над южным полюсом. Используются двигатели малой тяги. Миссия предусматривала решение ряда научных задач (рентгеновская и оптическая съемка Луны), однако основной ее целью является проверка новых технологических концепций для будущих полетов с

применением плазменных двигателей малой тяги, использующих солнечную энергию. Оптические эксперименты миссии оказались не очень удачными из-за плохой их продуманности и недостаточной координации постановщиков экспериментов и групп, ответственных за функционирование аппарата. Миссия завершилась управляемым падением на Луну в районе южного полюса.

- **КА «Селена»** («Кагуйа», Япония). Старт этого аппарата состоялся 14 сентября 2007 года. КА состоит из посадочного модуля и спутника, который помещается на полярную круговую орбиту с высотой около 100 км. Посадочный модуль позволил испытать систему мягкой посадки на лунную поверхность. Спутник оснащен приборами для детальной гравиметрии и исследования прецессии Луны. Используется оптическая съемка для картографирования с высоким пространственным разрешением химического и минералогического состава лунной поверхности. Спутник оснащен магнетометром (для определения остаточной намагниченности пород лунной поверхности), гамма и рентгеновским спектрометрами (для определения элементного состава). Вероятно, наиболее интересным с точки зрения понимания эволюции лунной поверхности на ранних стадиях ее формирования является эксперимент по низкочастотной радиолокации Луны (длина волны около 60 метров). Используется мощный источник радиоволн, около 800 ватт. Предполагается провести зондирование лунной поверхности до глубин 5 км с разрешением по глубине 100 метров. Данные измерений в настоящее время обрабатываются.
- **КА «Лунар-А»** (Япония). Основная задача – доставка пенетраторов на лунную поверхность. Старт планировался на август 1999 года, однако, затем смещался много раз, из-за проблем с аппаратурой. В начале 2007 года миссия была полностью отменена. Это вызывает большое сожаление, т.к. на КА «Лунар-А» планировалось проведение интересных экспериментов. Два пенетратора (по 13 кг каждый, с глубиной внедрения до 3 м) должны были быть сброшены в экваториальной области на видимой и обратной стороне Луны. Пенетраторы – снаряды длиной 90 см и диаметром 14 см, рассчитанные на перегрузки 10000 G, – оснащены сейсмометрами и измерителями теплового потока, идущего из недр Луны. Сейсмометры могли бы вести мониторинг сейсмической активности в течение года. Это позволило бы исследовать внутренне строение Луны. Опрос приборов пенетраторов предполагалось производить с помощью орбитального модуля.
- **КА «Чандрайаан-1»** (Индия). Спутник «Чандрайаан-1» («Chandrayaan-1») был запущен 22 октября 2008 года, вес спутника 523 кг. Сформирована полярная лунная орбита с высотой 100 км. Длительность миссии – 2 года. Научная аппаратура укомплектована в рамках международной кооперации. Центральным прибором является панорамная камера с

широтой захвата полосы съемки 40 км (пространственное разрешение 5 м), работающая в широком спектральном диапазоне, который перекрывает весь видимый диапазон. Имеется три европейских прибора, ранние версии которых были установлены на КА «Смарт-1». Среди них: рентгеновский спектрометр (CIXS-2) и оптический спектрометр (SIR-2). Многообещающим является эксперимент для спектрального картирования Луны с пространственным разрешением 80 м в полосе захвата 40 км и спектральным разрешением 15 нм в диапазоне длин волн 400 – 900 нм (HySI, Hyper Spectral Imager).

- **КА «Чанге 1» (Китай).** Запуск спутника «Чанге-1» («Chang'e-1») весом 2350 кг осуществлен 24 октября 2007 года. Аппарат доставлен на окололунную орбиту высотой 200 км. Общий вес научной аппаратуры составляет около 130 кг. В состав включены ПЗС камеры для стереосъемки лунной поверхности (разрешение 120 м), лазерный альтиметр, гамма и рентгеновский спектрометры (исследования элементного состава), и микроволновый радиометр для оценки толщины реголитового слоя Луны. Хотя в Китае нет опыта в области исследования Луны наземными и космическими средствами, китайцы практически все приборы сделали самостоятельно. Китай планирует запуск спутника «Чанге 2» и посадочного лунного модуля в 2012 году.
- **КА «Лунный Разведчик» (США).** Начало миссии LRO («Lunar Reconnaissance Orbiter») перенесено на весну 2009 года, из-за нехватки ракетносителей «Атлас-5». Это должна быть наиболее яркая и результативная миссия к Луне в ближайшие годы. Ее номинальная длительность около года с перспективой продления до 5 лет. Будет использована низкая круговая полярная орбита с высотой 50 км (возможно до 30 км). Само по себе это вызов возможностям управления космическим аппаратом, поскольку такие орбиты нестабильны – они «разбалтываются» за счет неоднородностей распределения масс в теле Луны. Движение аппарата будет требовать постоянной коррекции, для этого на борту спутника предусмотрен солидный запас рабочего вещества 500 – 700 кг. Спутник будет оснащен современным телеметрическим каналом с пропусканием 100 Мб/с. За время миссии предполагается передать на землю несколько сотен терабайт информации, что на 5 порядков больше того, что получил зонд «Клементина». На КА «Лунный Разведчик» будет всего шесть научных приборов для исследования Луны, но все они весьма оригинальны (см. ниже). Среди них камера, для глобальной съемки лунной поверхности с пространственным разрешением около 0,5 м.
- **КА «Луна-Глоб» (Россия).** Начало миссии планируется на 2012 год. Основная задача сброс на лунную поверхность пенетраторов, которые будут нести сейсмометры и другие приборы. КА будет оснащен десятью малыми и тремя большими пенетраторами. Малые пенетраторы

войдут в поверхность со скоростью 2,6 км/с. Они создадут сейсмическую когерентную апертуру, с помощью которой предполагается исследовать внутреннюю структуру Луны. Например, выяснить есть ли у Луны ядро. Большие пенетраторы будут иметь тормозные двигатели и войдут в поверхность в районе южного полюса со скоростью около 100 м/с. Они будут исследовать состав летучих, которые могут накапливаться в холодных ловушках на полюсах Луны. Платформа, с которой будут сброшены пенетраторы, станет лунным полярным спутником, задача которого опрос приборов пенетраторов и проведение съемки лунной поверхности.

В последнее время активно обсуждается и анализируется ряд других лунных проектов, в том числе, коммерческих, которые, однако, пока серьезно не финансируются. В основном, в этих обсуждениях участвуют страны Евросоюза, США, Россия, Китай и Японии, однако к ним могут присоединиться другие страны, например, Украина и Бразилия.

## **2.2. Цели и результаты полетов автоматических станций**

Автоматическими станциями был получен большой объем данных, которые не только обогатили фундаментальную науку, но и позволили обеспечить необходимыми данными пилотируемые полеты к Луне. Полеты автоматических станций значительно дешевле, в сравнении с пилотируемыми полетами. В последнее время множество автоматических зондов исследует не только Луну, но и другие объекты Солнечной системы.

**КА серии «Пионер».** По целям и поставленным задачам американским аналогом станций серии «Луна» модели «Е-3» была серия аппаратов «Пионер-0» – «Пионер-4», а также «Пионер Р3, Р30 и Р31». Ни один из этих аппаратов не выполнил свою задачу. Главной целью полетов КА «Пионер-0» – «Пионер-2» являлось фотографирование обратной стороны Луны при облете с помощью сканирующей фототелевизионной системы (размер элемента одна тысячная радиана). Изображения, полученные такой системой, могли бы оказаться несравнимо более высокого качества, чем те, что были переданы КА «Луна-3». Аппараты «Пионер-3» и «Пионер-4» были меньше и летали без фотокамер (испытывались лишь механизмы включения камер). На КА «Пионер-Р3» и «Пионер-Р31» были фототелевизионные системы, а на КА «Пионер-Р30» такая система была заменена прибором для изучения радиационного пояса Земли.

**КА серии «Луна»** подразделяются на три поколения. Первое поколение этих станций (модель «Е-3») создавалось для решения задачи достижения Луны. Среди успешных полетов этих станций отметим полеты КА «Луна-2» (попадание в Луну) и КА «Луна-3» (фотографирование обратной стороны, см. рис. 2.2). На снимках, сделанных камерой КА «Луна-3», видно несколько морей; имеются также дефекты изображения. Вообще на переданных снимках мало лунных деталей, потому, что фотографирование было проведено при небольшом фазовом угле. Авторы проекта, желая снять как можно большую площадь лунной поверхности, пренебрегли тем, что при полной фазе рельеф на Луне не виден. Кроме того, изображения оказались низкого качества. Главная причина тому была техническая. Сразу же после съемки фотопленка проявлялась и закреплялась прямо на борту станции (пленка последовательно соприкасалась с губкой, пропитанной проявителем, а затем – с губкой, пропитанной фиксажем). После этого изображения сканировались с помощью бортового микрофотометра, а регистрируемый аналоговый сигнал передавался по телеметрическому каналу на Землю. Этот громоздкий путь получения данных привел к тому, что первые изображения обратной стороны Луны оказались отягощенными ложными деталями. Некоторые из них даже, сгоряча, получили названия. Например, одно довольно большое образование было названо «Хребет Советский». Это поначалу вызвало недовольство западных ученых и считалось примером идеологической пропаганды СССР. Позднее, когда поступили новые данные, в частности, полученные с помощью автоматической станции «Зонд-3», номенклатура деталей обратной стороны Луны была откорректирована, «Хребта Советского» не стало; сейчас эта история в свете крушения советской системы приобрела признаки политического анекдота.



Рис. 2.2. Снимок обратной стороны Луны, сделанный КА «Луна-3»

Начиная с КА «Луна-4» и до КА «Луна-14», для полетов использовалась модель «Е-6» в двух модификациях: аппарат мягкой посадки и лунный спутник. Из примерно 12 попыток мягкой посадки успешно завершились лишь две (КА «Луна-9» и «Луна-13»). Во времена, когда готовились мягкие посадки, несущая способность лунной поверхности была неизвестна. Рассматривались две крайности. Первая: поверхность твердая как скала; вторая (гипотеза Голда): поверхность покрыта многометровым слоем тонкой пыли, в которой космический аппарат утонет. Харьковский астроном Н. П. Барабашова был одним из тех, кто убедил Главного конструктора С. П. Королева в том, что поверхность Луны достаточно твердая для того, чтобы выдержать космический аппарат. Академик Н. П. Барабашов полагал, основываясь на фотометрических измерениях Луны и возможных лабораторных аналогов ее вещества, что лунная поверхность покрыта мелким щебнем. Это была почти правильная модель. Оказалось, что хотя Луна покрыта материалом, напоминающим песок, в нем действительно есть множество включений твердых (каменных) фрагментов. Наличие камней разных размеров хорошо видно на первых панорамах лунной поверхности, переданных автоматическими станциями «Луна-9» и «Луна-13» (см. рис. 2.3).

С публикацией самой первой лунной панорамы связана история, которая хорошо иллюстрирует то, в какой обстановке работали тогда советские ученые, связанные с космосом. При передаче данных с борта КА «Луны-9» сигналы были перехвачены радиотелескопом радиоастрономической обсерватории Джодрелл Бэнк (Англия) и расшифрованы. Из соображений корректности англичане решили подождать, пока панорамы будут опубликованы в СССР. Однако время шло, а публикации все не было. Английские ученые послали телеграмму в Академию наук СССР; их удивляло, что такая сенсационная картинка замалчивается советскими коллегами. Ответа они не получили и потому сочли себя свободными от соблюдения приличий; они дали снимки в газеты и западная пресса первой опубликовала панорамы Луны, впервые полученные советской станцией «Луны-9». Однако опубликованные фотографии оказались очень сильно искажены; узкий и длинный панорамный снимок, длина которого в несколько раз превышала ширину, англичане вогнали в кадр с соотношением сторон 3:4. В результате на английском снимке лунная поверхность предстала в виде торчащих заостренных камней и обелисков, в которые превратились небольшие бугорки поверхности. Но почему молчала советская пресса? Причина оказалась анекдотичной: слишком много разрешительных подписей потребовалось собрать для опубликования панорам; за день не успели. Пока бумаги попали на подпись, по меткому выражению сотрудника ГЕОХИ РАН Г. А. Бурбы, к «Главному астроному страны» Л. И. Брежневу, Леонид Ильич успел лечь спать, будить его по пустякам не стали ...



Рис. 2.3. Фрагмент лунной панорамы, переданной станцией «Луна-13» из Океана Бурь. На переднем плане видны фрагменты станции

Полеты советских лунных спутников, например, КА «Луна-10» – «Луна-12» и «Луна-14» проходили более удачно, чем аппаратов мягкой посадки. В частности, были получены изображения небольших участков с максимальным разрешением около 20 м. Это был секретный материал (первичные данные уже давно уничтожены), который для научных целей фактически не использовался. На рис. 2.3. приведена одна из таких фотографий; к сожалению, она не имеет координатной привязки. Если бы такая привязка была, этот снимок, совместно с современными данными высокого разрешения, можно было бы использовать для поиска свежих кратеров.

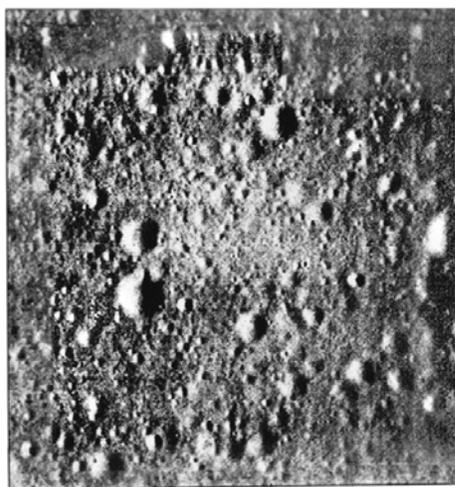


Рис. 2.4. Снимок высокого разрешения, сделанный фототелевизионной системой КА «Луна-12». Координаты площадки не известны

Параноидальная секретность в космических исследованиях СССР сильно мешала широкому использованию и известности советских космических достижений. Эксперименты часто задумывались и проводились людьми, далекими от конкретных научных исследований Луны, но работающими в солидных конструкторских бюро и, следовательно, допущенными к государственным секретам. При этом властвовал принцип: делаем, что умеем, а не то, что необходимо для науки. Действительно, почти ничего не стоило бы на спутниках «Луна-10» – «Луна-12» и «Луна-14», а также КА «Луна-19» и «Луна-22» провести съемку поверхности с двумя светофильтрами. По крайней мере, сейчас о полученных результатах можно было бы говорить, например, «была впервые проведена спектрональная съемка поверхности обратной стороны Луны». Однако в то время об этом никто не подумал.

Будучи первым, спутник «Луна-10», в принципе, имел шансы открыть масконы (это важное открытие было сделано позднее с помощью аппаратов серии «Лунар Орбитер»). Но оказалось, что программа работы спутника «Луна-10» предусматривала решение несравненно более «важных» задач, чем открытие масконов. С помощью этого аппарата была успешно (!) проведена трансляция с лунной орбиты Интернационала в качестве подарка 23 съезду КПСС.

Исследования Луны с помощью КА серии «Луна» моделей «Е-6» и «Е-8» были вспомогательной частью программы пилотируемых полетов к Луне.

Аппараты модели «Е-8» начинаются с КА «Луна-15», хотя до этого было три неудачных запуска аппаратов из этой серии. Было создано три модификации: (1) луноход, (2) аппарат с устройством взятия лунного грунта с его последующей доставкой на Землю и (3) лунный спутник. Несмотря на ряд неудач при запусках, аппараты этой модели были наиболее результативными в советской программе лунных исследований. В частности, был доставлен грунт из трех мест лунной поверхности (КА «Луна-16», «Луна-20» и «Луна-24»), в том числе из материкового района Луны (КА «Луна-20»). На станциях «Луна-16», «Луна-20» и «Луна-24» использовались грунтозаборные устройства вращательно-ударного типа, которые были способны бурить не только реголитовую массу, но и камни. Использовался полый бур, который постепенно заполнялся грунтом во время бурения. После завершения операции заполненный бур погружался на возвращаемый аппарат, двигатели которого обеспечивали вертикальный взлет и разгон до скорости 2,7 км/с.

Тогда многие удивлялись, почему места посадок советских АМС выбраны так странно: на восточном краю лунного диска, близко друг к другу, приблизительно вдоль меридиана в области лунного экватора (рис. 2.1). Правдивый ответ был прост: лучше так, чем никак. В то время в СССР отсутствовали ракетносители, имеющие достаточно большую грузоподъемность. Понадобился интенсивный мозговой штурм ученых, инженеров и

конструкторов НПО им. С. А. Лавочкина (его тогда возглавлял главный конструктор Г. Н. Бабакин), чтобы, используя скромные возможности имеющегося тогда в СССР ракетносителя, доставить лунный грунт на Землю. Решающая идея по экономии веса посадочного блока была предложена инженером Ю. Давыдовым; она состояла в том, чтобы посадить АМС с грунтозаборным устройством в такой точке лунной поверхности, из которой, при вертикальном взлете с Луны для возвращения, станция прошла бы на достаточно близком расстоянии от Земли. Это сразу позволило отказаться от системы ориентации станции в окололунном пространстве и очень серьезно сэкономить в весе возвращаемого аппарата. К счастью, такая точка оказалась на видимой стороне Луны у восточного края лунного диска.

Советские КА доставили всего около 320 г лунного грунта, однако и это количество было важно, т. к. грунт был привезен из мест, в которых КК «Аполлон» не летали. Часть этого грунта была использована для обмена на американские пробы грунта, что позволило советским ученым исследовать химические и физические характеристики лунного вещества почти на равных с американцами. В основном эти исследования велись в Институте геохимии и аналитической химии им. В. И. Вернадского (ГЕОХИ РАН), в котором лунное вещество хранится и по сей день. Следует отметить, что этот институт был головным академическим учреждением по космическим лунным исследованиям в СССР. В частности, изучением лунных образцов и геологическим обеспечением полетов здесь занимались сотрудники лаборатории сравнительной планетологии, которая была создана замечательным ученым К. П. Флоренским (рис. 2.5). Кирилл Павлович Флоренский - сын известного русского философа и религиозного деятеля Павла Флоренского, погибшего в сталиских лагерях.

Сейчас в этой лаборатории продолжают работать известные специалисты, сделавшие важные работы по лунной геологии и геохимии, например, А. Т. Базилевский, А. В. Иванов и М. А. Назаров.

К наиболее важным научным результатам, полученным при изучении лунного грунта, можно отнести открытие в верхних зонах частиц реголита микровключений (суперпарамагнитной фазы) восстановленного железа. Размер включений несколько десятков нанометров, поэтому это железо часто называют нанофазным. Образование нанофазного железа обусловлено воздействием на лунную поверхность внешних (космогенных) факторов таких, как микрометеоритная бомбардировка и облучение частицами солнечного ветра. Такое железо способно оказывать существенное влияние на оптические спектры лунного грунта. Открытие нанофазного железа было сделано независимо и почти одновременно в СССР и США. Это открытие было даже зарегистрировано в Комитете по изобретениям и открытиям СССР под номером 219.



Рис. 2.5. Кирилл Павлович Флоренский (1915–1982), крупный советский ученый, много сделавший для развития планетологии, организатор уникальной лаборатории сравнительной планетологии ГЕОХИ РАН



Рис. 2.6. Фотография фрагмента лотка с грунтом, доставленным КА «Луна-16»

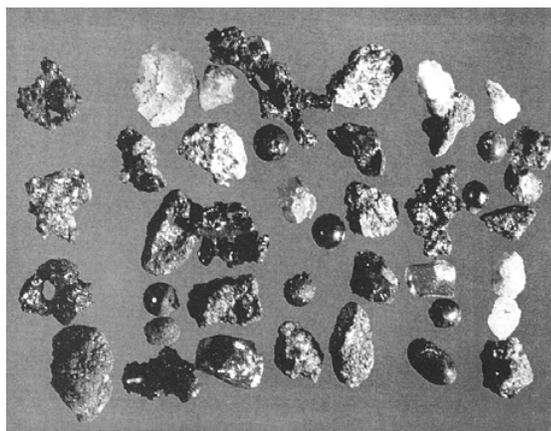


Рис. 2.7. Микрофотография частиц лунного грунта, доставленного КА «Луна-16»

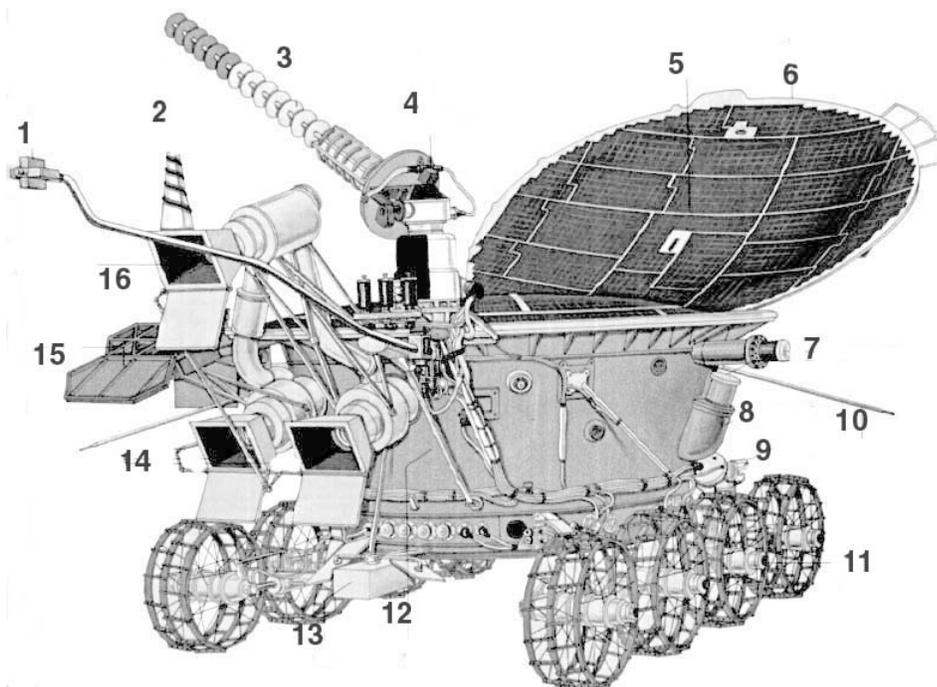


Рис. 2.8. Схематическое изображение КА «Луноход-2»; основные элементы конструкции и научные приборы указаны здесь цифрами: 1 – магнетометр, 2 – широконаправленная антенна, 3 – узконаправленная антенна, 4 – механизм наведения антенны, 5 – солнечная батарея, 6 – откидная крышка, 7 – панорамные телевизионные камеры горизонтального и вертикального обзора, 8 – изотопный источник тепловой энергии, 9 – грунтозаборное устройство, 10 – штыревая антенна, 11 – колесо с самостоятельным мотором, 12 – герметичный приборный отсек, 13 – анализатор химического состава грунта, 14 – пара телевизионных камер для стереоскопической съемки, 15 – оптический уголкового отражатель, 16 – телевизионная камера

Грунтозаборные устройства КА «Луна-16», «Луна-20» и «Луна-24» несколько отличались друг от друга. На рис. 2.6 показана часть лотка с грунтом, доставленным КА «Луна-16». Виден сыпучий материал с фрагментами мелких камней и брекчий. Формы частиц этого материала сильно варьируются (рис. 2.7). Встречается заметное количество почти сферических частиц; это капли расплава застывшие в полете при ударном разбрызгивании. Наиболее длинной была колонка грунта, доставленного КА «Луна-24», около 1,8 метра.

Очень большой объем исследований проводился КА «Луноход-1» и «Луноход-2», которые были доставлены, соответственно, КА «Луна-17» и КА «Луна-21». Успешная работа этих аппаратов имела большой резонанс в мире («наш любимый лунный трактор»). Это были первые автоматические передвижные научные лаборатории (см. рис. 2.8). Работой и движением этих аппаратов управлял с Земли экипаж из пяти человек. Особенно многообещающей была

программа КА «Луноход-2». К сожалению, аппарат прекратил работу раньше срока, хотя и успел проехать почти 37 км (для сравнения: КА «Луноход-1» проехал 10,5 км). Случилось, вероятно, следующее. Аппарат работал в кратере Лемонье в районе Прямой борозды. Будучи на склоне этой борозды, он въехал внутрь свежего, окруженного полем камней, лунного кратера. Грунт внутри кратера оказался очень рыхлым; аппарат буксовал, пока задним ходом не выбрался из опасного места. При этом откиннутая назад крышка с солнечной батареей (см. деталь 6 на рис. 2.8), возможно, зачерпнула грунт с вала кратера (или склона борозды). Во время консервации лунохода на время лунной ночи эта крышка насыпала этот грунт на верхнюю часть аппарата, которая также покрыта солнечной батареей. При расконсервации, КА «Луноход-2», не получив электропитания нужной мощности, не включился. По другой версии фатальной оказалась пыль, поднятая при буксовке, которая, осевши на поверхности аппарата (эта пыль хороший теплоизолятор), нарушила тепловой режим внутри станции. Эта же пыль могла осесть на солнечных батареях станции.



Рис. 2.9. Фрагмент лунной панорамы, снятой КА «Луноход-2». Панорама получена фототелевизионной системой с вертикальной строчной разверткой (ее следы прослеживаются на панораме)

По материалам работы КА «Луноход-1» издан атлас фотографий с подробными комментариями геологов, анализировавших их. Однако на издание аналогичного атласа КА «Луноход-2», полностью подготовленного к публикации в Институте геохимии и аналитической химии им. В. И. Вернадского, у Советской страны, затратившей порядка 100 миллионов рублей для осуществления космического проекта, не нашлось нескольких тысяч рублей – атлас так и не был опубликован. На рис. 2.9 приведен фрагмент лунной панорамы, полученной КА «Луноход-2». Хорошо видны следы колес аппарата на лунной поверхности.

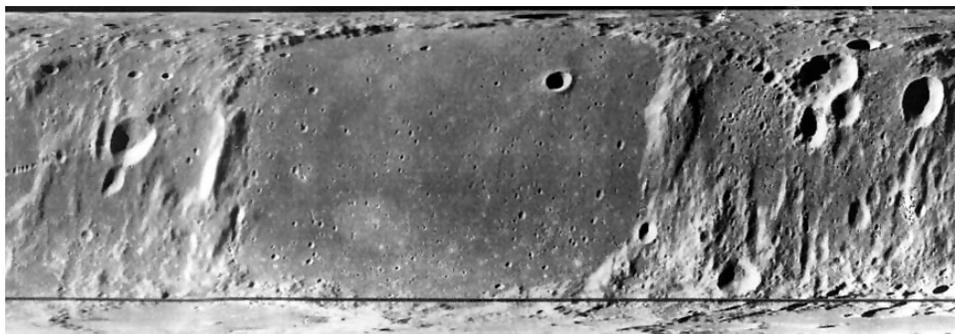


Рис. 2.10. Полоса лунной поверхности, снятая телефотометром КА «Луна-22». В центре полосы можно видеть огромный кратер Птолемей (он сильно искажен из-за особенностей проекции). Верхний и нижний край соответствуют горизонту. Темная узкая полоса в нижней части снимка связана с попаданием части антенны аппарата в поле зрения телефотометра

В 1993 году Главкосмос России продал запасную модель КА «Луноход-1» на аукционе Сотби за 68 тысяч долларов сыну одного из американских астронавтов (интересно, как счастливый обладатель этого аппарата собирается его использовать?). Аппарат «Луноход-3» (не состоявшийся запуск) стоит в музее НПО им. С. А. Лавочкина.

Спутники модели «Е-8», т.е. КА «Луна-19» и «Луна-22» отрабатывали маневры на лунной орбите и вели дистанционные исследования Луны, результаты которых были, однако, малопродуктивны. Отметим съемку лунной поверхности, выполненную КА «Луна-22» с помощью механического сканирующего устройства. На рис. 2.10 приведен пример изображения, полученного КА «Луна-22». Это панорама поверхности кратера Птолемей (см. также рис. 1.26), снятая от горизонта до горизонта (строчная развертка) механическим сканером. Кадровая развертка осуществлялась за счет собственного движения аппарата. Пространственное разрешение снимков около 200 м. Инженеры, ставившие этот эксперимент в обстановке секретности и отсутствия серьезной научной экспертизы, не понимали, что, если бы они провели эту съемку со светофильтрами, то обеспечили бы научную ценность полученных изображений до наших дней. Уже в начале 80-х годов данные были стерты; говорили, что кому-то срочно понадобились магнитные ленты для хранения других цифровых записей.

**КА серии "Рейнджер"**. Аппараты этой серии были предназначены для выполнения первых разведочных исследований лунной поверхности. Сначала их планировалось пять, но когда высадка человека на Луну стала национальной программой США, число полетов было решено увеличить. Главным было получение снимков лунной поверхности с разным разрешением в процессе падения аппарата на лунную поверхность. КА «Рейнджер-1» и «Рейнджер-2» запускались на околоземную орбиту для проведения испытаний систем и

приборов для будущих полетов аппаратов этой серии к Луне. КА «Рейнджер-3» – «Рейнджер-5» несли на себе интересные научные приборы. Камеры (видиконные системы) для съемки лунной поверхности в процессе падения, а также капсулы с сейсмометрами, которые должны были работать после прилунения. Кроме того, на аппаратах были установлены гамма-спектрометры (определение химического состава) и радиовысотомеры. Полеты КА «Рейнджер-3» – «Рейнджер-5» оказались неудачными.

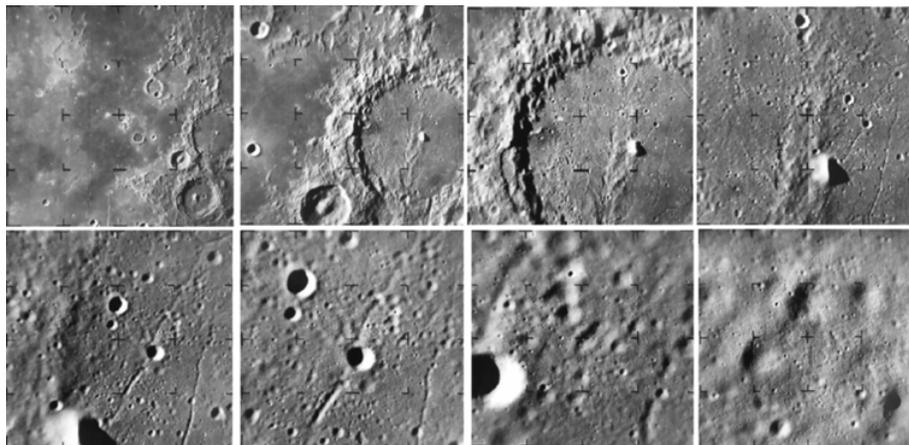


Рис. 2.11. Последовательность снимков, сделанных КА «Рейнджер-9» камерой А при падении на лунную поверхность (движение слева направо от верхнего левого угла)

Следующие аппараты этой серии, «Рейнджер-6» – «Рейнджер-9», были выполнены скромнее – они были оснащены только телевизионными камерами. Каждый аппарат нес 6 камер, разделенные на две полностью автономные группы (даже с раздельным питанием). Такое дублирование повышало шансы удачной съемки. Однако полет КА «Рейнджер-6» был все же неудачен – все камеры, не смотря на высокое резервирование, не включились. КА «Рейнджер-7» – «Рейнджер-9» полностью выполнили свою программу, передав на Землю изображения лунной поверхности высокого качества. Последние изображения (перед столкновением с поверхностью) имели разрешение около метра. На рис. 2.11 показана последовательность изображений лунной поверхности, полученных при жесткой посадке КА «Рейнджер-9» в кратере Альфонс.

**КА серии "Лунар Орбитер"** Аппараты этой серии предназначались для получения высококачественных изображений Луны с целью выбора мест посадки для аппаратов серии «Сервейер» и КК «Аполлон». Изображения регистрировались на фотопленку, проявлялись на борту и с помощью сканирующего фототелевизионного устройства передавались на Землю. Все аппараты этой серии, «Лунар Орбитер-1» – «Лунар Орбитер-5», выполнили свои

программы очень успешно, дав геологам огромный простор для исследования и возможности выбора мест будущих посадок. Анализ параметров орбит аппаратов этой серии позволил открыть масконы (mass concentrations). Это одно из наиболее важных открытий, сделанных автоматическими космическими аппаратами при исследовании Луны. Некоторые изображения были получены с очень высоким пространственным разрешением (~10 м). КА «Лунар Орбитер-4» и «Лунар Орбитер-5» имели почти полярные орбиты. Отснято около 99% площади лунной поверхности. Примеры изображений, полученных КА серии «Лунар Орбитер» приведены на рис. 2.12 – 2.16.

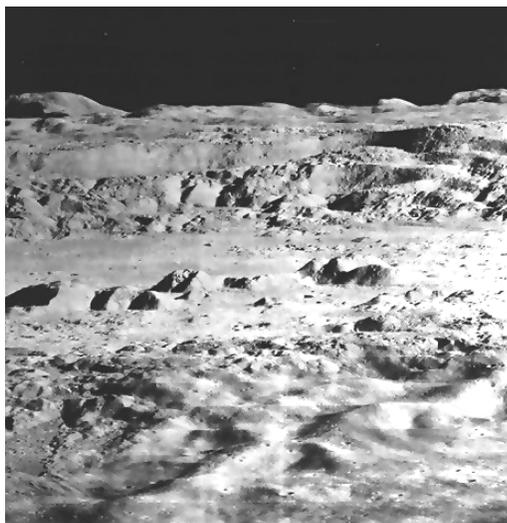


Рис. 2.12. Фрагмент перспективного снимка кратера Коперник, сделанного камерой КА «Лунар Орбитер-2». Видны оползни на валу кратера (задний план) и пики центральной горки (средний план)

Перспективный снимок внутренней части кратера Коперник диаметром 100 км, полученный КА «Лунар Орбитер-2», показан на рис. 2.12. Центральный пик кратера поперечником 15 км имеет высоту 400 м. На заднем плане – северный вал кратера. На рис. 2.13 показан также перспективный снимок холмов Мариуса, полученный КА «Лунар Орбитер-2». Холмы Мариуса представляют собой купола старых вулканов; это не очень распространенная форма рельефа на Луне. Надирный снимок части поверхности Океана Бурь, сделанный КА «Лунар Орбитер-4», показан на рис. 2.14 (видна часть плато Аристарх). Аналогично получены снимки высокого разрешения образования Рейнер-гамма и кратера Гумбольдт, соответственно, рис. 2.15 и рис. 2.16. Изображение свирла получено при угле фазы около 50°; однако тени заметны только у кратеров, детали свирла Рейнер-гамма теней не отбрасывают, и являются альбедными деталями. Кратер Гумбольдт находится на краю видимого полушария Луны; до

космических полетов о структуре его поверхности не было ничего известно. Как выяснилось, благодаря съемке КА «Лунар Орбитер-4», днище этого кратера имеет удивительную тектоническую структуру: имеется две системы трещин примерно радиального и концентрического простираения. Слева от центра снимка (рис. 2.16) виден кратер с двойным валом; такие кратеры могут возникать, если кратерообразование происходит в мишени, которая имеет слоевую структуру.



Рис. 2.13. Перспективный снимок района холмов Мариуса, сделанный камерой КА «Лунар Орбитер-2»

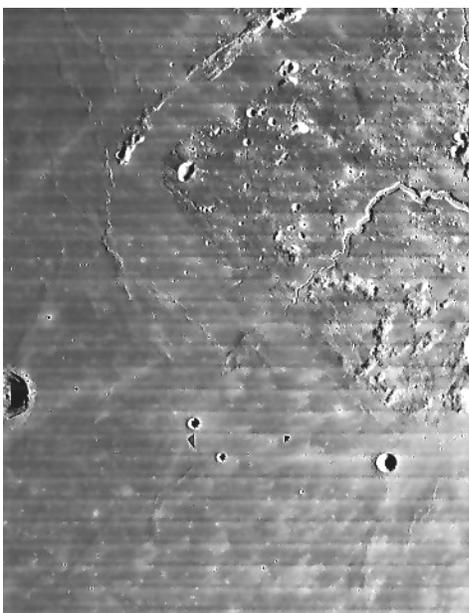


Рис. 2.14. Надирный снимок северной части поверхности Океана Бурь, сделанный КА «Лунар Орбитер-4»; плато Аристарх находится справа в верхней половине изображения. Полосатость изображения связана с блочностью передачи данных на Землю (это характерно для всех данных КА серии «Лунар Орбитер»)



Рис. 2.15. Один из лучших снимков свирля Рейнер-гамма, сделанный камерой КА «Лунар Орбитер-4». Хорошо видно, что это чисто альбедное образование

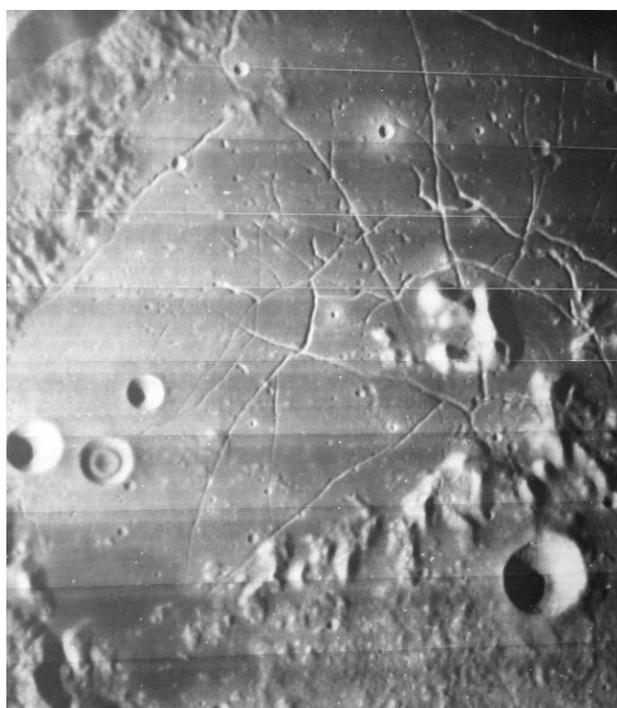


Рис. 2.16. Снимок кратера Гумбольдт, сделанный камерой КА «Лунар Орбитер-4»

**КА серии "Сервейер"**. Аппараты этой серии предназначались для выполнения разведочных исследований лунной поверхности с помощью приборов, непосредственно размещенных на этой поверхности. Тормозные двигатели аппаратов этой серии обеспечивали гашение скорости практически до нуля на высоте около 4 м. Затем двигатели отключались, и

аппарат в свободном падении садился на поверхность, амортизируя удар опорами. Такая схема позволяла свести к минимуму возмущение лунной поверхности струями газов, истекающих из двигателей. Опоры этих станций были рассчитаны на большую нагрузку. Из-за ошибки при отключении тормозного двигателя КА «Сервейер-3» станция ударилась о поверхность настолько сильно, что подскочила два раза, один на высоту до 10 м, другой – 3 м; опоры выдержали это. Через 2,5 года КК «Аполлон-12» совершил посадку в 183 м от КА «Сервейер-3». Такая точность посадки стала возможной благодаря кропотливой работе известного исследователя Луны Ивена Вайтекера, который по панорамам, переданным КА «Сервейер-3» сумел найти место его посадки на снимках, полученных КА «Лунар Орбитер». Астронавты демонтировали 10 кг деталей станции, включая телевизионную камеру, для изучения влияния космогенных факторов на материалы, используемые для создания космической техники. Аппарат оказался покрытым заметным слоем пыли. Часть ее могла осесть из-за скачков аппарата. Однако большая часть пыли осела, видимо, при посадке КК «Аполлон-12».

Сенсационным открытием, сделанным при исследовании возвращенных деталей КА «Сервейер-3», было обнаружение земной бактерии *Streptococcus mitis*. Такие микроорганизмы, диаметром около микрона, часто находят в дыхательных путях человека. Поразительно, что бактерии удалось выжить на Луне в течение 31 месяца, находясь внутри негерметичной телевизионной камеры. Аналогичные микроорганизмы были найдены и на костюмах астронавтов, в которых они побывали на лунной поверхности. Лунный грунт сам по себе очень инертен в своем влиянии на живые организмы – это и не стимулятор, и не ингибитор. Однако вакуум и большие перепады температуры, казалось бы, не должны были оставить шансов на выживание микроорганизмов.

Начиная с КА «Сервейер-5», аппараты этой серии были оснащены альфа-анализаторами для определения элементного состава лунной поверхности в месте посадки. КА «Сервейер-6», после исследования места посадки по полной программе, был поднят управляющими двигателями и смещен на 2,5 м в сторону и продолжил исследования. КА «Сервейер-7» был направлен в точку на северной части вала кратера Тихо. В этом уникальном месте также был измерен химический состав с помощью альфа-анализатора; этот прибор не хотел ложиться на грунт, и его опустили принудительно с помощью ковша-захвата, который использовался для забора грунта. С помощью КА «Сервейер-7» были зарегистрированы глобальные перемещения облаков пыли вслед за движением терминатора, очень неплотных, но, возможно, способных за длительное время обновлять поверхность в масштабах порядка микрона. Пылевые облака на Луне образуются, вероятно, за счет электростатического зависания частиц субмикронных размеров при взаимодействии лунного реголита с солнечным ветром.

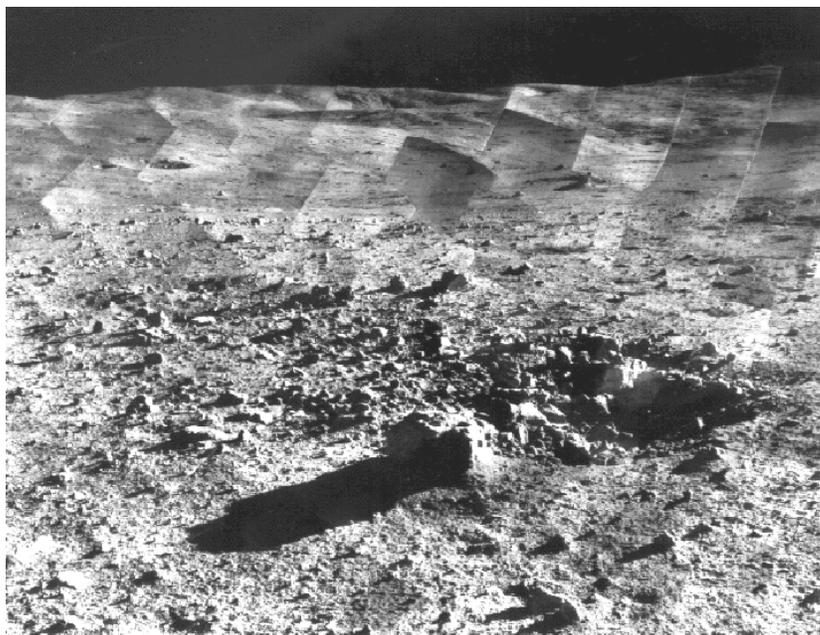


Рис. 2.17. Мозаика снимков, сделанных камерой КА «Сервейер-7»

На рис. 2.17 приведена мозаика изображений, полученных КА «Сервейер-7». Камень на переднем плане имеет поперечник 0,5 м, а кратер чуть далее – диаметр 1,5 м. Холмы, видимые на горизонте, находятся на расстоянии около 13 км.

**КА серии "Зонд"** являлись беспилотными версиями КК «Союз 7К-Л1». Этот корабль был создан для реализации советского проекта Л1 – пилотируемого облета вокруг Луны и возврата на Землю. В сентябре 1968 г (раньше американцев) советские «космонавты» облетели Луну на КА «Зонд-5» и вернулись на Землю живыми. «Космонавтами» были черепахи. Надо сказать, что облет Луны советскими черепахами был не единственным сюрпризом КА «Зонд-5». Во время облета Луны этой станцией на радиоастрономической обсерватории Джодрелл Бэнк от КА «Зонд-5» был принят сигнал с русской речью. Нет, разговаривали не русские черепахи, это был магнитофон – шла проверка систем дальней космической связи.

Для посадки на Землю станций серии «Зонд» была выбрана изящная, но не очень отработанная на тот момент схема с рикошетирующим входом. Посадочный аппарат должен был войти в атмосферу в довольно узком коридоре, шириной всего около 10 км, опуститься до 40 – 50 км, а затем, используя свое аэродинамическое качество (подъемную силу), выйти в верхние слои атмосферы, а затем повторно погрузиться в нее. Этот маневр очень эффективен для гашения высокой скорости возвращаемого аппарата. Только два аппарата этой серии, КА «Зонд-6» и «Зонд-7», смогли совершить такой маневр.

Действительно успешный полет аппарата серии «Зонд», когда было признано, что пилоты, если бы они были на корабле, вернулись бы живыми, состоялся лишь в августе 1969 года (КА «Зонд-7»), на 8 месяцев позднее пилотируемого полета КК «Аполлон-8». С помощью КА «Зонд-6» и «Зонд-8» были получены изображения Луны очень высокого качества, поскольку отснятая пленка обрабатывалась на Земле. Правда, эти изображения не очень пригодны для фотометрирования, т. к. обрабатывались в двухрастворном проявителе для повышения локальных контрастов изображений. Для примера, на рис. 2.18 приведено изображение фрагмента кратера Эйткен, полученное КА «Зонд-8».



Рис. 2.18. Изображение кратера Эйткен, полученное камерой КА «Зонд-8»

**КА «Клементина»** был первым американским аппаратом, запущенным специально для исследования Луны после экспедиций «Аполлон». С 19 февраля по 3 мая 1994 года этот зонд исследовал Луну с окололунной полярной орбиты, а затем в процессе перевода аппарата на траекторию полета к астероиду 1620 Географ связь с ним прервалась. «Клементина потерялась и исчезла навсегда» – этими словами кончается старинная английская баллада о Клементине, дочери рудокопа. Слова баллады, к сожалению, оказались пророческими (невольню

вспоминается: «как вы лодку назовете, так она и поплывет»). Однако первая часть миссии «дочери рудокопа» – изучение Луны – была очень успешной.

Первоначально этот аппарат создавался как космический робот для изучения искусственных объектов в околоземном пространстве в рамках программы «звездных войн». Такого типа аппараты стали разрабатываться в США с середины 80-х годов для использования в системе противоракетной обороны. С их помощью «рудокопы» из Министерства обороны США должны были «исследовать» советские космические системы, предназначенные для детектирования запусков американских баллистических ракет. Это должны были быть надежные, маневренные аппараты, оснащенные мощными бортовыми компьютерами, для принятия решений в автономном режиме. Во времена конверсии, в конце 80-х начале 90-х годов, было решено использовать один из аппаратов для исследования Луны. Аппарат был сконструирован и построен в Морской лаборатории США, огромном предприятии, в котором проводятся исследования оборонного характера. В этой лаборатории существует музей космических достижений, где, в частности, хранится салфетка, на которой два сотрудника военного ведомства, сидя в кафе, рисовали первые наброски проекта «Клементина». Там же можно приобрести ксерокопию этой салфетки, в рамке под стеклом, заплатив 20 долларов (автор этой книги воздержался от такого приобретения, о чем сейчас сожалеет).

Зонд «Клементина» был выведен на полярную орбиту с периодом обращения вокруг Луны около 5 часов. Минимальное расстояние до поверхности составляло около 400 км, а максимальное – 2900 км. На этой орбите зонд находился до 3 мая того же года. За это время КА «Клементина» отсняла 38 миллионов квадратных километров площади лунной поверхности с высоким разрешением. Объем переданной информации – это более миллиона полноценных изображений – заметно превышает то, что было получено в ходе всех предшествующих космических полетов к Луне, включая экспедиции «Аполлон». Зонд был оснащен четырьмя съемочными камерами. Как уже отмечалось, камера UVVis позволила провести съемку лунной поверхности в пяти сравнительно узких участках спектра: 0,415; 0,750; 0,900; 0,950; 1,000 мкм со средним разрешением на поверхности 200 метров на элемент ПЗС матрицы. Камера NIR (близкий инфракрасный диапазон) работала в шести спектральных каналах: 1,10; 1,25; 1,50; 2,00; 2,60; 2,78 мкм почти с тем же пространственным разрешением, что и камера UVVis. Камерой NIR было получено также около миллиона изображений четкостью примерно  $300 \times 300$  элементов. Еще около 300000 изображений было получено камерой LWIR, которая работала в тепловом диапазоне, в полосе 8,0 – 9,5 мкм (четкость изображений примерно  $100 \times 100$  элементов, среднее разрешение на поверхности около 100 м). На зонде имелась камера HIRES для изучения избранных участков лунной поверхности с высоким разрешением (около

20 м на поверхности). Этой камерой было получено около 600000 изображений в четырех участках спектра видимого диапазона. Эта же камера служила питающей оптикой для лазерного альтиметра (высотомера), который работал на длине волны 1,06 мкм, обеспечивая пространственное разрешение 20 м и точность измерения дальности 40 м при высоте полета аппарата 500 км над лунной поверхностью.

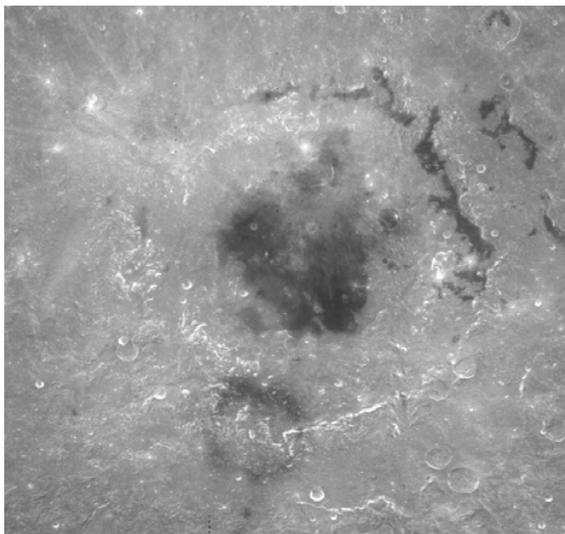


Рис. 2.19. Фрагмент глобальной мозаики района Моря Восточного, составленной по снимкам, которые были получены камерой UVVis КА «Клементина» при длине волны 0,75 мкм

Наиболее качественные изображения Луны, покрывающие почти всю ее поверхность с пространственным разрешением 100 м, были получены камерой UVVis. На рис. 2.19 приведен фрагмент глобальной мозаики, составленной по данным этой камеры. Здесь видна центральная часть замечательного образования на обратной стороне Луны – Моря Восточного. Это море образовалось в результате затопления лавой многокольцевого бассейна. Причины образования нескольких валов этого бассейна не вполне ясны. Вероятно, это отражение слоистости структуры лунной коры в этом районе.

На рис. 2.20 – 2.22 показаны мозаики (здесь они даны с 15 км разрешением и ограничены широтами примерно  $\pm 70^\circ$ ), соответственно, для распределения альбедо  $A(0,75 \text{ мкм})$  и показателей цвета  $C(0,750/0,415 \text{ мкм}) = A(0,750 \text{ мкм})/A(0,415 \text{ мкм})$  и  $C(0,900/0,750 \text{ мкм}) = A(0,900 \text{ мкм})/A(0,750 \text{ мкм})$ . В частности, на этих рисунках видно замечательное образование, находящееся на обратной стороне Луны, бассейн Южный полюс – кратер Эйткен (нижние углы изображений). Диаметр бассейна составляет около 2500 км – это крупнейший бассейн не только на Луне, но и в Солнечной системе. Это образование заметно даже на изображениях очень низкого разрешения, которое представлено на рис. 1.13, правое изображение (большое

темно-серое пятно вблизи южного полюса, левее центрального меридиана). При образовании этого бассейна удар был близок к критическому. Немногим более мощное событие могло разрушить Луну. Взрыв оказался настолько силен, что на поверхность было извлечено вещество мантии. Вот почему этот район рассматривается как перспективный для отбора и доставки грунта космическими аппаратами. Недавно в НАСА США рассматривался проект космического зонда для полета в район южного полюса Луны для взятия проб грунта. Пока, к сожалению, этот проект не стал приоритетным.

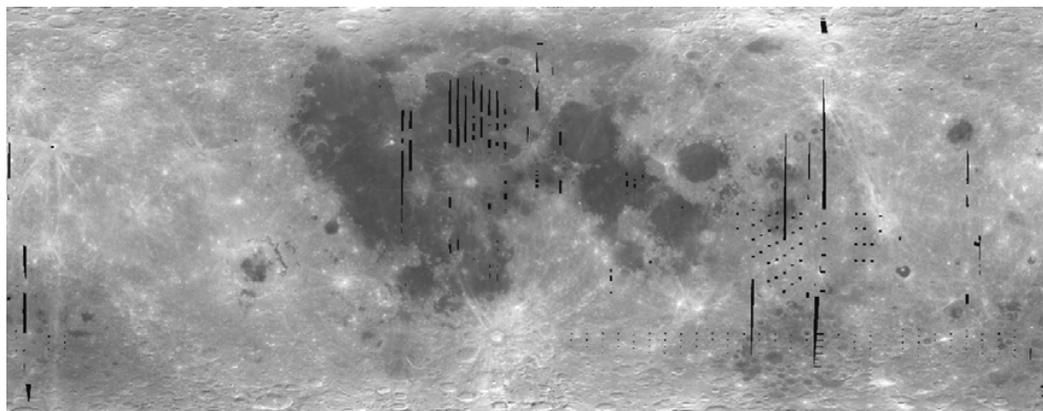


Рис. 2.20. Распределение альbedo лунной поверхности по данным КА «Клементина» на длине волны 0,750 мкм в цилиндрической проекции. Центральная часть панорамы соответствует видимому полушарию Луны

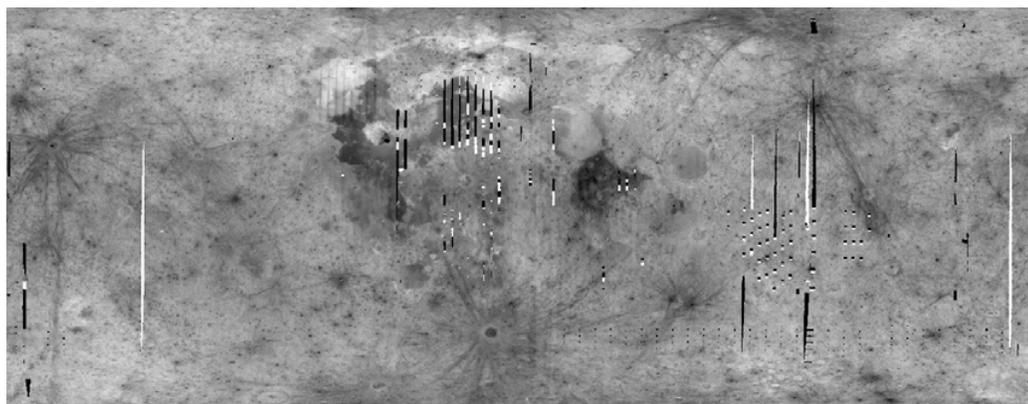


Рис. 2.21. Распределение цветового отношения  $C(0,750/0,415 \text{ мкм})$  лунной поверхности по данным КА «Клементина»

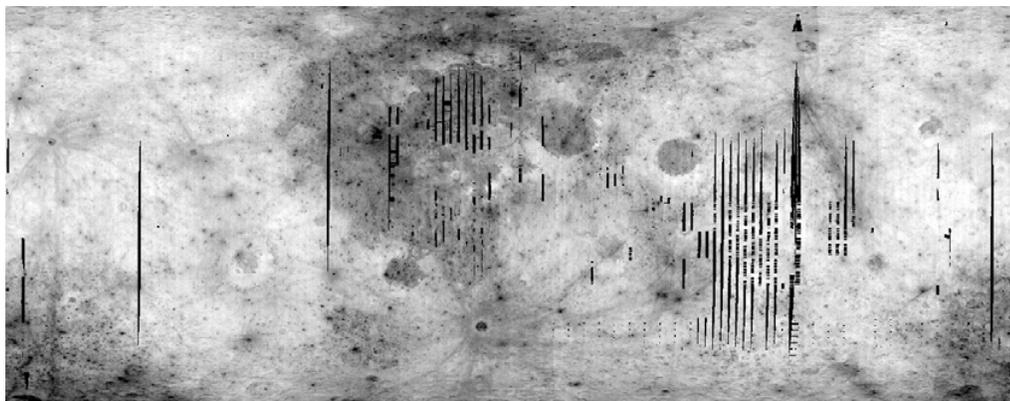


Рис. 2.22. Распределение цветового отношения  $C(0,900/0,750 \text{ мкм})$  лунной поверхности по данным КА «Клементина»

Следует отметить существенное различие изображений  $A(0,750 \text{ мкм})$ ,  $C(0,750/0,415 \text{ мкм})$  и  $C(0,900/0,750 \text{ мкм})$ . Альbedo лунной поверхности  $A(0,750 \text{ мкм})$  коррелирует с содержанием хромофорных (окрашивающих) элементов материала лунной поверхности, прежде всего железа и титана. Параметр  $C(0,750/0,415 \text{ мкм})$  характеризует наклон спектра в видимом диапазоне; оказывается, этот наклон коррелирует с содержанием титана. Другой показатель цвета,  $C(0,900/0,750 \text{ мкм})$ , характеризует полосу поглощения пироксенов, которая центрируется вблизи  $0,950 \text{ мкм}$ . Этот параметр в большой степени связан со зрелостью лунного грунта. Она характеризуется степенью переработки грунта под действием космогенных факторов.

**КА «Лунар Проспектор».** Вслед за КА «Клементина» в начале января 1998 года стартовал другой американский космический аппарат, «Лунар Проспектор». Основной его целью являлось геохимическое картографирование лунной поверхности, в частности, с помощью гамма спектрометра. Была предпринята попытка обнаружить водяной лед в полярных областях Луны с помощью нейтронного спектрометра. Этот спектрометр нашел повышенную концентрацию водорода в полярных областях Луны; на графике на рис. 2.23 это проявляется как понижение числа отсчетов эпитеpmальных нейтронов в области лунных полюсов. Однако однозначного ответа на вопрос о том, содержится ли этот водород в форме льда или в виде имплантированного в частицы грунта атомарного компонента, найдено не было. Таким образом, оптимизм по поводу открытия льда на лунных полюсах должен быть сдержанным.

С помощью гамма и нейтронного спектрометров было получено распределение по лунной поверхности тория и железа с низким разрешением около  $100 \text{ км}$ . Это важные

измерения, позволяющие оценить надежность косвенных (например, оптических) методов определения состава лунной поверхности.

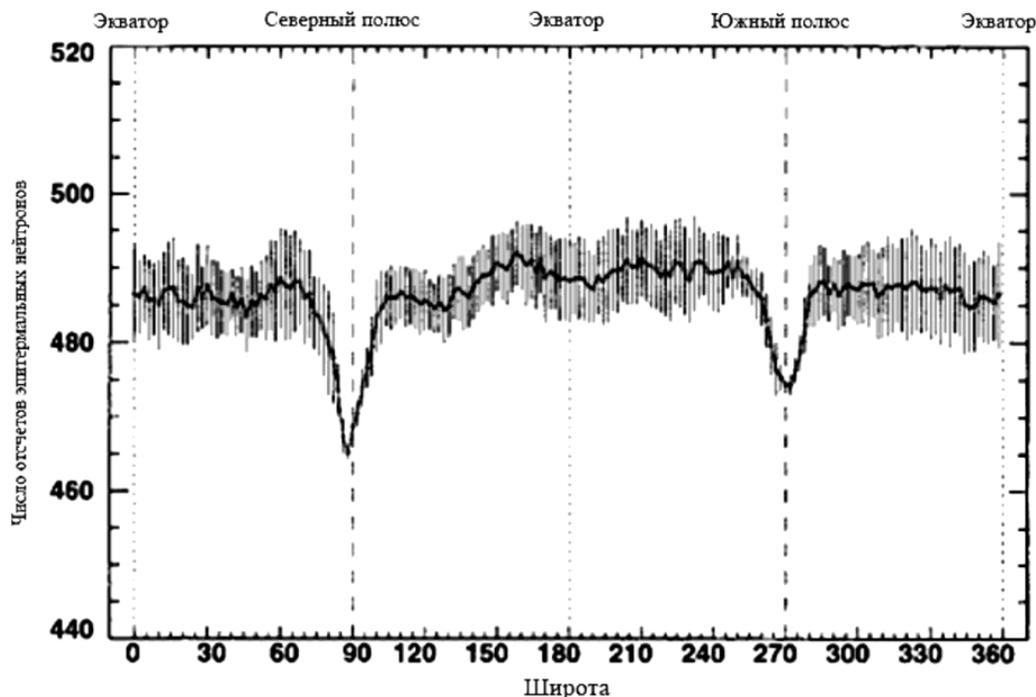


Рис. 2.23. Широтное распределение водорода по данным нейтронного спектрометра КА «Лунар Проспектор». На полюсах Луны наблюдается аномалия концентрации водорода

31 июля 1999 года КА «Лунар Проспектор» был направлен в кратер вблизи южного полюса Луны, днище которого находится в области вечной тени. Предполагалось, что удар этого аппарата о поверхность освободит достаточное количество водяных паров, для того чтобы их можно было бы наблюдать. Ожидалось, что, по крайней мере, линии ультрафиолетовой эмиссии гидроксила OH, который должен был бы образоваться при ударе аппарата о поверхность, удастся зарегистрировать спектрально с помощью космического телескопа Хаббл. Как уже отмечалось, никаких признаков падения аппарата зарегистрировано не было. Рассматривается несколько причин этого; наиболее вероятными являются следующие:

- Аппарат не попал в ожидаемую точку падения, т.е. то, что наблюдали с помощью телескопов, оказалось вообще не местом падения аппарата.
- Аппарат попал в район днища кратера, в котором нет льда, хотя он и находится в зоне вечной тени.
- Вода сильно связана в гидратированных минералах, поэтому ее выход слишком мал, чтобы быть зарегистрированным.

- Водяного льда на полюсах Луны нет вообще, а то, что открыл КА «Лунар Проспектор» с помощью нейтронного спектрометра, есть водород, внедренный в материал лунной поверхности потоками солнечного ветра.

Последняя причина представляется сейчас наиболее вероятной.

**Миссия «Смарт-1».** (SMART-1 Small Mission for Advanced Research in Technology). Хотя эта миссия предусматривала решение ряда научных задач, связанных с Луной, основной ее целью являлась проверка новых технологических концепций для подготовки будущих космических полетов с применением ионных двигателей малой тяги, использующих солнечную энергию для ионизации газа (ксенона), который применяется как рабочее вещество. КА «Смарт-1» был запущен на переходную орбиту. Для полета к Луне использовался ионный двигатель малой тяги. Он позволил за 14 месяцев увеличить размер орбиты настолько, чтобы перевести аппарат в область гравитационного захвата Луной. Для оптимизации процесса такого перевода использовались небесно механические резонансы, связанные с движением Луны. Была сформирована околополярная эллиптическая орбита спутника Луны; ее плоскость постоянна в пространстве в течение всего времени штатной работы аппарата вблизи Луны. Перигеум орбиты находился примерно над южным полюсом Луны на высоте около 300 км. Высота апоцентра составила примерно 10000 км. В состав научной аппаратуры входили следующие приборы для исследования лунной поверхности.

1. Компактный рентгеновский спектрометр D-CIXS (Demonstration of a Compact Imaging X-ray Spectrometer), который определял элементный состав лунной поверхности (содержание Si, Mg, Fe, Na, O, C) с наилучшим пространственным разрешением около 30 км. Спектрометр работал в диапазоне энергий 0,5 – 10 КэВ, при этом обеспечивалась абсолютная калибровка прибора относительно солнечного рентгеновского потока. Особый интерес с точки зрения происхождения и эволюции Луны представляют измерения отношения  $Mg/(Mg+Fe)$ .

2. Камера AMIE (Asteroid Moon micro-Imager Experiment) с полем зрения примерно  $7^\circ \times 7^\circ$  (ПЗС матрица  $1024 \times 1024$  элемента). Камера обеспечивала разрешение примерно то же, что и UVVis камера КА «Клементина». Камера AMIE способна регистрировать изображения в четырех спектральных каналах: широком (белом) и трех узких, центрированных на 0.75, 0.92 и 0.96 мкм. Фотометрическое качество данных этой камеры ниже по сравнению с тем, что дала КА «Клементина». На рис. 2.24 показан снимок кратера Де Гаспарис, который находится вблизи Моря Влажности, его диаметр 30 км. Снимок сделан с помощью камеры AMIE КА «Смарт-1» с расстояния около 1000 км (разрешение примерно 100 м/пиксел). Видна борозда, пересекающая кратер, которая, вероятно, связана с тектоническим разломом.

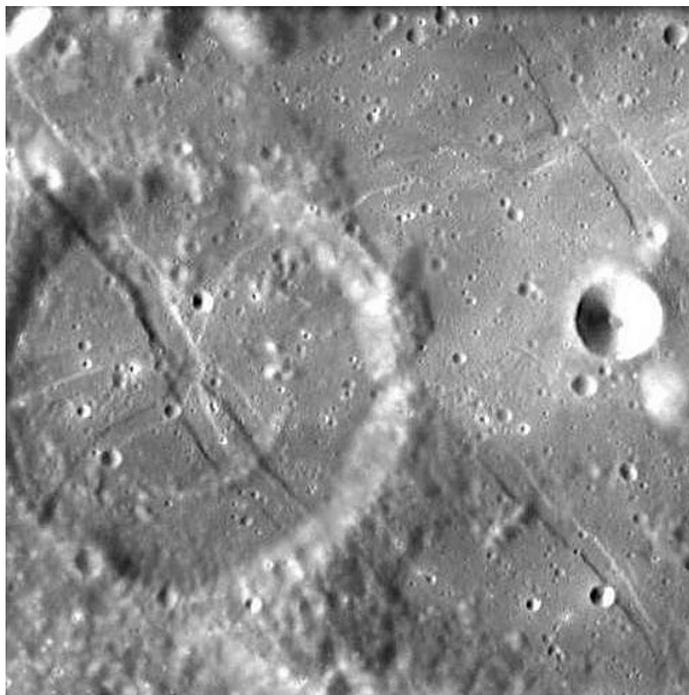


Рис. 2.24. Снимок кратера Де Гаспарис, сделанный с помощью камеры AMIE КА «Смарт-1» с расстояния около 1000 км

3. Инфракрасный дифракционный спектрометр SIR (Spectrometer for Infrared), который позволил снимать интегральные спектры отдельных участков лунной поверхности в диапазоне 0,9 – 2,4 мкм. Этот прибор должен позволить оценивать относительное содержание пироксенов, оливинов и плагиоклазов в лунном грунте.

Анализ научных данных, полученных КА «Смарт-1», продолжается, хотя уже понятно, что эта миссия значительно менее результативна в научном отношении, чем миссии «Клементина» и «Лунар Проспектор». Зато КА «Смарт-1» удачно врезался в лунную поверхность – вспышка от его взрыва была зарегистрирована с Земли. Более того, спектральные измерения этой вспышки показали наличие линий ксенона, который использовался на этом аппарате как топливо; теперь никто не посмеет сомневаться в том, что это разбился КА «Смарт-1».

**Миссия «Лунный Разведчик».** Эта миссия планируется на начало 2009 года. КА «Lunar Reconnaissance Orbiter» (LRO) будет оснащен следующими научными приборами: (1) камерой высокого разрешения высокой чувствительности (LROC), (2) измерителем температур лунной поверхности (DIVINER), (3) ультрафиолетовым фотометром LAMP, (4) измерителем нейтронного альbedo LEND, (5) высотомером LOLA и (6) небольшим радаром с синтезированной апертурой (SAR).

Камера LROC предназначена для выбора и сертификации будущих мест посадок космических аппаратов, а также для детального геологического описания лунной поверхности. Камера имеет два канала; один для получения 0,5 м разрешения в полосе съемки 5 км в интегральных лучах, второй – для съемки с разрешением 100 м в семи спектральных полосах в диапазоне 0,30 – 0,68 мкм. Предполагается получение стерео изображений. По снимкам высокого разрешения районов, отснятых ранее орбитальными модулями экспедиций «Аполлон», будет выполняться поиск новых кратеров, образовавшихся с 1971 – 1972 годов. Будет уточнено распределение районов вечной тени на лунной поверхности.

Целью исследований с помощью прибора DIVINER является измерение поверхностной и подповерхностной температуры Луны; это необходимо для строительства будущих лунных баз. В отличие от аналогичных данных, полученных КК «Аполлон», предполагается охватить большой диапазон широт и получить данные высокого разрешения. Картирование параметра тепловой инерции с высоким разрешением позволит использовать данные в инженерных целях, для выбора участков свободных от крупных блоков и камней. Прибор DIVINER представляет собой 9-канальный инфракрасный радиометр.

Области вечной тени в полярных областях Луны являются холодными ловушками. Таких ловушек на Луне примерно 1% всей площади. Поскольку поверхность ловушек не освещена, то их поверхность нельзя видеть обычным способом. Оценки показали, что изображения таких областей могут быть получены в ультрафиолетовой области на длине волны, отвечающей линии Лайман альфа (121,6 нм). Свечения звезд и неба Луны достаточно для освещения вечно затененных участков лунной поверхности; поток, рассеянный реголитом или предполагаемыми обнажениями льдов, будет измеряться помощью прибора LAMP. Он, возможно, позволит исследовать также переменность лунной водородной короны.

Прибор LEND предназначен для измерений нейтронного альbedo Луны. Будут регистрироваться потоки тепловых нейтронов, которые рождаются на глубине 1 – 2 метра под поверхностью при облучении этой поверхности галактическими космическими лучами. С помощью этих измерений предполагается провести картирование с 5 км разрешением концентраций водорода, который содержится в лунной поверхности. В принципе, этот эксперимент позволяет оценить запасы льда в лунной поверхности (если льды на Луне вообще существуют). Прибор позволит также построить глобальную модель распределения нейтронной компоненты космической радиации на высоте 30 – 50 км над лунной поверхностью с разрешением 20 – 50 км.

Лазерный высотомер LOLA предназначен для создания топографической и геодезической моделей Луны. Он позволит получить данные, которые повысят надежность будущих посадок космических аппаратов. Кроме того, этот эксперимент позволит создать топографические модели вечно затененных участков лунной поверхности.

Радиолокатор бокового обзора (SAR), использующий апертурный синтез, позволит получить радиоизображения областей вечной тени. Этот радар будет работать на длине волны 12 см. Аналогичная радиолокационная система есть также на индийском КА «Чандрайаан-1». Индийский спутник будет работать примерно в то же время, что и КА «Лунный Разведчик», поэтому возможно проведение не только моностатической, но и бистатической локации лунной поверхности.

**Украинский лунный полярный спутник.** После распада СССР Украине в условиях политической нестабильности и экономического кризиса пока удастся сохранять космическую отрасль. В 60–70-х годах украинские промышленные предприятия принимали участие в советской программе пилотируемых полетов к Луне, создавая лунный посадочный модуль и другие важные блоки по проекту «Н1-Л3». В частности, разгонный «Блок-Д», который должен был использоваться для выведения лунного корабля на лунную орбиту и его возвращения на Землю, был создан в КБ «Южное» под руководством Главного конструктора М. К. Янгеля и прошел успешные испытания в космическом пространстве; это были полеты КА «Космос-379», «Космос-382», «Космос-434» и «Космос-398». Сейчас Украина поддерживает свою космическую индустрию, участвуя в крупных международных проектах, таких как “Sea Launch”. Украина имеет носитель, способный доставить на лунную орбиту вес порядка 300 кг, поэтому эта страна потенциально может принять участие в космических исследованиях Луны. В качестве первого шага в этом направлении мог бы стать лунный полярный спутник.

Принимая во внимание удачные полеты к Луне КА «Клементина» и «Лунар Проспектор», а также ближайшие миссии, такие как «Лунный Разведчик», «Селена», «Луна-Глоб» и «Чандрайаан-1», выбор программы нового полярного спутника представляется непростой задачей. Эта программа не должна дублировать то, что уже было сделано, а напротив, заполнить бреши в научных знаниях о Луне и обеспечить действительно новый взгляд на геологическую историю нашего спутника. Таким недостающим звеном в изучении лунной поверхности могли бы быть ее глобальные радарные измерения (картирование) с высоким разрешением в миллиметровом диапазоне спектра, например, на длине волны 8 мм. Большой опыт создания необходимых радарных систем имеется в Радиоастрономическом институте НАН Украины.

Оптимальным могло бы оказаться наличие на борту спутника радара с синтезированной апертурой. Если глобальную радарную съемку Луны провести с пространственным разрешением порядка 100 метров, то она идеально дополнит данные КА «Клементина», полученные в оптическом диапазоне. Радарная съемка на длине волны 8 мм позволит выполнить картирование вариаций плотности верхнего слоя лунного реголита толщиной в десятки сантиметров, «увидеть» поля камней и близкие к поверхности выходы пород, оценить параметры шероховатости лунной поверхности на базе мм-см. Представляется возможным проведение дополнительных экспериментов, например, бистатического зондирования лунной поверхности с использованием спутниковой антенны и антенн наземного базирования.

Из приведенного описания программ и результатов автоматических космических миссий к Луне хорошо видно, что на ранних этапах автоматические станции выполняли скорее вспомогательную роль, связанную с подготовкой пилотируемых полетов. В настоящее время полеты космических зондов приобрели совершенно самостоятельное значение, причем в отличие от прошлых лет надежность автоматических миссий несравнимо возросла. С другой стороны, сколь бы ни были успешны полеты автоматических станций, они едва ли заменят постоянно действующие обитаемые лаборатории на лунной поверхности или окололунной орбите.

### **2.3. Очерк истории пилотируемых полетов к Луне**

Следует лишь сожалеть о том, что извечная тяга человечества к новым знаниям не была главным стимулом развертывания лунных пилотируемых программ. В 60-70-е годы между США и СССР шло активное соревнование за космические приоритеты, в частности, в области исследования Луны. В ту пору эти исследования содержали выраженный элемент политики; идеология имела главенствующее значение. В начале 60-х годов прошлого века в США и СССР полным ходом разворачивались программы пилотируемых полетов к Луне. Однако в начале – середине 70-х годов, когда выяснилось, что опередить США не удастся, секретную программу советских лунных исследований, к сожалению, пересмотрели, свернув работы, связанные с пилотируемыми полетами к Луне. Огромные наработки в этой области многих научных и инженерно-конструкторских коллективов оказались почти невостребованными. Упор в советской космонавтике был сделан на запуски автоматических аппаратов, создание околоземных долговременных орбитальных станций и корабля многоразового использования. Официальная пропаганда сделала вид, что в СССР не было никаких планов полета человека к

Луне и что советские ученые с самого начала понимали неоправданность риска пилотируемого полета к Луне и ориентировались на исследования ее с помощью автоматических станций.

В свою очередь, когда выяснилось, что американцам уже не с кем соревноваться в области освоения Луны, они свернули программу «Аполлон» и также сделали упор на запуски автоматических межпланетных аппаратов, создание долговременных орбитальных станций и корабля многоразового использования – «Шаттл». Быстрое сворачивание американской лунной программы чрезвычайно обидно потому, что в плане были запуски к интереснейшим местам лунной поверхности.

История соревнования СССР и США в области освоения Луны освещена в современной литературе довольно слабо, хотя все происходило фактически в наше время. Проблема в том, что все космические исследования в СССР были засекречены. В этой главе мы уделим внимание малоизвестным фактам из истории советской космической программы освоения Луны.



*Королев*

Рис. 2.25. Сергей Павлович Королев (1907 – 1966), советский ученый и конструктор в области ракетостроения и космонавтики, Главный конструктор первых ракет-носителей, пилотируемых космических кораблей, основоположник практической космонавтики, академик АН СССР, дважды Герой Социалистического Труда

Первое официальное упоминание о целесообразности создания ракеты, способной вывести на низкую околоземную орбиту 100 тонную полезную нагрузку и обеспечить высадку

2 – 3 человек на лунную поверхность, содержалось в секретном Постановлении советского правительства от 30 января 1956 года. Сроки такого создания не оговаривались. После первых запусков космических ракет к Луне, осуществленных под руководством Главного конструктора С. П. Королева (рис. 2.25), начали всерьез думать о программах пилотируемого облета Луны, высадки человека на Луну и даже о последующем строительстве обитаемой лунной базы.

В период с 1959 по 1963 годы в ОКБ-1 С. П. Королева велись работы по проекту «Л1-Р7» – облет Луны с помощью модуля Л1, который должен был быть собран из нескольких блоков на земной орбите, доставляемых ракетами Р7. Другие конструкторские бюро также занимались разработкой собственных проектов. Шла борьба за право первым создать техническое средство для облета Луны. В частности, Главный конструктор ОКБ-52 В. Н. Челомей предлагал осуществить запуск пилотируемого модуля для облета Луны с помощью проектируемой им универсальной ракеты УР-500 (будущий носитель «Протон»). Этот проект был более реалистичным, чем проект С. П. Королева, т. к. не требовал сборочных работ на орбите Земли. Надо сказать, что В. Н. Челомей имел сильную неформальную поддержку в высшем руководстве страны – в его бюро в то время работал С. Н. Хрущев, сын Генерального секретаря ЦК КПСС Н. С. Хрущева. Идея советского лунного проекта стала еще более конъюнктура с весны 1961 года, когда США начали говорить о своей программе пилотируемых полетов к Луне, программе «Аполлон». По воспоминаниям С. Н. Хрущева, ныне профессора Браунского университета (Провиденс, США), в 1961 году в ЦК КПСС рассматривалась даже возможность совместного с американцами проекта высадки человека на Луну, однако убийство президента Дж. Кеннеди прервало изучение такой возможности.

Одновременно с работами по проекту «Л1-Р7» С. П. Королев также активно проталкивал идею создания сверхмощной ракеты Н1 («Носитель-1»), которая была бы способна вывести до 80 тонн полезной нагрузки на низкую околоземную орбиту. В частности, в своем письме в ЦК КПСС в январе 1960 года он указывает, что такая ракета позволила бы нести корабль с 2 – 3 космонавтами, который может облететь Луну и вернуться на Землю. К сожалению, в то время эта идея поддержки не получила. Постановлением правительства от 23 июня 1960 года С. П. Королеву поручалось лишь создание пилотируемого космического корабля на 2 – 3 человека, способного маневрировать на орбите Земли и обеспечивать стыковку с другими модулями. Новый корабль создавался для военных целей, хотя оговаривалась возможность его использования и для облета Луны. Так появился корабль «Союз». Это была удачная модель, которая в разных усовершенствованных вариантах использовалась почти 30 лет. Работы по созданию ракеты Н1 в упомянутое июньское Постановление правительства включены не были. Понадобилось еще два года борьбы, чтобы проекту Н1 был дан «зеленый

свет» и открылось финансирование. Однако в новом Постановлении правительства от 24 сентября 1962 года речь шла лишь о создании ракеты Н1, а не о лунном проекте. Это не остановило С. П. Королева, и он в сентябре 1963 года вновь обращается в правительство со своим планом исследования космического пространства в период 1965 – 1975 годов. В частности, в этом плане он возвращается к проекту Л1 на базе корабля «Союз» (облет Луны двумя космонавтами с возвратом на Землю) и добавляет еще четыре проекта: Л2 (луноход, управляемый с Земли), Л3 (высадка космонавтов на лунную поверхность), Л4 (орбитальная станция на лунной орбите с 2 – 3 космонавтами) и Л5 (тяжелый обитаемый луноход). В марте 1964 года С. П. Королеву удается встретиться с Н. С. Хрущевым и убедить его активизировать советские лунно-планетные космические исследования и реализовать программу высадки человека на Луну, в противовес американской программе «Аполлон».

В августе 1964 года вышло постановление ЦК КПСС, касающееся космических исследований в СССР, в котором предписывалось Главным конструкторам В. Н. Челомею и С. П. Королеву приступить к развитию и осуществлению соответствующих проектов исследования Луны. В. Н. Челомею поручалось создание средств для пилотируемого облета Луны в 1967 году (проект «УР-500/ЛК-1»), а С. П. Королеву – высадка человека на Луну (проект «Н1-Л3»). На реализацию этой космической программы предполагалось ориентировать большую часть промышленного и интеллектуального потенциала космической отрасли СССР. Почти 2000 предприятий и организаций были связаны с подготовкой советской экспедиции на Луну. Цель программы была в своей основе политическая – обогнать Америку. К сожалению, выход постановления, которое давало начало серьезному финансированию программы, запоздал, американцы начали соответствующие работы на три года раньше и затратили намного больше средств.

В октябре 1964 года был смещен со своих постов Н. С. Хрущев. Поддержка космических исследований в руководстве страны ослабла. Военные были против выделения средств на «мирный» космос за их счет. Тем не менее, лунный проект сохранял очень высокие приоритеты. В конце 1965 года получилось так, что вся лунная программа фактически сосредоточилась в руках С. П. Королева. Пилотируемый облет Луны по-прежнему предполагалось выполнить в 1967 году, используя челомеевскую ракету УР-500 с двигателями конструкции В. П. Глушко и модуль Л1, разработанный конструкторским бюро С. П. Королева на базе КК «Союз». Было предпринято около 10 попыток запуска модуля Л1 в автоматическом режиме; аппараты сравнительно удачных запусков были названы КА серии «Зонд». К сожалению, только один из запусков модуля Л1 был по-настоящему успешным – это КА «Зонд-7». Однако этот полет прошел в августе 1969 года, уже после посадки американцев на Луну. Во

второй половине 1968 года у СССР теоретически еще имелись шансы обогнать американцев. В сентябре был определен экипаж лунного корабля: А. А. Леонов и О. Г. Макаров. Однако полет был слишком опасен, проводить его не решились и правильно сделали: посадка КА «Зонд-6» (облет Луны), в котором могли бы лететь космонавты, была неудачной. Американцы успели раньше: 24 декабря 1968 года пилотируемый КК «Аполлон-8» успешно облетел Луну. Этот полет состоялся неожиданно, почти на два месяца ранее намеченного срока.

Главным в соревновании за лунные приоритеты была доставка на лунную поверхность человека и его возврат на Землю. В советской программе предполагалось использовать для этого новый ракетоноситель Н1, который должен был выводить на околоземную орбиту полезную нагрузку до 95 тонн. В качестве такой нагрузки предполагалось использовать модуль ЛЗ с двумя космонавтами. Этот модуль включал в себя блок разгона для перевода корабля с околоземной на окололунную орбиту (после отработки он отделялся), лунный орбитальный блок, способный вернуть полезную нагрузку с окололунной орбиты на околоземную (КК «Союз»), и лунную посадочную кабину, рассчитанную на одного человека. Лунный комплекс создавался под руководством Главного конструктора М. К. Янгеля в Днепропетровске в КБ «Южное» и, как уже отмечалось, прошел успешные испытания на земной орбите в начале 70-х годов. В проекте «Н1-ЛЗ» предполагалось высадить на поверхность одного космонавта. Вторым космонавт в этом полете оставался на орбите. Предполагалось, что первый космонавт проведет от 6 до 24 часов на лунной поверхности, выполняя научные исследования и собирая образцы вещества лунной поверхности. Затем, после старта лунной кабины с поверхности Луны и стыковки с орбитальным модулем, космонавт вместе с образцами и другими научными материалами переходит в скафандре по внешней поверхности в орбитальный блок. Советский посадочный корабль получался меньше американского; космонавт во время прилунения и взлета должен был управлять кораблем фактически стоя. Предполагалось, что посадка и взлет с Луны будут выполняться одним и тем же двигателем, что более рискованно, чем в американском варианте. Задачей второго космонавта, находящегося на окололунной орбите, была связь с Землей и лунной кабиной, а также проведение дистанционных исследований лунной поверхности.

К сожалению, работы по созданию комплекса «Н1-ЛЗ» начали всерьез финансироваться только с 1964 года, т. е. значительно позже начала финансирования программы «Аполлон» (1961 год). Финансирование советского проекта было явно слабее американского. Трудности создания комплекса (например, необходимость строительства новой стартовой площадки) оказались таковы, что первая посадка на лунную поверхность вряд ли могла состояться ранее 1969 года, т. е. примерно тогда же, когда это рассчитывали сделать американцы. К сожалению,

этим напряженным планам не суждено было сбыться. 14 января 1966 года во время хирургической операции умер Главный конструктор С. П. Королев. Это была невосполнимая утрата не в риторическом, а в буквальном понимании этих слов. Адекватной замены С. П. Королеву не нашлось. Его приемник, Главный конструктор Мишин В. П., не обладал столь же мощным организаторским талантом и пробивной способностью. С большой степенью вероятности можно утверждать, что, если бы С. П. Королев не погиб под ножом хирурга, в СССР были бы пилотируемые полеты к Луне; это признал сам В. П. Мишин (1990 год).

После смерти С. П. Королева начался период некоторой смуты. Другие ракетные фирмы стали активнее проталкивать собственные программы посадки человека на Луну. Для этого имелись основания. Например, конструкторское бюро В. Н. Челомея было вполне способно быстро доработать уже прошедшую испытания надежную ракету УР-500 до уровня, когда она могла бы вывести на низкую околоземную орбиту до 100 тонн груза (модель УР-700) и обеспечить реализацию программы высадки человека на Луну. Ситуация анализировалась высокими комиссиями, а время неумолимо шло. Кроме того, новый корабль «Союз» дебютировал в начале 1967 года весьма плохо. Беспилотные запуски его к Луне были неудачны. А главное – это гибель космонавта В. М. Комарова на КК «Союз-1» при завершении испытательного полета на околоземной орбите. Этот несчастный случай на полтора года затормозил пилотируемые полеты в советской космической программе.

После смерти С. П. Королева снизились темпы создания носителя Н1. Его первый запуск, намеченный на март 1968 года, состоялся только в феврале 1969 года. Он был неудачен. На 69 секунде полета из-за неправильной команды системы мониторинга двигателей все двигатели ракеты отключились; ее взорвали из соображений безопасности полигона. Следующая попытка запустить ракету Н1 была предпринята 3 июля 1969 года, за две недели до высадки американцев на Луне. Дело кончилось большой катастрофой (рис. 2.26). За четверть секунды до отрыва ракеты от Земли, взорвался насос подачи окислителя в восьмом двигателе ракеты. Часть двигателей продолжала работать, ракета продолжала взлетать, пока не сработала автоматика полного выключения. Ракета, полностью заправленная керосином (2700 тонн) и жидким кислородом, поднимавшаяся на двести метров, упала на стартовую площадку; раздались взрывы огромной силы, была полностью разрушена стартовая площадка (в глубину до шестого этажа); на ее восстановление ушло два года. Позднее состоялось еще несколько попыток запуска ракеты Н1 (июнь 1971 и ноябрь 1972 года). Все они были неудачны. Снова подвели двигатели, сконструированные в авиационном КБ Главного конструктора Н. Д. Кузнецова.

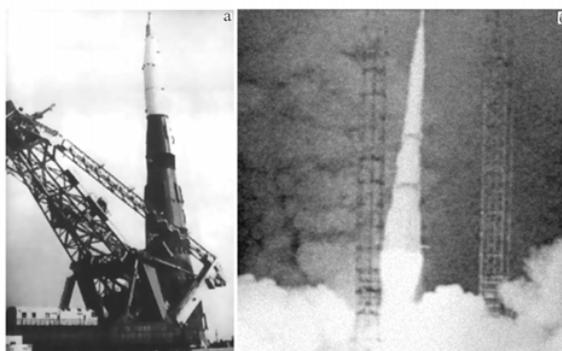


Рис. 2.26. Снимок ракеты Н1 на стартовой площадке космодрома Байконур – (а). Уникальный снимок неудачного старта той же ракеты за мгновение до падения и взрыва – (в)

Еще в 70-м году в высшем руководстве страны не могло быть и речи о том, что советский человек не ступит на Луну (говорили: «не первый, но зато основательно»). Однако к 1973 году настроения начали меняться. В 1974 году с приходом в королевское КБ В. П. Глушко в качестве Генерального конструктора работы, связанные с созданием ракеты Н1, были остановлены. По распоряжению В. П. Глушко имеющиеся блоки и детали будущих ракет Н1 были уничтожены. В 1975 году отряд лунных космонавтов был расформирован. В феврале 1976 года постановлением ЦК КПСС и Совета Министров работы по ракете Н1 были прекращены официально, а затраты размером 6 миллиардов рублей в ценах 70-х годов были списаны.

Прекращение работ по Н1 было большой ошибкой. Ко времени остановки проекта Н1 в КБ Главного конструктора Н. Д. Кузнецова уже были созданы и прошли огневые испытания надежные многоразовые кислородно-керосиновые двигатели для этой ракеты. Еще один-два испытательных пуска, и в СССР в середине 70-х годов, возможно, была бы ракета, равная «Сатурну-5». История космических исследований Луны могла бы оказаться совсем другой. Однако Генеральный конструктор В. П. Глушко решил создать свою сверхтяжелую ракету. Он ее действительно создал, но на 15 лет позднее того времени, когда ракета Н1 могла бы приступить к реализации лунной и марсианской космических программ.

В 70-х годах в СССР активно прорабатывалась идея развития долговременных лунных обитаемых баз как противовес уже выполненной программе «Аполлон». Различные проекты таких баз (с начала 60-х годов) разрабатывались на предприятии «Спецмаш» под руководством Главного конструктора В. П. Бармина и, позднее, на НПО «Энергия» под руководством В. П. Глушко. В 1971 году один из проектов лунной базы был представлен Министру обороны СССР маршалу Д. Ф. Устинову и получил принципиальное одобрение. Этот проект – Долговременная лунная база «Звезда» – был рассчитан на работу 9 человек. Предполагалось проведение очень

интересных научных экспериментов, включающих длительные экспедиции лунохода в окрестности базы с целью коллекционного сбора образцов лунной поверхности. К сожалению, определение сроков реализации этого проекта затягивалось. Частично это было связано с неудачными запусками ракет Н1. Советская лунная программа сильно буксовала.

В период 1974 – 1976 годов рассматривался вариант создания так называемого лунного экспедиционного комплекса (ЛЭК). К тому времени под руководством Главного конструктора В. П. Глушко был спроектирован новый ракетоноситель «Вулкан», способный выводить на низкую околоземную орбиту (200 км) массу 230 тонн. Такой носитель мог доставить на поверхность Луны груз до 30 тонн. Для проведения одной лунной экспедиции, а их планировалось несколько, предполагалось три запуска ракет серии «Вулкан». Они должны были доставить: 1) лунный жилой модуль, 2) луноход с научным оборудованием и материалами жизнеобеспечения на 1,5 года, а также 3) ЛЭК с тремя космонавтами. Системы ЛЭК должны были обеспечить возврат космонавтов на Землю после завершения работ на лунной поверхности.

Последняя попытка реанимировать программу пилотируемого полета к Луне советских космонавтов была предпринята в период 1976 – 1978 годах. Предполагалось использовать проектируемую ракету «Энергия», которая была в то время рассчитана на вывод 88 тонн на низкую околоземную орбиту. Из-за малого веса полезной нагрузки проект долговременной обитаемой лунной базы в этом варианте не получался, поэтому предполагалось двумя запусками ракет «Энергия» вывести на лунную орбиту орбитальный модуль и кабину, спускаемую на лунную поверхность (запуск в начале 80-х годов). Три космонавта из пяти, находящихся на орбитальном модуле, должны были перейти в лунную кабину и совершить мягкую посадку на лунную поверхность. После 5 – 10 дней пребывания на поверхности они должны были вернуться на орбитальный модуль, оставаясь на нем и продолжая исследования полный лунный день. Затем следовал возврат на Землю. Эта программа не получила поддержки, в частности, из-за того, что она по своим возможностям очевидным образом дублировала экспедиции «Аполлон».

Конец всем этим разработкам положило решение экспертной комиссии Академии наук СССР по исследованиям космического пространства (ее возглавлял Президент Академии наук СССР, академик М. В. Келдыш), которая в 1978 году рекомендовала правительству отложить реализацию проекта ЛЭК на следующее столетие. Были также прекращены работы по созданию самого мощного ракетоносителя «Вулкан». Эти работы сочли не актуальными и отвлекающими ресурсы страны от создания многоэтапной космической транспортной системы «Энергия-Буран». Первый запуск носителя «Энергия» состоялся 15 мая 1987 года. Второй,

тоже удачный, пуск этой ракеты с кораблем многоцелевого использования «Буран» был произведен 15 ноября 1988 года (посадка шаттла «Буран» производилась в автоматическом режиме). Поскольку это происходило всего за три года до распада СССР, в ситуации, когда в стране лавинообразно нарастали весьма серьезные экономические и политические проблемы, действующий комплекс «Энергия-Буран» – венец решения государственной задачи особой важности – оказался, в конечном счете, невостребованным. Впрочем, это не совсем так, космический корабль «Буран» является украшением Парка культуры и отдыха имени Горького в Москве; в нем планировалось даже открыть ... ресторан. Это мог бы быть самый дорогой ресторан в Солнечной системе, поскольку средств, затраченных на его создание, вполне хватило бы на то, чтобы довести до совершенства ракету Н1 и совершить нескольких пилотируемых полетов на Луну.

Перечисленные космические проекты и программы исследования Луны не исчерпывают всего того, что делалось в этом направлении. На разных этапах лунной космической эпопеи во многих конструкторских бюро и институтах Академии наук СССР с разной степенью проработанности обсуждались десятки вариантов и модификаций пилотируемых лунных экспедиций и вспомогательных полетов автоматических аппаратов. В частности, во второй половине 80-х годов в СССР планировался запуск автоматического лунного полярного спутника (проект 1Л) с комплексом приборов для дистанционного зондирования лунной поверхности. Но действительно серьезные финансовые средства на реализацию замыслов освоения Луны были выделены только один раз, под программу Главного конструктора С. П. Королева.

А теперь посмотрим, как развивались события в Америке.

В послании Конгрессу США 25 мая 1961 года Президент Дж. Кеннеди заявил: «Я верю, что наш народ может ... высадить человека на поверхность Луны и благополучно вернуть его на Землю в этом десятилетии» и примерно в то же время по советскому телевидению можно было услышать частушку: «... а пока американцы доберутся до Луны, не оставят там Советы ни гектара целины». В то время еще никто не знал, чье заявление окажется серьезнее. Так, 12 апреля 1961 года впервые был выведен на орбиту пилотируемый корабль «Восток». Юрий Гагарин оказался первым человеком в космосе. Лишь через три недели Алан Шепард совершил полет по суборбитальной дуге. Однако Америка решила взять реванш всерьез: в США было затрачено более 20 миллиардов долларов и более миллиона человеко-часов на то, чтобы доставить человека на Луну и вернуть его обратно. На пике расходов в 1965 году затраты на программу «Аполлон» составляли около 0,8% валового внутреннего продукта США. Только

лунная кабина стоила 15 таких же кабин, сделанных из чистого золота. Стоимость 1 карата доставленного на Землю лунного грунта, равна стоимости 3,5 каратов бриллиантов.

К счастью, в Америке конкуренция между различными космическими проектами не была столь разрушительной, как это было в СССР – в стране, которая гордилась своей плановой экономикой. В США все управление работами и финансовые потоки шли через один центр – НАСА. Были направлены в одно русло усилия трех обычно конкурировавших между собой ведущих аэрокосмических корпораций: «Боинг» делал первую ступень ракеты «Сатурн-5», «Норт Америкэн авиэйшн» – вторую, а «Дуглас Эйркрафт» – третью. Большинство работ проводилось открыто; НАСА занималась «мирным» космосом. В СССР такого не было. Секретные ракетные фирмы, задействованные в советской лунной программе, подавляющую часть времени и ресурсов тратили на военные цели и при этом иногда дублировали друг друга. Единого управления лунной программой в СССР фактически не было. Особенно ситуация обострилась после смерти С. П. Королева, который лишь на очень короткое время смог сконцентрировать руководство лунной программой в своих руках.

В США было три космические программы, связанные с пилотируемым полетом к Луне: «Меркурий», «Джемини» и «Аполлон». Эти программы в некотором смысле подстраховывали друг друга. Программа «Меркурий» началась в 1958 г, еще до того как было принято решение о высадке на Луну. В частности на корабле «Меркурий-6» 20 февраля 1962 года был впервые в Америке запущен на околоземную орбиту астронавт Джон Гленн. С появлением программы «Аполлон», программу «Меркурий» стали рассматривать как первый этап в создании лунного пилотируемого корабля. Программа «Меркурий» постепенно перешла в программу «Джемини». В принципе в рамках проекта «Джемини» можно было бы совершить облет Луны и даже совершить посадку на ее поверхность, используя малые ракеты типа «Титан-3С» или «Сатурн-1Б». Такую возможность имели в виду на случай, если запуски носителя «Сатурн-5» окажутся неудачными. В августе 1961 года рассматривали возможность запуска КК «Джемини» вокруг Луны уже в начале 1965 года. Однако программа «Аполлон» все время оставалась главной, на нее шло основное финансирование. С марта 1965 года по ноябрь 1966 года было осуществлено 9 запусков КК «Джемини». Эти запуски позволили отработать множество операций, необходимых для полетов КК «Аполлон», и провести тренировку некоторых лунных астронавтов, например, Дж. Янга («Джемини-3 и -10»), Ф. Бормана («Джемини-7»), Дж. Ловелла («Джемини-7 и -12»), Н. Армстронга и Д. Скотта («Джемини-8»), Т. Стаффорда и Ю. Сернана («Джемини-9»), М. Коллинза («Джемини-10»), Ч. Конрада и Р. Гордона («Джемини-11»), Э. Олдрина («Джемини-12»). Однако ни один корабль «Джемини» к Луне не летал.

Главным в программе «Аполлон» было использование мощной ракеты «Сатурн-5». Она создавалась под руководством Вернера фон Брауна и его сотрудников (среди них Артур Рудольф – конструктор этой ракеты), вывезенных американцами из Германии в конце войны. Работы проводились в Центре космических полетов им. Дж. Маршала (Алабама). Поражает то, что крупнейшая национальная программа США была доверена немцу (штурмбанфюреру), создававшему ракеты ФАУ, которые при оснащении их ядерными боезарядами могли бы стать гитлеровским «оружием возмездия», направленным, в том числе, против США.



Рис. 2.27. Вернер фон Браун (1912–1977), руководитель проектов по созданию немецких ракет ФАУ и американского ракетоносителя «Сатурн-5»

Советские войска также охотились за немецкими ракетными специалистами. Среди них оказался заместитель фон Брауна талантливый инженер Гельмут Греттруп, который после войны работал вместе с другими немецкими специалистами в СССР. Работа конструкторского бюро (шарашки), возглавляемого Греттрупом, не была продуктивна по двум причинам. Во-первых, в СССР хватало своих талантливых ракетчиков, во-вторых (и это, вероятно, главное), невозможно себе представить даже сейчас, а в то время и подавно, что создание своих ракет советское правительство доверит пленному немцу (годы спустя, Греттруп, будучи уже сотрудником фирмы Сименс, изобрел банкомат).

Традиционно Вернер фон Браун (рис. 2.27) воспринимается у нас как фигура одиозная. Однако необходимо учитывать, что в Германии он разрабатывал средства доставки оружия массового уничтожения, которое было не более разрушительным, чем создававшееся советскими учеными, многие из которых являются для нас символами научного успеха и человеческого мужества. Вернер фон Браун был талантливым ученым и инженером, который не всегда имел безоблачные отношения с существующим в Германии режимом. Он, в частности, арестовывался гестапо (правда, на короткое время) за ведение с коллегами

разговоров о космических полетах к Луне и планетам, что рассматривалось, как злонамеренная попытка отвлечь своих сотрудников от задачи создания «оружия возмездия».

Жизнь крупных ученых сама по себе является большой наукой. Вернер фон Браун сумел избежать многих серьезных технических ошибок, которые оказались в значительной мере фатальными для советской лунной космической программы. Прежде всего, он решил для первой ступени ракеты использовать кислородно-керосиновые, а для верхних ступеней – кислородно-водородные двигатели, очень эффективные за счет высокой скорости истечения газа. В СССР Главный конструктор ракетных двигателей В. П. Глушко считал такой путь неперспективным. Он разрабатывал свои двигатели, использовавшие токсичные вещества – несимметричный диметилгидразин (он же гептил) и тетроксид азота в качестве окислителя. Попытка С. П. Королева в начале 60-х годов создать кислородно-водородный и кислородно-керосиновый двигатели для ракеты Н1 в обход ОКБ В. П. Глушко кончилась ссорой двух Главных конструкторов и последующей взаимоослабляющей борьбой в верхах, которая привела к тому, что в СССР ракета, равная по мощности ракете «Сатурн-5», появилась только в конце 80-х годов. Курьезно то, что В. П. Глушко, разрабатывая носитель «Энергия», в конце концов, пришел к решению о создании второй ступени на кислородно-водородном двигателе, как это сделал Вернер фон Браун.



Рис. 2.28. Самая мощная в мире ракета «Сатурн-5» на стартовой площадке

Первые испытания ракеты «Сатурн-5» были проведены в конце 1961 года (рис. 2.28). За все время использования ракет «Сатурн-5» не было ни одного неудачного запуска. Двигатели этой ракеты удалось сделать очень надежными благодаря беспрецедентному объему разнообразных стендовых испытаний, включая полноразмерные огневые испытания отдельных ступеней. Создание таких стендов является делом дорогостоящим. В СССР соответствующие

средства на это не были выделены; отчасти с этим связаны неудачи с носителем Н1 и проигрыш в лунной гонке – это мнение Б. Е. Чертока, заместителя С. П. Королева.

Разработка космических кораблей «Аполлон» началась осенью 1961 года. К середине 1962 года была окончательно принята их схема полета к Луне. Сейчас эту схему называют схемой Мичела-Хуболта, по именам специалистов, которые обосновали ее использование в начале 60-х годов, работая по программе «Аполлон». Однако она имеет более раннюю историю, связанную с именами Германа Оберта и Юрия Кондратюка (Шаргея). Жизнь талантливого инженера и ученого Кондратюка (рис. 2.29) вместила множество драматических событий; достаточно сказать, что в гражданскую войну он служил в белой армии, оставшись при этом в СССР (с этим связана смена фамилии). В 1929 году им была опубликована небольшая книга, в которой изучались проблемы оптимизации космических полетов. В частности, в этой книге рассматривалась схема полета на Луну космического аппарата. Это и была схема Мичела-Хуболта. Она выглядит следующим образом: (1) старт с Земли и выход на селеноцентрическую орбиту, (2) посадка челнока на Луну, (3) взлет капсулы (части челнока) с лунной поверхности, (4) его стыковка с лунным орбитальным модулем, (5) возвращение орбитального модуля на Землю. Книга Кондратюка намного опередила свое время, настолько, что к началу космической эры о ней забыли. Приятно было бы думать, что программа «Аполлон» проводилась по плану харьковского ученого-инженера. Следует, однако, признать, что все было далеко не так просто. Книга Кондратюка, будучи переведенной на английский язык, воспринималась американскими конструкторами скорее как научно-исторический курьез, а не как руководство к действию. Столь грандиозная программа, как «Аполлон», конечно, требовала несоизмеримо более основательной научно-технической проработки, нежели это сделал в 20-е годы Кондратюк (достаточно сказать, что сам Вернер фон Браун долгое время был сторонником иной схемы полета).



Рис. 2.29. Юрий Васильевич Кондратюк (Александр Игнатьевич Шаргей) (1897–1942), талантливый инженер и ученый, один из пионеров теоретической космонавтики

В середине 1962 года в США началась также разработка лунной кабины. Все шло сравнительно гладко, однако первый запуск по программе «Аполлон» оказался трагичным. Собственно запуска даже не было. 27 января 1967 года, когда КК «Аполлон» уже был смонтирован на ракете «Сатурн-1Б», в отсеке, в котором находился экипаж, занятый проверкой бортовых систем, возник пожар из-за неисправности электропроводки. В жилом отсеке КК «Аполлон», как и в КК «Меркурий» и «Джемини», использовалась кислородная атмосфера при давлении 0,35 атм. (это позволяет экономить на ресурсах жизнеобеспечения), поэтому искра в электросистемах, на которую можно было бы не обратить внимание в обычных условиях, в такой атмосфере имела фатальные последствия. Возник пожар, три астронавта В. Гриссом, Э. Уайт и Р. Чаффи задохнулись от дыма. Это событие задержало развитие программы «Аполлон», но не сильно. Весной 1967 года администрация НАСА объявила несостоявшийся полет астронавтов В. Гриссома, Э. Уайта и Р. Чаффи миссией «Аполлон-1», а следующий полет, намеченный на осень 1967 года, – миссией «Аполлон-4». Таким образом, запуски КК «Аполлон-2» и «Аполлон-3» просто не состоялись.

Первый запуск ракеты «Сатурн-5» был осуществлен 9 ноября 1967 года. По физическим масштабам это было нечто грандиозное. Ударная волна, порожденная работой двигателей первой ступени, была зарегистрирована в 1770 км от места старта. Был запущен непилотируемый КК «Аполлон-4» на высокую орбиту, который благополучно вернулся на Землю, используя принцип рикошетного гашения скорости. Заметим, что КК «Аполлон» в комплексе, доставляемом на орбиту Луны, весил около 30 тонн! Второй запуск доработанной ракеты «Сатурн-5» с КК «Аполлон-6» состоялся в начале 1968 года.

11 октября 1968 года США осуществили первый пилотируемый запуск КК «Аполлон-7» с астронавтами У. Ширра, Д. Эйзел и У. Каннингем на земную орбиту. Предстояли дальнейшие испытания. Первый запуск корабля к Луне был намечен на начало 1969 года. Однако удачный полет КК «Аполлон-7» и интенсивные попытки СССР опередить США были причиной принятия НАСА неожиданного и довольно рискованного решения: лететь к Луне в конце декабря 1968 года. Космический корабль «Аполлон-8» стартовал 21 декабря 1968 года. Это был первый полет человека к Луне. Состав экипажа: Ф. Борман, Дж. Ловелл и У. Андерс. 24 декабря корабль приблизился к Луне на расстояние около 100 км, перешел на селеноцентрическую орбиту и совершил десять оборотов. КК «Аполлон-8» пробыл на орбите вокруг Луны около 20 часов, что позволило команде провести детальное фотографирование лунной поверхности (см. рис. 2.30), в том числе и будущих мест посадки. Лунная кабина в этом

полете не испытывалась – ее к этому времени просто не успели сделать; КК «Аполлон-8» летал к Луне с балластом, массовым эквивалентом кабины, весом около 9 тонн.



Рис. 2.30. Первый в истории человечества снимок восхода Земли, сделанный астронавтами КК «Аполлон-8»

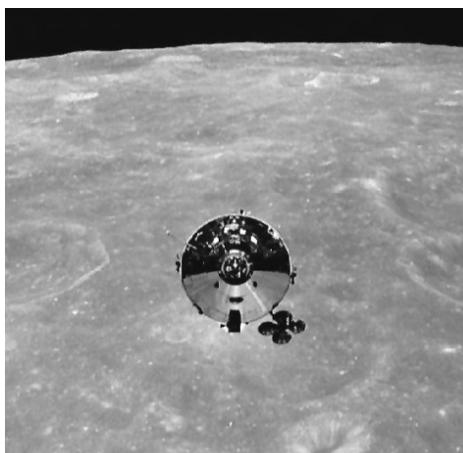


Рис. 2.31. Снимок КК «Аполлон-10», сделанный с борта лунной кабины.

На заднем плане видна восточная часть поверхности Моря Смита

Космический корабль «Аполлон-9» был запущен 3 марта 1969 года на околоземную орбиту для отработки стыковки лунной кабины; экипаж корабля – Дж. Макдевитт, Д. Скотт и Р. Швейкарт. Полет КК «Аполлон-10» к Луне, начатый 18 мая 1969 года, был генеральной репетицией перед посадкой на ее поверхность. Экипаж КК «Аполлон-10», Т. Стаффорд, Ю. Сернан и Дж. Янг, проводили испытания лунной кабины (рис. 2.31). Астронавты Т. Стаффорд и Ю. Сернан приблизились к Луне на 15 км. Затем, отделив от лунной кабины посадочную ступень, пристыковались к КК «Аполлон», где находился Дж. Янг. Всего пятнадцать

километров отделяло Т. Стаффорда и Ю. Сернана от лунной поверхности, но это еще не была посадка.

#### 2.4. Результаты и уроки экспедиций «Аполлон»

Далее дано краткое описание миссий «Аполлон-11» – «Аполлон-17» и результатов, полученных в ходе их выполнения. Следует подчеркнуть, что представленный ниже материал лишь очень малая часть того, что можно было бы написать об этих полетах. Однако рамки одной книги заставляют нас ограничиться пока этим.

**КК «Аполлон-11».** 16 июля 1969 года начался исторический полет человека к Луне для высадки на ее поверхность. В состав экипажа этого корабля входили: Нейл Армстронг (командир), Эдвин Олдрин – они совершили посадку – и Майкл Коллинз (он оставался на орбите) (рис. 2.32). Посадка на Луну была осуществлена 20 июля в 20 часов 17 минут 43 секунды по Гринвичу в южной части Моря Спокойствия:  $0^{\circ}41'$  сев. широты,  $23^{\circ}26'$  вост. долготы. Завершилась экспедиция благополучно 24 июля 1969 года. Сразу же после посадки астронавты проверили системы аварийного взлета, на случай, если возникнет опасная ситуация. Далее был запланирован 4 часовой сон. Однако астронавты попросили разрешить им немедленный выход на поверхность.



Рис. 2.32. Команда КК «Аполлон-11» на тренировке примерно за полгода до старта к Луне.

Слева направо: Эдвин Олдрин, Нейл Армстронг и Майкл Коллинз

Ступив первый раз на лунную поверхность, Нейл Армстронг произнес историческую и часто цитируемую фразу: «Это небольшой шаг для одного человека, но огромный скачок для всего человечества». Это не был экспромт; фраза была выбрана заранее из десятков других, но это не умаляет ее значения. В память о погибших исследователях космоса на поверхность Луны в этой экспедиции были доставлены, а затем возвращены на Землю, медали и погоны Ю. Гагарина, В. Комарова, В. Гриссома, Э. Уайта и Р. Чаффи.

Полет «Аполлона-11» не обошелся без сюрпризов с советской стороны. За 3 дня до старта КК «Аполлона-11», СССР запускает к Луне КА «Луна-15». О программе полета этого аппарата сообщается только стандартная фраза: «для проведения дальнейших исследований Луны и окололунного пространства». Когда корабль с астронавтами приближался к Луне, то по окололунной орбите уже двигалась советская станция, цели которой были неизвестны. НАСА посылало запросы в Москву, стараясь получить информацию, которая показала бы, что помех их полету не будет. Но вразумительного ответа не было. Астронавт Фрэнк Борман даже решил воспользоваться личными связями и попытался узнать о полете КА «Луна-15», позвонив из Хьюстона президенту АН СССР. Академик М. В. Келдыш «успокоил» американских специалистов, сообщив им лишь, что траектории КА «Луны-15» и КК «Аполлон-11» не пересекутся. И они действительно не пересеклись: в день триумфа американской лунной программы – первой высадки астронавтов на лунную поверхность – КА «Луна-15» разбилась. Попытка привезти лунный грунт раньше или, по крайней мере, одновременно с американцами не удалась. Причиной аварии могла быть ошибка в командах управления нашей станции; в результате она на большой скорости врезалась в поверхность в материковом районе, южнее Моря Кризисов. Успех КА «Луна-15» мог бы сильно поддержать престиж СССР, как космической державы, однако фокус не получился.

Нейл Армстронг провел на лунной поверхности около 2 часов 40 минут. Им и Олдрином было собрано 22 кг образцов лунного грунта и камней. Малая сила тяжести позволяла астронавтам передвигаться большими прыжками, но наиболее удобной оказалась обычная ходьба. В рамках этой миссии было проведено три основных эксперимента. Был установлен пассивный сейсмометр, лазерный уголкового отражатель для измерений параметров лунной либрации и ловушка для частиц солнечного ветра. Задачей особой важности был сбор образцов материала лунной поверхности. Его проводили в несколько этапов. Вначале был быстро собран 1 кг образцов в ближайшей окрестности лунной кабины, на тот случай, если миссию придется неожиданно прервать. Затем следовал документированный сбор образцов; производилось бурение и отбор образцов грунта с глубины около 1 метра. Все это сопровождалось фотосъемкой окрестностей. На рис. 2.33 показан снимок лунной поверхности в окрестности

посадочного модуля «Аполлон-11». Яркий нимб вокруг тени головы астронавта Нейла Армстронга является не признаком святости первого человека, вступившего на Луну, а проявлением опозиционного эффекта яркости ее поверхности (см. следующую главу).



Рис. 2.33. Панорама лунной поверхности в окрестности посадочного модуля «Аполлон-11».

Яркое пятно вокруг тени головы Нейла Армстронга связано с опозиционным эффектом

Интересны первые впечатления астронавтов, ступивших на лунную поверхность. Они отмечали необычную когезионную способность лунного грунта, он легко собирался в комки и лип к ногам астронавтов, хорошо держал вертикальный откос (до нескольких сантиметров), сохраняя четкие отпечатки рубчатых подошв костюмов астронавтов. На Земле такое характерно, например, для мокрого песка. Мелкая лунная пыль неизбежно попала в лунный корабль, и после его герметизации астронавты имели с ней непосредственный контакт: оказалось, что лунное вещество пахнет жженым порохом. Неизбежность контакта астронавтов с лунным веществом требовала определенных мер предосторожности – тогда никто не мог дать 100 % гарантии того, что с Луны не будет занесен на Землю неизвестный науке микроб, от которого вымрет половина человечества. Астронавты прошли карантин, а вещество лунной поверхности подвергалось биологическому анализу. Результат был ожидаем: «Луна не обитаема, ни одна душа не бродит там» (Франческо Гримальди, 1650 год).

По свидетельству астронавтов, неожиданным для них оказалось наличие в днищах некоторых кратеров примерно метрового диаметра странных образований. Астронавты сравнивали их с лужами и каплями припоя, которые видел любой человек, проводивший пайку. Уже тогда было понятно, что это застывшие остатки низкоскоростных выбросов расплава, образовавшегося при формировании кратеров. Однако в то время рассматривалась и другая, значительно более экстравагантная гипотеза, предложенная американским ученым Томасом Голдом, который считал, что 100000 лет назад в окрестности Земли вспыхнула «минисверхновая» и опалила лунную поверхность; при этом чашеобразные кратеры

сфокусировали радиацию в днищах, благодаря чему и появился расплав. При всей оригинальности этой идеи она, конечно, не выдерживает критики.

Пожалуй, самым важным инструментом, доставленным астронавтами на поверхность Луны, был сейсмометр, который проработал успешно 21 день. Он был установлен примерно в 16 метрах от посадочного модуля. Основным результатом этого эксперимента было то, что сейсмический фон Луны оказался чрезвычайно низким, ниже земного примерно в 1000 раз. Сейсмометр зарегистрировал множество сейсмических сигналов, однако их происхождение точно идентифицировать тогда не удалось. Рассматривались следующие причины таких сигналов: (1) выход газа из лунного модуля и циркуляция в нем рабочих жидкостей, (2) освобождение термоупругих напряжений лунной поверхности в окрестности сейсмометра, (3) микрометеоритные удары в сейсмометр и окружающую поверхность, (4) перемещение реголита в окрестности сейсмометра за счет склоновых процессов и, наконец, (5) лунотрясения – то, ради чего устанавливали сейсмометр.

Лазерный уголкового отражатель позволил проводить измерения расстояния между лазером (Земля) и отражателем (Луна) с неопределенностью около 4 м. Измерения проводились с использованием телескопов Ликской и Макдональдской обсерваторий. Эти измерения, а также измерения, проведенные аналогичными приборами, доставленными другими миссиями, позволили уточнить параметры широтной и долготной либрации Луны, а также скорость удаления Луны от Земли за счет приливных потерь. Сейчас с лазерными отражателями, доставленными экспедициями «Аполлон», ученые продолжают работать, доведя точность определения расстояний до нескольких сантиметров.

Ловушка для частиц солнечного ветра представляла собой лист тонкой фольги площадью примерно  $4000 \text{ см}^2$ , который экспонировался на Солнце на протяжении 77 минут. Частицы солнечного ветра внедрялись в фольгу, застревая там. Затем лист свернули и доставили на Землю для анализа с помощью масс-спектрометра. Главным результатом этого эксперимента является обнаружение (хотя и ожидаемое) в солнечном ветре тяжелых ионов и их изотопов. Такие ловушки использовались позднее во всех экспедициях на Луну.

Первые лабораторные исследования материала лунной поверхности с места посадки КК «Аполлон-11» показали, что лунные породы в этом районе являются аналогами земных базальтов, хотя и имеют более мелкозернистую структуру и несколько другой состав. В частности, титана в лунных базальтах заметно больше, чем в земных, до 10%; на Земле такое содержание титана квалифицируется как рудное месторождение. Микрокристаллическое строение лунных пород указывает на быстрое остывание расплава. Этот расплав мог образоваться либо при извержении лав во время затопления Моря Спокойствия, либо

возникнуть в процессе местных ударных событий. Материал лунной поверхности оказался абсолютно обезвожен. В сборах образцов было найдено большое количество брекчий – сравнительно твердых фрагментов, которые образовались за счет ударного цементирования мелкодисперсной фракции лунного реголита. Исследование образцов, доставленных КК «Аполлон-11», положило начало изучению космогенных процессов, изменяющих оптические свойства материала лунной поверхности. В частности, при расколе куска породы на ней была обнаружена тонкая корка (толщиной  $< 1$  мм) более светлой окраски, чем материал объема. Основную массу поверхностного лунного материала составляет реголит, порошкообразная масса, состоящая из разнородных частиц размером менее миллиметра. Реголитовые частицы представляют собой фрагменты кристаллических пород, стекол и шлаков. Эти частицы содержат большое количество благородных газов, внедренных солнечным ветром. В реголите найдено некоторое количество метеоритного материала.

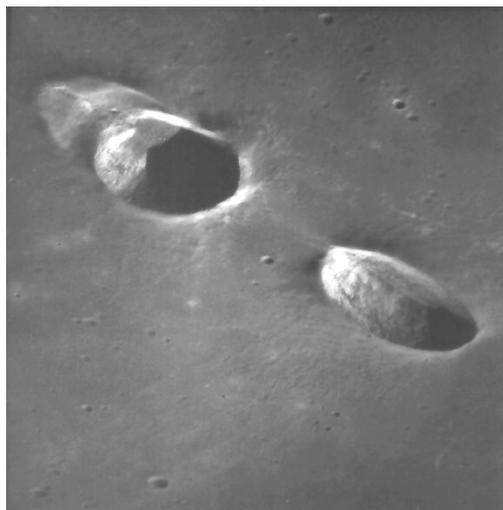


Рис. 2.34. Снимок кратеров Мессье, сделанный фотографической камерой астронавтом орбитального модуля КК «Аполлон-11»

Проводилась съемка лунной поверхности с орбитального модуля КК «Аполлон-11». На рис. 2.34 приведен снимок двух кратеров, Мессье (справа) и Мессье А. Это замечательные кратеры, они имеют слегка вытянутую форму. Здесь уместно вспомнить историю гипотез об образовании лунных кратеров. В прошлом долгое время считалось, что лунные кратеры имеют вулканическое происхождение. Ударное происхождение исключалось, т.к. считалось, что при ударе тела, летящего под ненулевым углом к нормали, должны образовываться вытянутые кратеры, а их на Луне очень мало (абсурдно, ведь, предполагать, что все тела падали на поверхность вдоль ее нормали). В начале прошлого столетия Е. Эпик (он был тогда директором обсерватории в Тарту) разрешил возникшее противоречие. Он полагал, что если тело падает на

поверхность с достаточно высокой скоростью, то это по воздействию, скорее, можно уподобить взрыву артиллерийского снаряда; воронка от его взрыва симметрична независимо от параметров траектории снаряда. Небольшая вытянутость может появиться, только когда налетающее тело входит в поверхность по настильной траектории. Таким образом, получается, что кратеры Мессье и Мессье А образовались при ударе тел, летевших по близким, очень пологим траекториям.

**КК «Аполлон-12».** Вторая пилотируемая экспедиция на Луну состоялась 14 – 24 ноября 1969 года. В состав экипажа этого корабля входили: Чарльз Конрад, Алан Бин (совершили посадку) и Ричард Гордон (оставался на лунной орбите). КК «Аполлон-12» совершил посадку в Океане Бурь в месте с координатами:  $3^{\circ}12'$  юж. широты и  $23^{\circ}23'$  зап. долготы, недалеко от точки прилунения КА «Сервейер-3» (апрель 1967 года.). Лунная поверхность в этом месте оказалось моложе, чем в месте посадки КК «Аполлон-11». За время экспедиции было собрано около 34 кг лунного грунта в окрестности места посадки радиусом около 500 метров. Были впервые проведены измерения магнитного поля на поверхности и концентрации атомов лунной атмосферы. Вообще состав научной аппаратуры этой экспедиции был более богатым, чем в экспедиции КК «Аполлон-11».

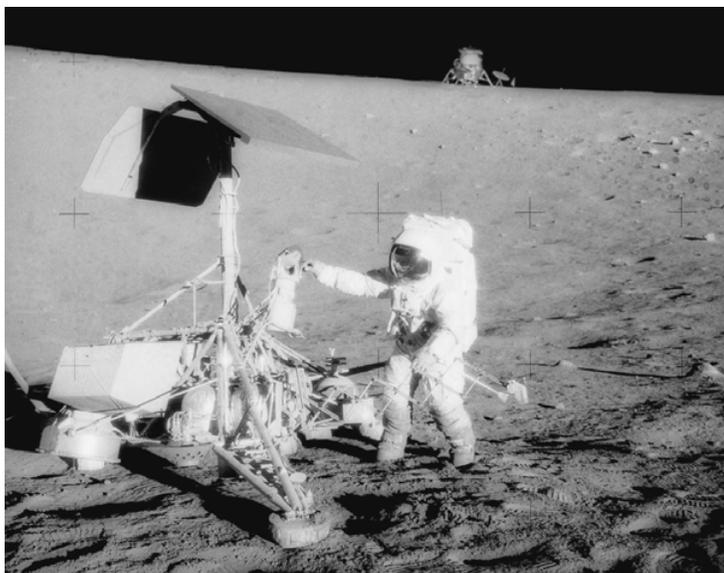


Рис. 2.35. Астронавт демонтирует детали станции «Сервейер-3». На заднем плане виден посадочный модуль КК «Аполлон-12»

Чарльз Конрад и Алан Бин дошли до КА «Сервейер-3» (расстояние 183 метра) и демонтировали некоторые детали конструкции этого аппарата для доставки их на Землю и

последующих исследований (рис. 2.35). Они также сделали фотографии окрестностей КА «Сервейер-3» для того, чтобы сравнить их с фотографиями тех же участков, сделанными на 30 месяцев раньше камерами КА «Сервейер-3». Никаких достоверных изменений на поверхности в масштабах 1 мм – 1 см найдено не было.

Отметим два интересных геологических результата. В сборах лунных образцов КК «Аполлон-12» было найдено существенно меньше брекчий, чем в сборах в месте посадки КК «Аполлон-11». Это связывается с тем, что большое число образцов в экспедиции «Аполлон-12» было взято с гребней кратеров, на которых расположен преимущественно незрелый материал. В окрестности места посадки лунной кабины были найдены языки светлого материала, местами частично захороненные. Предположительно, это материал выбросов из кратера Коперник. Этот материал, возможно, формирует яркую лучевую систему этого кратера.

Экспедицией «Аполлон-12» были проведены новые сейсмические измерения. В результате было показано, что лунные сейсмические сигналы сильно отличаются от тех, что измеряются на Земле. Это связано с очень низкими сейсмическими потерями лунного материала. Был проведен также дополнительный сейсмический эксперимент. Использовалось падение на лунную поверхность отработанной двигательной ступени лунного модуля. Она упала в 80 км от сейсмометра. Это событие было отчетливо зарегистрировано. Сигнал медленно нарастал, а затем еще медленнее затухал. Это продолжалось примерно 1 час. Когерентность вертикальной и горизонтальной компонент сигнала почти отсутствовала. Все это характерно для материалов с высокой рассеивающей способностью и низким затуханием сейсмических волн. Временной профиль сейсмосигнала, полученный в этом эксперименте, был полезен для селектирования сигналов, связанных с событиями на Луне. Всего было выделено около 30 сейсмосигналов, которые можно связать либо с ударными событиями, либо неглубокими лунотрясениями.

Измерения, выполненные трехосным магнетометром, показали, что в месте посадки КК «Аполлон-12» имеется постоянное магнитное поле напряженностью 38 гамм ( $1 \text{ гамма} = 8 \cdot 10^{-4} \text{ а/м}$ ). Для сравнения: напряженность магнитного поля Земли на экваторе составляет примерно 30000 гамм, а межпланетного поля на орбите Земли – 5 гамм. Был измерен градиент этого поля, примерно  $4 \cdot 10^{-3} \text{ гамм/см}$ ; это позволило оценить размер местного магнитного источника, размер которого оказался не менее 200 метров.

Прибор для измерения давления (ионный датчик с охлаждаемым катодом) выносился на расстояние примерно 200 метров от лунного модуля. Измерения проводились днем. Давление вблизи лунной поверхности составило  $8 \cdot 10^{-9} \text{ торр}$ . Если рядом с прибором на расстоянии нескольких метров находился астронавт, то локальное атмосферное давление поднималось до

$10^{-6}$  торр из-за газового облака, окружающего астронавта; оно создается системой жизнеобеспечения. Однако после ухода астронавта давление падало до  $10^{-8}$  торр за несколько минут. До значений  $8 \cdot 10^{-9}$  торр оно упало лишь через 20 часов.

В состав научной аппаратуры посадочного модуля КК «Аполлон-12» входил также надтермальный ионный детектор. Он измерял потоки положительно заряженных ионов. Такие потоки были зарегистрированы лунной ночью вблизи ударного плазменного фронта Земли. Было найдено заметное увеличение потока после падения отработавшей двигательной ступени лунного модуля; предполагается, что газ, образовавшийся при ударе, был ионизирован и разогнан солнечным ветром.

Для измерений характеристик приповерхностной плазмы использовался спектрометр, позволяющий измерять энергию заряженных частиц. Он показал, что характеристики солнечного ветра вблизи лунной поверхности не отличаются от измеренных вдали от Луны. Плазма солнечного ветра не наблюдалась в области лунной тени и геомагнитном хвосте. Этот результат подтверждал отсутствие магнитного поля Луны, низкую проводимость ее недр, отсутствие заметной атмосферы и электрическую нейтральность ее поверхности.



Рис. 2.36. Снимок лунной поверхности, сделанный в окрестности места посадки КК «Аполлон-12». На переднем плане видна небольшая коническая горка. Вероятно, это выход породы

С орбитального модуля КК «Аполлон-12» проводилась спектрозональная съемка места посадки следующей предполагаемой миссии «Аполлон-13». Большое количество снимков было сделано на самой поверхности. Как пример, на рис. 2.36 показана фотография небольшой горки (ее высота около метра), напоминающей небольшой вулканический конус. Однако это сходство случайно, это просто выходы породы.

**КК «Аполлон-13».** Полет этого корабля чуть не закончился трагедией. Он начался 11 апреля 1970 года. В состав экипажа входили Джеймс Ловелл (он летал вокруг Луны на КК

«Аполлон-8»), Джон Суиджерт и Фред Хейс. На половине пути к Луне в двигательном отсеке основного блока взорвался кислородный бак номер 2. Первоначально этот бак был установлен на КК «Аполлон-10». Затем был снят для доработки. При снятии он повредился, но так, что этого не удалось выявить при испытаниях. В конце концов, он был установлен на КК «Аполлон-13». Наступило 13 апреля – третьи сутки полета. Незадолго до взрыва дежурные операторы сообщили экипажу, что полет корабля проходит настолько хорошо, что они готовы «плакать от скуки». Скоро им скучать стало некогда, а плакать они имели возможность совсем по другому поводу. Астронавты неожиданно почувствовали резкий звук и вибрацию. Джон Суиджерт, который был на связи, сказал: «Хьюстон, у нас здесь проблема». Спустя 3 часа после взрыва, отсек основного блока КК «Аполлон-13» полностью лишился кислорода. Поврежденным оказался и другой кислородный бак. Газ вытекал медленно и некоторые любители астрономии в Хьюстоне, как писал потом Джеймс Ловелл, даже наблюдали эту странную «комету». Основной блок лишился и энергопитания. Стало невозможно использовать его двигательную установку. Посадка на Луну была, конечно, отменена. Экипаж перешел в лунную кабину. Поврежденный корабль, совершив облет вокруг Луны, стал возвращаться на Землю. При этом экипаж проводил исследования (!) лунной поверхности. Этот полет закончился благополучно, но оказался сильным аргументом для тех, кто ратовал за сворачивание программ пилотируемых полетов к Луне.

**КК «Аполлон-14».** Эта миссия состоялась почти год спустя после аварии КК «Аполлон-13». Экспедиция «Аполлон-14» продолжалась с 31 января по 9 февраля 1971 года. Алан Шепард, Эдгар Митчелл совершили посадку в районе кратера Фра Мауро (3°40' юж. широты и 17°28' зап. долготы) и провели на лунной поверхности около 9 часов. Ранее это место планировалось для высадки экспедиции «Аполлон-13». Астронавты собрали около 43 кг лунных образцов. Третий астронавт, Стюард Руса, в это время находился на орбите.

Район Фра Мауро геологически очень интересен. Некоторые его формации представляют собой отложения выбросов, образовавшиеся при ударном событии, которое дало начало огромному бассейну, Морю Дождей. Сбор образцов таких отложений был очень важен, т. к. позволял провести датировку одного из наиболее важных ударных событий, сформировавших современный облик Луны. Вещество выбросов извлечено с глубин несколько километров, поэтому его исследование представляло интерес с точки зрения понимания состава лунной поверхности на больших глубинах.

Несколько необычными оказались механические свойства грунта в этом месте. По данным пенетраторов и буров он оказался более плотным в сравнении с тем, что было найдено

для мест «Аполлон-11 и «Аполлон-12». В этой экспедиции использовалась ручная тележка. По ее следам было замечено, что грунт на краях (римах) кратеров метровых размеров менее плотный и более сжимаемый, чем в межкратерном пространстве.

Сейсмометр в этой экспедиции был более совершенным. Теоретически он позволял зарегистрировать падение тела весом более 1 кг в любой точке Луны. Во время функционирования этого сейсмометра продолжал работать сейсмометр, установленный экспедицией «Аполлон-12». Множество сейсмических сигналов было зарегистрировано двумя сейсмометрами, что несравненно улучшило оценки достоверности событий. По характеристикам сигнала данные сейсмометров удалось разделить на две группы: одна из них относилась к регистрации ударных событий, а вторая – к лунотрясениям. События последней группы хорошо коррелируют с временем прохождения Луной перигея. По-видимому, такие прохождения стимулируют (за счет приливного эффекта) освобождение внутренних напряжений в теле Луны, что и порождает лунотрясения. Экспедицией «Аполлон-14» был проведен активный сейсмический эксперимент. Команда установила три дополнительных геофона (сейсмометра) и взрывное устройство на некотором расстоянии от них. Анализ полученных сигналов позволил измерить толщину реголитового слоя (около 8,5 м) и скорость распространения *p*-волн (продольных волн) в этом слое, 104 м/сек. Оценки толщины реголита хорошо совпали с оценками, сделанными по геологическим данным. Ниже реголитового слоя обнаружен другой слой толщиной около 50 м, в котором скорость распространения *p*-волны примерно в три раза более высокая, чем в реголите. Предполагается, что второй слой это собственно отложения материала выбросов из бассейна Моря Дождей.

Как и в предыдущей экспедиции, команда установила прибор для измерения давления лунной атмосферы, точнее – концентрации нейтральных атомов. Ночная концентрация оказалась равной  $2 \cdot 10^5 \text{ см}^{-3}$ . При восходе Солнца концентрация атомов резко увеличивалась, на два порядка за 2 минуты и удерживалась в дневное время на уровне  $10^7 \text{ см}^{-3}$ . В экспедиции «Аполлон-14» использовался также детектор надтермальных ионов. Этот прибор, как и аналогичный прибор предыдущей миссии, отслеживал перемещения ионных облаков. В частности, 19 марта 1971 года было зарегистрировано ионное облако размером примерно 130 км; оно двигалось на запад со скоростью около 700 м/сек. Предполагается, что это облако порождено сравнительно сильным лунотрясением, зарегистрированным 37 минутами ранее сейсмометром «Аполлона-14». Команда этой экспедиции установила также уголкового отражатель для продолжения исследований движения Луны и Земли. Были проведены также магнитные измерения. Они были измерены в двух точках на расстоянии 1,1 км друг от друга. Поля оказались существенно разными, 43 и 103 гамм. В этой экспедиции проводились также

эксперименты по измерению потоков низкоэнергетических электронов и ионов (диапазон энергий 50 эв – 50 Кэв) на лунной поверхности. Были обнаружены стабильные потоки низкоэнергетических фотоэлектронов, которые возникают при облучении лунной поверхности жестким излучением Солнца. Для энергий электронов 80 эв этот поток составил около  $10^4$  эл/см<sup>2</sup> стер эв. Он быстро падает с ростом энергии фотоэлектронов. Было зарегистрировано плазменное облако, образовавшееся при ударе о лунную поверхность двигательной ступени лунного модуля после его взлета.



Рис. 2.37. Снимок посадочного модуля КК «Аполлон-14», сделанный против Солнца. Виден яркий след колеи колес лунной тележки

Как и в случае предыдущих миссий, астронавтами КК «Аполлон-14» было получено множество изображений лунной поверхности. На рис. 2.37 показан снимок посадочного модуля КК «Аполлон-14», сделанный против Солнца. Хорошо виден яркий след колеи колес лунной тележки, которой пользовались астронавты для сбора образцов. Этот снимок демонстрирует, насколько высока шероховатость поверхностного слоя Луны в естественных условиях – небольшое сжатие грунта колесами тележки привело к тому, что яркость поверхности на больших фазовых углах резко возросла. Оптики-практики хорошо знают этот эффект, когда матированная стеклянная поверхность блестит в скользящих лучах. Это происходит из-за конструктивной интерференции однократно рассеянных лучей.

**КК «Аполлон-15».** Время проведения экспедиции 26 июля – 7 августа 1971 года. Состав экипажа: Дэвид Скотт (командир), Джеймс Ирвин (они совершили посадку) и Альфред Уорден (оставался на орбите). Место посадки было выбрано в районе борозды Гадлея в предгорье

Апеннин. Координаты места посадки:  $26^{\circ}06'$  сев. широты и  $3^{\circ}39'$  вост. долготы. Оно показано стрелкой на снимке, сделанном КА «Клементина» со 100 м разрешением, который представлен на рис. 2.38. Д. Скотт и Дж. Ирвин провели более 18 часов вне посадочного модуля, впервые используя лунный автомобиль (рис. 2.39). Они проехали по лунной поверхности около 10 км. Собрали около 77 кг лунных образцов. Впервые Д. Скотт и Дж. Ирвин увидели высокие лунные горы так близко. Крутые склоны некоторых из них обнаружили удивительную слоистую структуру (рис. 2.40). Объяснить ее не так просто; некоторые ученые даже считают это «хитрой» игрой теней. Однако для человека, который посвятил много лет исследованию теневого эффекта, это объяснение едва ли покажется приемлемым.

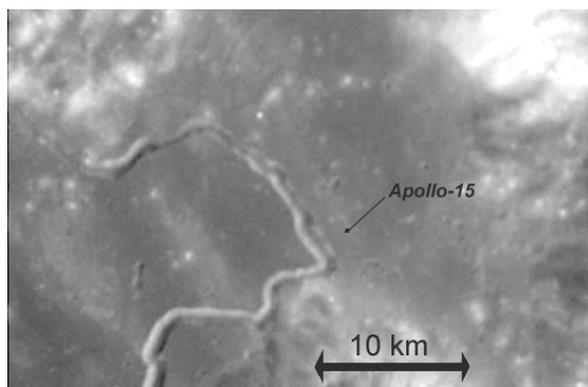


Рис. 2.38. Место посадки экспедиции «Аполлон-15»



Рис. 2.39. Снимок лунного автомобиля экспедиции «Аполлон-15» на фоне гор

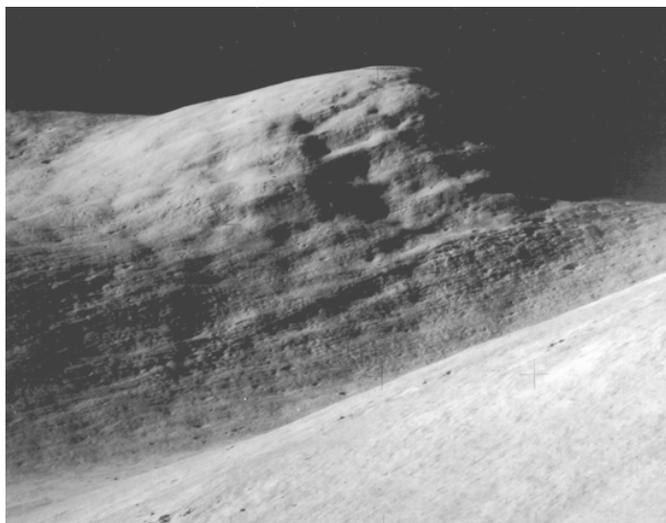


Рис. 2.40. Гора, имеющая слоистую структуру, сфотографирована астронавтом экспедиции «Аполлон-15»

В целом научная программа этой миссии была существенно более насыщенная, чем у предыдущих экспедиций. В частности, в этот раз был проведен большой комплекс экспериментов с борта орбитального модуля. Среди них были гамма и рентгеновская съемка лунной поверхности, исследование вариаций потока  $\alpha$ -частиц, масс-спектрометрические измерения, бистатическая локация, магнитометрическая съемка, фотосъемка лунной поверхности, в том числе, для изучения оппозиционного эффекта. С борта командного модуля производился запуск субсателлита для проведения магнитных исследований. Был несколько расширен арсенал приборов, использующихся для измерений на поверхности. В частности, в грунт внедрялся термодатчик для регистрации теплового потока из лунных недр. Впервые был найден необычный грунт, в состав которого входило много сферических частиц зеленого цвета. Предполагается, что такие частицы могли образоваться в процессе вулканического извержения (пирокластические выбросы). Были проведены бурения поверхности в нескольких местах, в том числе вблизи места посадки бурение проводилось до глубины 2,4 метра. Оказалось, что почти все отобранные колонки грунта стратифицированы, т.е. имеют хорошо выраженную слоистую структуру. Это указывает на сложную геологическую историю этого района. Отметим некоторые результаты научных экспериментов этой миссии.

В этой экспедиции на Луне был установлен еще один сейсмометр, который в совокупности с сейсмометрами КК «Аполлон-12» и «Аполлон-14» образовал простейшую апертуру, которая позволила делать оценки глубин сейсмических событий, положений

эпицентров, а также определить скорость волн сжатия в лунной коре и мантии. В частности, был определен очаг сейсмической активности Луны на глубине примерно 700 – 800 км, с эпицентром в южной части видимого полушария. Скорость распространения волн сжатия в коре оказалась равной примерно 7 км/сек, что типично для пород, обогащенных полевыми шпатами. В мантии скорость волн оказалась более высокой, примерно 9 км/сек. Активный сейсмический эксперимент позволил определить скорость волн сжатия в реголите места посадки КК «Аполлон-15», она составила 98 м/сек.

Измерения, выполненные с помощью магнетометра, показали, что напряженность поля в этом районе составляет всего 5 гамм, что близко к межпланетному фону. Это сильно отличает место посадки КК «Аполлон-15» от мест посадок предыдущих миссий.

Измерения температуры на глубине 1 метр в двух местах показали 252,4°К и 250,7°К, это примерно на 35° выше, чем средняя температура поверхности. Измеренный тепловой поток из недр оказался равным примерно  $3,3 \cdot 10^{-6}$  ватт/см<sup>2</sup>. Источником глубинного тепла является радиоактивный распад.

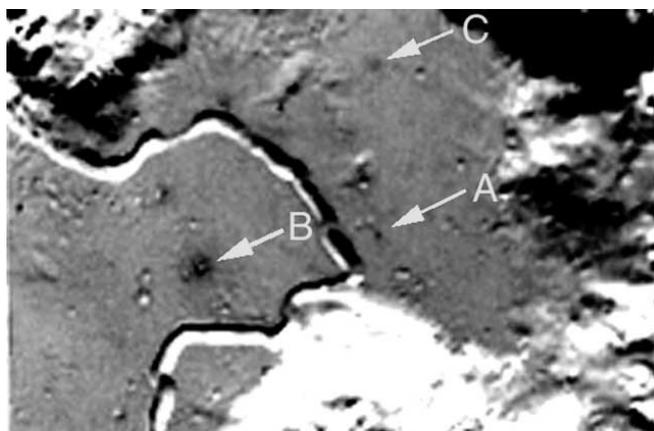
Д. Скотт и Дж. Ирвин установили лазерный отражатель, с помощью которого определялось расстояние от Земли до Луны с точностью до нескольких десятков сантиметров. Измерения с помощью лазерного альтиметра на КК «Аполлон-15» показали, что среднее значение лунного радиуса в плоскости орбиты равно 1737 км. Центр масс Луны смещен от центра фигуры на 2 км к востоку от центра диска. Средняя высота материков относительно морей около 3 км. Поверхность морей относительно ровная с перепадами высот не более 150 м на базе 200 – 600 км. Поверхность материков неровная – средний перепад 600 м на базе 40 км.

С орбитального модуля КК «Аполлон-15» было проведено картирование небольшой части лунной поверхности (вдоль следа орбиты) с помощью гамма спектрометра. Поток гамма лучей от лунной поверхности состоит из двух компонент: одна из них соответствует естественной радиоактивности (калий, уран, торий), а другая – наведенной космическими лучами (железо, титан и др.). Концентрация естественных радионуклидов является индикатором степени химической дифференциации, которой подвергалась Луна. К сожалению, пространственное разрешение этих данных не высоко, около 100 км; это связано с тем, что поток гамма лучей в этих экспериментах не коллимировался. Информация о составе поверхности приходит из слоя толщиной около 1 метра.

Целью экспериментов с помощью рентгеновского спектрометра было картирование таких характеристик лунной поверхности как отношение концентраций Al/Si и Mg/Si. Соответствующие линии характеристического излучения генерируются солнечной рентгеновской радиацией. Обнаружены сильные вариации этих отношений по лунной

поверхности. В частности, отношение для лунных материков примерно в три раза превышает типичные значения для морей.

В рамках этой миссии была сделана попытка измерить с орбиты потоки  $\alpha$ -частиц в диапазоне энергий 5 – 12 Мэв. Предполагалось, что эти измерения дадут информацию о распределении по лунной поверхности урана и тория, а также об интенсивности эманации радона, газа, выбросы которого могут сопровождать современную вулканическую и тектоническую активность. К сожалению, поток  $\alpha$ -частиц оказался значительно меньше, чем считалось, поэтому измерения с помощью  $\alpha$ -спектрометра позволили лишь обнаружить несколько областей с повышенной эманацией радона. Возможно это зоны очень слабой вулканической активности.



Map of the photometric anomalies around the Apollo 15 landing site. Images taken by the Clementine spacecraft have resulted in spotting disturbed lunar terrain around the touchdown zone.  
Arrow A points to a diffuse dark spot exactly at the locale of the lunar module, Falcon, believed created by the craft's engine blast.  
Arrows B and C point to other dark spots that are photometric anomalies related to small fresh craters.

CREDIT: KRESLAVSKY & SHKURATOV

Рис. 2.41. Место посадки КК «Аполлон-15» на изображении фотометрических аномалий указано стрелкой А (небольшая темная область, почти точка). Аналогичным образом выделяются молодые кратеры, указанные стрелками В и С

Как и в предыдущих миссиях, с командного модуля КК «Аполлон-15» проводилась фотосъемка лунной поверхности. В частности, был получен снимок, на котором предположительно на пределе разрешения видна посадочная кабина, а точнее, отбрасываемая ею тень. Много лет спустя удалось обнаружить на лунной поверхности следы, которые остались после взлета кабины. Дело в том, что место посадки КК «Аполлон-15» было детально отснято КА «Клементина» при разных углах фазы (около 50 значений) с разрешением 100 м. Это позволило для каждого элемента изображения построить зависимость яркости от фазового угла. Затем, применяя специальную методику анализа данных, удалось построить распределение параметра, характеризующего наклон фазовой зависимости (см. следующую

главу). На этом изображении четко выделились (как аномалии) несколько молодых кратеров и место посадки лунной кабины (стрелки А-С на рис. 2.41). Фотометрическая аномальность этих областей обусловлена структурными особенностями их реголита. В частности, аномалия в месте посадки КК «Аполлон-15» обусловлена, вероятно, раздуванием пыли газовыми струями двигателя посадочного модуля в окрестности нескольких сотен метров. Результаты этой работы несколько лет назад были представлены на ежегодной лунно-планетной конференции в Хьюстоне. После этого несколько американских газет и интернетовских сайтов совершенно неожиданно сообщили примерно следующее: учеными Харьковской астрономической обсерватории Креславским и Шкуратовым было доказано, что американские астронавты действительно побывали на Луне ...

Для людей с научным образованием эта история может показаться забавной. На самом деле, смеяться здесь не над чем. Агрессивное невежество и бессовестность некоторых «любителей истины» сделали свое черное дело: немало обывателей сейчас действительно думают, что их водят за нос и что американцы на Луну не летали, а сняли свои лунные фильмы в Голливуде. Приводятся разные «доказательства», которые специалист легко развеет, но обывателю они кажутся правдоподобными. Например, «убойный» аргумент бесовщины, что флаг США, воткнутый в лунную поверхность, в одном из фильмов развеивается как на ветру («любители истины» знают, что на Луне нет атмосферы, а значит, нет и ветра!). Разве поверят такие люди, что американские инженеры специально сконструировали устройство, которое имитировало колыхание полотнища флага. Разве объяснишь им, что этим инженерам и в страшном сне не могло присниться, чем обернется их невинная шутка.

**КК «Аполлон-16».** Эта миссия осуществлялась в период 16 – 27 апреля 1972 года. Состав экипажа был следующий. Джон Янг (командир) и Чарльз Дюк, они совершили посадку. Томас Маттингли оставался в орбитальном модуле. Место посадки было выбрано на плоскогорье вблизи кратера Декарт. Координаты места посадки:  $8^{\circ}59'$  юж. широты и  $15^{\circ}31'$  вост. долготы. Дж. Янг и Ч. Дюк провели вне лунной кабины более 20 часов. Было собрано около 95 кг лунных образцов. За три выхода на лунную поверхность астронавты проехали около 27 км. В научном отношении это была очень продуктивная экспедиция; отчасти это связано с тем, что посадка впервые была произведена в материковом районе Луны, в котором, как предполагалось, можно было найти образцы первичных, наиболее старых пород, обогащенных алюминием.



Рис. 2.42. Джон Янг – командир корабля «Аполлон-16». Снимок сделан в 1971 году

Для экипажа, из-за насыщенности научной программы, это был тяжелый полет.

В 1999 году автору этой книги представилась возможность побывать в гостях у астронавта Джона Янга, в его доме под Хьюстоном. Нас встретил на пороге пожилой человек небольшого роста, небрежно одетый; в нем было трудно узнать бравого астронавта, снимок которого приведен на рис. 2.42. Он производил странное впечатление: исключительно экономные движения, очень краткие ответы, сдержанные эмоции. Вопросы, которые ему задавали я и мои коллеги, он слышал много раз, поэтому отвечал заученно и однообразно. Но в какой-то момент, увлекшись воспоминаниями, он сказал важную вещь, что факт своего пребывания на Луне он по-настоящему осознал только много времени спустя после возвращения, а до этого была просто изнуряющая работа, когда длительными периодами было некогда даже на секунду отвлечься от приборов. Когда необходимость сосредоточиться и мгновенно реагировать на неожиданные ситуации делала астронавтов почти роботами.

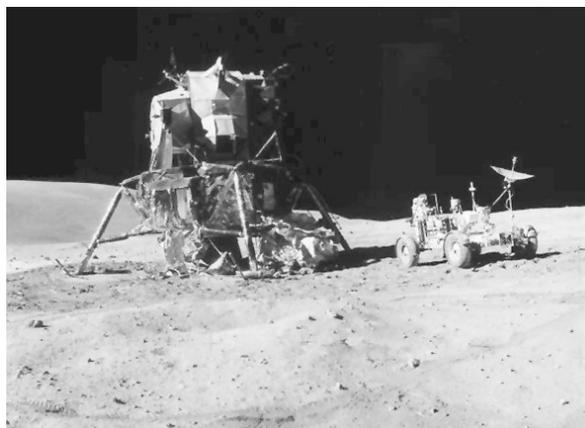


Рис. 2.43. Лунный автомобиль экспедиции «Аполлон-16»

Астронавты этой экспедиции также пользовались лунным автомобилем (рис. 2.43). Как и в предыдущей миссии, на поверхности Луны были проведены измерения теплового потока, идущего из лунных недр, пассивные и активные сейсмические измерения, а также исследования с помощью магнетометра и многие другие работы. Проводилось также бурение грунта; длина одной отобранной колонки грунта составила 2,6 метра. Проводилось исследование механических свойств грунта. В частности, приповерхностная пористость в месте посадки КК «Аполлон-16» оказалась почти той же, что и в других местах посадок, примерно 45%. Пористость кратерных римов оказалась выше, около 46%. Были также взяты пробы материала больших каменных блоков, выброшенных когда-то при образовании кратеров (рис. 2.44). На этом рисунке видно, что астронавт, находящийся в тени крупного камня, неплохо освещен за счет перерасеяния света лунной поверхностью.



Рис. 2.44. Астронавт, находящийся в тени большого валуна  
(экспедиция «Аполлон-16»)

Сейсмометр, доставленный экспедицией «Аполлон-16», был значительно более чувствительным, чем сейсмометры предыдущих миссий. Он позволял регистрировать примерно 10000 сейсмических сигналов в год. С помощью сети сейсмометров, доставленных КК «Аполлон-12, «Аполлон-14» – «Аполлон-16», и данных исследований лунных образцов удалось установить, что: (1) толщина лунной коры в области материков составляет примерно 60 км; (2) эта кора сложена преимущественно анортозитами и породами типа габбро; (3) толщина базальтового слоя в районе посадок КК «Аполлон-12» и «Аполлон-14» (т.е. в юго-восточной части Океана Бурь) составляет примерно 25 км. Активный сейсмический эксперимент позволил найти скорость волн сжатия в реголите места посадки КК «Аполлон-16»,

она оказалась равной 114 м/сек. Толщина реголитового слоя оценивается здесь равной примерно 12 метрам. Скорость ниже этой отметки оказалась равной 250 м/сек. Это слой реголитовых брекчий, его толщина примерно равна 70 метрам.

Магнитные измерения на поверхности с помощью переносного магнетометра показали, что породы в месте посадки КК «Аполлон-16» обладают наибольшей остаточной намагниченностью. Были найдены места, где величина поля доходила до 313 гамм.

Эксперименты, проведенные на орбитальном модуле КК «Аполлон-16», включали в себя гамма-спектрометрические измерения. Они охватили около 18% лунной поверхности. В среднем поток гамма излучения видимого полушария в 2 раза выше, чем обратного. Наиболее высокие значения потока, соответствующие KREEP базальтам, зарегистрированы в Море Дождей и Океане Бурь. Дисперсия концентраций калия ниже, чем для U и Th. Эти измерения были выполнены с очень низким пространственным разрешением, поскольку гамма лучи практически не коллимируются. Таким образом, гамма спектрометр регистрировал весь поток, идущий от лунной поверхности из всех направлений, а это, при 100 км орбите командного модуля, соответствует измерениям подаппаратной области размером примерно 100 км.

Измерения рентгеновской флуоресценции поверхности показали различия в химическом составе морей и материков – материковые породы содержат больше Al и меньше Mg, чем морские. Изменения состава на границе море-материк резкие, что указывает на ограниченный масштаб явлений горизонтального переноса вещества на поверхности. Главным типом пород на материках является анортозитовое габбро или полевошпатовый базальт. Систематических различий в химическом составе пород круговых морей и морей неправильной формы не обнаружено. Величина отношения Al/Si прямо коррелирует с величиной альбедо поверхности. На первый взгляд это странно, поскольку алюминий не является хромофором. Все объясняется тем, что содержание алюминия в лунном веществе тесно антикоррелирует с содержанием железа, а железо как раз является основным хромофором в лунных породах и реголите.

Масс-спектрометрические измерения на орбите зарегистрировали в основном газы, выделяющиеся из систем корабля. Обнаружены магнитные аномалии (порядка 1 гамма на высоте полета субсателлита) над крупными кратерами Ван-де-Грааф, Герцшпрунг, Королев и Гагарин. Наблюдаемые остаточные магнитные поля на видимой стороне слабее и более сглажены, чем на обратной. Съемка поверхности, проведенная с помощью  $\alpha$ -спектрометра, подтвердила наличие повышенной эманации радона в области плато Аристарх, что было ранее найдено в результате аналогичных измерений с борта КК «Аполлон-15». С орбиты проводилась также лазерная альтиметрия Луны.

Гравитационные исследования показали, что маскон Моря Ясности может быть смоделирован диском на поверхности диаметром 245 км и толщиной 8 км (с избытком плотности равным 1 г/см). Маскон Моря Кризисов может быть смоделирован диском диаметром 210 км. Обнаружена положительная аномалия (60 миллигал) над Холмами Мариуса. Поле над Апенниннами указывает на частичную изостатическую компенсацию. К востоку от Моря Ясности и Моря Кризисов обнаружены крупные отрицательные аномалии, похожие на отрицательную кольцевую аномалию над Морем Восточным. Все заполненные кратеры и круглые моря более 200 км являются положительными аномалиями; наименьшая по простиранию аномалия ассоциируется с кратером Гримальди, 150 км в диаметре. В некоторых случаях заполненные кратеры являются отрицательными аномалиями, например, кратер Птолемей. Все незаполненные кратеры являются отрицательными гравитационными аномалиями.

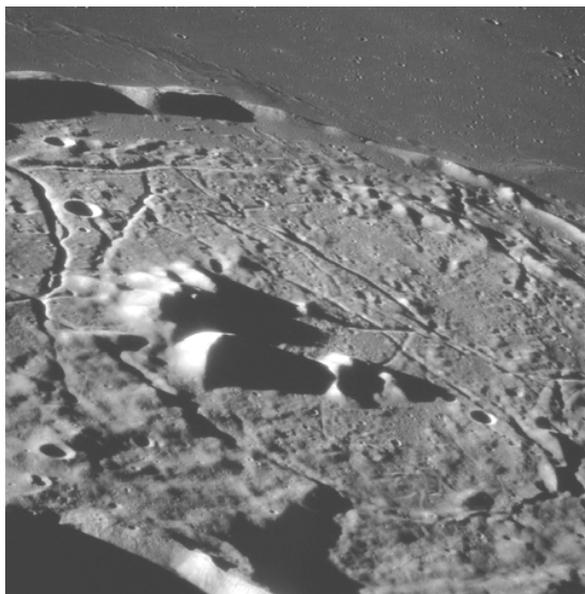


Рис. 2.45. Снимок кратера Гассенди, сделанный с орбиты КК «Аполлон-16»

Фотографическая съемка, проведенная с помощью фотографических камер, использовалась для уточнения места посадки КК «Аполлон-17». На фотографиях обнаружен ряд интересных геологических образований, например, лавовое озеро около кратера Перельман с несколькими уровнями стояния лавы и необычные купола диаметром до 40 км около борозды Шредингер 1. На рис. 2.45 дан снимок кратера Гассенди, полученный с орбитального модуля КК «Аполлон-16». Виден сложный рельеф дна кратера с множеством борозд, связанных с тектоническими разломами.

**КК «Аполлон-17».** Эта экспедиция стартовала 7 декабря, а возвратилась 19 декабря 1972 года. Это был последний пилотируемый полет по программе «Аполлон». Состав экипажа: Юджин Сернан, Гаррисон Шмитт (они совершили посадку) и Рональд Эванс (оставался на орбите). Посадка произведена в долине Тавр Литтров: 20°10' сев. широты и 30°46' вост. долготы. Было доставлено на Землю более 110 кг образцов лунного грунта и камней. Как и в предыдущих двух экспедициях, астронавты использовали лунный автомобиль (рис. 2.46).



Рис. 2.46. Астронавты экспедиции КК «Аполлон-17» с лунным автомобилем  
вблизи большого валуна

Одной из наиболее интересных находок, сделанной в этой экспедиции, был оранжевый грунт, состоящий из стеклянных шариков со средним размером около 40 мкм. Оранжевый материал найден в темном покрове, перекрывающем старые морские районы, в виде гало или лучей вокруг свежих ударных кратеров диаметром от 50 до 250 м, а также в слоях темных покровных отложений, обнаженных на крутых стенках депрессий и грабенах. Предполагается, что оранжевый материал залегает в темном покрове на глубине 50 м в виде частично стратифицированных, не выдерживающихся по простиранию пирокластических отложений, образовавшихся, вероятно, при вулканических процессах, сформировавших древние морские базальтовые равнины описываемого района.

Был проведен ряд интересных экспериментов на поверхности. В частности, были выполнены измерения электрических и структурных свойств лунного реголита *in situ*. Они подтвердили существование довольно резкой нижней границы реголитового слоя. Проводился активный сейсмический эксперимент. Было взорвано восемь зарядов, ранжированных по

мощности от 57 г до 2,7 кг тротилового эквивалента. Эти заряды были расположены на разных расстояниях от 100 до 2700 метров от линейной апертуры геофонов. Заряды были взорваны по команде с Земли и измерено время распространения волн сжатия. Геофоны приняли также сигналы, связанные с падением отработанной двигательной ступени лунного модуля. В результате удалось построить трехслойную вертикальную модель для долины Тавр Литтров. Первый слой толщиной примерно 250 метров обнаружил скорость сейсмических волн, около 250 м/сек. Второй слой простирается до глубин 1200 метров; здесь скорость распространения сейсмосигнала составляет около 1200 м/сек. Этот слой, вероятно, и есть материал лавого затопления долины. Еще ниже (подложка) расположен слой, в котором скорость распространения достигает до 4 км/сек.

Много было выполнено орбитальных экспериментов. В частности, визуальные наблюдения с орбиты и анализ других данных КК «Аполлон-17» показали, что, вопреки установившемуся мнению, поверхность внутренней части Моря Ясности, имеющей светло-серый цвет, моложе, чем материал внешнего более темного синевато-серого кольца, смыкающегося с заполнением Моря Спокойствия. На вершинах массивов и на их склонах наблюдались крупные камни, что обычно характерно для молодых образований, таких как центральные горки свежих кратеров. Многочисленные камни, покрывающие вершины массивов, следы движения камней вниз по склону, наличие обвалов, вероятно, связаны с относительно поздними тектоническими подвижками в пределах древних массивов.

Проводились измерения с помощью ультрафиолетового спектрометра, который работал в спектральном диапазоне 118 – 168 нм. Этот спектрометр предназначался для измерений лунной атмосферы в резонансных линиях. Никаких признаков атмосферы, кроме короткоживущего облака, связанного с падением двигательной ступени лунного модуля, найдено не было. Это дало возможность установить нижний предел по концентрации атомарного водорода вблизи лунной поверхности,  $\leq 10$  атомов/см<sup>3</sup>. Это, по крайней мере, на порядок ниже, чем ожидалось по оценкам диффузии водорода из лунного грунта (источником этого водорода служит солнечный ветер). Во время этих измерений обнаружилось, что ультрафиолетовая отражательная способность лунной поверхности заметно варьируется по мере движения аппарата вдоль орбиты. Тогда было решено провести картографирование ультрафиолетового альbedo Луны. Оказалось, что альbedo морской поверхности заметно выше, чем у материковой. То есть контраст море/материк в ультрафиолете противоположен тому, что наблюдается в видимой части спектра. Выяснилось также, что альbedo Луны в интервале 118 – 168 нм очень низкое, 3 – 4 %, и оно несколько увеличивается с уменьшением длины волны.

С помощью сканирующего инфракрасного радиометра (спектральный диапазон от 1,2 до 70 мкм) была проведена съемка лунной поверхности с разрешением около 10 км. Обнаружилось большое количество небольших участков с аномальной тепловой инерцией; их число в морях оказалось заметно выше, чем в зоне материков.



Рис. 2.47. Снимок каменного поля в районе посадки КК «Аполлон-17»

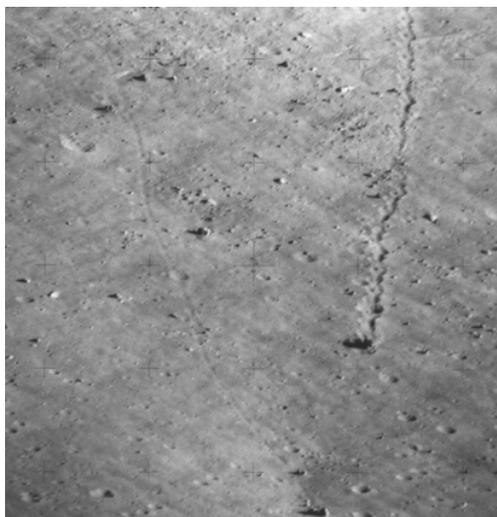


Рис. 2.48. Следы камней, катившихся по склону горы, в районе посадки КК «Аполлон-17»

Было сделано очень много снимков лунной поверхности. На рис. 2.47 показан снимок поля камней. Вообще местами лунная поверхность довольно камениста, однако практически везде камни покрыты слоем пыли. Снимки материковых гор, сделанные астронавтами,

позволяют в некоторых случаях видеть склоновые процессы. Например, на рис. 2.48 хорошо видны две борозды на склоне, которые заканчиваются бугорками. В обоих случаях это след катящегося камня, а бугорок – это сам камень.



Рис. 2.49. Орбитальный снимок района кратера Аристарх, сделанный с орбитального модуля КК «Аполлон-17»

Астронавтами были сделаны уникальные фотографии лунной поверхности с орбиты. На рис. 2.49 приведена фотография кратеров Аристарх и Геродот (взгляд с севера). Хорошо видна долина Шретера, которая начинается вблизи кратера Геродот с образования, которое называется Головой кобры.

**Отмененные миссии «Аполлон».** В первоначальных планах программы «Аполлон» количество миссий к Луне особо не оговаривалось – было, тем не менее, понятно, что их может быть более десяти. В январе 1970 года был отменен полет КК «Аполлон-20», а в сентябре того же года из-за уменьшения финансирования, выделенного НАСА на 1971 г, были отменены миссии «Аполлон-18 и «Аполлон-19». Об этих изменениях планов США можно только сожалеть, поскольку отмененные полеты планировались в интереснейшие места лунной поверхности. Так, КК «Аполлон-18» должен был совершить посадку в долине Шретера, месте очень необычном по оптическим характеристикам и очень разнообразном в геологическом отношении. Существует много сообщений о наблюдении в этом районе большого количества преходящих явлений. В составе экипажа КК «Аполлон-18» должен был лететь Гаррисон Шмитт – первый геолог. По настоянию влиятельных ученых, он все же побывал на Луне (КК «Аполлон-17»), вместо другого члена экипажа. До отмены миссии «Аполлон-18», Г. Шмитт настаивал на том, чтобы КК «Аполлон-18» летел в кратер Тихо. Первоначально миссия «Аполлон-19» планировалась в район долины Гюйгенса. Однако позднее местом посадки КК

«Аполлон-19» был обозначен кратер Коперник. КК «Аполлон-20» первоначально должен был совершить посадку в кратере Коперник, однако позднее рассматривались варианты посадок в районе холмов Мариуса или, если бы позволили баллистические возможности, в кратер Тихо.

Сэкономленные на отмене трех миссий «Аполлон» ресурсы, в частности, запуск носителя «Сатурн-5», были направлены на подготовку и запуск орбитальной станции «Скайлаб», а также на запуск корабля по программе «Союз-Аполлон». Последнее было практически бесполезным для науки политическим шоу.

Из-за свертывания программы исследований Луны Вернер фон Браун ушел из НАСА, основав собственную фирму. В 1977 году он умер от рака.

\*\*\*

Несмотря на то, что при более благоприятном стечении обстоятельств советские и американские космические исследования Луны могли бы оказаться намного эффективнее, то, что было сделано, можно рассматривать, как огромное событие в истории нашей цивилизации. В конечном счете, в соревновании капиталистической и социалистической систем победили ученые, удачно сыграв на честолюбии политиков. Американские и советские космические исследования Луны – это беспрецедентный пример чрезвычайно дорогостоящего научного эксперимента, на реализацию которого потратили огромные средства две сверхдержавы.

### 3. КЛАССИЧЕСКАЯ ОПТИКА ЛУНЫ

В наше время Луна по-прежнему является объектом, интересным для астрофизических (телескопических) исследований. Это утверждение одним сейчас кажется раздражающе тривиальным, а другим – вызывающе спорным. Согласия здесь нет даже среди астрономов. Часто приходится слышать вопрос: «Зачем наблюдать Луну с Земли, если там уже побывал человек?». Ответить на это просто: пребывание человека на Луне не убавило вопросов, оно лишь во много раз увеличило их количество. Традиционно считается, что оптические исследования Луны подразумевают использование наземных телескопов. Однако сейчас методика телескопических исследований активно перенимается и для проведения космических экспериментов. Уже не редкость, когда результаты наземной и космической съемки Луны анализируются совместно. Это относится, например, к данным, полученным американским космическим аппаратом «Клементина».

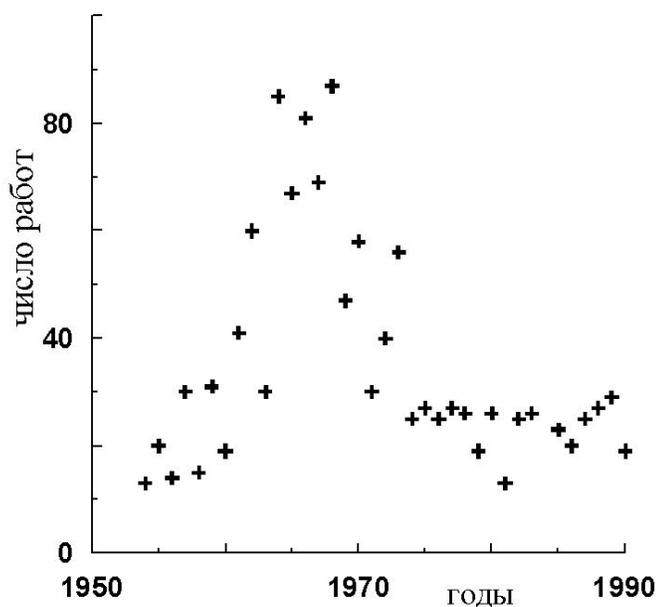


Рис. 3.1. Количество публикаций по лунным наблюдениям за период 1953 – 1990 годов по данным советского реферативного журнала

В конце 60-х годов 20 века астрономы, исследовавшие Луну, оказались очевидцами (и отчасти жертвами) беспрецедентного по масштабам вторжения смежных наук в их область. Тогда многие астрономы предпочли переключиться на другие объекты, говоря в свое оправдание, что Луна отныне стала предметом геологии и геофизики. Кризис астрофизических исследований Луны (астрофизика Луны – странный термин, но использующийся) хорошо прослеживается по результатам анализа советского реферативного журнала за период 1953 –

1990 годов (см. рис. 3.1). По оси ординат здесь отложено количество статей за год, содержащих данные телескопических наблюдений Луны. Видно, что зависимость имеет максимум, приходящийся примерно на 1966 год – это время подготовки и реализации космических программ исследования Луны.

В наши дни изучение Луны классическими оптическими методами успешно продолжается, хотя объем таких работ сравнительно невелик. Следует, однако, подчеркнуть возрастание качества таких исследований и расширение их интерпретационной базы за счет использования методов физики и геологии. В этой главе мы рассмотрим историю и наиболее примечательные результаты оптических исследований Луны.

### 3.1. Фотометрия

*Первые фотометрические исследования Луны.* То, что ночью освещенность предметов на земной поверхности максимальна в полнолуние, было известно всегда. Это, пожалуй, самый первый результат фотометрических исследований Луны. Более определенно начало лунной фотометрии можно вести от Галилео Галилея. Основанием этому является работа, в которой Галилей описывал свои сравнительные оценки яркости восходящей Луны в фазе, близкой к полной, с яркостью освещенной Солнцем стены дома во время солнечного заката. Он нашел, что альbedo лунной поверхности заметно ниже альbedo стены. Отсюда можно было сделать вывод, что Луна имеет невысокую отражательную способность. Первые количественные измерения фазовой зависимости яркости лунной поверхности были проведены значительно позднее. Прежде всего, отметим наблюдения Джона Гершеля, который нашел систематическое увеличение яркости Луны с уменьшением фазового угла, не связанное с изменением площади лунного диска. Будучи осторожным наблюдателем, Гершель был склонен приписывать это ошибкам измерений. Позже Мюллер и Рассел, основываясь на измерениях Гершеля, а также своих собственных, подтвердили эффект возрастания яркости освещенной части лунного диска при уменьшении угла фазы. Иногда в качестве первых надежных измерений фазовой зависимости яркости лунных образований упоминают измерения Вислисенуса в период 1893-95 годов, опубликованные Виртцем в 1915 году.

В связи с историей оптических исследований Луны упомянем работы санкт-петербургского физика Федора Фомича Петрушевского – основателя Российского физико-химического общества, – который в 1873 году предложил программу комплексных оптических исследований Луны. К сожалению, эта программа не была реализована, однако она, будучи только в замыслах, удивляет своей глубиной и детальностью проработки. В частности, Ф. Ф.

Петрушевский хорошо понимал перспективность задач лунной фотометрии: «... Нет сомнения, что измерения количеств света, отражаемого отдельными частями Луны при различных высотах Солнца над их поверхностью, могут повести к важным результатам ...».

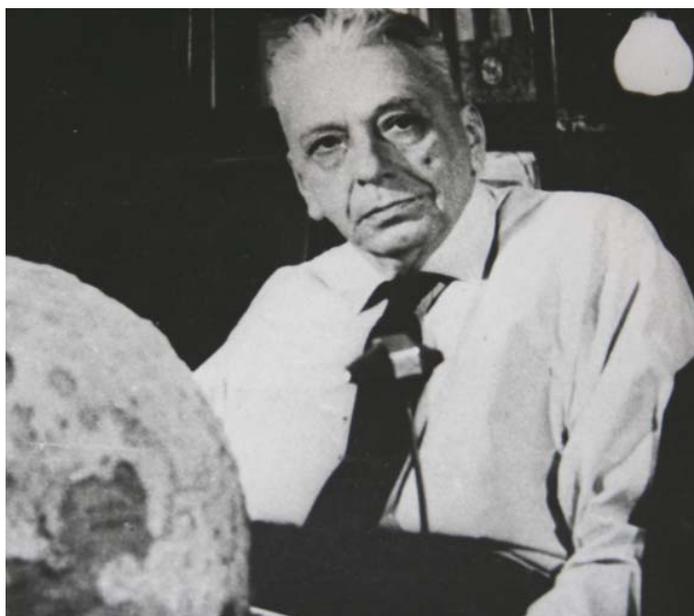


Рис. 3.2. Николай Павлович Барабашов (1894–1971)

Детальных фотометрических наблюдений Луны было выполнено множество. Так, большую серию для своего времени высокоточных измерений отдельных участков лунной поверхности провели Н. П. Барабашов и А. В. Марков в начале 20-х годов прошлого столетия. В этих работах использовался метод фотографической фотометрии. Барабашов и Марков впервые описали возрастание яркости лунных образований с убыванием фазового угла как самостоятельный оптический эффект. Отметим абсолютные фотометрические измерения ленинградских ученых В. В. Шаронова и Н. Н. Сытинской (середина прошлого века). До сих пор их данные считаются одними из самых точных оценок альбедо Луны. Эти данные и сейчас используются для абсолютизации относительных фотометрических измерений.

Считается, что исследования оппозиционного эффекта Луны – резкого нелинейного возрастания яркости ее поверхности при уменьшении фазового угла от  $10^\circ$  – начинаются с работы Герелса 1964 года, которая основана на фотоэлектрических измерениях. Сам термин «оппозиционный эффект» (или эффект противостояния) был введен Герелсом в более ранней работе 1956 года в связи с исследованием астероида Массалия. Как это часто бывает, автором эффекта считается тот, кто назвал эффектом особенность, которая, так или иначе, известна многим. Как уже упоминалось, об усилении яркости Луны вблизи малых фазовых углов знали Барабашов и Марков уже в двадцатые года прошлого века. Оппозиционный пик хорошо виден

на фазовых зависимостях яркости лунных площадок, представленных в каталоге В. А. Федорец (1952 год). Кроме того, почти одновременно с работой Герелса в 1964 году вышла статья ван Диггелена, в которой также сообщалось об открытии эффекта обратного рассеяния в фазовых углах меньше  $10^\circ$ . Курьезно то, что ван Диггелен на основе лабораторных исследований предложил в качестве наилучшего аналога лунной поверхности по оппозиционному эффекту лишайник *Cladonia Rangiferia*.

**Некоторые определения.** Прежде чем переходить к описанию конкретных результатов фотометрии Луны, дадим несколько определений. Пусть участок лунной поверхности освещается удаленным источником параллельных лучей (Солнцем). Предполагаем, что, с одной стороны, этот участок достаточно мал, чтобы считаться плоским элементом поверхности лунного шара, а с другой стороны – достаточно велик, чтобы было обеспечено статистическое усреднение, связанное с наличием шероховатости поверхности. Если участок имеет единичную площадь, то величина потока излучения, рассеянного в единичном телесном угле, т.е. сила света  $I$ , выразится следующей формулой:

$$I = \frac{E_0}{\pi} r, \quad (1)$$

где  $E_0$  – нормальная освещенность площадки, а  $r$  – коэффициент диффузного отражения (отражательная способность). Если в фотометрическом отношении поверхность изотропна, то величина  $r$  есть функция трех углов (см. рис. 3.3): угла падения –  $i$ , угла отражения  $e$  и угла между плоскостями падения и отражения, т.е. азимутального угла –  $\varphi$ :

$$r = A_0 F(i, e, \varphi), \quad (2)$$

где  $F(i, e, \varphi)$  – функция рассеяния,  $A_0$  – значение коэффициента диффузного отражения, обычно при  $i = e = \varphi = 0$  (нормальное альbedo). Такое определение  $A_0$  задает нормировку функции рассеяния,  $F(0, 0, 0) = 1$ .

Поверхность, для которой

$$I_L = \frac{E_0}{\pi} \cos i \cos e \quad (3)$$

называется абсолютно белой ортотропной (ламбертовской) поверхностью. Строго говоря, таких поверхностей в природе не бывает, хотя в некоторых случаях консервативного рассеяния формулу (3) можно рассматривать как хорошее приближение. Использование абсолютно белой ортотропной поверхности как некоего репера позволяет ввести в рассмотрение альbedo (белизну) исследуемой поверхности. Если известна геометрия освещения/наблюдения площадки, то под альbedo можно понимать отношение

$$\frac{I(i, e, \varphi)}{I_L(i, e)} = A_0 B(i, e, \varphi) \quad (4)$$

где  $B(i, e, \varphi)$  – яркостная индикатриса рассеяния, определяемая как

$$B(i, e, \varphi) = \frac{F(i, e, \varphi)}{\cos i \cos e} \quad (5)$$

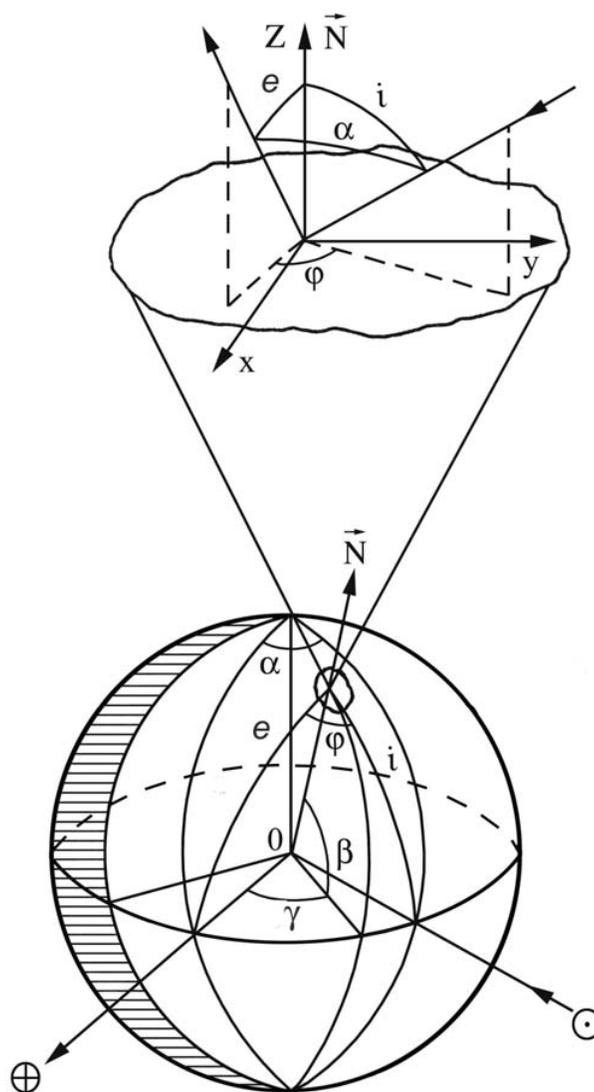


Рис. 3.3. Схема, поясняющая основные обозначения

На практике углы  $i$ ,  $e$  и  $\varphi$  для изучаемого участка поверхности могут быть не всегда известны. Например, на Луне мы можем наблюдать склон кратера, не зная его наклона по отношению к средней поверхности. Для того чтобы обойти эти проблемы, можно эталонную

ламбертовскую поверхность считать всегда ориентированной перпендикулярно падающим лучам. Тогда,

$$\rho(i, e, \varphi) = \frac{I(i, e, \varphi)}{I_L(0, e)} = A_0 f(i, e, \varphi), \quad (6)$$

где  $\rho(i, e, \varphi)$  называется в этом случае яркостным фактором, а  $f(i, e, \varphi)$  – фотометрической функцией,

$$f(i, e, \varphi) = \frac{F(i, e, \varphi)}{\cos e}. \quad (7)$$

В некоторых задачах лунной фотометрии бывает удобно использовать фотометрические координаты: фазовый угол  $\alpha$ , фотометрическую долготу  $l$  (обычно ее отсчитывают от центрального фотометрического меридиана) и фотометрическую широту  $b$  (она отсчитывается от фотометрического экватора). С помощью рис. 3.3 нетрудно получить формулы, связи троек углов  $(i, e, \varphi)$  и  $(\alpha, \beta, \gamma)$ :

$$\begin{aligned} \cos i &= \cos \beta \cos(\gamma - \alpha) \\ \cos e &= \cos \beta \cos \gamma \\ \cos \varphi &= \frac{\cos \alpha - \cos i \cos e}{\sin i \sin e} \end{aligned} \quad (8)$$

и

$$\begin{aligned} \cos \alpha &= \cos e \cos i + \sin e \sin i \cos \varphi \\ \operatorname{tg} \gamma &= \frac{\cos i / \cos e - \cos \alpha}{\sin \alpha} \\ \cos \beta &= \cos e / \cos \gamma \end{aligned} \quad (9)$$

Заметим, что углы  $(\beta, \gamma)$  представляют сферическую систему координат, которая при достаточно больших фазовых углах почти совпадает с селенографической системой, если источник света и наблюдатель находятся на бесконечности. Если фазовый угол мал, то Луна в полнолуние может оказаться выше или ниже тени Земли; в этом случае, фотометрический экватор может быть развернут относительно селенографического вплоть до угла  $90^\circ$ . Если наблюдатель находится недалеко от поверхности Луны (на космическом аппарате), то полюса фотометрической системы координат могут находиться друг от друга на расстоянии меньшем, чем длина селенографического меридиана. Тогда фотометрические координаты, сохраняя формально свойства сферических координат, являются лишь способом параметризации положения точки на наблюдаемой части лунной поверхности. Заметим, что в этом случае формулы (8) и (9) выглядят иначе; в них появляется зависимость от расстояния наблюдателя до Луны.

Если Луну наблюдать как точечный объект, то для описания ее фотометрических характеристик используется интегральная фазовая функция:

$$\Phi(\alpha) = \int_{-\pi/2}^{\pi/2} d\beta \int_{\alpha-\pi/2}^{\pi/2} d\gamma F(\alpha, \beta, \gamma) \cos\beta. \quad (10)$$

Пределы здесь взяты по одновременно видимой и освещенной части Луны.

Отражательная способность лунной поверхности зависит от свойств этой поверхности (состава, структуры) и внешних фотометрических параметров, характеризующих геометрию освещения/наблюдения –  $\alpha$ ,  $\gamma$ , и  $\beta$ . Зависимость  $r(\alpha, \beta, \gamma)$  несколько различна для разных участков. Это можно использовать для целей дистанционной диагностики лунной поверхности. Фотометрическая функция  $f(\alpha, \beta, \gamma)$  может быть представлена как  $f(\alpha, \beta, \gamma) = \phi(\alpha)D(\alpha, \beta, \gamma)$ , где  $\phi(\alpha)$  – фазовая функция, описывающая составляющую фотометрической функции, не зависящую от фотометрических координат непосредственно; функция  $D(\alpha, \beta, \gamma)$  задает глобальное распределение яркости по диску Луны, если исключить из рассмотрения вариации альбедо (см. ниже). Зависимости  $\phi(\alpha)$  и  $D(\alpha, \beta, \gamma)$  могут быть найдены из наблюдений и описаны аналитически с использованием нескольких формальных или физических параметров.

Величина  $A_0$ , а также функции  $\Phi(\alpha)$ ,  $\phi(\alpha)$  и  $D(\alpha, \beta, \gamma)$  зависят от длины волны  $\lambda$ . Зависимость  $A_0(\lambda)$  наиболее выражена. В диапазоне спектра 0,3 – 3,0 мкм величина  $A_0$  монотонно возрастает с увеличением  $\lambda$  примерно в три раза (см. далее раздел, посвященный спектральным исследованиям). Благодаря гладкости зависимости  $A_0(\lambda)$ , ее можно приблизительно описать с помощью небольшого набора отношений  $C(\lambda_1/\lambda_2) = A(\lambda_1)/A(\lambda_2)$ , где  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$  некоторые оптимально выбранные длины волн. Величину  $C(\lambda_1/\lambda_2)$  принято называть показателем цвета. Функция  $\phi(\alpha)$  зависит от  $\lambda$  значительно слабее, чем альбедо. Отношение  $\phi(\alpha, \lambda_1)/\phi(\alpha, \lambda_2)$  описывает фазовую зависимость нормированного показателя цвета исследуемой поверхности. Спектральные вариации функции  $D(\alpha, \beta, \gamma)$  исследованы недостаточно; известно, однако, что они сравнительно малы.

**Альбедо.** В сравнении с другими оптическими характеристиками, распределение альбедо по лунной поверхности является наиболее доступным для исследования и, как следствие, наиболее изученным. Одна из первых надежных карт альбедо была составлена Н. Н. Евсюковым на Харьковской астрономической обсерватории по снимку Луны, полученному при фазовом угле около  $2^\circ$  при длине волны  $\lambda = 0,56$  мкм. Карта имеет около 30 градаций альбедо. В то время (1973 год) построение системы изолиний альбедо было нетривиальной задачей; описываемая карта была построена методом фотографической эквиденситометрии (когда-то

это было тонким ремеслом, которое теперь забыто). На рис. 3.4 представлен малый черно-белый фрагмент этой карты для Моря Кризисов (в оригинале карта выполнена в цвете). Известна также карта альbedo Вайлди и Пона, построенная немного раньше карты Евсюкова. В целом, наблюдается хорошее согласие этих карт.

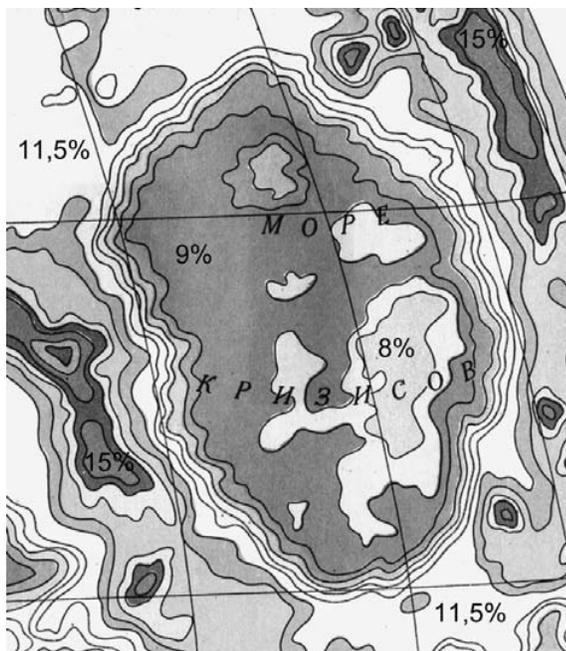


Рис. 3.4. Фрагмент карты альbedo видимого полушария Луны  
Н. Н. Евсюкова 1973 года

Для дальнейшего развития методов дистанционной диагностики лунной поверхности с помощью измерения альbedo необходимо решить ряд важных технических вопросов. Прежде всего, необходима новая абсолютизация (стандартизация) альбедных данных. Как уже говорилось, до сих пор для этого используются довольно старые измерения Шаронова и Сытинской. Это данные действительно хорошие. Так, Саари и Шортхилл провели с использованием звезд-стандартов независимую абсолютную калибровку лунного альbedo при длине волны около 0,45 мкм и получили хорошее совпадение с оценками Шаронова и Сытинской. Среднее значение альbedo получилось: для морей 6,8 %, материков 12,2 %. Среднее по всему видимому полушарию оказалось 10,5 %. Самая темная и самая яркая точки (при разрешении 10'') – 6,5 % и 27,6 % соответственно. Однако все эти данные морально устарели. Заявленная в них относительная точность 5 – 10 %, видимо, вполне соответствует действительности, но сейчас она все же кажется низкой.

Геологическая служба США, понимая необходимость уточнения абсолютной шкалы лунного альbedo, проводит наблюдательную программу, целью которой является исследование

Луны как возможного спектрофотометрического эталона в диапазоне длин волн 0,35 – 2,50 мкм. Однако данных высокой точности все еще нет. Аналогичная программа, фактически сводящаяся к фотометрии Луны (всего диска либо его деталей) с фотометрической привязкой к звездам-стандартам и Солнцу, могла бы выполняться практически на любой обсерватории бывшего СССР с хорошим астроклиматом с использованием телескопа скромных размеров и простого фильтрового фотометра. В ходе этих наблюдений может быть уточнена также шкала региональных вариаций альbedo Луны.

Отсутствие современных общепринятых оценок абсолютного альbedo привело к неприятной истории, последствия которой вероятно будут еще долго ощущаться. Геологической службой США были выпущены CD-диски с данными, полученными камерой UVVis КА «Клементина». Сейчас с этими материалами работает множество исследователей в разных странах. CD-диски содержат изображения, которые представляют собой мозаики отснятых полос, приведенных в одну фотометрическую систему и «сшитых» в одно изображение. Эти данные покрывают почти всю лунную поверхность с пространственным разрешением около 100 м для всех 5 спектральных каналов камеры UVVis. И вот оказывается, что абсолютные шкалы этих изображений-мозаик неправильны – значения альbedo, определяемые по этим данным, примерно в 2,5 раза выше тех, что соответствуют калибровке Шаронова-Сытинской и Саари-Шортхила. Связано это с тем, что абсолютизация данных КА «Клементина» выполнена по лабораторному спектру всего лишь одного образца лунного грунта (считается, что этот образец представителен) из места посадки КК «Аполлон-16». Эта история означает, что работы, в которых используются абсолютизированные данные описываемых мозаик, могут содержать ошибочные выводы относительно лунной поверхности.

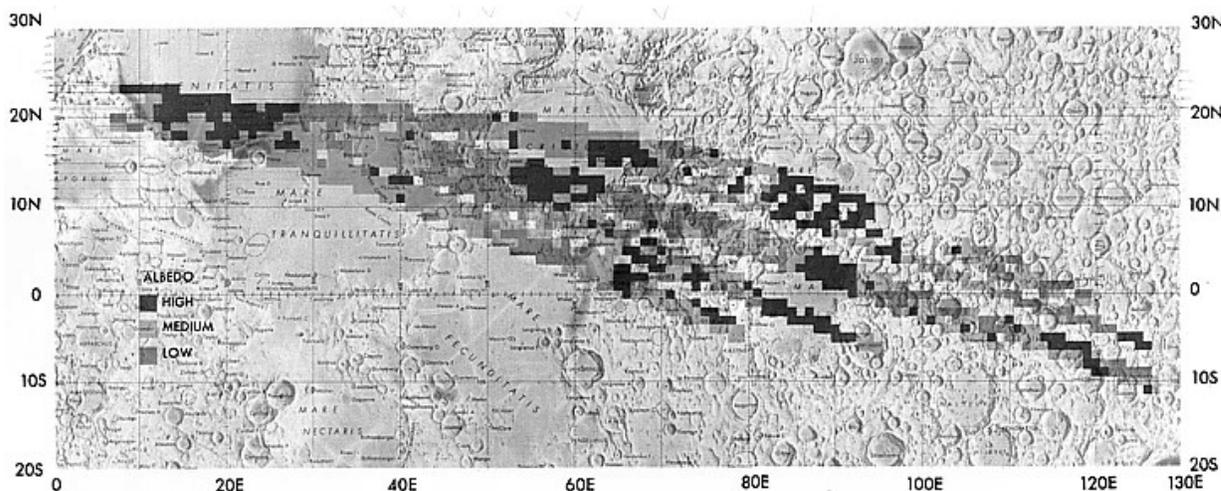


Рис. 3.5. Фрагмент карты УФ альbedo, построенной по измерениям КК «Аполлон-17»

Интересны измерения альbedo Луны в далекой ультрафиолетовой области спектра. Как уже отмечалось, такие измерения были выполнены с орбитального модуля КК «Аполлон-17». На длине волны солнечной линии водорода  $L_{\alpha}$  (121,6 нм) была исследована область поверхности, включающая южную часть Моря Кризисов, материк между Морем Изобилия и Морем Кризисов, южную часть Моря Спокойствия и небольшой материковый участок на обратной стороне Луны (рис. 3.5). Измерения показали, что УФ альbedo лунной поверхности очень низкое, около 3-4% и что материка в этой области менее светлые, чем моря. На рис. 3.5 показана черно-белая версия карты с тремя градациями УФ альbedo Луны.

*Глобальное распределение яркости по диску.* При малых фазовых углах Луна видна как плоский диск. Объяснение этому дал Галилео Галилей. Он предположил, что лунная поверхность (говоря современным языком) имеет очень широкое распределение локальных нормалей элементов поверхности. Это означает, что независимо от того, смотрит ли наблюдатель на центр диска или на лимб, он увидит при нулевом фазовом угле одинаково много площадок, нормаль которых повернута в его сторону; отсюда и постоянство яркости.

Представляет интерес изучение того, насколько лунный диск при  $\alpha = 0$  равномерен по яркости, если отвлечься от вариаций альbedo. Этой проблемой еще в начале прошлого века начали заниматься Н. П. Барабашов и А. В. Марков. В частности, ими было показано, что в полнолуние это распределение постоянно с точностью около 10–15%. Позднее, однако, Марков (1948 год) нашел слабое повышение яркости участков лунного диска вблизи лимба при фазовом угле  $4^{\circ}$ . Измерения проводились электрофотометрическим методом с использованием набора кольцевых диафрагм, которые вырезали участки лунной поверхности, равноудаленные от центра. О возможности некоторого повышения яркости Луны в полнолуние вблизи лимба писал Миннарт (1961). Исследования, выполненные с помощью фотометрических каталогов В. А. Федорец и Л. А. Акимова, не дали никаких особенностей поведения яркости вблизи лимба, но эти измерения не были специально ориентированы на поиск лимбового эффекта, поэтому вопрос о его существовании нельзя считать исчерпанным. Основную трудность в поисках описываемого эффекта представляет исключение влияния локальных альбедных вариаций на радиальный ход яркости по лунному диску.

При больших углах фазы на изображениях лунного диска хорошо видно понижение яркости (яркостный тренд) от лимба Луны к ее терминатору. Пример показан на рис. 3.6 а, где представлено изображение последней четверти Луны. В основном это тренд долготный. Широтная составляющая мала, хотя при больших фазовых углах хорошо наблюдается.

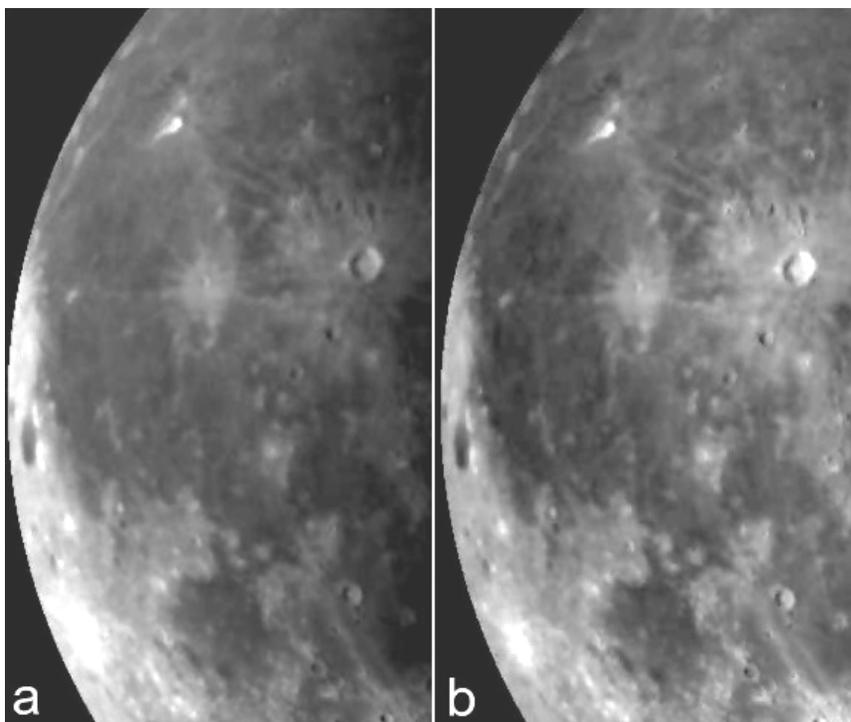


Рис. 3.6. Изображение последней четверти Луны (а). То же самое изображение с компенсированным долготным ходом яркости (б)

Для решения некоторых задач необходимо этот яркостный тренд исключить. Обычно довольствуются устранением долготной составляющей, используя закон Ломмеля-Зеелигера, который вообще не имеет параметров:

$$D_{L-z}(\alpha, \beta, \gamma) = \frac{\cos i}{\cos i + \cos e} = \frac{\cos(\alpha - \gamma)}{\cos(\alpha - \gamma) + \cos \gamma} \quad (11)$$

Как видно из этой формулы, при  $\alpha = 0$  распределение превращается в константу. При небольших углах фазы закон Ломмеля-Зеелигера дает неплохие результаты. Однако при углах фазы, больших  $70 - 80^\circ$ , формула (11) дает заметный всплеск яркости на лимбе, который не наблюдается у Луны. Интересно отметить, что закон Ломмеля-Зеелигера, строго говоря, отношения к Луне не имеет. Он может быть легко получен теоретически в приближении однократного рассеяния (при грубом учете теневого эффекта) для среды, состоящей из частиц, при условии, что эта среда имеет макроскопически плоскую границу. Хотя лунная поверхность состоит из частиц, она в масштабах больших размера частиц далеко не плоская; кроме того, в случае лунной поверхности вкладом многократного рассеяния пренебрегать никак нельзя даже в коротковолновой части спектра.

Для описания распределения яркости по диску Луны с точностью 1% достаточно всего лишь одного параметра, если использовать следующую эмпирическую формулу Л. А. Акимова, которую он предложил в 1979 году:

$$D_{AE}(\alpha, \beta, \gamma) = \frac{\cos \frac{\alpha}{2} \cos^q \beta \left( \cos^{q+1} \left( \gamma - \frac{\alpha}{2} \right) - \sin^{q+1} \frac{\alpha}{2} \right)}{\cos \gamma \left( 1 - \sin^{q+1} \frac{\alpha}{2} \right)}, \quad (12)$$

где  $q$  – эмпирический параметр, который отличается для разных поверхностей, в частности, для различных участков лунной поверхности. При  $q = 1$  формула (12) превращается в закон Ламберта. Этот параметр может также зависеть от фазового угла. Так, Акимов показал, что  $q = 0,31\alpha$  и  $0,16\alpha$  для лунных материков и морей, соответственно.

Акимовым была также получена формула, которая обеспечивает аппроксимацию наблюдательных данных (исключая терминатор) с точностью не хуже 5 %:

$$D_{AT}(\alpha, \beta, \gamma) = (\cos \beta)^{\alpha/(\pi-\alpha)} \frac{\cos \left[ \frac{\pi}{\pi-\alpha} \left( \gamma - \frac{\alpha}{2} \right) \right]}{\cos \gamma}. \quad (13)$$

Как и закон Ломмеля-Зеелигера, формула (13) не содержит свободных параметров.

На рис. рис. 3.6 а показано изображение, на котором хорошо видна «объемность» Луны. Рис. 3.6 б представляет то же изображение с исключенным глобальным ходом яркости по долготе и широте. Исключение было выполнено с помощью формулы (13). На рис. 3.6 б Луна выглядит плоской, как в полнолуние.

**Интегральные наблюдения.** При фотометрии Луны как точечного объекта происходит усреднение оптических характеристик ее поверхности. При наблюдениях с Земли интегральный блеск Луны является функцией двух переменных: фазового угла и длины световой волны. Надежные интегральные наблюдения Луны, результаты которых используются по сей день, были выполнены Ружье (1933 год) с помощью фотоэлемента. Измерения были выполнены в синих лучах при длине волны примерно 0,43 мкм. Лишь много лет спустя были предприняты попытки (Лэйн и Ирвин 1973 год) повторить интегральные наблюдения Ружье в нескольких спектральных интервалах, используя более совершенную технику. К сожалению, эти попытки были не столь удачны, как наблюдения Ружье. Следует отметить, что данные Ружье не учитывают эффекта либрации, который, хотя и слабо, но все же влияет на соотношение видимых площадей морей и материков. Учет либрационного эффекта позволяет несколько снизить разброс данных Ружье (Корохин, 2006 год).

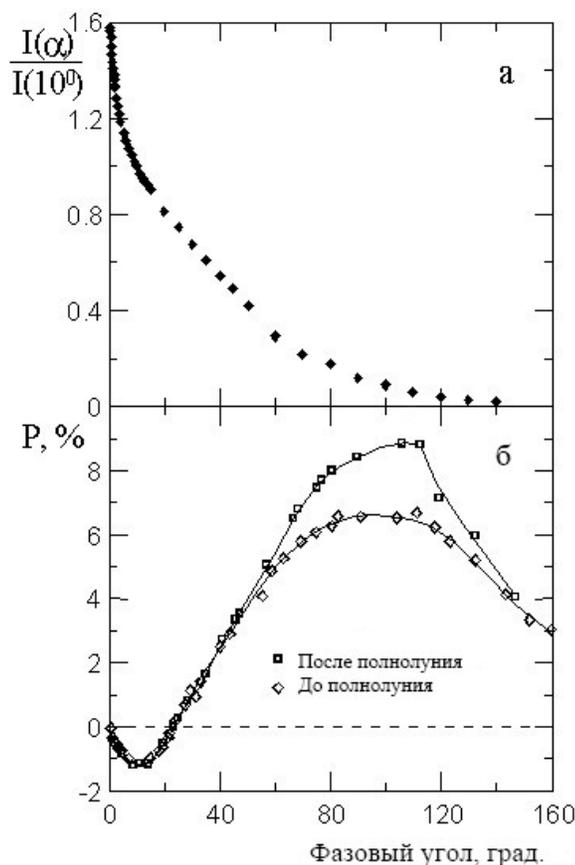


Рис. 3.7. Фазовая зависимость интегрального блеска Луны, построенная по данным Ружье (1933 год) и харьковским оценкам (малые фазовые углы), которые были выполнены с помощью измерений КА «Клементина»

Данные Ружье не охватывают область малых фазовых углов, где наблюдается резкое возрастание яркости лунной поверхности, т.е. оппозиционный эффект, но недавно их удалось дополнить данными КА «Клементина», которые позволяют продолжить кривую Ружье вплоть до нулевого фазового угла (Шкуратов и др., 1999 год). На рис. 3.7 приведена фазовая зависимость интегрального блеска Луны в синих лучах, охватывающая широкий диапазон фазовых углов. Анализ этих данных показывает, что в диапазоне  $0.1 - 10^\circ$  у Луны наблюдается острый пик яркости с амплитудой около 1,6. Фазовый ход, показанный на рис. 3.7, включает в себя геометрический фактор, а именно то, что при возрастании угла фазы доля освещенной и видимой площади лунного шара уменьшается. Эта зависимость имеет вид  $\Phi(\alpha) = (1 + \cos\alpha)/2$ . Нетрудно убедиться в том, что зависимость  $\Phi(\alpha)$  значительно менее крутая, чем наблюдаемая. Для того чтобы получить приблизительную оценку фазового хода средней отражательной способности лунной поверхности, необходимо зависимость, приведенную на рис. 3.7,

разделить на  $(1+\cos\alpha)/2$  и умножить на 0,07 – это отражательная способность Луны в синих лучах при  $\alpha = 10^\circ$ .

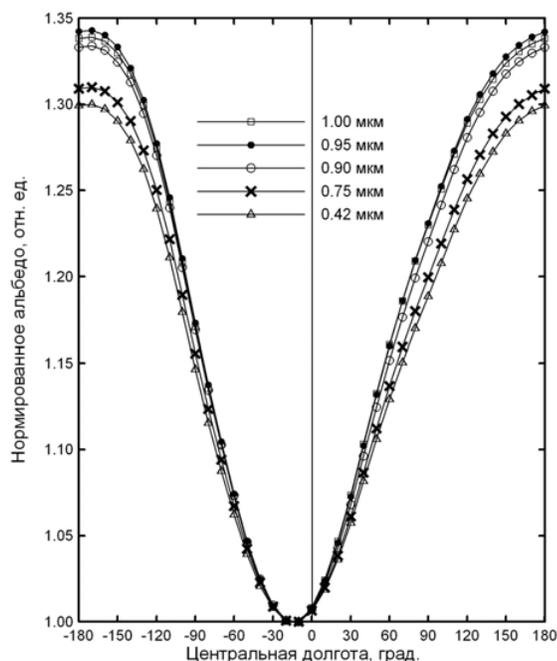


Рис. 3.8. Кривые блеска Луны в разных длинах волн

Изображения, полученные КА «Клементина», позволяют оценить еще одну интегральную характеристику Луны, которая может исследоваться только с помощью космических аппаратов. Это кривые блеска в зависимости от фазы вращения Луны. На рис. 3.8 приведены зависимости интегральной яркости Луны от фазы ее вращения в разных длинах волн. Моделируется то, как если бы Луна не была повернута к нам одной стороной, а вращалась так, что мы бы видели ее разные стороны. Кривые блеска соответствуют «измерениям» в лунной экваториальной плоскости при фазовом угле близком к нулю. Согласно рис. 3.8, характерная амплитуда блеска Луны составляет примерно 33%, что встречается у астероидов. Амплитуда зависимости блеска Луны от фазы вращения несколько возрастает с увеличением длины волны.

**Дискретная фотометрия.** Эти слова подразумевают фотометрические измерения отдельных (малых) участков поверхности. Существует ряд работ, в которых описываются результаты дискретной фотометрии Луны сначала визуальным, потом фотографическим и фотоэлектрическим методами. Здесь мы остановимся лишь на нескольких из них.

Большую роль в дискретной фотометрии Луны сыграла работа В. А. Федорец (1952 год), основанная на фотографических наблюдениях, которые были выполнены на Харьковской

обсерватории. В. А. Федорец (Езерская), ученица Н. П. Барабашова, выполнила трудоемкую работу по созданию фотометрического каталога; она уточняла и расширяла его более 25 лет, вплоть до времени своей кончины (1977 год). Это был первый надежный фотометрический каталог Луны. Каталог содержит большой фактический материал, который широко использовался в 60-е годы прошлого века, в частности, для оценки структурной однородности лунной поверхности, проверки теоретических моделей светорассеяния лунной поверхностью, а также для проведения светотехнических расчетов при подготовке космических миссий к Луне. К сожалению, относительная точность данных этого каталога не высока (не лучше 10 – 15 %) и в настоящее время он устарел и почти не используется. Дискретная фотометрия Луны проводилась и другими авторами. Эти измерения, однако, были не многочисленны.

Сейчас на смену каталогу Федорец пришел новый фотометрический каталог 256 лунных площадок размером около 6". Наблюдения были проведены в красных лучах,  $\lambda = 0,65$  мкм. Он был создан Л. А. Акимовым также на Харьковской астрономической обсерватории. Использовались фотографические изображения Луны, а также данные дискретной фотоэлектрики; наблюдения проводились на протяжении 25 лет. Точность данных лежит в пределах нескольких процентов. Анализируя свой каталог, Акимов пришел к выводу, что в фотометрическом отношении Луна значительно более однородна, чем считалось ранее. Этот «скучный» вывод был одним из основных положений его докторской диссертации. В диссертациях редко защищают «отрицательные» результаты; для этого необходима не только научная честность, но и определенное мужество (см. рис. 3.9).

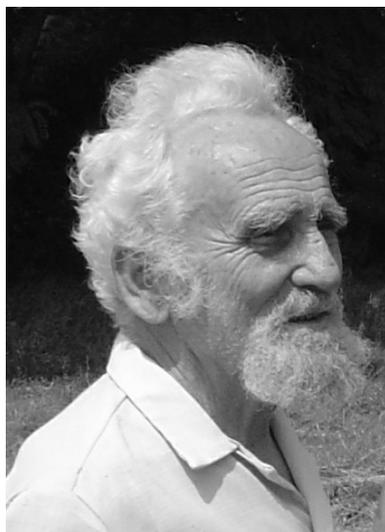


Рис. 3.9. Леонид Афанасьевич Акимов, харьковский астроном, сделавший основополагающие работы в области лунной фотометрии

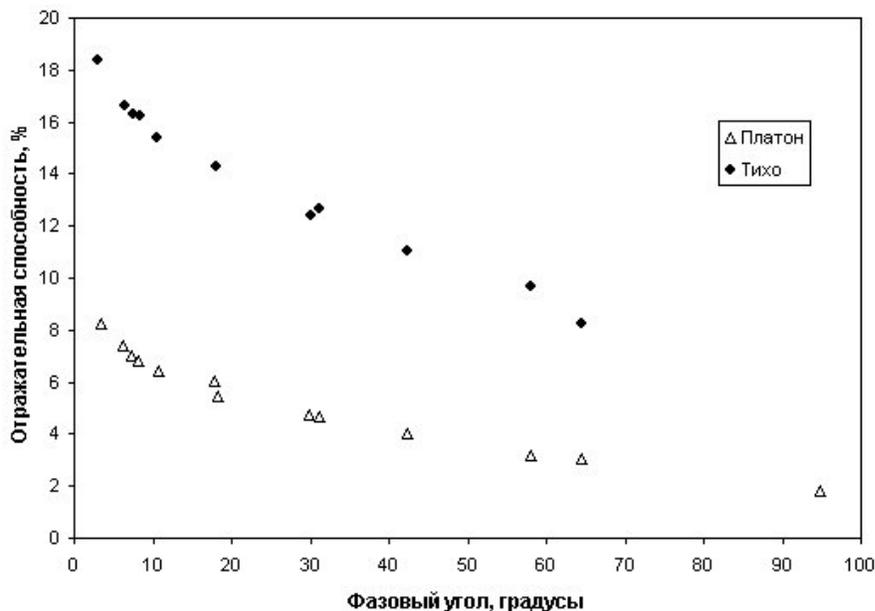


Рис. 3.10. Фазовые зависимости яркости для двух 6'' площадок на поверхности Луны, кратеры Тихо и Платон. Фазовые зависимости приведены к одинаковым фотометрическим условиям. Им соответствует положение деталей на «зеркальном» фотометрическом меридиане, когда выполняется условие  $i = e$

На рис. 3.10 представлены фазовые зависимости яркости Луны, построенные по данным фотометрического каталога Акимова для двух лунных образований, кратеров Тихо и Платон. Построение таких фазовых зависимостей непростая задача, поскольку наблюдения Луны при разных фазах проводятся, как правило, при различных либрациях, а, кроме того, разные точки лунной поверхности имеют разные условия освещения и наблюдения даже при одной и той же фазе. Для приведения фотометрических наблюдений к одинаковым условиям необходимо использовать, в частности, формулы (9) и (12). В случае рис. 3.10 эти условия соответствуют положениям деталей на «зеркальном» фотометрическом меридиане, когда  $i = e$ .

**Оппозиционный эффект лунных деталей.** Большой интерес представляет фотометрия Луны при фазовых углах несколько градусов. Исследования оппозиционного эффекта лунной поверхности с Земли в диапазоне углов фазы менее  $1^\circ$  невозможны из-за того, что Луна вступает при этом в область затмения. Во время затмения освещенность Луны изменяется очень сильно и довольно быстро – в этом случае затруднительно проводить даже относительную фотометрию. Таким образом, лунную поверхность при очень малых фазовых углах можно изучать либо располагаясь на этой поверхности, либо с помощью космических

аппаратов, находящихся на окололунной орбите. Впервые оппозиционный эффект Луны в области фазовых углов менее  $1^\circ$  наблюдали астронавты КК «Аполлон-8». Было показано, что амплитуда этого эффекта не коррелирует ни с альбедо поверхности, ни с ее морфологическими особенностями. Оппозиционный всплеск яркости исследовался также в других миссиях «Аполлон». Например, на рис. 3.11 показаны два последовательно снятых изображения юго-восточной части Моря Кризисов (район посадки КА «Луна-24»), на которых видно оппозиционное пятно, шириной несколько градусов, перемещающееся по мере движения орбитального модуля КК «Аполлон-17».

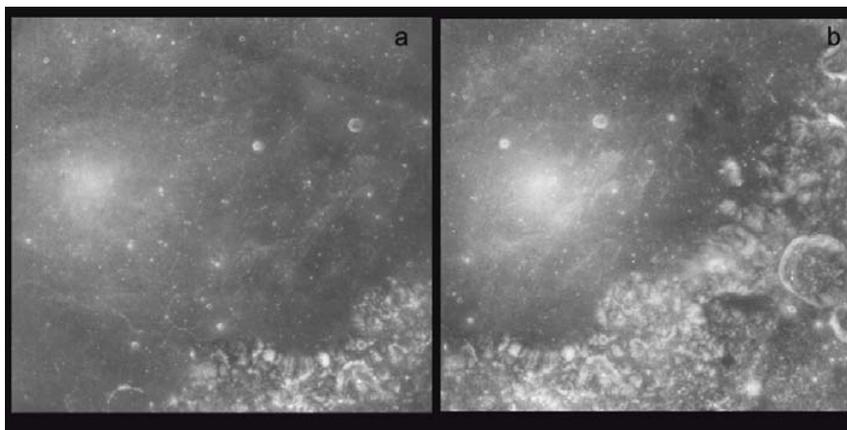


Рис. 3.11. Два изображения окрестностей места посадки КА «Луна-24», снятые камерой на орбитальном модуле КК «Аполлон-17». Заметно перемещение светлого пятна, в центре которого находится точка, видимая при строго нулевом фазовом угле; теоретически в ней должна находиться тень аппарата

Сравнительно недавно новые результаты, связанные с оппозиционным эффектом лунной поверхности в области предельно малых фазовых углов, были получены в НИИ Астрономии ХНУ им. В.Н. Каразина. Остановимся на них подробнее.

Среди изображений лунной поверхности, полученных UVVis камерой КА «Клементина», нашлось некоторое количество таких, которые включали точку нулевого фазового угла, т.е. точку тени отбрасываемой космическим аппаратом на лунную поверхность. Это дало уникальную возможность исследовать оппозиционный эффект Луны в широком спектральном диапазоне. Для примера на рис. 3.12 а приведено изображение, на котором хорошо видно яркое диффузное пятно вокруг точки нулевого фазового угла (контраст изображения усилен). Изображение охватывает небольшой участок на северо-востоке залива Центрального. Участок перекрыт лучами кратера Треснеккер.

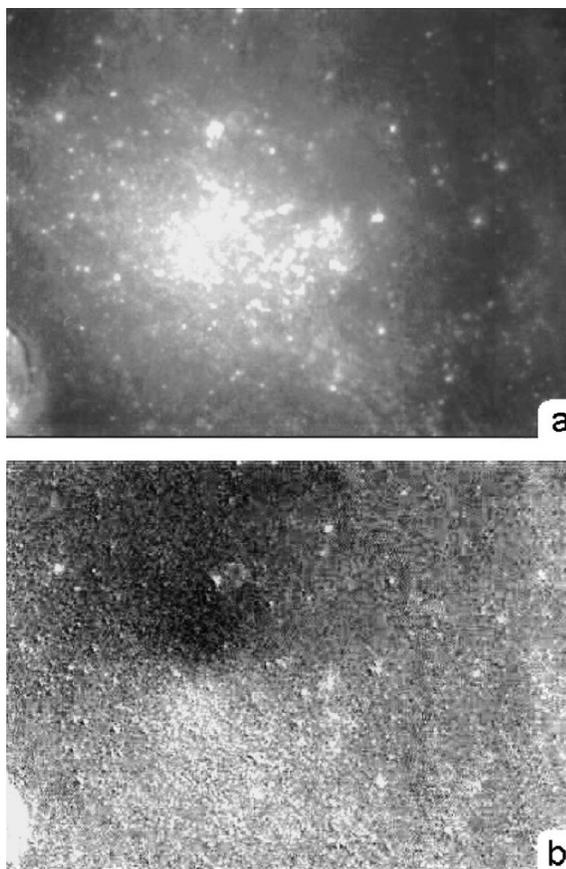


Рис. 3.12. Изображение LUC2275J.167 участка на северо-востоке залива Центрального (фильтр 0,90 мкм) – (а). Координаты центра кадра  $1,3^\circ$  с.ш.,  $3,9^\circ$  в.д. Отношение изображений LUD2271J.167 ( $\lambda = 0,95$  мкм) LUC2275J.167 ( $\lambda = 0,90$  мкм), на котором виден узор, связанный с взаимным сдвигом оппозиционных пятен примерно на угол фазы  $0,2^\circ$  – (b)

Чтобы извлечь количественную информацию об оппозиционном пике из изображений типа того, что приведено на рис. 3.12 а, используется несколько методов. Например, в некоторых работах было предложено просто усреднять изображения, содержащие оппозиционное пятно, но так, чтобы у всех усредняемых снимков были бы совмещены центры оппозиционных пятен. Такая процедура приводит к ослаблению случайных альбедных вариаций, видимых на изображениях, относительно регулярной оппозиционной составляющей. Этот прием не дает хорошей точности, поскольку изображений, которые можно усреднить для исследования оппозиционного эффекта, в наборе данных КА «Клементина» немного; альбедный узор все равно остается на результирующем изображении. Может так случиться, что в точке нулевого фазового угла окажется деталь (яркая или темная) – она прочтется как особенность в поведении фазовой функции.

Видимо, это и послужило причиной одной поучительной истории. В первой публикации в журнале «Сайенс» по результатам работы КК «Клементина» сообщалось об «открытии» узкого оппозиционного пика Луны шириной менее  $0,25^\circ$  с амплитудой около 25% (см. кривые, соответствующие светлым символам на рис. 3.13). Это выглядело новым и очень эффективным результатом. Однако это «открытие» было скоро опровергнуто. Харьковские астрономы (Ю. Г. Шкуратов и Д. Г. Станкевич) обратили внимание на то, что столь узкий пик не может наблюдаться у Луны в принципе. Дело в том, что угловой размер солнечного диска на расстоянии 1 а.е. составляет  $0,5^\circ$ , что заведомо больше ширины «открытого» пика. Поскольку каждая точка солнечного диска может рассматриваться как некогерентный источник, имеющий собственный угол фазы, любой узкий пик должен замываться, приобретая (если после замытия от пика еще что-то остается) характерную ширину около  $0,5^\circ$  и никак не меньше.

Более изощренные способы исследования оппозиционного эффекта по данным КА «Клементина» были предложены в работах автора этой книги и М. А. Креславского. Один из этих способов основан на следующем. Из-за движения космического аппарата вдоль лунной поверхности точка нулевого фазового угла также смещается по поверхности. Если время, прошедшее между сменой светофильтра, достаточно мало, то и смещение окажется малым. Если взять изображения, полученные последовательно в двух близких спектральных каналах, совместить их по альбедному узору, а затем построить отношение этих изображений, то альбедные вариации на таком изображении исчезнут. Останутся только вариации показателя цвета, которые малы благодаря выбору близких спектральных каналов, и вариации, обусловленные сдвигом оппозиционного пятна в пределах кадра. На рис. 3.12 б приведено отношение изображения LUD2271J.167 ( $\lambda = 0,95$  мкм) к изображению LUC2275J.167 ( $\lambda = 0,90$  мкм) (см. объяснения в следующем параграфе «Фазовые отношения»). На результирующем изображении хорошо видна специфическая картина, связанная с взаимным сдвигом оппозиционных пятен примерно на угол фазы  $0,2^\circ$  (в первом приближении это распределение производной фазовой функции). Зная фазовый угол для каждой точки на обоих изображениях, нетрудно вычислить по результирующему изображению эту производную в каждой точке кадра. Затем найденные производные усредняются для каждого из значений фазового угла. Интегрирование производной дает фазовую кривую яркости. Отметим, что интегрирование экспериментальных данных значительно более благодарная задача, чем дифференцирование; интегрирование хорошо подавляет шум. Результаты такого интегрирования представлены на рис. 3.13. Кривые, соответствующие темным символам, отвечают обработке данных описанным методом. Как видно, ход этих кривых не похож на тот, что был открыт Буратти; оппозиционный всплеск исследуемых участков поверхности в диапазоне фазовых углов  $0,2 -$

1,6° довольно слабый (почти линейный); наблюдается даже тенденция к выполаживанию зависимости при очень малых углах фазы  $< 0,25^\circ$ . Это выполаживание как раз и определяется угловым размером солнечного диска.

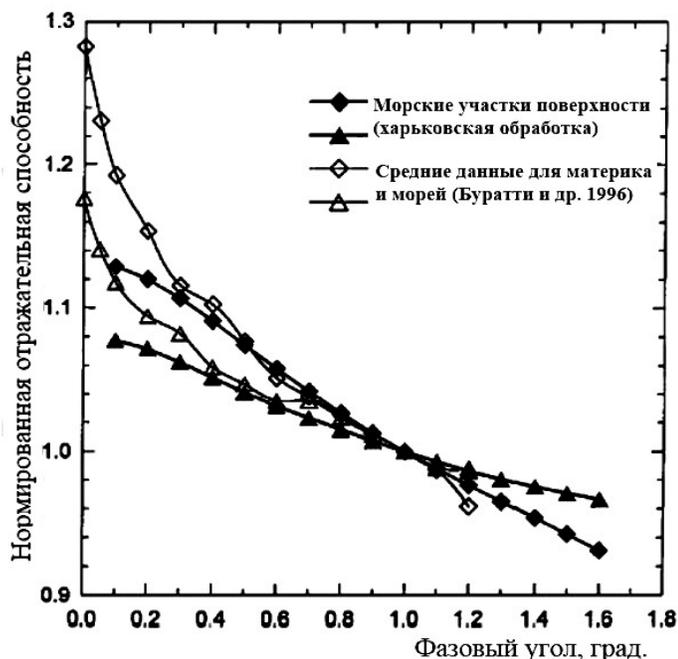


Рис. 3.13. Опозиционный эффект лунной поверхности. Зависимости, показанные светлыми символами, отвечают данным Буратти; они дают пик, который не может наблюдаться у Луны из-за конечного углового размера солнечного диска. Зависимости, показанные темными символами, соответствуют обработке, предложенной харьковскими астрономами

**Фазовые отношения.** Пусть имеется два совмещенных друг с другом изображения, которые получены при разных углах фазы. Величина сигнала в элементе одного изображения может быть разделена на величину сигнала в соответствующем элементе другого изображения. В этом смысле говорят о том, что одно изображение делится на другое. Если изображение, полученное при некотором фазовом угле  $\alpha_1$ , разделить на изображение того же участка, полученное при другом фазовом угле  $\alpha_2$ , то получится изображение, передающее вариации наклона фазовой зависимости в данном диапазоне фазовых углов,  $\phi(\alpha_1)/\phi(\alpha_2)$ . Одна из первых попыток сделать это была предпринята в работе Акимова и Шкуратова в 1981 году. Использовался метод аналогового фотографического вычитания равноконтрастных изображений, полученных при разных фазовых углах, но близких параметрах либрации Луны (вычитание фотографических плотностей эквивалентно делению интенсивностей). Снимки

были получены при фазовых углах  $3,2^\circ$  и  $14,5^\circ$  при длине волны  $0,55$  мкм. Первые изображения были невысокого качества, поскольку нельзя подобрать снимки с абсолютно точно совпадающими параметрами либрации. Тем не менее, на этих изображениях видно, что наибольшей крутизной в исследуемом диапазоне углов фаз обладают участки со средним альбедо (светлые моря или темный материк).

В 90-е годы распределения нескольких фазовых отношений видимого полушария Луны были получены цифровыми методами, позволяющими привести изображения Луны к одинаковым параметрам либрации. Для примера на рис. 3.14 представлены изображения альбедо и фазовых отношений ( $90^\circ/18^\circ$ ) и ( $134^\circ/90^\circ$ ) для района, включающего образование Рейнер-гамма (в центре изображений), которые были построены Н. В. Опанасенко. Как уже говорилось, это образование не имеет заметного рельефа, такого, как, например, кратер Рейнер (см. рис. 3.14, правее образования Рейнер-гамма). Отметим, что фазовый угол  $134^\circ$  это практически предельный угол, достижимый при наблюдениях свирла Рейнер-гамма с Земли. Изображение на рис. 3.14 b показывает, что, в среднем, наклон фазовой зависимости в диапазоне  $18 - 90^\circ$  ниже у Рейнер-гамма, чем у окружающих областей. Иная картина наблюдается в диапазоне фазовых углов  $90 - 134^\circ$  (рис. 3.14 c). В этом диапазоне наклон фазовых кривых выше для поверхности Рейнер-гамма. Это может свидетельствовать о том, что поверхность Рейнер-гамма обладает сложным мезорельефом, который не разрешается на снимках, но дает вклад в затенение при больших фазовых углах.

Этот результат противоречит устоявшемуся мнению о том, что поверхность этого свирла более гладкая, чем окружающих областей. Такое мнение было основано на дискретных фотометрических наблюдениях Саари и Шортхила (1964 год). По их данным при больших углах пара точек фазовой зависимости действительно отскакивает вверх, давая намек на то, что поверхность Рейнер-гамма сильно рассеивает вперед. Однако этому едва ли стоит сильно доверять. Скорее всего, это ошибки старых измерений; об этом говорит рис. 3.14 c. Для объяснения этого «феномена» строили даже искусственные модели сжатия (выглаживания) лунного грунта, например, газовой комой кометы. Элементарные оценки показывают, однако, что газовое давление комы кометы с ядром несколько километров не может преодолеть силы когезии частиц лунного реголита, а даже, если и преодолет, то взрыв кометного ядра при ударе о лунную поверхность наверняка сотрет все следы взаимодействия с газовой и пылевой комой.

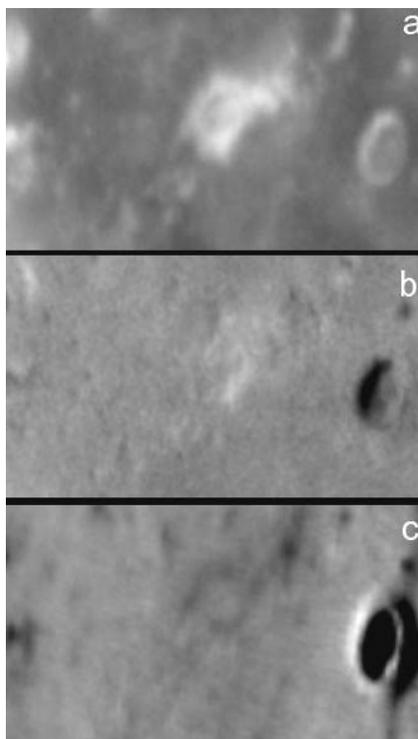


Рис. 3.14. (a) – распределение альbedo, (b) – фазовое отношение ( $90^\circ/18^\circ$ ) и (c) – фазовое отношение ( $134^\circ/90^\circ$ ) для западной части видимого полушария Луны. Светлые тона на изображениях фазовых отношений отвечают пониженным значениям фазовых наклонов. Почти в центре изображений виден свирл Рейнер-гамма, в правой части – кратер Рейнер

**Параметры фотометрической функции.** Сравнительно новой задачей лунной фотометрии является построение изображений или карт Луны для параметров, описывающих фотометрическую функцию. Для исследования можно выбрать параметры теоретических зависимостей, моделирующих экспериментальные данные, или параметры соответствующих эмпирических формул. Региональное распределение таких параметров несет более конкретную информацию о структурных особенностях лунной поверхности, в сравнении с изображениями фазовых наклонов. Некоторые параметры структуры поверхностного слоя Луны (например, характерный наклон на базе порядка 10 м) коррелируют с экспозиционным возрастом поверхности. Это открывает возможность независимой оценки относительного возраста по данным оптических измерений.

Простейшей функцией, которая хорошо описывает фазовые зависимости яркости в диапазоне  $5^\circ - 50^\circ$ , является функция вида  $\phi(\alpha) = \exp(-\tau\alpha)$ . Если имеются изображения, полученные для некоторого набора фазовых углов из диапазона  $5^\circ - 50^\circ$ , то совместный анализ этих изображений позволит построить распределение параметра  $\tau$ , который зависит от

шероховатости поверхности и его альбедо. Именно такую обработку данных удалось провести для участка формации Рейнер-гамма, который был отснят КА «Клементина» при многих фазовых углах (свыше 50 значений), как и район места посадки КК «Аполлон-15» (об этом уже писалось выше). Таким образом, для каждой точки предварительно совмещенных друг с другом изображений строится фазовая зависимость. Методом наименьших квадратов эта зависимость аппроксимируется функцией  $\exp(-\tau\alpha)$ , т.е. для каждой точки определяется значение  $\tau$ . Результат такой обработки приведен на рис. 3.15. Сравнивая изображения (а) и (б) на этом рисунке, можно видеть, что в целом величина  $\tau$  выше для тех участков, которые имеют более высокое альбедо. Однако наблюдаются исключения. Например, темные альбедные детали, показанные на рис. 3.15 а черными короткими стрелками, имеют низкие значения  $\tau$ , т.е. пологие фазовые зависимости, в сравнении с окружающими областями. Эти аномалии отражают аномалии структуры поверхностного слоя лунного реголита. Вероятно, здесь произошло накопление темного мелкозернистого материала, который сгладил микрорельеф. В то же время, образование, показанное белой стрелкой на рис. 3.15 а имеет одновременно сравнительно высокое альбедо и величину  $\tau$ . В частности, деталь, показанная белой стрелкой на рис. 3.15 а ассоциируется с зоной выбросов молодого кратера; ее поверхность содержит, вероятно, большое количество свежих камней и блоков, вынесенных на поверхность ударом. Таким образом, описываемый метод может быть использован для определения мест со структурой, не типичной для окружающей поверхности.

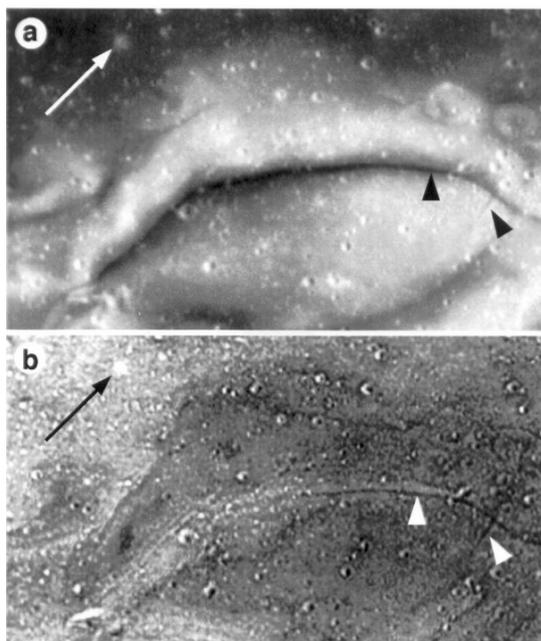


Рис. 3.15. Изображение участка формации Рейнер-гамма – (а) и распределение параметра  $\tau$  – (б). Темным тонам на распределении параметра  $\tau$  отвечают низкие значения  $\tau$

**Механизмы формирования фазовой функции.** Существует несколько механизмов, которые формируют фазовую зависимость яркости Луны. Основной причиной падения яркости лунной поверхности с ростом угла фазы является теневой эффект. Многократное рассеяние между частицами реголита и элементами рельефа поверхности может отчасти ослабить это падение. Заметный вклад в ход яркости вносит однократное рассеяние частицами. В области малых углов фазы для ярких участков поверхности возможно проявляется так называемый эффект когерентного усиления обратного рассеяния. Рассмотрим эти факторы подробнее.

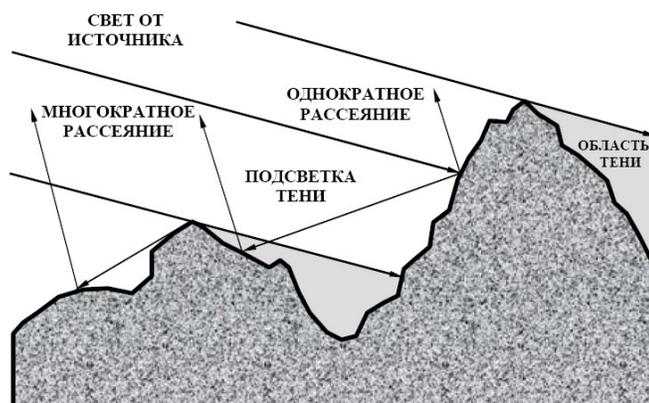


Рис. 3.16. Затенение и вторичная подсветка на статистически шероховатой поверхности

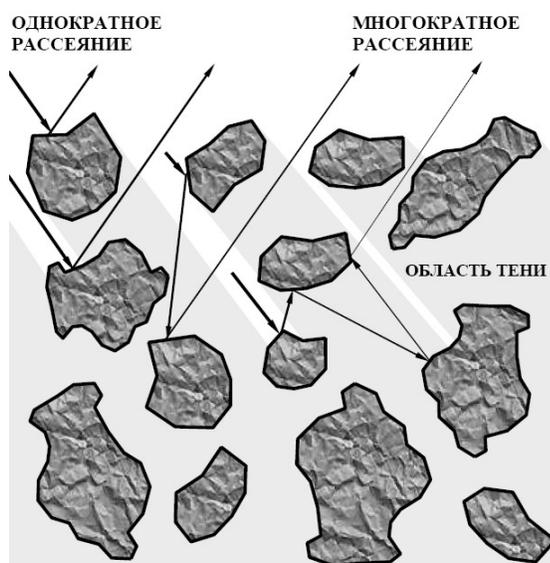


Рис. 3.17. Затенение и вторичная подсветка на частицах реголитоподобной среды

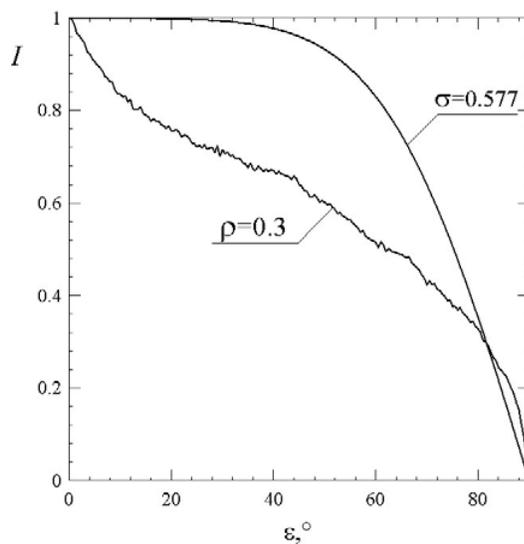


Рис. 3.18. Сравнение расчетных функций затенения для случайной поверхности со среднеквадратичным наклоном 0,577 и статистически однородной среды, состоящей из частиц, с плотностью 0,3

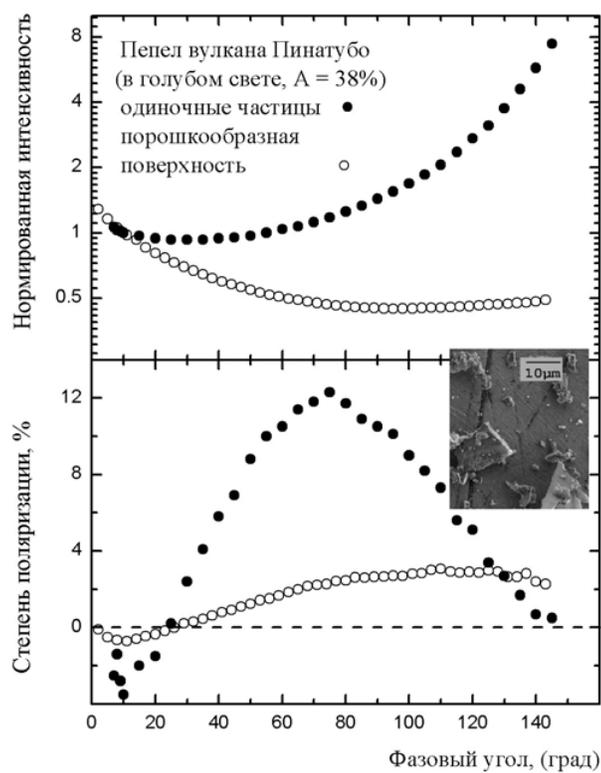


Рис. 3.19. Сравнение фазовых функций одиночных частиц и порошкообразной поверхности, сложенной ими, для вулканического пепла вулкана Пинатубо

Структура лунной поверхности зависит от масштаба ее рассмотрения. На масштабах дециметры - декаметры (мезорельеф) лунная поверхность может быть описана случайной функцией (рис. 3.16); в масштабах микрон – миллиметров она представляет собой порошкообразную среду, реголит (рис. 3.17). Таким образом, каждый элемент мезорельефа лунной поверхности имеет структуру дискретной среды. Теневой эффект для статистического рельефа и порошкообразных сред проявляется по-разному. В обоих случаях для описания теневого эффекта вводится так называемая теневая функция, которая рассчитывается в приближении геометрической оптики. Она характеризует зависимость относительной доли затененной площади поверхности от углов  $i$ ,  $e$  и  $\alpha$ .

Для статистически шероховатых поверхностей и порошкообразных сред теневые функции оказываются разными. Для примера на рис. 3.18 показана теневая функция поверхности со значением среднеквадратичного наклона элементов шероховатости  $\sigma = 0,577$ , что соответствует углу  $30^\circ$ . Эта поверхность визируется вдоль средней нормали; угол падения изменяется, т.е. он равен фазовому углу. Как видно, для данного рельефа при малых углах падения света (когда падающие лучи близки к средней нормали поверхности, фазовый угол около нуля) затенений практически не наблюдается. Они наступают только при пологом освещении шероховатой поверхности (зависимость становится крутой). В принципе, статистически неровные поверхности могут давать крутую зависимость теневой функции и при малых фазовых углах. Это может быть, если падающий и отраженный луч лежат в плоскости (плоскость рассеяния), которая отклонена на большой угол от средней нормали поверхности. Такое наблюдается, например, в зоне фотометрических полюсов планетных тел. Затененные области могут подсвечиваться освещенными элементами поверхности (рис. 3.16), ослабляя теневой эффект. Однако, как показали расчеты, для шероховатых поверхностей даже с высоким альбедо вклад многократного рассеяния невелик, если характерный наклон поверхности меньше  $40^\circ$  (Д. В. Петров, 2003 год). Для мезорельефа Луны этот наклон обычно меньше и, кроме того, у Луны поверхность довольно темная. Поэтому при построении теоретических моделей фотометрической функции планетных поверхностей (например, модели Хапке, которая широко используется в настоящее время) многократным рассеянием света между элементами мезорельефа поверхности пренебрегают.

Среды, состоящие из частиц, допускающие геометрооптическое приближение, демонстрируют крутые зависимости теневой функции при малых фазовых углах (рис. 3.17) при любых наклонах плоскости рассеяния относительно средней нормали поверхности. На рис. 3.18 показана теневая зависимость для случая среды с плотностью 0,3 (30% объема занято

веществом). Поверхность визируется вдоль средней нормали, а угол падения равен фазовому углу, т.е. используется та же геометрия светорассеяния, что и в случае шероховатой поверхности. Как видно, поведение теневых функций среды и неровной поверхности существенно различается при малых и средних углах фазы, тогда как при больших углах обе структуры обнаруживают сильный теневой эффект. Многократное рассеяние света в лунном реголите вносит заметный вклад. Некоторые частицы реголита полупрозрачны; свет, проходя сквозь них или рассеиваясь другими частицами, ослабляет теневой эффект.

Фактор многомасштабности и иерархичности строения играет важную роль в формировании теневой и, следовательно, фотометрической функции лунной поверхности. В частности, автором этой книги было показано, что формула Акимова (13) является прямым следствием этого фактора. Механизм здесь следующий. Представим себе шероховатую поверхность. Ее фазовая зависимость формируется теневым эффектом и фазовой зависимостью элементов этой поверхности. Если эти элементы также шероховаты, то их фазовая функция формируется теневым эффектом и фазовой функцией элементов рельефа мелкомасштабной шероховатости и т.д. Получается иерархия шероховатостей, которая мультиплицирует теневой эффект, резко увеличивая крутизну фазовой зависимости.

Существенный вклад в обратное рассеяние порошкообразной поверхности (особенно, при низких альбедо) может вносить однократное (точнее, одночастичное) рассеяние. Лабораторные измерения и расчеты показывают, что частицы и шероховатости случайной формы размером порядка длины световой волны дают после усреднения по ориентациям и формам небольшое увеличение рассеянного потока при углах фазы менее  $30 - 40^\circ$ . На рис. 3.19 а представлены фотометрические данные измерений вулканического пепла вулкана Пинатубо. Измерения проведены в синих лучах; альбедо этого порошка при угле фазы  $2^\circ$  составляет 38 %. На этом рисунке сведены вместе измерения одиночных частиц, выполненные с помощью нефелометра Амстердамского Университета, и порошка, состоящего из этих частиц, который исследовался с помощью лабораторного фотометра/поляриметра НИИ Астрономии ХНУ им. В. Н. Каразина; здесь же приведена микрофотография частиц этого порошка, полученная с помощью электронного микроскопа. Учитывая сравнительно невысокое альбедо вулканического пепла, можно утверждать, что частично эффект обратного рассеяния порошкообразной поверхности формируется однократным рассеянием, вклад которого довольно заметен в этом случае. Этот вклад может быть очень существенным для темных морских образований на Луне.

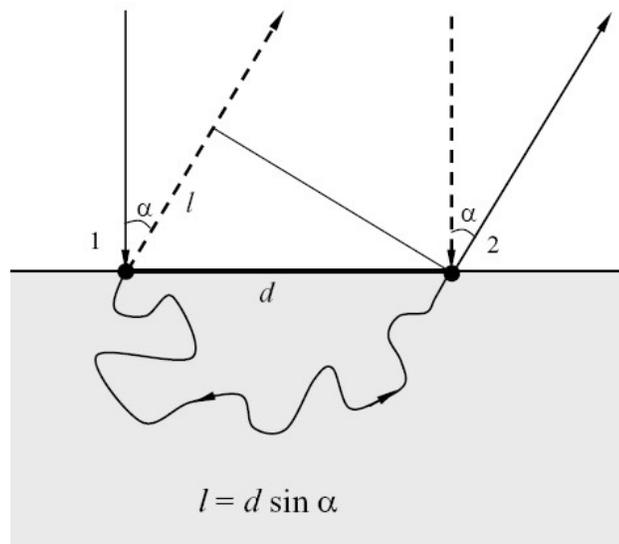


Рис. 3.20. Схема когерентного усиления обратного рассеяния

В случае ярких порошкообразных поверхностей может наблюдаться эффект когерентного усиления обратного рассеяния. Это интерференционный эффект. Он связан с тем, что любая траектория лучей, испытавших рассеяние в среде кратности выше первой, может интерферировать с взаимно обратной траекторией (см. рис. 3.20). При строго нулевом фазовом угле лучи, прошедшие по этим траекториям, всегда интерферируют с усилением, поскольку их оптический путь один и тот же. При угле фазы, не равном нулю, эти пути отличаются друг от друга и могут интерферировать как с усилением, так и с взаимным гашением. Таким образом, при рассеянии направление на источник света является выделенным. Интерференция ответственна за существование оппозиционного эффекта (узкого пика яркости). Этот эффект по своей природе универсален. Он проявляется везде, где есть рассеяние волн, в том числе и волн де Бройля. В физике твердого тела сходные эффекты называются эффектами слабой локализации (например, в теории электронной проводимости, это андерсоновская локализация). Скалярная теория рассеяния предсказывает максимальную амплитуду когерентного усиления обратного рассеяния, равную 2. Более строгая векторная модель показывает, что эта максимальная амплитуда может быть около 1,5 (по крайней мере, меньше 2). Величины всплесков с амплитудой около 50 % встречаются в лабораторных измерениях при очень малых углах фазы. Следует отметить, что в случае Луны этот эффект проявляется, вероятно, только для участков поверхности с высоким альбедо; это могут быть зоны вскрытия незрелого материкового грунта (молодые кратеры и лучи).

*Восстановление рельефа по фотометрическим изображениям.* Вариации яркости на изображениях Луны, полученных при фазовых углах отличных от нуля, связаны не только с изменениями отражательной способности вещества поверхности, но и несут информацию о ее локальных наклонах. Особенно сильно топографический эффект яркости проявляется при больших фазовых углах. Иллюстрацией тому могут служить изображения на рис. 2.16, 2.18, 2.45 и 2.49, на которых подсолнечные склоны видны как очень яркие образования. Если имеется несколько изображений, полученных при разных высотах и азимутах Солнца, но при одинаковых условиях наблюдения поверхности, можно ставить задачу определения поля локальных наклонов (а тем самым и поля высот) поверхности; это задача фотоклинометрии. Этот метод работает для таких поверхностей и при таких условиях освещения, когда шероховатости не отбрасывают тени. Применительно к Луне метод определения наклонов по фотометрическим данным был впервые предложен ван Диггеленом в 1959 году. Позднее, он был существенно развит харьковским физиком Ю. В. Корниенко, который сумел сформулировать задачу восстановления рельефа в приближении слабых наклонов, как задачу оптимальной фильтрации изображений. К сожалению широкого применения метод фотоклинометрии в исследованиях Луны не получил. Как ни странно, главной причиной этого является отсутствие практического интереса к такой задаче.

Более востребованным оказался метод фотограмметрии. Условия, при которых применим этот метод, отличаются от предыдущего случая. Для фотограмметрии необходимо иметь стерео пары изображений; каждое из них должно быть получено при одних и тех же условиях освещения, но немного отличающихся условиях наблюдения. Этим методом Геологической службой США было построено большинство топографических (высотных) карт лунной поверхности. В 60–70-е годы прошлого столетия уровни высот рисовались операторами вручную путем анализа фотографий помощью стереоскопов. Работа велась, в основном, по снимкам КА серии «Орбитер» и фотографиям, полученным с орбитальных модулей КК серии «Аполлон».

Фотограмметрическая задача может быть описана математически; благодаря этому карты высот строят сейчас с помощью компьютера. Для этого существуют специальные программы, например, программный комплекс, созданный более 10 лет назад в DLR в Германии. К сожалению, эти программы являются, в основном, коммерческим продуктом, и не доступны для широкого использования. С другой стороны алгоритмы восстановления рельефа фотограмметрическим методом не так сложны и при желании необходимые программные средства могут быть созданы самостоятельно. Иллюстрацией тому служат результаты, полученные недавно аспирантом НИИ Астрономии ХНУ им. В. Н. Каразина А. Н. Опанасенко.

Для компьютерного фотограмметрического анализа он использовал изображения района места посадки КК «Аполлон-17», полученные КА «Клементина» и космическим телескопом Хаббла. Изображения имеют почти одинаковое пространственное разрешение (около 100 м/пиксел); они получены в близких длинах волн. Так совпало, что условия освещения этого участка также были близкими. Отличались лишь углы визирования: в случае КА «Клементина» ось камеры UVVis была направлена точно вниз (в надир), тогда как телескоп Хаббла снимал поверхность под углом (перспективный снимок), приблизительно равным широте места посадки КК «Аполлон-17», т.е. при наклоне луча зрения от нормали примерно на  $25^\circ$  (см. рис. 3.21).

По этой паре удалось построить карту рельефа поверхности. Это стало возможным, потому что участки поверхности, имеющие разную высоту, проектируются немного по-разному на картинную плоскость при получении надирного изображения и снимка при угле визирования  $25^\circ$ . По величине относительного смещения деталей на этих изображениях оценивалась высота рельефа. Самым трудным здесь является этап совмещения деталей для определения поля смещений. Для этого изображения вначале совмещались друг с другом жестким (аффинным) преобразованием. Затем эти изображения просматривались скользящим окном (радиусом примерно 10 пикселей), в котором участки совмещались сдвигом по максимуму корреляционной функции; это этап мягкого совмещения, приводящий к локальным деформациям одного из изображений. Шаг за шагом (через 5 пикселей) скользящее окно «просматривало» оба изображения, что дало возможность определить поле сдвигов, по которому вычислялись высоты; в результате получилась карта, показанная на рис. 3.22. Она охватывает район долины Тавр Литтров (место посадки КК «Аполлон-17»). Эта карта сравнивалась данными топографической карты Геологической службы США, построенной ранее для этого района; получилось превосходное согласие. Наличие высотных распределений позволяет моделировать произвольные условия освещения и наблюдения исследуемого района. Так, на рис. 3.23 показано перспективное изображение долины Тавр Литтров в двух вариантах, когда альбедные вариации удалены с изображения рельефа (а) и когда они оставлены (б).

Следует особо подчеркнуть полезность использования распределения наклонов рельефа в некоторых фотометрических задачах, например, при сравнении изображений, полученных при разных углах фазы. Так, на рис. 3.14 и 3.15 эффект наклонов хорошо виден у кратеров; он может мешать интерпретации данных.

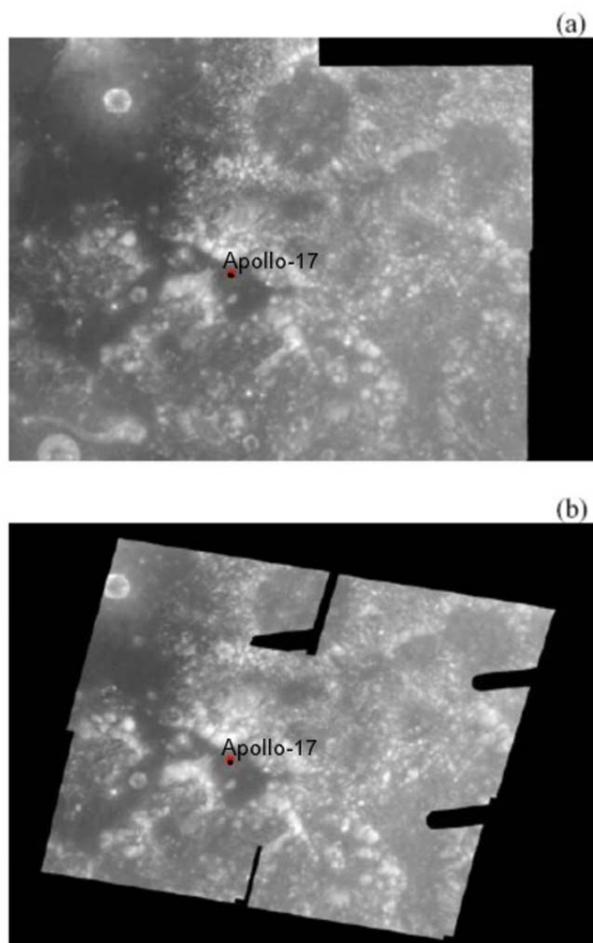


Рис. 3.21. Изображения района посадки КК «Аполлон-17» по данным съемки КА «Клементина» (a) и телескопа Хаббла (b). Темные полосы на изображении связаны с отсутствием данных

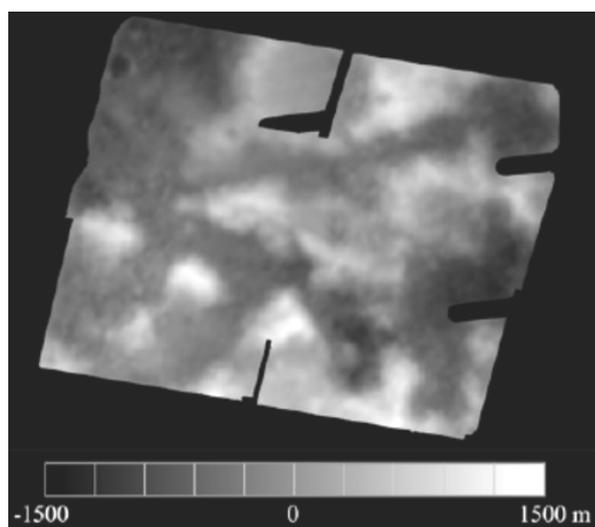


Рис. 3.22. Карта высот для района посадки КК «Аполлон-17»

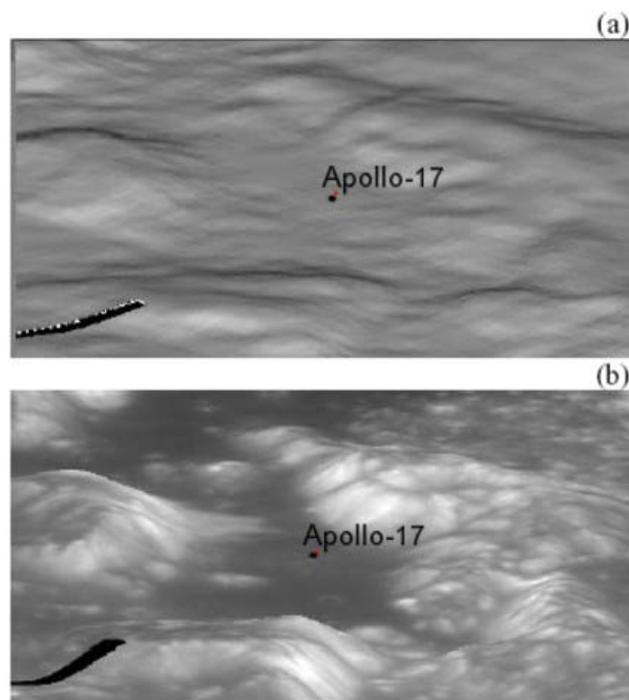


Рис. 3.23. Перспективный взгляд на долину Тавр Литтров. (a) – альбедные вариации исключены, (b) – альбедные вариации включены

Отметим одну из причин, по которой метод фотограмметрии получил большее распространение, чем фотоклинометрический метод. Дело в том, что условия для успешного использования фотоклинометрии реализуются именно при наблюдении Луны с Земли, когда угол визирования почти постоянный, но изменяется угол освещения. Однако при съемке с Земли пространственное разрешение изображений, как правило, невысокое, поэтому оценки параметров рельефа особой ценности не представляют. Исключение могли бы составить снимки, полученные телескопом Хаббла, но их пока недостаточно для выполнения фотоклинометрии.

Известен лишь один пример успешного решения фотоклинометрической задачи с использованием снимков, полученных с Земли, но он имеет пока только иллюстративную ценность. Речь идет о работе, выполненной около 10 лет назад В. В. Корохиным в Харьковской астрономической обсерватории. По снимкам Луны, полученным при разных фазовых углах, были определены наклоны лунной поверхности на базе 2 км в широтном направлении (рис. 3.24 а). Использовалось предположение о малости наклонов. Одновременно при решении фотоклинометрической задачи было определено распределение альбедо для исследуемого участка поверхности (рис. 3.24 б). Этот участок представляет собой сектор; края лунного диска слева и справа «подрезаны», поскольку эти области находятся в области тени при

максимальных фазовых углах. Наклоны поверхности на рис. 3.24 а отображены так, чтобы дать представление о направлении нормали площадки. Серый фон отвечает нулевому наклону, светлый фон и темный тона соответствуют отклонению нормали площадок, соответственно, к востоку (вправо) и к западу (влево). К сожалению, эти данные не дают возможность построить поле высот рельефа, поскольку изменения направления освещенности поверхности Луны при наблюдениях с Земли происходят практически в одной плоскости (либрационные колебания этого направления малы и ими практически не удастся воспользоваться).

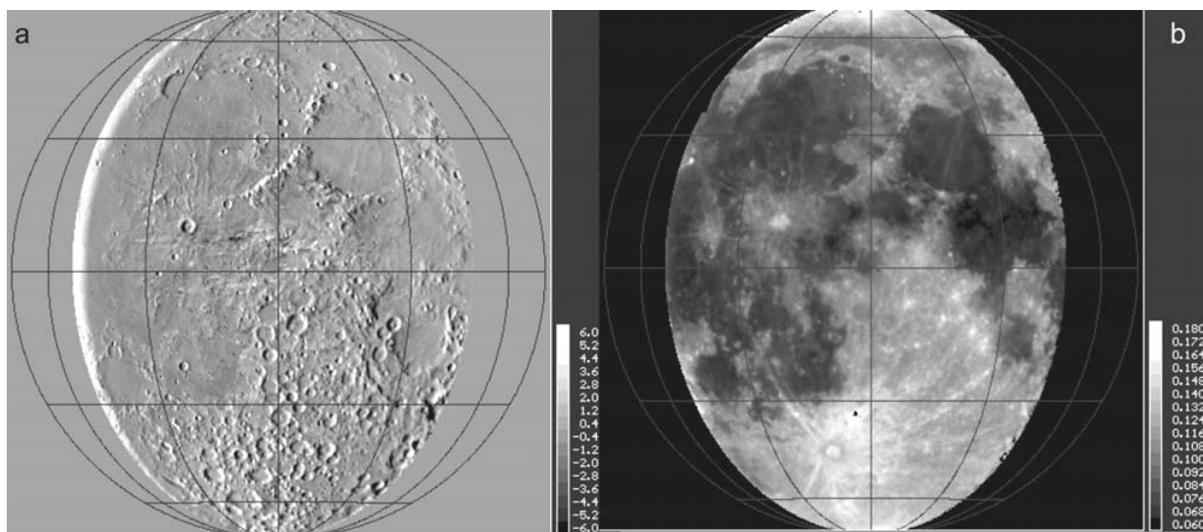


Рис. 3.24. Изображение центральной части видимого полушария Луны. Распределение наклонов вдоль широты – (а) и распределение альbedo – (b). Распределения получены по телескопическим изображениям; их пространственное разрешение составляет несколько километров. Шкала наклонов (правее изображения) дана в градусах; шкала альbedo – в естественных единицах

С другой стороны для получения стерео изображений лунной поверхности естественно использовать съемку с орбиты лунного спутника. В этом случае компоненты стерео пары получаются почти одновременно за счет орбитального движения аппарата, при этом условия освещения практически неизменны; таким образом, реализуются условия благоприятные для фотограмметрии. Изображения, полученные с лунного спутника, имеют, конечно, большее пространственное разрешение, чем снимки с Земли; оценки параметров рельефа в масштабах 10 – 100 метров представляют большой интерес для геологов.

### 3.2. Спектрофотометрия и колориметрия

*Этапы истории лунной спектрофотометрии.* В 19 веке многие астрономы пытались с помощью спектроскопа обнаружить спектральные особенности различных участков Луны, но результат был обескураживающий – всегда наблюдались спектральные детали, совпадающие с системой солнечных фраунгоферовых линий. Вероятно, одним из первых, кто понял, что искать различия надо не в спектральных линиях, а в протяженных деталях спектра, был уже упоминавшийся русский физик Ф. Ф. Петрушевский (рис. 3.25). Он описывал свои пробные наблюдения с помощью спектроскопа собственной конструкции следующим образом: «... вид спектров представлял столько разнообразия, что не оставалось никакого сомнения относительно различия в цветах разных частей Луны, заслуживающего полного внимания и специального изучения».



Рис. 3.25. Федор Фомич Петрушевский (1828–1904), русский физик, основатель российского физико-химического общества

Первые количественные спектрофотометрические измерения Луны были выполнены в 1908 – 1910 годах в Потсдамской обсерватории Вильзингом и Шейнером. В работах этих авторов также впервые было проведено сравнение измеренных спектральных зависимостей альbedo участков лунной поверхности с аналогичными данными для некоторых земных пород. Это была первая попытка сравнительного спектрального анализа с целью определения наиболее вероятных типов пород на лунной поверхности. Уместно сказать, однако, что сама по себе идея такого сравнения была в то время уже не нова. Так, во все том же плане физических исследований Луны Ф. Ф. Петрушевского (1873 год) можно прочесть следующее: «Все исследования Луны ... получают особенную важность, когда будут исследованы земные тела по

той же программе ... Следует продолжать подобные исследования над горными породами, как такими, каковыми они являются на поверхности Земли, ... так и обнаженными».

Позднее, примерно с 30-х по 60-е годы 20 века, спектральные измерения Луны проводились фотографически многими авторами. Нет смысла подробно останавливаться на этих работах, поскольку, при всей их важности на тот момент, они не были результативны. Дело в том, что Луна светит отраженным солнечным светом, поэтому для нахождения спектрального хода альbedo лунной поверхности необходимо измеренный спектр разделить на спектр Солнца. Если солнечные данные недостаточно надежны, то при таком делении в спектре лунного альbedo появятся ложные детали.

Надежные данные о солнечном спектре появились только в конце 60-х начале 70-х годов прошлого столетия. До этого появлялось много сообщений об открытии полос поглощения и даже эмиссии в видимой части спектра лунного альbedo. Последующие измерения показали, что спектр лунной поверхности очень ровный и практически не имеет никаких абсорбционных (а тем более, эмиссионных) особенностей. Только в ближней ИК области, вблизи 1 мкм, имеется слабая полоса поглощения пироксенов и оливина – минералов, входящих в состав лунного грунта. Впервые эта полоса была обнаружена известным советским астрономом В. И. Морозом в 1965 году, а также независимо Ватсоном и Даниельсоном в том же 1965 году. В спектре альbedo Луны вблизи 2 мкм была также найдена другая полоса поглощения пироксенов. Однако открытие этой полосы не было неожиданным – ее нашли ранее с помощью лабораторных спектрофотометров, исследуя различные пироксены земного происхождения, а затем и лунный грунт.



Рис. 3.26. Карли Питерс, профессор Браунского Университета (США), специалист в области исследования Луны спектральными методами

Спектрофотометрия Луны в ближней ИК области спектра в обсерваториях бывшего СССР практически не проводилась; однако это направление бурно развивалось в США в 70 – 80-х годах, в частности, Томасом Маккордом, Карли Питерс (см. рис. 3.26) и другими наблюдателями. Параллельно Джоном Адамсом были начаты спектральные измерения лунного грунта. Одной из важнейших работ в этой области было сопоставление телескопических спектров мест посадок космических аппаратов со спектрами «типичных» для данного места образцов лунного грунта. На рис. 3.27 показано такое сравнение для мест посадки КК серии «Аполлон». Оно представляется удовлетворительным.

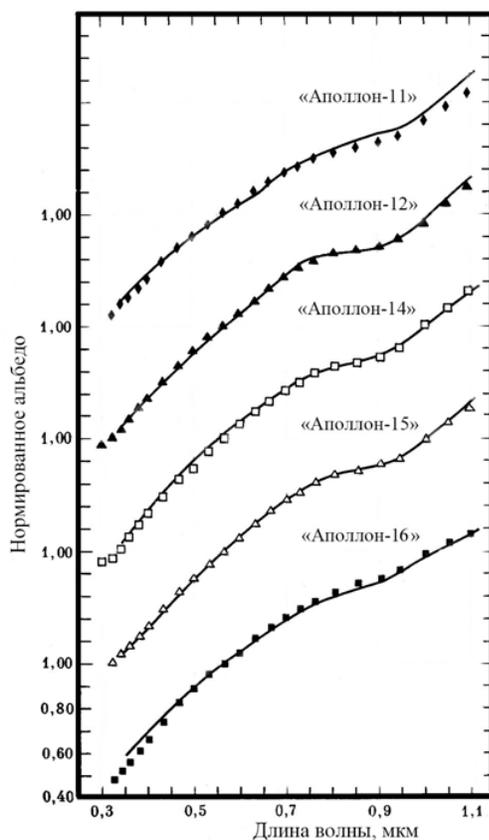


Рис. 3.27. Сравнение телескопических спектров мест посадок КК серии «Аполлон» (точки) со спектрами образцов лунного грунта (линии)

В настоящее время в Университете Брауна под руководством К. Питерс работает лаборатория НАСА (RELAB), в которой находится три спектрометра для видимой и ИК области спектра. Эти инструменты позволяют проводить измерения лунных образцов и аналогов планетных грунтов в диапазоне длин волн 0,3 – 50 мкм. С помощью одного из инструментов лаборатории RELAB были проведены измерения отражательной способности

образца лунного грунта из места посадки КК «Аполлон-16» в диапазоне спектра 0,3 – 2,5 мкм. Параметры освещения и наблюдения были следующие:  $i = 30^\circ$ ,  $e = 0$  (угол падения и отражения, соответственно). Эти измерения позволили выполнить абсолютную калибровку данных камеры UVVis КА «Клементина» (см. рис. 3.28). Харьковскую обсерваторию связывает долготное плодотворное сотрудничество с Университетом Брауна.

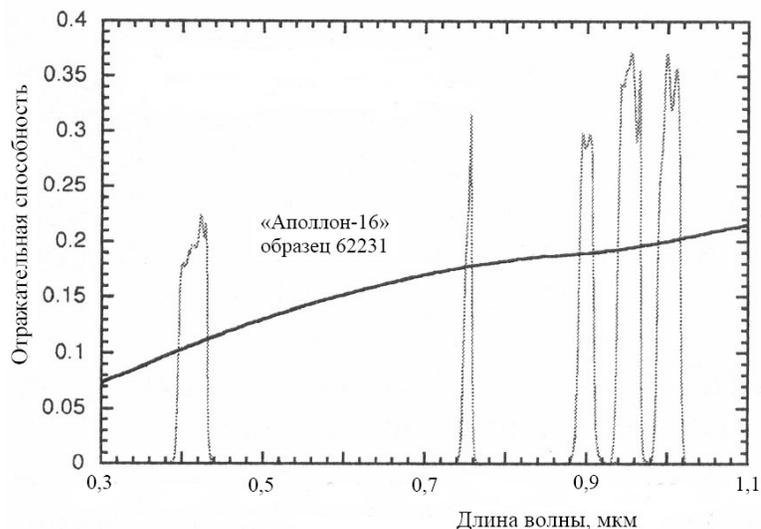


Рис. 3.28. Спектральная зависимость отражательной способности (определенная относительно белого стандарта, спектралон) образца лунного грунта (62231) из места посадки КА «Аполлон-16». Показаны также полосы пропускания фильтров камеры UVVis КА «Клементина»

Существует множество работ, посвященных использованию спектральных данных с целью геологического описания и классификации образований лунной поверхности. Стоит отметить работы группы гавайских исследователей, которые выполняются под руководством Пола Люси. Ими получены спектры в ближней инфракрасной области (0,7 – 2,5 мкм). В одной из работ этой группы исследованы площадки размером 2 – 5 км на плато Аристарх и вокруг него. По этим спектрам удалось дифференцировать различные морфологические образования в окрестности кратера Аристарх по минералогическому составу.

Приведем другой пример геологического применения спектральных данных. К. Питерс изучала лучи кратера Коперник. Было исследовано, насколько быстро количество первичного вещества кратера Коперник, определенного в поверхностном веществе лучей, уменьшается с ростом радиального расстояния (найден 20 – 25 % вещества первичного выброса на расстоянии шести радиусов кратера). Сравнительно высокое альbedo лучей кратера Коперник обусловлено полевошпатовым (материковым) составом первичных выбросов в лучах. Незрелый локальный материал наблюдался в лучах кратера Коперник в области больших

вторичных кратеров или других областях со склонами, препятствующими накоплению зрелых грунтов.

**Особенности спектров.** При измерении спектров лунных образований с Земли атмосфера ограничивает диапазон измерений с коротковолновой стороны. Связано это с тем, что земная атмосфера очень сильно поглощает ультрафиолетовую радиацию. Граница прозрачности находится примерно на 0,3 мкм. С длинноволновой стороны также существует определенное ограничение. Дело в том, что в ближней ИК области (примерно на 2,4 мкм) поток собственного (теплового) излучения лунной поверхности уравнивается с отраженным потоком. Таким образом, для астрономов рабочим диапазоном является диапазон 0,3 – 2,4 мкм. На рис. 3.29 показаны средние спектры для морских и материковых участков поверхности. Каждый из этих двух спектров получен путем усреднения нескольких десятков, соответственно, морских и материковых спектров. Для построения этих зависимостей был использован каталог данных К. Питерс, которая в 70 – 80 годах прошлого столетия провела большой цикл спектральных измерений Луны, исследовав несколько сотен лунных деталей. Для абсолютизации данных на рис. 3.29 использовался фотометрический каталог Л. А. Акимова. Как видно, спектры альbedo лунного грунта в видимом и ближнем ИК диапазоне длин волн (0,3 – 2,4 мкм) бедны деталями. Благодаря такой простоте спектров отражения, часто используется их представление в виде небольшого набора показателей цвета (см. ниже). Это же обстоятельство делает Луну удобным спектральным стандартом при изучении полос поглощения атмосфер планет-гигантов.

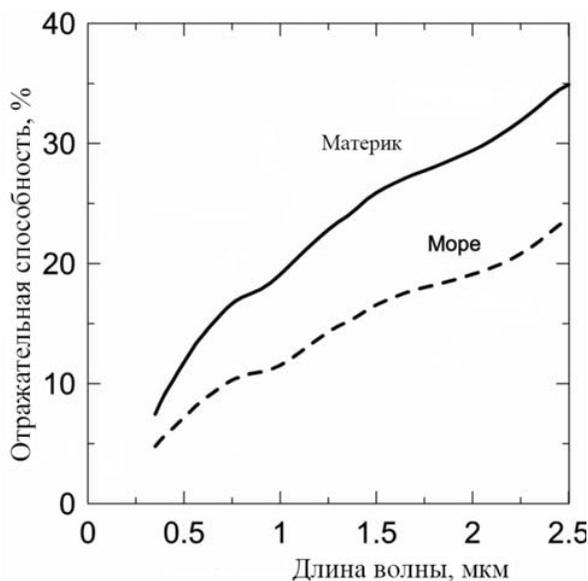


Рис. 3.29. Средние спектры морской и материковой поверхности Луны по данным измерений К. Питерс

Теория спектров планетных реголитов развита недостаточно. Понятны основные механизмы формирования этих спектров на квантово механическом уровне. Это позволяет вычислить положения центров полос поглощения, задаваясь параметрами кристаллической решетки того или иного минерала. Однако пока нет удовлетворительных моделей, которые связывали бы наблюдаемую в спектре отражения интенсивность полосы поглощения с интенсивностью квантового перехода, характеризуемого следующим объемным интегралом  $\int \psi_1 \hat{M} \psi_2^* dv$ , где  $\psi_1, \psi_2^*$  – волновые функции основного и возбужденного состояний,  $(^*)$  – комплексное сопряжение, а  $\hat{M}$  – оператор перехода между этими состояниями. Опишем несколько наиболее важных механизмов формирования спектров лунной поверхности.

В УФ и коротковолновой части видимого диапазона лунного спектра наблюдается падение отражательной способности с уменьшением длины волны, связанное с влиянием полосы собственного поглощения силикатов и полос поглощения переноса заряда типа «кислород-металл», в основном, это переходы:  $O^{2-} \rightarrow Fe^{2+}$  и  $O^{2-} \rightarrow Ti^{4+}$ . Следует отметить, что термин «перенос заряда» является условным. На самом деле, между анионами и катионами в кристаллической решетке минералов образуются гибридные (молекулярные) орбитали, на которых находятся электроны. Эти орбитали способны возбуждаться с поглощением фотона. Фотон или с некоторой вероятностью переизлучается, или его энергия расходуется на тепло без переизлучения.

Уменьшение альбедо поверхности в коротковолновой части спектра приводит к тому, что визуально Луна кажется слегка желтоватой. Заметное влияние на наклон спектра оказывают нанофазные включения восстановленного железа. Они образуются в частицах лунного грунта, вероятно, в результате взаимодействия с протонами солнечного ветра и микрометеоритной бомбардировки. Размер включений составляет несколько десятков ангстрем. Атомные кластеры таких размеров даже не образуют магнитных доменов, поэтому это железо называется суперпарамагнитным. На рис. 3.30 показана фотография, сделанная с помощью электронного микроскопа, на которой виден край (рим) частицы лунного полевого шпата; стрелками указаны кластеры атомов восстановленного железа. Описываемые кластеры способны заметно поглощать свет, приводя к потемнению поверхности и увеличению крутизны спектра, «покраснению».

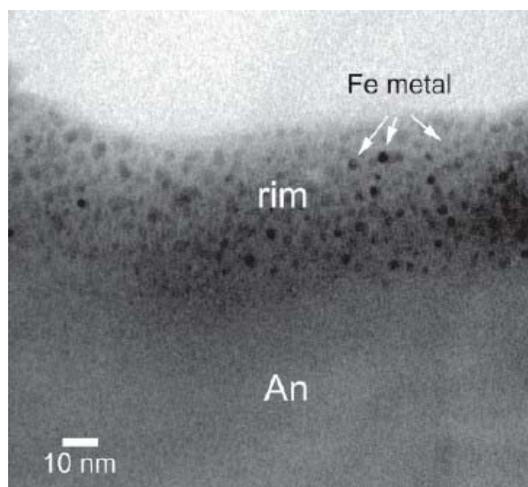


Рис. 3.30. Электронная микрофотография края частицы полевого шпата, на которой видны вкрапления нанофазного железа

В области 1 и 2 мкм наблюдаются слабые полосы, связанные с переходами d-d типа в ионах  $\text{Fe}^{2+}$  в минералах пироксенового и оливинового рядов. Эти полосы формируются электронными переходами между расщепленным кристаллическим полем уровнями ионов  $\text{Fe}^{2+}$ , находящимися в определенной координации. Остановимся на этом подробнее.

Железо относится к элементам первой переходной серии. Это означает, что атом Fe имеет незаполненную d-оболочку. Эта оболочка является внешней, поэтому электроны, находящиеся на пяти ее орбиталях  $d_{xy}$ ,  $d_{yz}$ ,  $d_{xz}$ ,  $d_{x^2-y^2}$ , и  $d_{z^2}$ , сравнительно слабо связаны с ядром; благодаря этому они способны реагировать на излучение в видимом и близком ИК диапазоне.

Вероятностные распределения электронов на d орбиталях имеют различные угловые зависимости, однако в свободном пространстве этим орбиталям соответствует одна и та же энергия (случай вырождения). Другое дело, когда такой атом (катион) помещен в регулярную кристаллическую решетку и окружен анионами. В силу различия формы орбиталей анионы возмущают их по-разному. Это снимает вырождение; энергетические уровни расщепляются, что делает возможным квантовые переходы с поглощением фотона. Например, в случае ортопироксена атомы железа занимают местоположение второго металла (M2) в анионном окружении с октаэдрической симметрией; расщепление уровней дает полосы, центрирующиеся на 0,90 мкм и 1,85 мкм. В случае оливина такое расщепление дает три перекрывающиеся полосы в области одного микрона. Таким образом, величина расщепления энергетических уровней (следовательно, положение и интенсивность полос) зависит от параметров кристаллической решетки минерала и ее симметрии. На параметры решетки (расстояния между

катионами и анионами) могут существенно влиять примеси. Например, при внедрении в кристаллическую решетку такого элемента, как Са, межионные расстояния увеличатся, что приведет к смещению центров полос поглощения в длинноволновую часть спектра. Зависимость центров пироксеновых полос при изменении содержания Са впервые исследовалась Дж. Адамсом (кривая Адамса). Пример такой диаграммы приведен на рис. 3.31; содержание кальция возрастает слева направо.

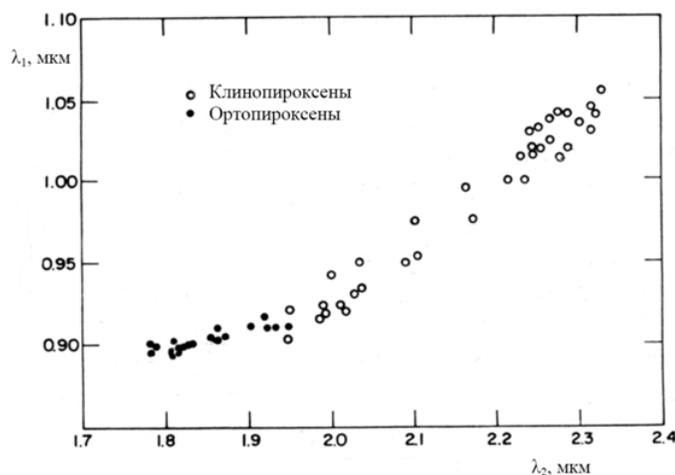


Рис. 3.31. Пироксеновая диаграмма Адамса. По вертикальной и горизонтальной осям отложены длины волн, соответствующие центрам 1-мкм и 2-мкм полос

Лунная полоса поглощения вблизи 1 мкм может быть заметно не симметрична. Это связано с тем, что происходит наложение полос пироксена и оливина. Пироксеновая полоса более интенсивна и, как правило, несколько смещена относительно оливиновой полосы в коротковолновую часть спектра. Таким образом, по измерениям параметра асимметрии результирующей 1 мкм полосы можно в первом приближении судить о соотношении количеств пироксена и оливина в лунном грунте. Возможность постановки такой задачи достаточно очевидна, однако до сих пор никаких конкретных данных не получено. Вероятно, это связано с тем, что оливина в составе материала лунной поверхности обычно заметно меньше, чем пироксена; не хватает точности для разделения полос этих минералов. В редких случаях, однако, идентификацию оливина можно провести. Около двадцати лет назад К. Питерс, сравнивая оливиновые и пироксеновые спектры, пришла к выводу о том, что центральная горка кратера Коперник имеет в основном оливиновый состав. Эта аномалия состава до сих пор не имеет удовлетворительного объяснения. На рис. 3.32 приведено сравнение спектров нескольких деталей кратеров Тихо и Коперник. Как видно, спектр центральной горки (пика) кратера Коперник заметно шире, чем в случае кратера Тихо; центр микронной полосы этой

горки смещен в длинноволновую область; при этом 2-мкм полоса практически не видна, в отличие от кратера Тихо, центральная горка которого содержит много пироксена.

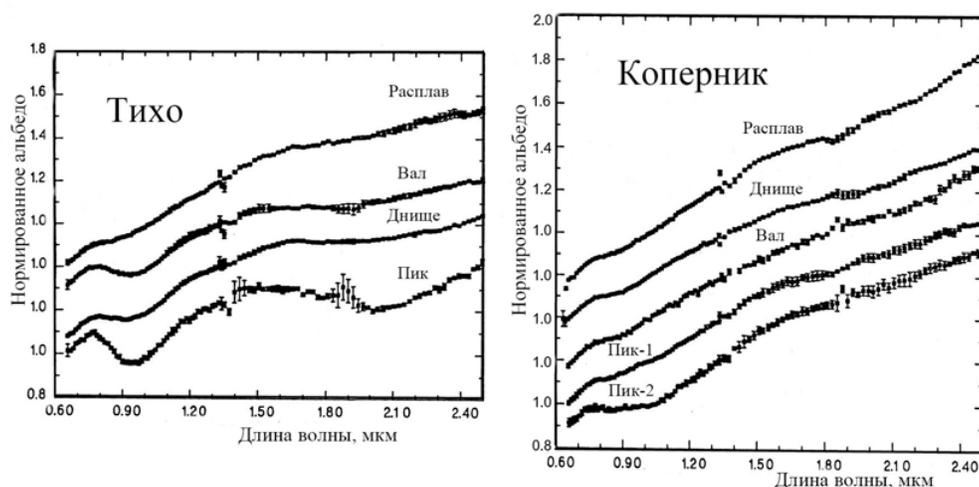


Рис. 3.32. Спектры деталей кратеров Тихо – (а) и Коперник – (в)

Совместное исследование 1 и 2 мкм полос поглощения может дать важную информацию о степени зрелости лунного реголита, которая тесно коррелирует с содержанием агглютинатов – продуктов космогенной переработки лунных пород. Спектры альbedo агглютинатов имеют полосу поглощения в области 1 мкм и практически не обнаруживают 2 мкм полосы. Причина этого состоит, отчасти, в том, что при ударной переработке лунного грунта пироксены в большей степени, чем оливины, подвержены плавлению. Это способствует накоплению в агглютинатах оливинов (не имеющих 2 мкм полосы); пироксены при этом превращаются в стекло. Другой причиной является частичное сохранение в стекле ближнего порядка кристаллической структуры; это способствует только выживанию полосы на 1 мкм. Таким образом, по соотношению глубины полос на 1 и 2 мкм можно судить о степени зрелости лунного грунта.

Важной характеристикой является положение центра пироксеновых полос на шкале длин волн. Этот параметр напрямую связан с параметрами кристаллической решетки минералов. В случае пироксенов, чем больше  $\lambda_{center}$  коротковолновой (условно 1 мкм) полосы, тем эта величина больше у длинноволновой (условно 2 мкм) полосы. Оказывается, по этому положению можно судить о типе пироксенов, которые присутствуют в материале исследуемого участка лунной поверхности – ортопироксены имеют меньшие значения  $\lambda_{center}$  у обеих полос, чем клинопироксены (рис. 3.31). Необходимо, однако, сказать, что существуют такие типы клинопироксенов, которые практически не имеют 2 мкм полосы.

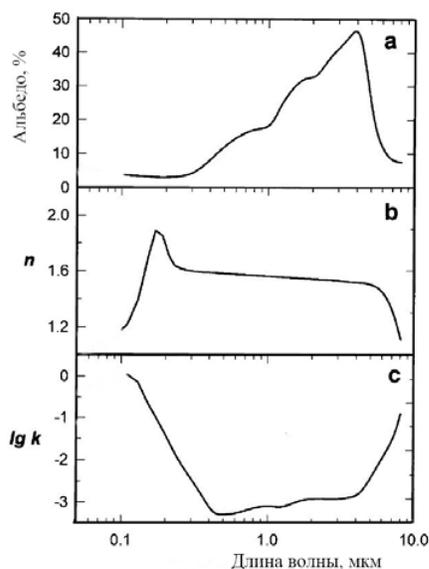


Рис. 3.33. Синтетические спектры: альbedo – (а), действительной части показателя преломления – (b) и показателя поглощения – (с) материала лунной поверхности

Использование данных каталога К. Питерс, данных космических исследований, а также лабораторных измерений лунного грунта позволило построить синтетический спектр отражения Луны в широком диапазоне длин волн (рис. 3.33 а). На этом же рисунке приводятся данные для спектральной зависимости действительной  $n$  и мнимой  $k$  части показателя преломления земного базальта, оптические свойства которого близки к материалу лунной поверхности (рис. 3.33 в,с). Подъем отражательной способности в вакуумном ультрафиолете обусловлен тем, что лунная поверхность ведет себя в этом диапазоне как полуметалл. Частицы грунта становятся непрозрачными и рассеивают свет только поверхностями; коэффициент отражения зависит при этом не только от действительной части показателя преломления, но и от мнимой. Мнимая часть с уменьшением длины волны возрастает, поэтому растет и коэффициент отражения. Увеличение альbedo от ультрафиолета до, примерно, 4 мкм связано с увеличением прозрачности частиц лунного грунта просто за счет возрастания длины волны. Действительно, поглощение света в частице, размер которой существенно большей длины волны, можно грубо оценить с помощью закона Бугера,  $I = I_0 \exp(-4\pi kL/\lambda)$ , где  $I_0$  – интенсивность падающего излучения,  $L$  – характерный путь света в частице,  $k$  – показатель поглощения,  $\lambda$  – длина световой волны. Как видно из формулы, с увеличением длины волны интенсивность прошедшего света  $I$  увеличивается (если пренебречь зависимостью  $k(\lambda)$ ), следовательно, должно возрастать альbedo порошкообразной среды. Это возрастание не компенсируется небольшим увеличением показателя поглощения, в диапазоне 0,5 – 4,0 мкм,

которое можно видеть на рис. 3.33 с. В диапазоне длин волн 4,0 – 8,0 мкм наблюдается резкое увеличение поглощения, связанное с возбуждением колебательных уровней молекулярных комплексов, составляющих лунный материал. В области 7 – 8 мкм альbedo лунного грунта очень низкое; в ней расположены христиансеновские частоты силикатов. На этих частотах действительная часть коэффициента преломления обращается в единицу; поверхность частиц перестает преломлять, а стало быть, и рассеивать. Порошкообразная среда на этих частотах способна практически только поглощать излучение, давая минимальный вклад в рассеяние. Поскольку для различных минералов христиансеновские частоты немного разные, то альbedo Луны в этой области спектра не столь низкое, как для мономинеральных порошкообразных поверхностей.

Спектры реголитоподобных поверхностей зависят от размеров частиц (через параметр  $L$ ). Чем больше размеры, тем ниже отражательная способность. Размер частиц сильно влияет не только на интегральную отражательную способность, но и на глубину полос поглощения: эта глубина максимальна на средних альbedo, при высоких и низких альbedo полосы не столь глубоки (рис. 3.34). К счастью, средний размер частиц лунного грунта мало варьируется по лунной поверхности. Для зрелого грунта он практически один и тот же, как для морей, так и материков (в материковом грунте чуть больше пылевой фракции) и составляет примерно 60 мкм. Для незрелых грунтов этот размер около 100 мкм. Обычно при интерпретации спектров отражения лунного материала влияние размера частиц считается вторичным фактором.

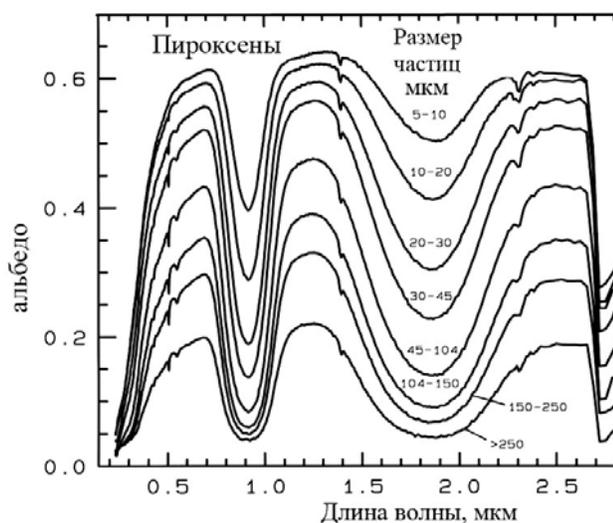


Рис. 3.34. Спектры отражения порошков пироксена одного состава, но с разными размерами частиц

Наряду с исследованиями относительно заметных полос поглощения в области 1 и 2 мкм, у Луны и некоторых астероидов со средним альбедо уже давно предпринимаются попытки найти слабые полосы поглощения в видимой части спектра. Если у астероидов такие полосы определяются более или менее уверенно – их впервые уверенно нашли известные азербайджанские астрономы Д. И. Шестопалов и Л. Ф. Голубева, – то применительно к Луне надежных данных пока нет. Как уже говорилось, трудности определения состоят в том, что исходные спектральные данные необходимо делить на спектры Солнца и звезд-стандартов. Из-за несовпадения профилей фраунгоферовых линий в измеренном спектре и спектре-стандарте на вычисленном лунном спектре видны нерегулярности, достигающие 10%, которые заманчиво интерпретировать как слабые полосы поглощения.

Согласно лабораторным измерениям у некоторых типов пироксенов – это железистые и кальциевые клинопироксены (типа геденбергита и феррогеденбергита) – действительно могут наблюдаться слабые полосы вблизи 0,490, 0,505 и 0,550 мкм. Это запрещенные полосы, которые приписываются иону  $Fe^{2+}$ , занимающему октаэдрические позиции M1 и M2 в структуре решетки пироксена. Отметим также, что существует некоторая надежда телескопически обнаружить слабую полосу иона  $Cr^{3+}$  в области 0,625 мкм – в спектрах отражения некоторых образцов лунного грунта со сравнительно высоким содержанием хрома эта полоса хорошо заметна.

Таким образом, несмотря на неопределенность результатов телескопического обнаружения слабых полос поглощения у Луны в видимой части спектра, целесообразно продолжать их поиски со спектральным разрешением порядка 10 ангстрем, хотя следует хорошо осознавать, что этот поиск сопряжен с большими трудностями. Это, в частности, иллюстрирует рис. 3.35 a,b; данные для него получены харьковским астрономом Н. В. Опанасенко. На этом рисунке показана спектральная освещенность (а), создаваемая Солнцем (видны фраунгоферовы линии) и вычисленные (путем деления спектра Луны на спектр Солнца) спектральные зависимости отражательной способности 4 участков поверхности. На этих зависимостях хорошо видно остаточное присутствие фраунгоферовых линий (см. стрелки), связанное с неточным знанием солнечного спектра на момент наблюдения Луны.

Перспективным средством поиска слабых полос является спектрополяриметрия. Измерения спектральной зависимости степени поляризации являются более точными, чем спектральные измерения альбедо, поскольку они всегда относительны – не требуется деление на солнечный спектр и т. п. Спектрополяриметрический метод основан на следующем. Для реголитоподобных поверхностей существует тесная обратная корреляция между альбедо и степенью поляризации, измеренной при достаточно больших фазовых углах, – это называется

эффектом Умова. Благодаря этому эффекту, все особенности спектрального хода альbedo проявляются в соответствующем спектральном поведении степени поляризации. В работе Н. В. Опанасенко 1994 года предпринималась попытка обнаружить таким способом слабые полосы поглощения для тех же 4 участков лунной поверхности разных морфологических типов (см. рис. 3.35). Проводились спектрополяриметрические измерения при фазовом угле около  $50^\circ$  (положительная поляризация) в диапазоне  $0,48 - 0,57$  мкм с разрешением 20 ангстрем. По уровню чувствительности несколько десятых процента никаких нерегулярностей спектра степени поляризации найдено не было (ср. рис. 3.35 b,c). Однако эти данные, будучи получены лишь для нескольких участков Луны, не закрывают вопрос о существовании слабых полос поглощения в спектре лунного грунта. Кроме того, спектрополяриметрию с целью поиска слабых полос желательно проводить в более широком спектральном диапазоне при фазовых углах, при которых степень поляризации близка к максимуму, т.е. в области фазовых углов  $\alpha = 100 - 110^\circ$ .

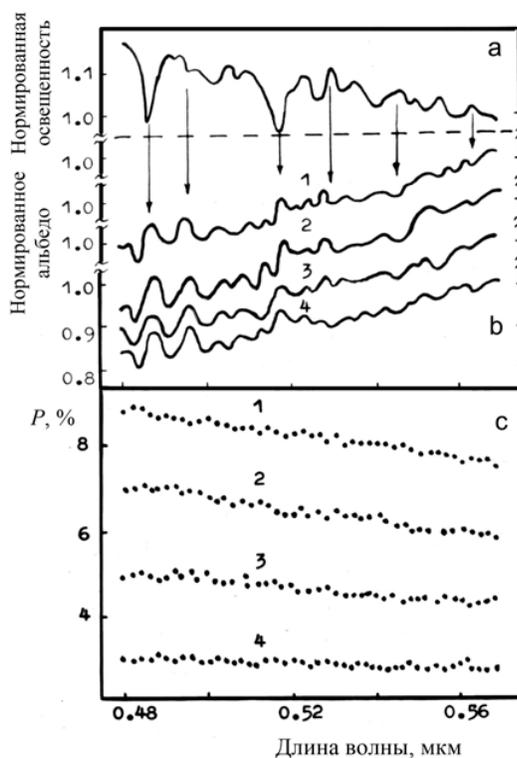


Рис. 3.35. Спектральная освещенность, создаваемая Солнцем – (a). Спектральные зависимости отражательной способности – (b) и степени поляризации – (c) для 4 участков лунной поверхности (1 – днище кратера Платон, 2 – участок в Море Влажности, 3 – образование Гельмет, 4 – кратер Аристарх)

**Колориметрия (измерение показателей цвета).** Показатели цвета количественно описывают цвет поверхности. Различия цветовых оттенков разных частей лунного диска отмечались многими наблюдателями со времен изобретения телескопа. Так, Ян Гевелий в 1647 году сообщал о красноватом оттенке участка, который сейчас называется пятном Вуда (плато Аристарх); это действительно одна из самых «красных» деталей лунной поверхности. Спор о том, видны ли глазом цветовые оттенки на лунной поверхности, продолжался несколько столетий, почти до наших дней. Так, Ю. Франц (1923 год) писал: «Я хотя и не страдаю цветной слепотой, до сих пор никогда не мог увидеть на Луне различных цветов. Поэтому я сомневаюсь в их реальности. Мне только яркие кратеры, как Аристарх и Дионис, постоянно кажутся синеватыми ...». Отметим, что зрение не обмануло Франца – яркие молодые кратеры (тот же кратер Аристарх) имеют заметный «синий» цветовой избыток. Сейчас можно дать вполне определенный ответ на вопрос о том, заметны ли визуально цвета лунной поверхности. Если вы знаете заранее, где расположены участки с аномальными цветом (а это уже хорошо известно), то с помощью рефлектора средних размеров оттенки видны отлично.

Количественное исследование цветовых оттенков лунной поверхности началось с появлением фотографии. Первые попытки фотографировать Луну с различными светофильтрами начали предприниматься в позапрошлом веке. Об одной из таких попыток пишет Роберт Вуд, упоминая некоего фотографа Ф. Айвса, который в конце 19 века провел фотографирование Луны в трех светофильтрах. Насколько удачными были эти попытки, неизвестно. Цветоделительные фотографии Луны Мите и Зигерта (1911 год) и Роберта Вуда (1912 год) оказались первыми и довольно достоверными. В частности, на изображениях, полученным Мите и Зигертом, хорошо видно, что красный оттенок имеют центральная часть Моря Ясности, восточная часть Моря Дождей, Море Холода, плато Аристарх, кольцевая область вокруг кратера Тихо. Синий оттенок имеют: Море Спокойствия и периферийная часть Моря Ясности, северная часть Моря Изобилия (в районе посадки КА «Луна-16»), западная часть Моря Дождей, западная и южная части Океана Бурь. Все эти цветовые особенности подтвердились в дальнейшем. Отметим также попытку Н. П. Барабашова в 1960 году фотографирования Луны на цветную пленку. В то время качество такой пленки и возможности цветной печати были не очень высокие, поэтому о распределении цветовых оттенков с помощью полученных фотографий практически ничего нового не удалось узнать. Сейчас цвета лунной поверхности легко регистрируются даже любительской цифровой фотокамерой.

Цветовые оттенки количественно характеризуются различными показателями цвета или цветовыми отношениями  $C(\lambda_1/\lambda_2) = A(\lambda_1)/A(\lambda_2)$ , где  $A$  – альбеда поверхности,  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$  –

несовпадающие длины волн. Колориметрические изображения это такие изображения, которые передают распределение того или иного показателя цвета.

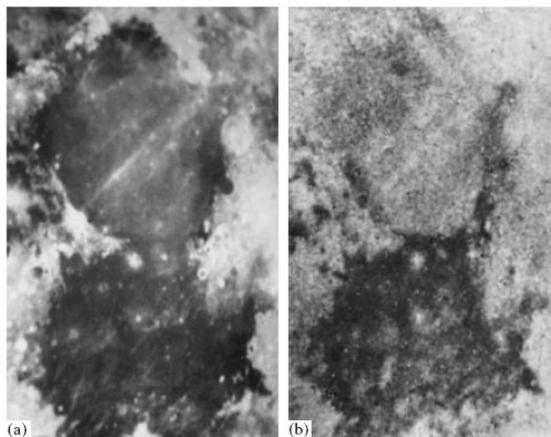


Рис. 3.36. Изображение района Моря Ясности и Моря Спокойствия – (а) и распределение цветового отношения (0,63/0,44 мкм) – (в). Светлым тонам соответствуют более высокие значения отношения

Первые качественные колориметрические изображения начал строить фотографическим методом известный исследователь Луны Ивен Вайтекер в 1965 году. Он использовал для этого опыт Цвикки, который изучал распределения показателя цвета галактик. Метод основан на сложении равноконтрастных позитива и негатива, в результате чего выявляются отличия одного изображения от другого, а это и есть цветовые отличия. Тем же методом была создана, в частности, первая карта цвета видимого полушария Луны (Евсюков, 1973 год, Харьков). На рис. 3.36 приведено колориметрическое изображение района, который включает в себя Море Ясности и Море Спокойствия (слева – распределение альбедо, а справа – цветового отношения). Хорошо видно различие этих морей по показателю цвета. Приведенное на рис. 3.36 изображение  $S(0,63/0,44 \text{ мкм})$  было построено автором этой книги в 1977 году методом Цвикки-Вайтекера. Надо сказать, это было очень непросто. Фотографические пластинки, которые использовались в то время, не обеспечивали достаточную фотометрическую однородность, точность измерений в лучшем случае составляла несколько процентов. Это было на пределе, необходимом для выполнения качественной лунной колориметрии. Приходилось принимать специальные меры для повышения точности исходных изображений. Для этого, в частности, обеспечивался особый режим проявления фотопластинок с сильным перемешиванием проявителя. Сейчас, когда любительские цифровые камеры дают в несколько раз более высокую точность, чем фотоэмульсии, грустно вспоминать об ухищрениях, которые

приходилось использовать, чтобы повысить достоверность результатов; безвозвратно ушло в небытие ремесло научной фотографии.

Главные достижения в телескопической колориметрии Луны были получены с помощью видиконной техники (Маккорд и др., 1976 – 1979 годы). В частности, были созданы атласы изображений показателей цвета:  $C(0,40/0,56 \text{ мкм})$  и  $C(0,56/0,95 \text{ мкм})$ , позволившие провести детальный геологический анализ многих участков лунной поверхности.

Наилучшие колориметрические изображения Луны, которые представляют собой отношения двух альбедных изображений,  $C(0.750/0.415 \text{ мкм})$  и  $C(0.950/0.750 \text{ мкм})$ , были получены КА «Клементина»; они показаны на рис. 2.21 и 2.22. Эти изображения охватывают практически всю поверхность Луны (использована простая цилиндрическая проекция). Изображения  $C(0.750/0.415 \text{ мкм})$  и  $C(0.950/0.415 \text{ мкм})$  сильно отличаются друг от друга и от изображения альбеда. Самые высокие значения показателя цвета  $C(0.750/0.415 \text{ мкм})$  (избыток красного цвета) наблюдаются в Море Холода и на севере Моря Дождей. Большой избыток красного цвета имеет, как уже отмечалось, плато Аристарх. Низкие значения  $C(0.750/0.415 \text{ мкм})$  наблюдаются в Море Спокойствия и на западе Океана Бурь. Также низкие значения имеют молодые кратеры и их лучевые системы; кратер Тихо является примером. Отметим несколько особенностей распределения колориметрического отношения  $C(0.950/0.750 \text{ мкм})$ . Величина этого отношения в среднем больше у материков, чем у морских образований, молодых кратеров и их лучевых систем. Очевидно, чем больше это отношение, тем меньше глубина 1 мкм полосы поглощения пироксенов. Интересно отметить глобальную неоднородность материков по параметру  $C(0.950/0.750 \text{ мкм})$ . Хорошо виден бассейн Южный полюс – кратер Эйткен (левый и правый нижние углы панорамы на рис. 2.22). Эта особенность была обнаружена профессором Браунского Университета Дж. Хэдом и др. в 1992 году по цветоделительным изображениям, полученным КА «Галилео». На панораме (рис. 2.22) видна также особенность на северном материке, возможно, это тоже часть ударного бассейна.

В следующей главе будет более детально рассмотрен вопрос, как использовать колориметрические данные для оценки химического и минералогического состава лунной поверхности. Здесь же мы дадим лишь предварительное описание такого использования.

Возможность оценки состава по оптическим измерениям была впервые показана Майком Шарет и др. в работе 1974 года; в ней по данным лабораторных измерений зрелого морского грунта была построена калибровочная зависимость показателя цвета  $C(0,40/0,56 \text{ мкм})$  от содержания двуокиси титана (отметим, что почти одновременно аналогичная зависимость была построена по средним данным для мест посадок харьковским астрономом Н. Н. Евсюковым). Тогда же было отмечено, что на величину показателя цвета  $C(0,40/0,56 \text{ мкм})$

оказывает влияние зрелость грунта. В самом первом приближении можно считать, что цветовые особенности молодых кратеров по колор-индексам  $C(0.750/0.415 \text{ мкм})$  и  $C(0.950/0.415 \text{ мкм})$  связаны с низкой зрелостью слагающего их материала. Различия цветового отношения  $C(0.750/0.415 \text{ мкм})$  в морях связано с вариациями титана: чем больше титана, тем ниже значения  $C(0.750/0.415 \text{ мкм})$ , т.е. темнее тона на рис. 2.21. Аналогично, различия цветового отношения  $C(0.950/0.750 \text{ мкм})$  в морях и материках (исключая кратеры) связаны с вариациями содержания железа: чем больше железа, тем ниже значения  $C(0.950/0.750 \text{ мкм})$ , т.е. темнее тона на рис. 2.22.

Отметим еще два направления, которые интересны для развития колориметрии Луны.

Показатели цвета лунной поверхности сравнительно слабо зависят от условий освещения. Это дает возможность накапливать и сопоставлять данные, полученные при разных фазовых углах. В частности, изображения, из которых составлены мозаики, приведенные на рис. 2.21 и 2.22, получены при разных фазовых углах (примерно от 0 до  $50^\circ$ ), тем не менее, они хорошо сшиваются и составляют целостную картину. В силу того, что фазовые зависимости цвета довольно слабы, их надежные измерения телескопическими методами практически отсутствуют. Пожалуй, достоверно известно, что общий наклон спектра несколько (процентов на 10) увеличивается к квадратурам (Маккорд, 1968 год). Однако есть некоторые указания на то, что при больших углах фазы этот наклон снова уменьшается.

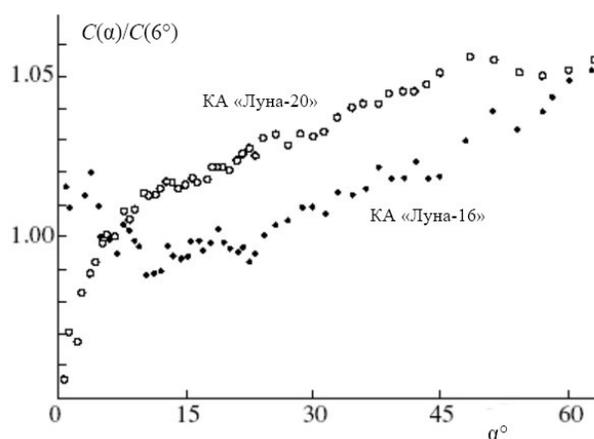


Рис. 3.37. Фазовые зависимости нормированного при  $6^\circ$  показателя цвета  $C(0,65/0,43 \text{ мкм})$  для материкового (КА «Луна-20», образец 2002-1.6) и морского (КА «Луна-16», образец 1603), соответственно, открытые кружки и точки

Возможны тонкие особенности поведения показателей цвета Луны при малых углах фазы; об этом свидетельствуют, в частности, лабораторные колориметрические измерения лунного грунта, выполненные Л. А. Акимовым в 1977 году. На рис. 3.37 приведены фазовые

зависимости цветового отношения  $C(0,65/0,43 \text{ мкм})$  для материкового и морского грунтов. Различия поведения в пределах нескольких процентов хорошо заметны. Морской зрелый грунт КА «Луна-16» показывает минимум в фазовой зависимости цвета примерно на  $15^\circ$ . В то же время, материковый незрелый реголит КА «Луна-20» не имеет такой особенности. Пока никому не удалось найти эти особенности, измеряя Луну; впрочем, никто и не пытался это сделать.

### 3.3. Поляриметрия

*Этапы истории.* Поляризацию света, рассеянного Луной, открыл в 1811 году Доменик Франсуа Араго – выдающийся французский ученый и политик, успевший, помимо исследований Луны и прочих научных занятий, участвовать в управлении правительственными войсками, подавлявших Парижскую коммуну. Д. Ф. Араго установил, что линейная поляризация лунного света максимальна в квадратурах. Он использовал следующее (им же предложенное) определение степени линейной поляризации света:  $P = (I_{\perp} - I_{\parallel}) / (I_{\perp} + I_{\parallel})$ , где  $I_{\perp}$  и  $I_{\parallel}$  компоненты интенсивности, соответствующие перпендикулярной и параллельной ориентации оси поляроида относительно плоскости рассеяния. Далее мы будем использовать именно это определение. Д. Ф. Араго интерпретировал возникновение поляризации влиянием лунной атмосферы, что оказалось неправильным. Лишь в 1863 году аббат Арканжело Секки правильно предположил, что причиной поляризации света, рассеянного Луной, является сама лунная поверхность. Он подтвердил, что степень поляризации света, рассеянного морями, выше, чем в случае материков и что плоскость поляризации перпендикулярна плоскости рассеяния.

Надо сказать, что уже в 70-е годы позапрошлого столетия сложилось довольно четкое понимание задач поляриметрических исследований Луны. Так, Ф. Ф. Петрушевский, неоднократно цитировавшийся выше, в своем плане исследований Луны 1873 года писал: «Цель исследования Луны полярископами заключается в следующем: напряженность поляризованного света может дать некоторое понятие о зеркальности и кристалличности рассматриваемой местности. Определяя при различных высотах Солнца количество поляризованного света для какой-нибудь местности, удастся, может быть, найти угол, если не полной, то наибольшей поляризации для этой местности. Так как есть связь между поляризацией и преломлением света, хотя бы и непрозрачного тела, а также известны указания на соотношение показателя преломления света и плотностью тела, может быть, исследования

поляризованного света позволят открыть новый признак тел при поверхности Луны. Помимо этой отдаленной цели, количество отраженного и поляризованного света некоторой поверхностью само по себе представляет положительный признак, так что польза собирания материалов относительно распределения поляризации света на Луне не подлежит сомнению».



Рис. 3.38. Французский астроном Бернар Лио (1897–1952), один из основателей планетной поляриметрии

Работа кардинальной значимости для поляриметрии планет была проведена Бернаром Лио в 1929 году (см. рис. 3.38). Прежде всего, в этой работе впервые сообщается об открытии во время наблюдений 1922 года ветви отрицательной поляризации света, рассеянного Луной при малых углах фазы. Аналогичный эффект был найден Лио и в лабораторных измерениях порошков различного происхождения. Благодаря сопоставлению лунной ветви отрицательной поляризации с данными для возможных лабораторных аналогов, Лио сделал наиболее удачное предсказание возможного материала лунной поверхности. Им оказался мелко раздробленный темный базальт. Классическая работа Лио содержит богатейший экспериментальный материал, который до сих пор не утратил своего значения. Поражает то, что Лио удалось с помощью визуальных измерений, с использованием полярископа, достичь точности 0,1 %, что довольно типично для аналогичных измерений современными приемниками излучения. На рис. 3.7 приведена интегральная фазовая зависимость степени линейной поляризации света, рассеянного Луной. Видны две близкие кривые, которые соответствуют фазовым углам до и после полнолуния. Максимум фазовой кривой, снятой после полнолуния, оказывается выше. Это наблюдается благодаря тому, что в западной части лунного диска моря занимают большую часть поверхности, чем в восточной половине (моря поляризуют свет сильнее, чем материки).

В последующие годы поляриметрией Луны, в основном, занимался во Франции Одуэн Дольфюс, ученик Лио и большой энтузиаст поляриметрии планет. Ряд исследователей в

нескольких обсерваториях СССР также вели работы в этой области. В частности, на Абастуманской астрофизической обсерватории Отар Кварцхелия в начале 80-х годов провел большой цикл дискретных поляриметрических измерений. Кроме того, в той же обсерватории в течение многих лет получались изображения Луны с применением поляризационного светофильтра, на основе которых был создан поляриметрический атлас для видимого полушария (В. П. Джапиашвили и А. Н. Король 1982 год).

Надежные наблюдения циркулярной поляризации света, рассеянного Луной, были выполнены в 60-х годах прошлого столетия М. М. Поспергелисом в ГАИШ МГУ (Москва). Эти измерения показали очень слабую поляризацию (около 0,001 %) на лунных полюсах, причем эта поляризация изменяла знак при переходе через лунный экватор. Отметим, что соображения симметрии, применительно к круговой поляризации, требуют именно такого ее поведения. Едва ли можно ожидать какого-либо практического развития исследований циркулярно поляризованного света Луны: слишком мал измеряемый эффект. Невероятно тяжелый и самоотверженный труд, связанный с этими рекордными по точности никем не перекрытыми измерениями 40-летней давности, привели, в конце концов, М. М. Поспергелиса к увлечению проблемами Общей Теории Поля, увлечению, которому он посвятил более 25 лет, работая на Наблюдательной станции НИИ Астрономии ХНУ им. В. Н. Каразина.

Таким образом, далее имеет смысл вести речь только о линейной поляризации.



Рис. 3.39. Изображения Луны, полученные при всех равных условиях в синих лучах для двух разных ориентаций поляризационного фильтра: слева (а) ось поляроида перпендикулярна плоскости рассеяния, а справа (b) – параллельна

На первый взгляд, поляриметрия Луны кажется соблазнительно доступной. Вблизи квадратур величина положительной поляризации настолько велика, что была визуальна

обнаружена Араго с помощью полярископа. Дополнительной иллюстрацией является рис. 3.39, на котором представлена пара строго равноконтрастных фотографических изображений Луны в последней четверти, полученных при двух положениях поляроида в синих лучах ( $\lambda = 0,43$  мкм); ось поляроида перпендикулярна – (а) и параллельна – (b) плоскости рассеяния. Легко видеть, что изображения несколько отличаются друг от друга – (а) выглядит как бы менее контрастным, по сравнению с (b), хотя фотоснимки были получены на одинаковых фотопластинках и обрабатывались одновременно в одинаковых условиях, т.е. имеют один и тот же наклон характеристической кривой. Различия изображений, очевидно, связаны с разной поляризующей способностью лунных морей и материков. К сожалению, эти хорошо заметные различия пока не удалось в достаточной мере использовать для прямых оценок физических свойств лунной поверхности. Трудности обусловлены тем, что при больших фазовых углах степень поляризации света, рассеянного лунной поверхностью, тесно коррелирует с ее альбедо (эффект Умова). Поэтому информацию, которую несет степень поляризации при больших фазовых углах, можно в первом приближении получить, исследуя альбедо, что проще. В одной из работ автора этой книги 1980 года было показано, что информативными являются отклонения от линии регрессии корреляционной зависимости альбедо – степень поляризации. Для количественного описания этих отклонений был введен параметр поляриметрических аномалий, который оказался тесно связанным с некоторыми структурными характеристиками лунной поверхности, такими как пористость и средний размер частиц реголита. Тогда же были построены первые изображения Луны в этом параметре (см. ниже). Автору посчастливилось увидеть Луну такой, какой ее до этого никто не видел.

***Отрицательная поляризация и проблема постоянства ориентация плоскости поляризации.*** Прямой солнечный свет является неполяризованным по уровню чувствительности  $10^{-6}$ ; это показали измерения авторитетного астронома-поляриметриста Кэмпса, проведенные в 1987 году. При рассеянии лунной поверхностью солнечного света он частично линейно поляризуется. Причем при фазовых углах больше  $23^\circ$  эта поляризация положительна – это означает, что электрический вектор отраженного Луной света имеет преимущественные колебания в направлении, перпендикулярном плоскости рассеяния, а при фазовых углах меньше  $23^\circ$  эта поляризация отрицательна, т.е. электрический вектор отраженного Луной света имеет преимущественные колебания в плоскости рассеяния. Исследования отрицательной ветви поляризации сложны, т.к. приходится измерять вариации малых величин. Природа этой поляризации до сих пор не совсем понятна. В настоящее время известно, что широкие ветви отрицательной поляризации света, рассеянного твердыми

поверхностями безатмосферных небесных тел (в том числе Луны), скорее всего, обусловлены одночастичным рассеянием; при этом некогерентное многократное рассеяние может лишь ослаблять поляризацию. Это иллюстрируется рис. 3.19 б, на котором показаны измерения степени поляризации как функции фазового угла для частиц пепла вулкана Пинатубо. Измерения проведены в синих лучах. На рис. 3.19 б сведены вместе измерения одиночных частиц, выполненные с помощью нефелометра Амстердамского Университета (Э. Вольтен), и порошка, состоящего из этих частиц, который исследовался с помощью лабораторного поляриметра НИИ Астрономии ХНУ им. В. Н. Каразина (С. Ю. Бондаренко). Как видно, отрицательная поляризация для изолированных частиц может достигать 4 %. Когда эти частицы образуют поверхность, глубина ветви уменьшается до 1 % за счет влияния на альbedo поверхности межчастичного некогерентного многократного рассеяния. Таким образом, ветвь отрицательной поляризации, которая наблюдается у этого образца вулканического пепла и, вероятно, Луны, формируется одночастичным рассеянием. В некоторой степени, отрицательная ветвь поляризации света, рассеянного лунной поверхностью при углах фазы менее  $10^\circ$ , может быть связана с интерференционным эффектом, который возникает при прохождении света в процессе рассеяния низкой кратности по так называемым “прямым” и “обращенным во времени” траекториям. Напомним, что такая интерференция является одной из причин возникновения опозиционного эффекта яркости. Впервые механизм когерентного усиления обратного рассеяния был предложен для объяснения отрицательной поляризации при малых фазовых углах в Харьковской астрономической обсерватории (Шкуратов, 1985 год).

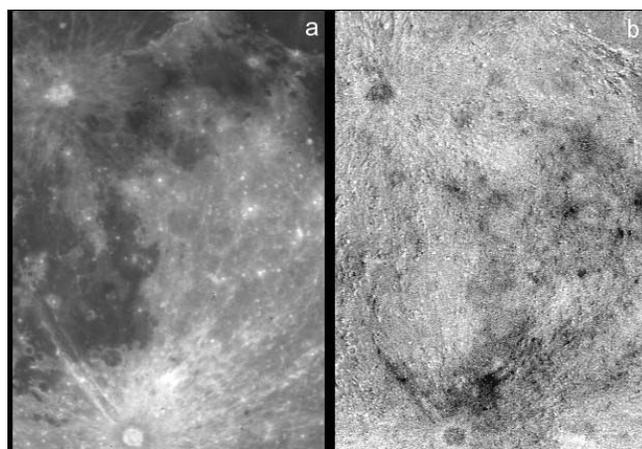


Рис. 3.40. Изображение центральной части лунного диска в синих лучах – (а). Распределение параметра  $|P_{\min}|$  того же участка в синих лучах – (б)

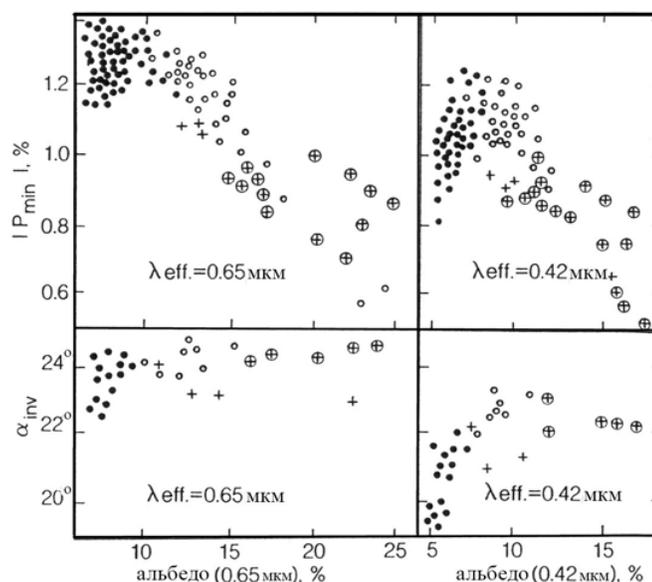


Рис. 3.41. Зависимости поляризационных параметров  $|P_{\min}|$  и  $\alpha_{\text{inv}}$  от альбеда в красных (левые панели) и синих (правые панели) лучах. Черными точками представлены морские участки, крестиками – молодые морские кратеры, открытыми кружками – материковые участки, открытыми кружками с вписанными плюсами – молодые материковые кратеры

Величина минимума отрицательной поляризации, будучи всего около 1%, варьируется по лунной поверхности в пределах примерно от 0,5 до 1,5%. В 1993 году Н. В. Опанасенко сделал попытку получить изображение лунной поверхности, передающее распределение параметра  $|P_{\min}|$  (см. рис. 3.40). Качественно это изображение согласуется с его же данными дискретных поляриметрических измерений (рис. 3.41). Оказалось, что наибольшие значения параметра  $|P_{\min}|$  характерны для участков поверхности со средним альбеда. На изображении хорошо выделяются лучевые системы кратеров, имеющие пониженные значения  $|P_{\min}|$ . Корреляционные диаграммы на рис. 3.41 показывают, что в красных лучах существует хорошо выраженная обратная корреляция  $|P_{\min}|$  и альбеда, тогда как  $\alpha_{\text{inv}}$  практически не зависит от альбеда. В противоположность этому, в синих лучах, как уже отмечалось, существует двузначная зависимость  $|P_{\min}|$  от альбеда и сильная нелинейная зависимость  $\alpha_{\text{inv}}$  от альбеда.

Картографические исследования параметров отрицательной поляризации необходимо продолжить. В частности, следующим шагом могло бы быть построение изображения, передающего распределение по лунной поверхности величины угла инверсии. Эта величина тесно связана с размерами частиц светорассеивающей поверхности и степенью ее оптической разнородности в масштабах порядка длины световой волны. Согласно лабораторным измерениям тонкодисперсных смесей веществ с разным альбеда (лунный реголит является

примером такой смеси), глубина отрицательной ветви поляризации существенно зависит от степени оптической разнородности смеси. Таким образом, возможно, что с помощью измерений параметров отрицательной ветви удастся развить методику дистанционного определения таких нетрадиционных параметров структуры, как соотношение количеств и степень альбедного контраста смеси светлого и темноцветного компонентов лунного грунта.

Состояние линейной поляризации рассеянного света характеризуется не только степенью поляризации, но и ориентацией плоскости поляризации. Наблюдения, проведенные Лио (1929 год), показали, что в случае положительной поляризации эта плоскость практически совпадает (в пределах  $\pm 0,5^\circ$ ) с плоскостью рассеяния, т.е. с плоскостью лунного фотометрического экватора. Физически это вполне объяснимо. Для возникновения отклонений плоскости поляризации от плоскости рассеяния необходимо, чтобы исследуемая поверхность обнаруживала бы некоторое физически выделенное направление. Например, поверхность может иметь анизотропную структуру или быть наклоненной так, что средняя нормаль лежит вне плоскости рассеяния.

Поверхность Луны в масштабах характерного размера светорассеяния изотропна. Однако местные наклоны, особенно в материковой части (валы крупных кратеров), достаточно велики для того, чтобы влиять на положение плоскости поляризации. Локальные вариации этого положения можно пытаться обнаружить, производя съемку лунной поверхности с помощью поляризационного светофильтра при нескольких (не менее трех) ориентациях его оси. Особенно интересны такого рода измерения для областей лунной поверхности, близких к терминатору, где влияние наклона поверхности проявляется наиболее сильно.

Область малых фазовых углов (при которых проявляется отрицательная ветвь поляризации) также интересна для изучения вариаций ориентации плоскости поляризации. Так, при углах фазы около  $1 - 2^\circ$  Лио (1929 год) обнаружил вблизи лимба слабую радиальную составляющую поляризации рассеянного Луной светового потока. Этот эффект был подтвержден Н. В. Опанасенко в 1990 году. Причины возникновения этой поляризации пока не понятны. Необходимы дополнительные наблюдения.

Проблема, связанная со сменой знака поляризации при прохождении точки инверсии, интригует наблюдателей, исследующих Луну, на протяжении многих лет. Как происходит инверсия: скачком или наблюдается постепенный поворот плоскости поляризации? Из общих соображений следует, что постепенный поворот плоскости поляризации может наблюдаться только в том случае, если структура светорассеивающей поверхности обладает каким-либо выделенным направлением и/или если эта поверхность имеет наклон, который нарушает симметрию задачи относительно плоскости рассеяния.

Поляриметрические измерения Кварацхелия (1988 год) и Опанасенко (1994 год) различных участков лунной поверхности не показали достоверных признаков постепенного поворота плоскости поляризации при прохождении точки инверсии. Однако такого рода измерения можно было бы повторить, проводя измерения в лимбовой зоне Луны вблизи фотометрических полюсов, – здесь угол отклонения средней нормали поверхности от плоскости рассеяния достаточно велик. Северный и южный фотометрические полюса должны давать разные направления поворота плоскости поляризации. Следует особо подчеркнуть большую зависимость результатов измерений этого эффекта от точности учета вектора паразитной (инструментальной) поляризации. Таким образом, предлагаемые измерения должны быть проведены с особой тщательностью.

**Положительная поляризация и параметр поляриметрических аномалий.** При углах фазы больше примерно  $23^\circ$  у Луны наблюдается положительная поляризация (рис. 3.7). Положительная ветвь простирается в сторону больших фазовых углов вплоть до углов около  $165^\circ$  – максимум, который достигнут в наземных наблюдениях. Как неоднократно отмечалось, степень положительной поляризации тесно коррелирует с альбедо  $A$  поверхности (эффект Умова). Эта корреляция близка к линейной, если использовать логарифмические оси. Особенно тесной она оказывается для максимальной степени поляризации  $P_{\max}$ . В этом случае корреляция настолько сильна, что изучение параметра  $P_{\max}$  само по себе теряет смысл; необходимо исследовать отклонения от линии регрессии этой корреляции (Шкуратов, 1980 год). Позднее этот подход стал развиваться и другими авторами в России (Шевченко, 1995 год) и Франции (Дольфюс, 1998 год).

По измерениям 142 участков лунной поверхности при длине волны  $0,53$  мкм Дольфюс в начале 70-х годов прошлого столетия получил следующее уравнение регрессии для параметров  $A$  и  $P_{\max}$ :  $\lg A + a \lg P_{\max} = b$ , где  $a = 0,724 \pm 0,005$  и  $b = -1,81 \pm 0,02$ ; при этом коэффициент корреляции оказался близок к  $0,96$ . Для описания отклонений от линии регрессии можно использовать величину  $b$  как параметр  $b = \log AP_{\max}^a$ . Оказалось, что этот параметр тесно связан со средним размером частиц светорассеивающей поверхности  $d$ . С помощью данных лабораторных измерений лунного грунта удалось даже построить калибровочную зависимость ( $d[\text{мкм}] = 0,03 \exp(-2,9b)$ ), которая применялась для оценок вариаций среднего размера частиц лунной поверхности.

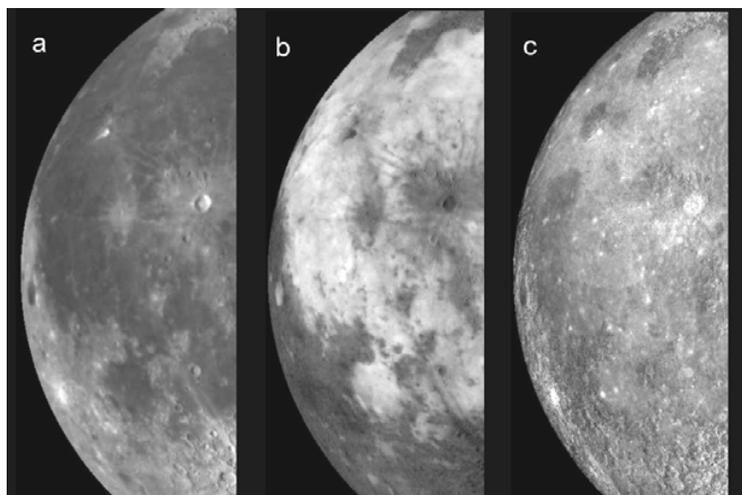


Рис. 3.42. Изображение западной части видимого полушария Луны с компенсированной долготно-широтной зависимостью яркости – (a), распределение степени линейной поляризации по этому участку – (b), распределение параметра  $b = \log AP_{\max}^a$  по тому же участку – (c)

На рис. 3.42 приведены изображения, построенные Н. В. Опанасенко по результатам фотополариметрической съемки Луны, выполненной на 60-см телескопе (гора Майданак) в синих лучах ( $\lambda = 0,42$  мкм) при фазовом угле  $88^\circ$ . При съемке ось поляроида ориентировалась перпендикулярно либо параллельно плоскости рассеяния. Затем были получены изображения, которые передают распределение яркости с компенсированным долготно-широтным ходом яркости (рис. 3.42 a), степени поляризации (рис. 3.42 b) и параметра  $b = \log AP_{\max}^a$  (рис. 3.42 c). Первые два изображения сильно антикоррелируют друг с другом. Последнее изображение выглядит совершенно непохожим на предыдущие два; оно качественно передает распределение среднего размера частиц (темным тонам отвечают меньшие размеры частиц). Из приведенного изображения (рис. 3.42 c) видно, что материковая поверхность в среднем более мелкозерниста. Яркие молодые кратеры имеют грунт со сравнительно большим средним размером частиц, что согласуется с тем, что это грунт незрелый. Мелкодисперсный материал характерен для областей, в которых возможно присутствие пирокластических отложений – это область холмов Мариуса, плато Аристарха и пик Рюмкер.

Было бы очень заманчиво использовать телескоп Хаббла для поляриметрии Луны с пространственным разрешением около 100 м. Этот телескоп имеет камеру, позволяющую проводить поляриметрию в коротковолновой части спектра с высокой точностью. Такая возможность уже использовалась для исследования Марса в великое противостояние 2003 года. В ультрафиолете степень поляризации света, отраженного Луной при больших фазовых углах, очень высока. Предположительно, она может достигать в максимуме 40–50 %.

Существует и другая возможность провести поляризметрию Луны с высоким пространственным разрешением с Земли. Для этой цели можно использовать телескопы Южно-европейской обсерватории VLT (Very Large Telescope, ESO) обсерватории Паранал (Чили). Эта обсерватория имеет очень хороший астроклимат, атмосферное дрожание астрономических изображений здесь одно из самых низких в мире (в среднем около  $0,5''$ ). Эта уникальная обсерватория имеет четыре больших телескопа, каждый с диаметром главного зеркала восемь метров. Предполагается, что эти телескопы будут работать в режиме интерферометра большой базы (около 100 метров). Это обеспечит возможности исследовать Вселенную с фантастическим пространственным разрешением. Каждый из телескопов оснащен камерой с адаптивной оптикой, которая позволяет проводить грубую коррекцию падающего волнового фронта. Это дает возможность существенно ослабить влияние атмосферного дрожания. На этих телескопах удастся получать изображения с угловым разрешением  $0,07''$ . На рис. 3.43 представлено изображение северной части дна кратера Тарунций (диаметр 53 км), полученное с помощью камеры с адаптивной оптикой, установленной на восьмиметровом телескопе «Yerun». Этот кратер находится севернее Моря Изобилия. Пространственное разрешение снимка около 100 м/пиксель. Телескопы оснащены панорамными поляризметрами, которые могут работать в комплексе с адаптивной камерой в спектральном диапазоне 1 – 5 мкм. Хотя степень поляризации Луны в области 1 – 2 мкм низкая (всего несколько процентов в максимуме), точность поляризметрии, необходимая для исследования параметра  $AP_{\max}^a$ , может вполне быть обеспечена.



Рис. 3.43. Изображение северной части дна кратера Тарунций, полученное с помощью адаптивной камеры телескопа «Yerun» обсерватории Паранал (Чили)

Как и в случае отрицательной поляризации, можно ставить вопрос о картографическом исследовании таких характеристик степени положительной поляризации, как: угол фазы, при

котором достигается максимум поляризации, ширина ветви положительной поляризации и степень ее симметрии. Как показывают данные лабораторных измерений образцов порошкообразных поверхностей разного происхождения, эти три характеристики являются диагностическими. В частности, ширина ветви положительной поляризации может характеризовать ширину распределения частиц лунного реголита по размерам. Удачная попытка построить изображение, передающее распределение  $\alpha_{\max}$ , была предпринята В. В. Корохиным и Ю. И. Великодским (1996 год). На рис. 3.44 представлено такое изображение для восточной четверти Луны; оно было получено при длине волны 0,46 мкм. Распределение этой характеристики довольно хорошо коррелирует с альбедо лунной поверхности: чем выше альбедо, тем меньше  $\alpha_{\max}$ .

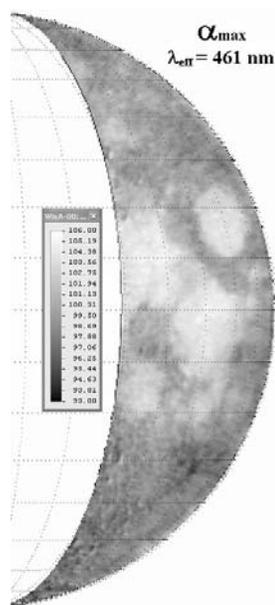


Рис. 3.44. Изображение, передающее распределение  $\alpha_{\max}$  для восточной четверти Луны в синих лучах

Отметим одну наблюдательную поляриметрическую задачу. Лабораторные измерения некоторых порошкообразных порошков с разным размером частиц показывают, что в некоторых случаях в области фазовых углов больше  $160^\circ$  может наблюдаться вторая ветвь положительной поляризации, предположительно интерференционной природы. Конечно, наблюдения Луны при таких фазовых углах очень сложны – слишком мало угловое расстояние между Солнцем и Луной. Однако, используя телескопы и поляриметры, для которых приняты меры по ослаблению вклада рассеянного света, можно рассчитывать найти, по крайней мере, признаки второй ветви положительной поляризации (если у Луны она вообще существует).

Здесь уместно отметить, что с помощью коронографа, поднятого на ракете в 1967 году, удалось сфотографировать лунный серп при фазовом угле  $178^\circ$ .



Рис. 3.45. Изображение Луны в пепельном свете. Справа виден серп (передержка), освещенный Солнцем

Рассмотрим интересную задачу, решение которой находится лишь в зачаточной фазе. Одной из характеристик лунной поверхности является коэффициент деполаризации света. Распределение этой величины можно получить, исследуя пепельный свет Луны (рис. 3.45). Правильное объяснение происхождению пепельного света Луны – как света Земли, отраженного Луной – дал Леонардо да Винчи и, затем, Галилео Галилей. Часть лунной поверхности видимого полушария Луны, находящаяся в тени, освещается светом, отраженным Землей. При фазовом угле Земли (наблюдаемой с Луны) около  $90^\circ$  этот свет поляризован. Степень этой поляризации зависит от состояния земной атмосферы и может достигать нескольких десятков процентов. Поляризованный свет от Земли, рассеиваясь лунной поверхностью, деполаризуется, причем разные участки поверхности деполаризуют его по-разному. Как показали исследования Дольфюса (1962 год), более светлые участки поверхности деполаризуют свет сильнее, чем более темные. Отметим, что измерения Дольфюса, несмотря на то, что они были выполнены почти 50 назад, является пока единственными такого рода (во время своего визита в Харьков в 1994 году О. Дольфюс рассказывал, насколько трудно выполнять такие исследования – катастрофически мешает рассеянный свет).

Корреляция “деполаризация – альbedo”, как и корреляция “степень положительной поляризации – альbedo”, – проявление эффекта Умова. Поэтому есть основания думать, что параметр, характеризующий отклонения от линии регрессии корреляции “деполаризация – альbedo”, окажется диагностичным для определения структурных особенностей рассеивающей поверхности, например, для оценки среднего размера частиц реголита. Следует подчеркнуть,

что наблюдения пепельного света Луны, если они проводятся с Земли, всегда соответствуют лунному фазовому углу близкому, к нулю (строго нулевого фазового угла не получается из-за того, что Земля имеет при взгляде с Луны конечный угловой диаметр около  $2^\circ$ ). Таким образом, даже обычные изображения участков Луны в пепельном свете представляют большой интерес, т.к. передают распределение альбедо при малом фазовом угле. Такие данные потенциально могут дать информацию о вариациях амплитуды оппозиционного эффекта по лунной поверхности. В частности, многие наблюдатели отмечали высокий контраст (относительно окружающих участков) у лучевых систем лунных кратеров, что говорит о сравнительно высокой амплитуде оппозиционного эффекта этих областей.

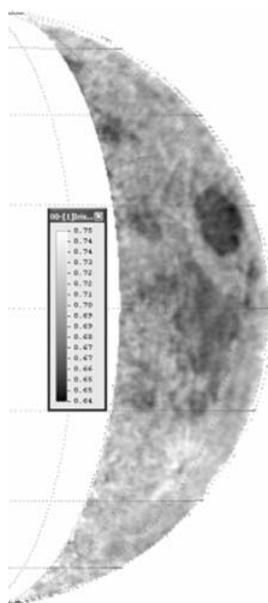


Рис. 3.46. Изображение восточной четверти Луны, представляющее отношение

$$P_{\max}(0,67 \text{ мкм})/P_{\max}(0,46 \text{ мкм})$$

Если проводить поляризметрию Луны в нескольких участках спектра, то можно исследовать так называемый спектрополяриндекс  $C_p(\lambda_1/\lambda_2)$ . Он определяется по аналогии с показателем цвета в колориметри, как  $C_p(\lambda_1/\lambda_2) = P(\lambda_1)/P(\lambda_2)$ , где  $P(\lambda)$  – степень поляризации при длине волны  $\lambda$ . В принципе эта величина может исследоваться при любом фазовом угле, для которого величины  $P(\lambda_1)$  и  $P(\lambda_2)$  заметно отличаются от нуля, в том числе, в максимуме поляризации. Данные о связи показателя  $C_p(\lambda_1/\lambda_2)$  с другими физическими характеристиками поверхности немногочисленны. Первая попытка построить изображение, передающее распределение отношения  $P_{\max}(0,67 \text{ мкм})/P_{\max}(0,46 \text{ мкм})$ , была сделана В. В. Корохиным и Ю. В. Великодским. На рис. 3.46 показано такое изображение. Хорошо видно, что это распределение в целом коррелирует с альбедо, однако в деталях отличия могут быть велики.

Было бы интересно получить изображения, подобные представленным на рис. 3.44 и 3.46, с высоким пространственным разрешением.

\*\*\*

Луна – уникальный астрономический объект. В наше время изошренной техники, сложных и дорогостоящих научных экспериментов она дает возможность проводить серьезные исследования очень простыми методами, фактически доступными любителям астрономии. В оптике Луны имеется множество нерешенных проблем. Прежде всего, требует развития поляриметрия. Удивительно и несправедливо то, что поляриметрия в астрофизике, начавшись с наблюдений Луны, дала так мало для изучения самой Луны. Сделаны лишь первые шаги в картировании параметра  $b = \log AP_{\max}^a$ , который может использоваться для определения степени зрелости лунного грунта. Перспективным методом кажется построение изображений фазовых отношений; это путь дифференцировать поверхность по степени ее шероховатости, детектировать каменные поля, а в будущем определять следы техногенной деятельности. Луна дает шанс ученым, особенно молодым, проявить себя в области науки, в которой не «толкаются локтями»; для науки не так важно чем занимаешься, важно, как ты это делаешь.

#### 4. ПРОГНОЗИРОВАНИЕ СВОЙСТВ ПОВЕРХНОСТИ ПО КОЛОРИМЕТРИЧЕСКИМ ДАННЫМ

В предыдущей главе мы дали общий обзор оптических методов исследования Луны. Здесь мы покажем, как колориметрические измерения характеристик лунной поверхности позволяют делать количественные оценки некоторых ее физических и химико-минералогических параметров. В этом направлении сделаны пока лишь первые шаги, но они заложили фундамент будущей количественной дистанционной диагностики Луны. В этой главе мы представим результаты картирования: (1) химических и минералогических параметров лунного реголита, (2) толщины реголитового слоя (используются также радиолокационные данные) и (3) содержания в лунном грунте гелия-3.

##### 4.1. Химический состав реголита

Химические элементы Si, O, Fe, Ti, Al, Ca и Mg являются главными элементами в составе лунных пород. Часто элементное содержание пересчитывают в содержание соответствующих окислов, например, SiO<sub>2</sub>, FeO, TiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, CaO и MgO. Далее используются оба представления.

Информация о содержании и распределении этих и других элементов по лунной поверхности была получена методами дистанционной спектроскопии, оптической, нейтронной, гамма и рентгеновской. Пространственное разрешение имеющихся данных разное, но, тем не менее, их сравнение и совместное использование вполне возможно. Существует несколько методов оптической диагностики состава лунного грунта. Главная проблема в этих методах – это разделение влияния на оптические характеристики зрелости реголита и его состава.

**Метод Люси.** Один из методов разделения такого влияния был предложен известным планетологом Полом Люси (см. рис. 4.1) в 1995 году. Метод Люси опирается на результаты лабораторных оптических исследований лунного грунта, которые показали закономерность в расположении на диаграмме  $A(0,75 \text{ мкм}) - C(0,95/0,75 \text{ мкм})$  точек, отвечающих образцам разной степени зрелости и состава. Оказалось, что образцы с близким содержанием железа, но различной степенью зрелости образуют веерные последовательности, приблизительно ориентированные в направлении некоторой особой точки диаграммы (точка сверхзрелости),

причем расстояние от этой точки характеризует степень зрелости образца: чем меньше расстояние, тем выше зрелость.



Рис. 4.1. Пол Люси, профессор Гавайского Университета, специалист в области исследования Луны оптическими методами

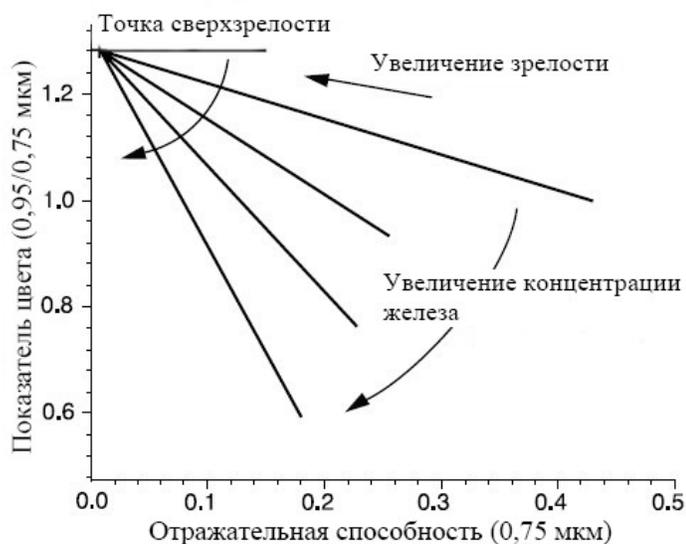


Рис. 4.2. Схема оптической диаграммы  $A(0,75 \text{ мкм}) - C(0,95/0,75 \text{ мкм})$

Используя это, Люси (1995 год) предложил перейти на плоскости  $A(0,75 \text{ мкм})$ ,  $C(0,95/0,75 \text{ мкм})$  к новой системе полярных координат с центром в точке сверхзрелости (рис. 4.2). В этом случае полярный угол оказывается связанным с содержанием железа, а радиальная координата – со зрелостью образцов грунта. Аналогичный подход для «разделения» влияния на альбедо  $A(0,750 \text{ мкм})$  и показатель цвета  $C(0,750/0,415 \text{ мкм})$  степени зрелости реголита и содержания в нем двуоксида титана был предложен позднее Блюитом и др. (1998 год). Для вычисления распределение  $\text{FeO}$ ,  $\text{TiO}_2$  и так называемого параметра оптической

зрелости *OMAT* по лунной поверхности использовались данные КА «Клементина». Диаграммы  $A(0,750 \text{ мкм}) - C(0,950/0,750 \text{ мкм})$  и  $A(0,750 \text{ мкм}) - C(0,750/0,415 \text{ мкм})$  строились с использованием измерений образцов, доставленных экспедициями «Аполлон», и оптических данных КА «Клементина» высокого (100 м) пространственного разрешения для мест отбора этих образцов. Анализ этих двух диаграмм позволил найти для каждой из них точку сверхзрелости, в которую была помещена новая система координат, в которой естественно разделяются влияния состава и зрелости грунта. С помощью диаграмм были найдены эмпирические формулы, позволяющие определять состав и оценивать оптическую зрелость по нелинейным комбинациям альбедо при длинах волн 0,950, 0,750 и 0,415 мкм:

$$\text{FeO}[\%] = -17,43 \left\{ \arctg \left[ \frac{A(0,950)/A(0,750) - y}{A(0,750) - x} \right] \right\} - 7,56, \quad (14)$$

$$\text{TiO}_2[\%] = 3,71 \left\{ \arctg \left[ \frac{A(0,415)/A(0,750) - z}{A(0,750)} \right] \right\}^{5,98}, \quad (15)$$

где  $A(\lambda)$  альбедо (%) при данной длине волны  $\lambda$ ,  $x = 0,08$ ,  $y = 1,19$  и  $z = 0,42$ . Формула для вычисления параметра оптической зрелости *OMAT* с помощью диаграммы  $A(0,750 \text{ мкм}) - C(0,950/0,750 \text{ мкм})$  имеет вид:

$$\text{OMAT} = \sqrt{(A(0,750) - x)^2 + \left( \frac{A(0,950)}{A(0,750)} - y \right)^2}. \quad (16)$$

Параметр *OMAT* коррелирует с обычной степенью зрелости лунного реголита  $I_s/\text{FeO}$  (см. ниже), хотя эта связь не такая тесная, как хотелось бы. Любопытно отметить, что параметры *OMAT*, найденные по паре  $A(0,750 \text{ мкм}), C(0,950/0,750 \text{ мкм})$  и паре  $A(0,750 \text{ мкм}), C(0,415/0,750 \text{ мкм})$ , совершенно не совпадают друг с другом. Сам Пол Люси избегает комментировать это и предлагает использовать только *OMAT*, определенный по диаграмме  $A(0,750 \text{ мкм}), - C(0,950/0,750 \text{ мкм})$ . Здесь также уместно добавить, что теоретическое моделирование диаграмм  $A(0,750 \text{ мкм}) - C(0,950/0,750 \text{ мкм})$  и  $A(0,750 \text{ мкм}) - C(0,750/0,415 \text{ мкм})$  и лабораторный эксперимент показывают, что, на самом деле, никаких точек сверхзрелости на этих диаграммах нет; но есть область (каустика), где приближенно сбегаются оси «поток», вдоль которых изменяется зрелость при приблизительно одинаковом содержании железа (или титана). Таким образом, метод Люси является методом, позволяющим оценивать состав лунной поверхности только в первом приближении.

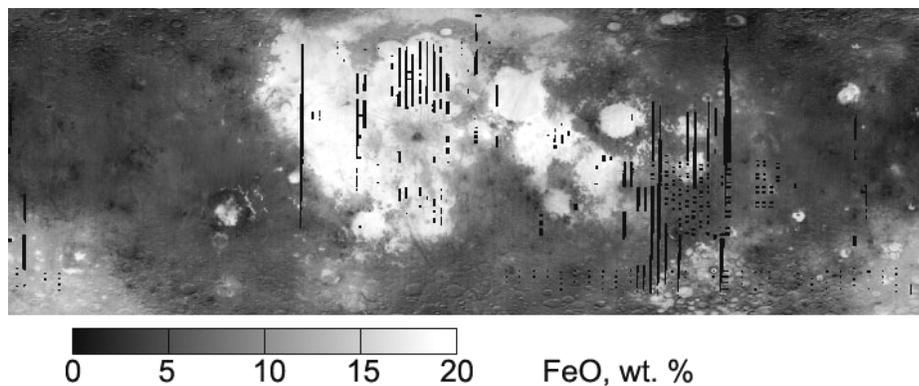


Рис. 4.3. Распределение FeO по лунной поверхности, построенное методом Люси по данным КА «Клементина»

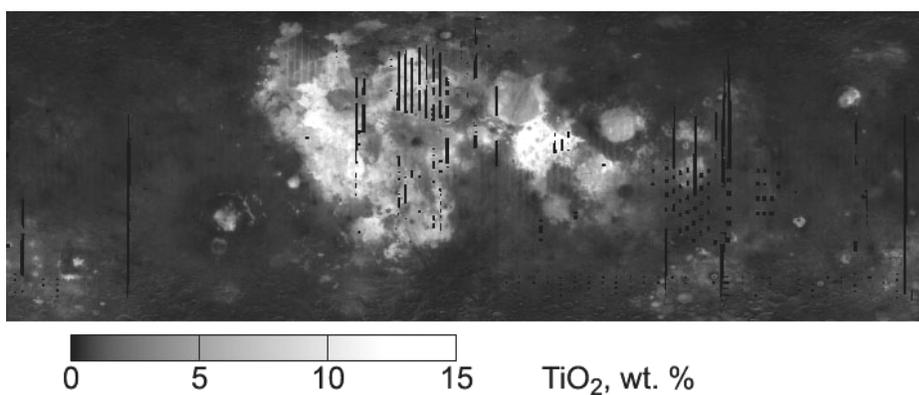


Рис. 4.4. Распределение TiO<sub>2</sub> по лунной поверхности, построенное методом Люси по данным КА «Клементина»

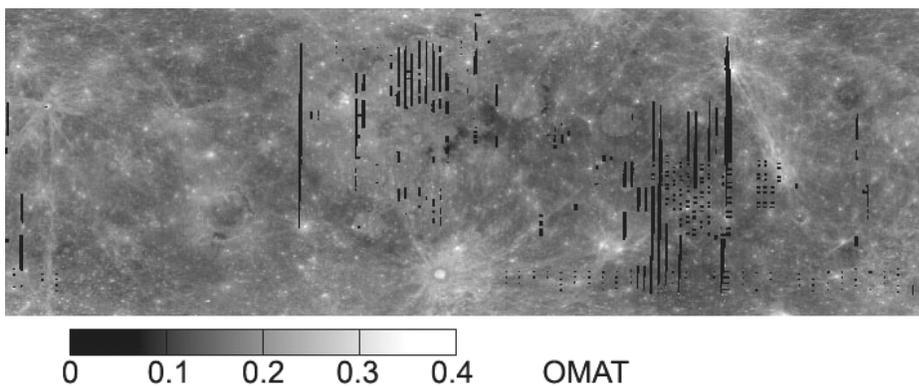


Рис. 4.5. Распределение параметра *OMAT* по лунной поверхности, построенное методом Люси по данным КА «Клементина»

На рис. 4.3 приведена карта распределения железа по лунной поверхности, построенная по данным КА «Клементина» с помощью формулы (14). Это изображение сильно напоминает распределение альbedo (негатив). Однако в отличие от альbedo на изображении FeO контраст молодых материковых кратеров и их лучевых систем заметно приглушен, что рассматривается

как критерий правильности работы метода. Люси считает, что состав реголита в этих кратерах не должен отличаться от состава материала окрестностей. Распределение  $TiO_2$  по лунной поверхности, построенное методом Люси (формула (15)), представлено на рис. 4.4. Оно похоже на изображение для показателя цвета  $C(0,750/0,415 \text{ мкм})$  (рис. 2.21). Контрасты молодых материковых кратеров в этом случае тоже приглушены. Метод Люси дает завышенные значения содержания  $TiO_2$ ; едва ли можно ожидать 18 % концентраций этого окисла в лунном грунте, что предсказывается картой прогноза на рис. 4.4, например, в Море Спокойствия. Распределение параметра *OMAT* по лунной поверхности представлено на рис. 4.5. Оно напоминает изображение для показателя цвета  $C(0,95/0,75 \text{ мкм})$  (рис. 2.22). Здесь сильно выделяются молодые кратеры и их лучи, что согласуется с низкой зрелостью их реголита.

**Использование данных LSCC.** Аббревиатура LSCC означает Lunar Soil Characterization Consortium. Этот консорциум был создан Л. Тэйлором (рис. 4.6) и К. Питерс для того, чтобы исследовать химический и минеральный состав нескольких десятков представительных образцов лунного реголита и снять оптические спектры тех же образцов. Такие исследования дают возможность изучать корреляцию между химико-минералогическими и оптическими параметрами, а затем использовать найденные корреляции для прогноза состава лунной поверхности. Эта программа была реализована харьковскими астрономами. Для выполнения химического и минералогического картографирования лунной поверхности использовались результаты съемки, проведенной КА «Клементина» с помощью камеры UVVIs. Отметим, что фотометрические системы лабораторных спектральных измерений лунного грунта и спектральных данных, полученных КА «Клементина», одинаковы. Это принципиально важно для описываемого анализа.



Рис. 4.6. Известный американский геохимик Ларри Тейлор, профессор Университета Теннесси, заведует геохимической лабораторией, в которой изучаются образцы лунного грунта

Карты прогноза содержания FeO и TiO<sub>2</sub> строились по данным LSCC следующим образом. Вместо формул Люси (14) и (15) использовалась простая линейная комбинация оптических параметров:

$$\log P = aA_R + bC_{BR} + cC_{IR1} + hC_{IR2} + fC_{IR3} + eD + g, \quad (17)$$

где  $P$  – геохимический параметр (содержание Fe или Ti в вес. %),  $A_R = A(750 \text{ мкм})$  – альbedo в %,  $C_{BR} = A(415 \text{ мкм}) / A(750 \text{ мкм})$ ,  $C_{IR1} = A(900 \text{ мкм}) / A(750 \text{ мкм})$ ,  $C_{IR2} = A(950 \text{ мкм}) / A(750 \text{ мкм})$ ,  $C_{IR3} = A(1000 \text{ мкм}) / A(750 \text{ мкм})$ ,  $D = A(750 \text{ мкм}) A(1000 \text{ мкм}) / [A(900 \text{ мкм})]^2$ . Выбор комбинаций оптических характеристик логически вполне оправдан: альbedo – важнейший параметр, который обязательно должен присутствовать в анализе,  $C_{BR}$ ,  $C_{IR1}$ ,  $C_{IR2}$ , и  $C_{IR3}$  – цветовые отношения, каждое может характеризовать особенности состава,  $D$  – глубина пироксеновой полосы. Логарифм параметра в формуле (17) берется для того, чтобы избежать отрицательных величин при прогнозе. Параметры  $a$ ,  $b$ ,  $c$ ,  $h$ ,  $f$ ,  $e$  и  $g$  подбирались так, чтобы обеспечить максимальный коэффициент корреляции между оптическими и химическими данными для образцов. Затем уравнение (17) использовалось для построения карт.

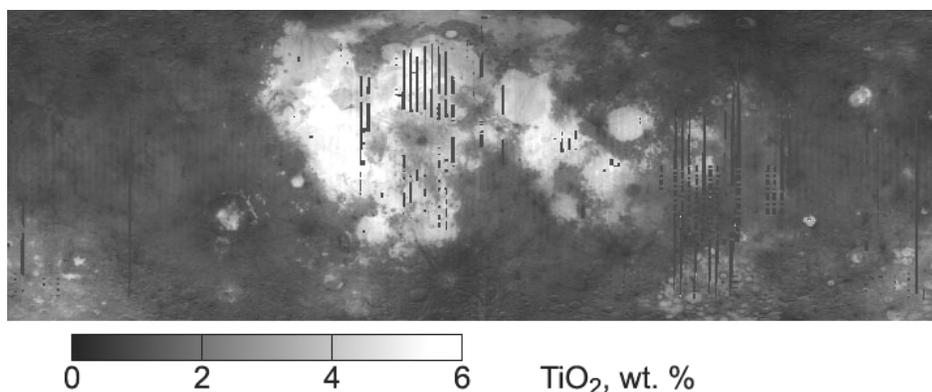


Рис. 4.7. Карта распределения TiO<sub>2</sub> по данным LSCC и КА «Клементина»

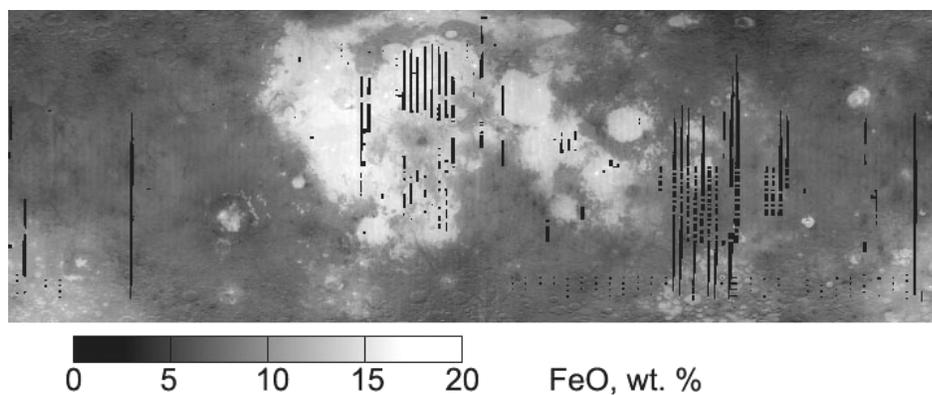


Рис. 4.8. Карта распределения FeO по данным LSCC и КА «Клементина»

На рис. 4.7 представлена карта распределения  $TiO_2$  по данным LSCC и КА «Клементина». Эта карта заметно отличается от той, что была получена методом Люси. Сильно отличаются шкалы содержания двуокиси титана; в случае данных LSCC шкала сжата почти в 2 раза по сравнению с картой Люси. В то же время, карты распределения FeO (рис. 4.3 и 4.8) близки, хотя в случае LSCC на морях выделяются молодые кратеры, тогда как на карте Люси этот эффект менее выражен. Мы видим, что две независимые методики определения состава поверхности дают отличающиеся результаты; очевидно, что эти методики находятся пока в начальной фазе разработки и могут использоваться только для грубых оценок.

*Интерполяция данных КА «Лунар Проспектор».* Оптическая съемка лунной поверхности дает информацию о верхнем слое толщиной примерно 1 мм. Геохимическая съемка с помощью гамма спектроскопии позволяет исследовать слой толщиной до 1 м. Если считать, что состав реголита для этих глубин примерно одинаков, то геохимические данные можно в принципе использовать как «обучающие» (вместо образцов лунного грунта) для получения уравнений типа (14) – (17). Затем их можно применить для прогнозирования состава лунной поверхности. Этот план был также реализован недавно сотрудниками НИИ Астрономии ХНУ им. В. Н. Каразина (В. Г. Кайдаш и Ю. Г. Шкуратов).

Как уже отмечалось, первые прямые геохимические данные о распределении железа и титана были получены с помощью гамма спектроскопии на орбитальных модулях КК «Аполлон-15» и «Аполлон-16». Была исследована небольшая часть лунной поверхности с пространственным разрешением приблизительно  $100 \text{ км} \times 100 \text{ км}$ . Глобальная нейтронная и гамма съемка всей лунной поверхности с целью определения химического состава была проведена много лет спустя КА «Лунар Проспектор». Эти данные представлены в виде карт (изображений) с разрешением примерно  $5^\circ \times 5^\circ$  ( $150 \text{ км} \times 150 \text{ км}$  на экваторе). «Строчная» и «кадровая» развертка изображений проводилась за счет, соответственно, орбитального движения КА и вращения Луны. Столь низкое разрешение геохимической съемки связано с тем, что нейтронные и гамма детекторы, установленные на космическом аппарате, измеряют сигнал от всей нижней полусферы; при высоте орбиты 150 км подаппаратная площадки примерно  $150 \text{ км} \times 150 \text{ км}$  на лунной поверхности дает доминирующий вклад в сигнал.

Существуют методы апостериорного повышение пространственного разрешения данных геохимической съемки. Эти методы неизбежно используют дополнительную информацию. Например, можно учесть связь между оптическими и геохимическими параметрами. Для выявления таких связей разрешение оптических данных КА «Клементина» было приведено к разрешению геохимических ( $150 \text{ км}$ ). Использовалось уравнение (17). Как и ранее, параметры

этого уравнения подбирались таким образом, чтобы коэффициент корреляции для измеренных и предсказанных величин был максимальным. Затем это уравнение применялось для картирования состава лунного грунта (Fe, Ti, O, Al, Ca и Mg) по оптическим данным КА «Клементина» более высокого разрешения (15 км).

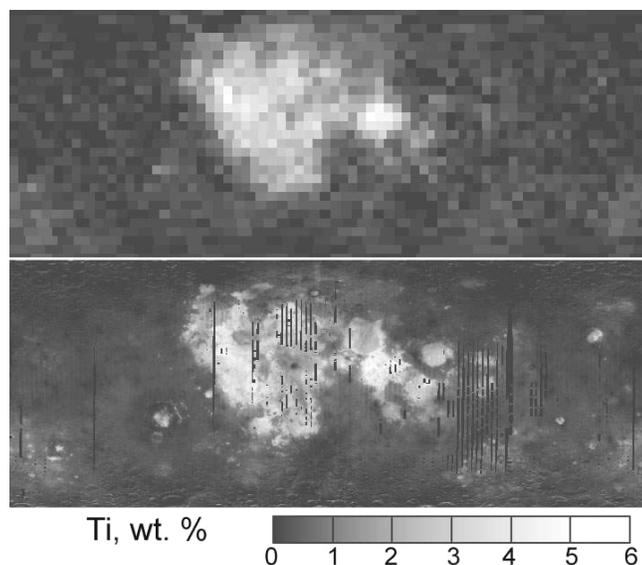


Рис. 4.9 Распределение железа по лунной поверхности. Карта с разрешением 150 км, полученная КА «Лунар Проспектор», показана на верхней панели. Ниже приведена карта с разрешением 15 км, построенная с использованием оптических данных КА «Клементина»

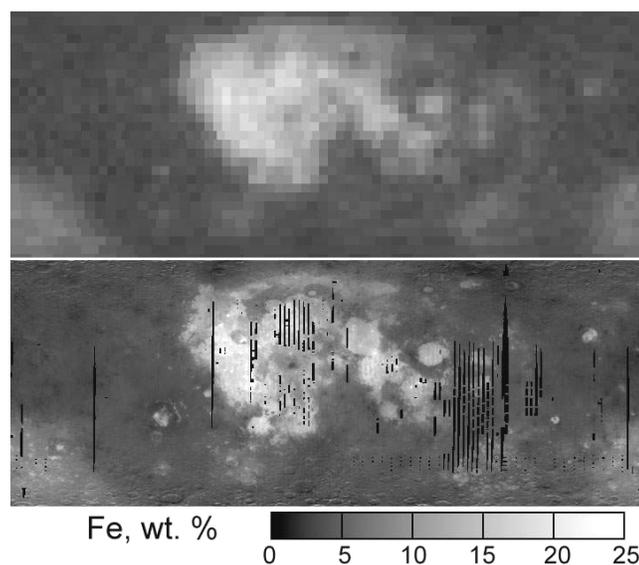


Рис. 4.10. Распределение титана по лунной поверхности. Карта с разрешением 150 км, полученная КА «Лунар Проспектор», дана на верхней панели. На нижней панели приведена карта с разрешением 15 км, построенная по оптическим данным КА «Клементина»

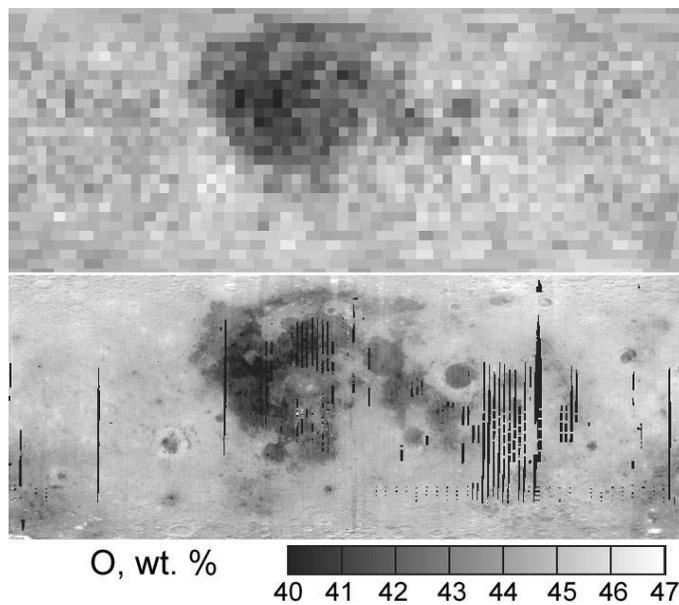


Рис. 4.11. Распределение кислорода по лунной поверхности. Карта с разрешением 150 км, полученная КА «Лунар Проспектор», показана на верхней панели. Ниже приведена карта с разрешением 15 км, построенная с использованием оптических данных КА «Клементина»

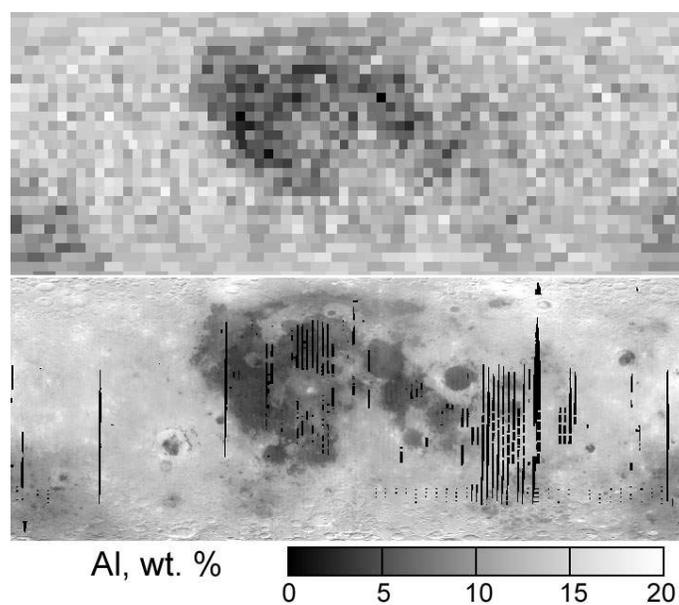


Рис. 4.12. Распределение алюминия по лунной поверхности. Карта с разрешением 150 км, полученная КА «Лунар Проспектор», показана на верхней панели. Ниже приведена карта с разрешением 15 км, построенная с использованием оптических данных

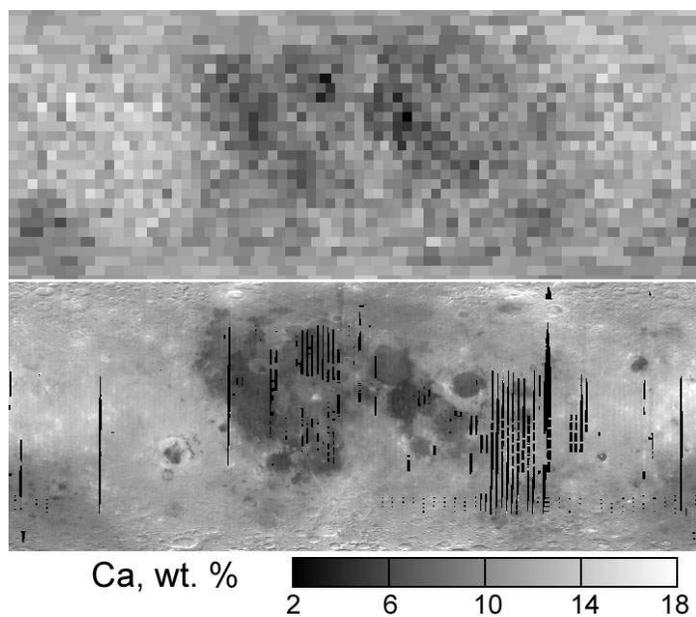


Рис. 4.13. Распределение кальция по лунной поверхности. Карта с разрешением 150 км, полученная КА «Лунар Проспектор», показана на верхней панели. Ниже приведена карта с разрешением 15 км, построенная с использованием оптических данных КА «Клементина»

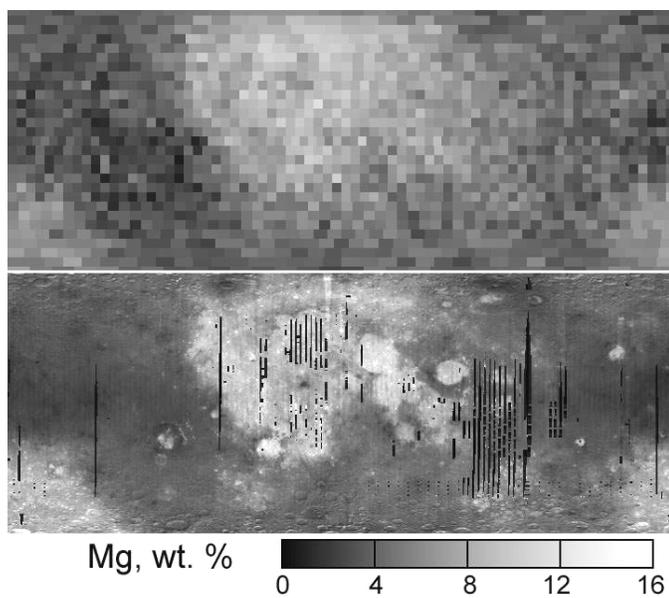


Рис. 4.14. Распределение магния по лунной поверхности. Карта с разрешением 150 км, полученная КА «Лунар Проспектор», показана на верхней панели. Ниже приведена карта с разрешением 15 км, построенная с использованием оптических данных КА «Клементина»

Рис. 4.9 – 4.14 представляют карты Fe, Ti, O, Al, Ca, Mg, соответственно. Верхние панели отвечают исходным распределениям КА «Лунар Проспектор» низкого разрешения; нижние – представляют результаты интерполяции (повышения разрешения) через связь с оптическими данными. Виден огромный выигрыш в четкости новых карт. Среди приведенных элементов имеются не только хромофорные элементы, например, O, Al, Ca и Mg. Может возникнуть вопрос, каким же образом работает методика; как по оптическим данным можно предсказать распределение элементов, не влияющих на оптические свойства грунта? Дело в том, что содержание основных хромофорных элементов (Fe и Ti) коррелирует с содержанием нехромофорных элементов, O, Al, Ca и Mg. Таким образом, корреляции оптических характеристик с концентрациями нехромофорных элементов являются косвенными.

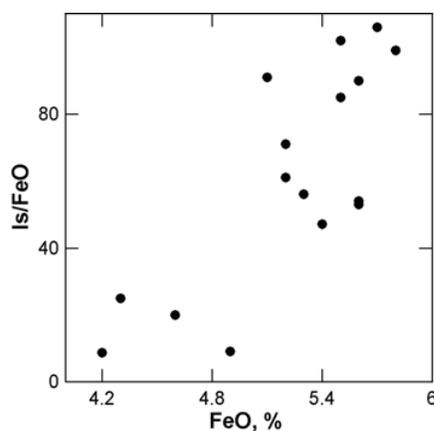


Рис. 4.15. Корреляция между степенью зрелости  $I_s/FeO$  и содержанием FeO для материковых образцов

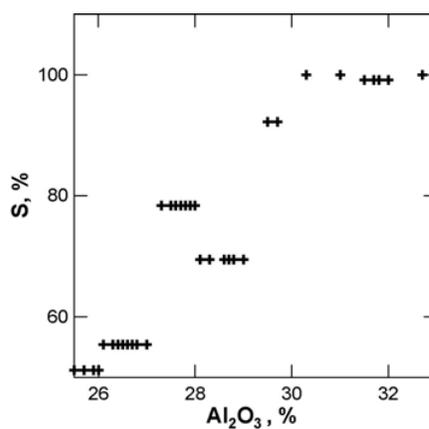


Рис. 4.16. Корреляция между содержанием кристаллической (незрелой) компоненты и содержанием  $Al_2O_3$  для материковых образцов

На карте 4.9 представлено распределение титана. После повышения разрешения это распределение стало похожим на то, что видно на рис. 4.4 и 4.7. Сравнение карт титана низкого и высокого разрешения обнаруживает отличия некоторых крупных деталей. Например, Море Кризисов на исходной карте низкого разрешения имеет низкую концентрацию титана; это согласуется с данными для образцов лунного грунта, доставленных из этой области КА «Луна-24» (содержание титана около 1 %). После повышения разрешения оценки содержания Ti в этом море возросли минимум в два раза.

На изображениях распределений Fe и Al – это элементы, концентрации которых сильно антикоррелируют – видны молодые материковые кратеры и их лучевые системы (рис. 4.10 и 4.12). В этих кратерах количество железа ниже, а количество алюминия выше, чем в окружающих областях. Это означает, что содержание этих элементов коррелирует с экспозиционным возрастом. На первый взгляд, такая корреляция не кажется очевидной и можно думать, что мы имеем здесь дело с проявлением какого-то недостатка метода. Однако по данным лабораторных измерений лунного грунта оказывается, что эти корреляции все же реальны. Были рассмотрены зависимости концентраций окислов FeO и Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> от параметров зрелости реголита. На рис. 4.15 хорошо видна зависимость I<sub>s</sub>/FeO от FeO по данным для материковых образцов КК «Аполлон-16». Напомним, что степень зрелости I<sub>s</sub>/FeO представляет собой отношение величины, пропорциональной количеству восстановленного железа (оно определяется методом ферромагнитного резонанса), к его общему количеству. Другим параметром, характеризующим экспозиционный возраст лунной поверхности, является содержание кристаллической компоненты S в лунном реголите. Оно, естественно, выше в незрелом грунте (малый экспозиционный возраст). Корреляция между параметром S и содержанием Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> для образцов с места посадки КК «Аполлон-16» показана на рис. 4.16. Причиной таких корреляций может являться глобальный перенос материала лунной поверхности при ударных явлениях различных масштабов. Вертикальное и горизонтальное перемешивание материала при метеоритной бомбардировке является важным процессом, влияющим на состав поверхности. В морских районах материковый компонент извлекается на поверхность благодаря ударам, способным пробить морское затопление (вертикальное перемешивание). Контаминация (загрязнение) материкового вещества морским слабее и происходит благодаря горизонтальному переносу, сопутствующему ударным событиям.

На рис. 4.11 показана карта распределения кислорода. Как и следовало ожидать, кислорода оказывается меньше в морских породах (более основной состав). Обнаруживается большое разнообразие составов морских лавовых потоков. Аномалии по содержанию кислорода наблюдаются на материке, например, в области кратера Тихо. Карты на рис. 4.13 и

14 представляют распределения Са и Mg. В последнем случае хорошо видны аномалии в морских молодых кратерах. Сейчас нет ясности в том, являются ли эти аномалии реальными, или это проявление недостатков метода прогнозирования.

#### 4.2. Содержание минералов и зрелость реголита

Плагиоклаз, пироксен и оливин являются основными породообразующими минералами лунной поверхности; плагиоклаз наиболее распространен в материковых, а пироксен и оливин – в морских районах. Изучение регионального распределения содержания этих минералов и особенностей их состава картографическим методом является одной из важнейших задач дистанционной диагностики Луны. Как уже говорилось, в развитии такой диагностики, равно как и диагностики химического состава, сделаны лишь первые шаги. Они основаны на использовании данных оптической съемки Луны КА «Клементина» и результатах спектральных и минералогических исследований образцов лунного грунта. Спектральные характеристики, по которым производится минералогический прогноз, существенно зависят не только от состава, но и от зрелости лунного грунта. Одной из характеристик зрелости реголита является величина содержания в нем агглютинатов. Агглютинаты – наиболее переработанная часть вещества лунной поверхности. Частицы агглютинатов представляют собой обломки пород и минералов сцементированные стеклами, образовавшимися под действием микрометеоритных ударов (рис. 4.17). Состав агглютинативных частиц в основном соответствует составу местного материала, однако часто наблюдаются отклонения от этого правила. Изучение причин таких отклонений является важной задачей. Ее решение может пролить свет на эволюцию лунной поверхности, в частности, дать информацию об эффективности механизмов глобального переноса вещества на ней. Грунт Луны содержит десятки процентов агглютинатов. В зрелом грунте агглютинатов может быть в несколько раз больше, чем в незрелом реголите.

**Минералогический состав и параметр  $I_s/FeO$ .** Как и в случае определения химических составов, среди многих комбинаций оптических параметров, мы ищем такую комбинацию, которая для данного набора образцов лунного грунта максимально тесно коррелирует с тем или иным минералогическим параметром. Далее используется простейшая линейная комбинация спектрального альбедо в четырех длинах волн

$$\log(P) = aA(0,415) + bA(0,750) + cA(0,900) + dA(1,000) + e. \quad (18)$$

Мозаика для фильтра 0,950 мкм здесь не используется, потому что ее калибровка выполнена хуже, чем изображений в других фильтрах; в случае минералогического картирования это ощущается. Анализ корреляций оптических и минералогических данных по образцам показал, что надежно можно выполнить картографирование содержаний плагиоклаза, пироксена и агглютинатов (оливин предсказывается плохо). Уверенный прогноз параметра зрелости  $I_s/FeO$  также возможен с помощью уравнения (18).

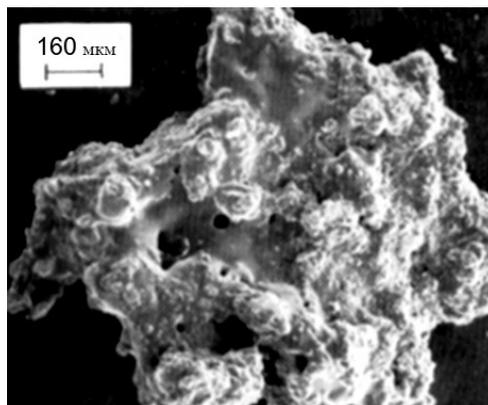


Рис. 4.17. Электронная микрофотография крупной агглютинатовой частицы из сборов КА «Луна-16». Форма и характер поверхности определяется оплавлением и спеканием фрагментов минеральных и стеклянных зерен реголита в одну частицу при метеоритном ударе

Важным является вопрос о том, можно ли использовать оптические измерения в полосах UVVis камеры КА «Клементина» для картографирования плагиоклаза, почти не содержащего хромофорных элементов. Напомним, что спектральные свойства реголита формируются не отдельными элементами или даже окислами, а минералами – сложными соединениями окислов. Важным фактором, влияющим на интенсивность и положение полос поглощения, являются расстояния между ионами в минералах. При внедрении непереходных элементов в кристаллическую решетку минерала изменяется расстояние между ионами переходных элементов, что, в свою очередь, сказывается на оптическом спектре. Примером является Ca в пироксенах; он существенно изменяет положение полос кристаллического поля пироксенов вблизи 1 и 2 мкм (Адамс, 1974 год), хотя Ca не является хромофорным элементом. Отметим также, что содержание окислов и минералов, слабо влияющих на отражательные свойства, иногда тесно коррелирует с содержанием хромофорных компонент; это дает корреляции (подчас довольно высокие) между альбедо и содержанием таких непереходных (оптически нейтральных) элементов, как Ca, Al и Mg.

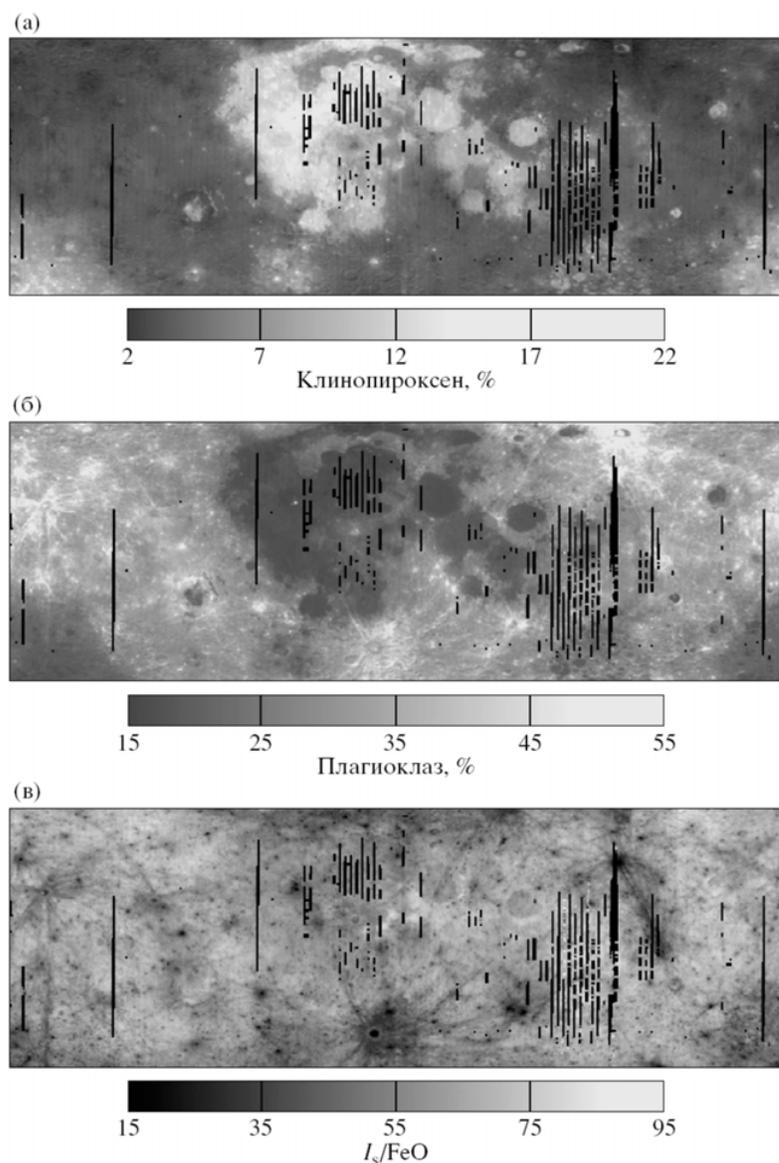


Рис. 4.18. Карты, передающие распределения пироксена (CPx), плагиоклаза (Plag) и степени зрелости ( $I_s/FeO$ ) по лунной поверхности

Обозначим картируемые характеристики следующим образом: клинопироксен – CPx, плагиоклаз – Plag и степень зрелости –  $I_s/FeO$ . На рис. 4.18 а-в приведены, соответственно, распределения CPx, Plag и  $I_s/FeO$  по лунной поверхности. Как следовало ожидать, содержания клинопироксена и плагиоклаза антикоррелируют. Содержание минералов (кристаллической компоненты) существенно зависит от возраста поверхности, а это означает, что оно должно коррелировать со степенью зрелости грунта. На карте содержания CPx в морских областях выделяются молодые кратеры. Высокое содержание CPx в этих областях (свыше 20 %) связано со сравнительно небольшим экспозиционным возрастом поверхности кратеров и зон их

выбросов. Для этих участков кристаллическое вещество, в состав которого входит и СРх, не столь сильно изменено микрометеоритными ударами, поэтому его больше на этих участках по сравнению с другими районами. То же относится к свирлу Рейнер гамма, в котором наблюдается некоторый избыток СРх по сравнению с окружающими морскими участками. Это согласуется с тем, что свирл Рейнер гамма является одним из самых молодых образований на лунной поверхности. Много СРх входит в состав грунта в районе Южный полюс – кратер Эйткен (нижние углы мозаики). В большом количестве (> 20%) СРх присутствует в Океане Бурь в окрестности кратера Аристарх. Пониженное содержание этого минерала наблюдается в зонах некоторых молодых материковых кратеров. Возможно, это связано с вертикальной неоднородностью состава лунного материка, хотя более осторожным было бы объяснить это недостатками метода прогнозирования.

Избыток Plag (более 50 %) наблюдается в материковых кратерах; в зонах морских молодых кратеров такой аномалии практически не встречается. Исключение составляет кратер Аристарх, при образовании которого плагиоклаз был извлечен ударом из материковой подложки. Высокое содержание плагиоклаза в материале молодых материковых кратеров объясняется таким же образом, как и СРх аномалия в морских молодых кратерах: плагиоклаз лучше сохранился в местах, где грунт в меньшей степени переработан ударами метеоритов. Содержание плагиоклаза в Море Спокойствия оказывается несколько выше, чем для Моря Ясности. Лавы вдоль западной границы Океана Бурь имеют пониженное содержание плагиоклаза. Низким содержанием плагиоклаза выделяется также пятно Вуда.

Особенностью распределения параметра  $I_s/FeO$  (см. рис. 4.18 в) является очень низкий контраст границы море – материк; то есть море и материк сложены грунтами примерно одинаковой зрелости. Как и следовало ожидать, низкой степенью зрелости обладают молодые кратеры, независимо от того, находятся ли они в морях или материках. Особенно низка зрелость в зоне кратера Джордано Бруно и его выбросов. Это согласуется с тем, что этот кратер является самым молодым из крупных ударных образований на Луне. Наибольшей зрелостью обладает реголит в местах, которые классифицируются Вильгельмсом и Макколи (1971 год) как Dark Mantles. Эти области находятся в центре изображения (светлые пятна на рис. 4.18 в); примером может служить Залив Центральный. Построенное распределение степени зрелости имеет сходство с распределением параметра Люси *OMAT*, хотя и не следует ему в деталях.

**Прогноз агглютинатов и их состава.** Аналогичным образом была также построена карта прогноза распространенности агглютинатов по лунной поверхности. Эта карта приведена на рис. 4.19. Как следовало ожидать, области с наименьшим содержанием агглютинатов

соответствуют молодым кратерам (например, кратеры Тихо, Аристарх и др.) и их лучевым системам. Прогноз распределения агглютинатов хорошо коррелирует с аналогичной картой степени зрелости  $I_s/FeO$ . Наблюдаются слабые вариации содержания агглютинатов в лунных морях; заметно выделяются области пирокластических отложений, например, плато Аристарх.

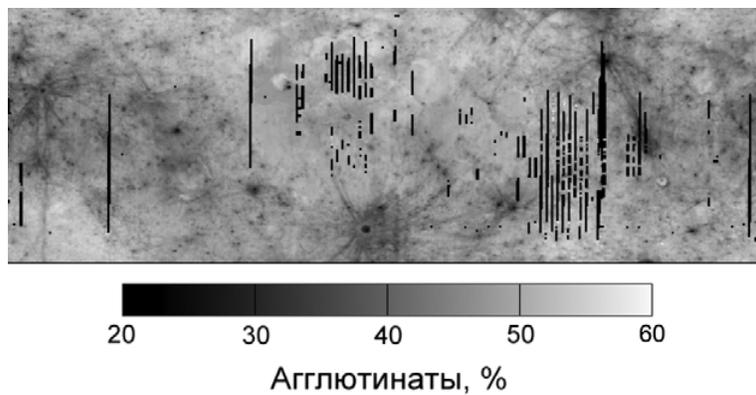


Рис. 4.19. Карта содержания агглютинатов в материале лунной поверхности по данным LSCC и КА «Клементина»

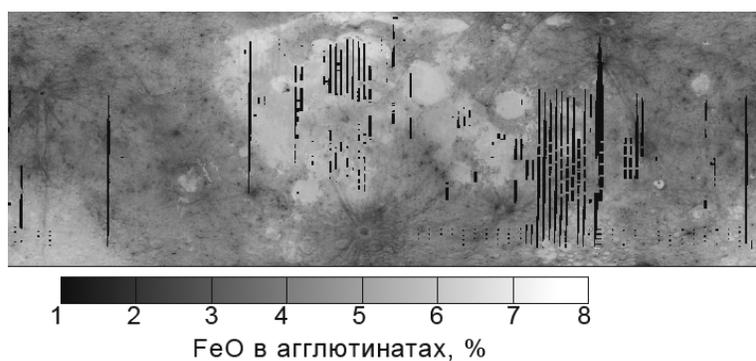


Рис. 4.20. Карта содержания железа в агглютинатах по данным LSCC и КА «Клементина»

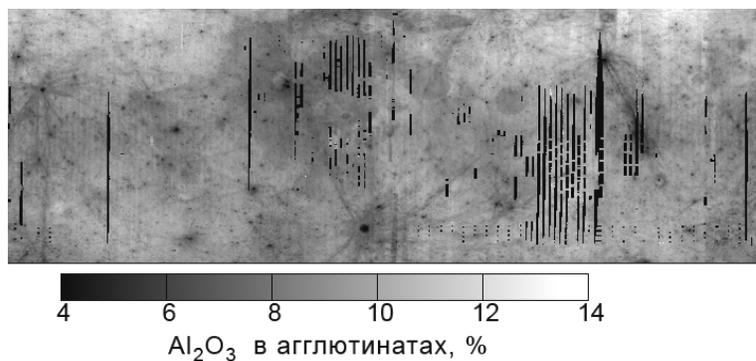


Рис. 4.21. Карта содержания Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> в агглютинатах по данным LSCC и КА «Клементина»

Данные LSCC позволяют исследовать состав агглютинатов и разных минералогических фракций. На рис. 4.20 представлено распределение содержания FeO только в агглютинатах,  $\text{FeO}^{(\text{agg})}$ . В целом, это содержание коррелирует с валовым содержанием FeO. Аналогично рис. 4.21 представляет распределение содержания  $\text{Al}_2\text{O}_3$  только в агглютинатах,  $\text{Al}_2\text{O}_3^{(\text{agg})}$ . В отличие от предыдущего случая, это распределение, скорее, напоминает карту содержания агглютинатов.

По данным исследований образцов лунного грунта известно, что, в сравнении с кристаллической фракцией, морские агглютинаты обогащены Al и обеднены Fe, Ti и Cr, тогда как материковые агглютинаты, наоборот, обеднены Al, но обогащены Fe, Ti и Cr (Питерс и Тейлор, 2003). Чтобы выяснить, существует ли относительное превышение содержания FeO в агглютинатах материков по сравнению с морями для всей поверхности, было построено изображение, передающее распределение отношения  $\frac{\text{FeO}^{(\text{agg})}}{(\text{FeO})\text{G}}$ , где G – содержание агглютинатов в материале лунной поверхности (см. рис. 4.22). Как оказывается, такое превышение действительно наблюдается глобально. На изображении отношения  $\frac{\text{FeO}^{(\text{agg})}}{(\text{FeO})\text{G}}$  почти не видна неоднородность морей, т.к. при нормировке на содержание агглютинатов, коррелирующее со зрелостью грунта, различные участки поверхности приводятся к почти одинаковой зрелости. Это изображение сильно напоминает распределение альбедо.

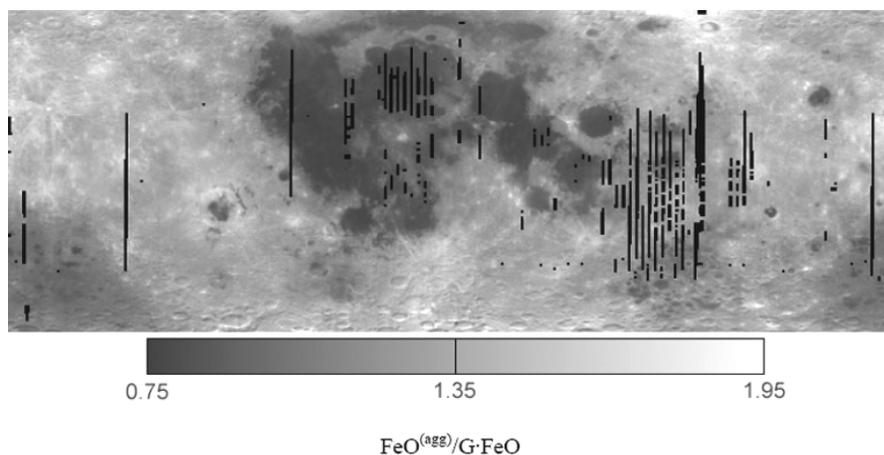


Рис. 4.22. Карта распределения отношения  $\frac{\text{FeO}^{(\text{agg})}}{(\text{FeO})\text{G}}$  по данным LSCC и КА «Клементина»

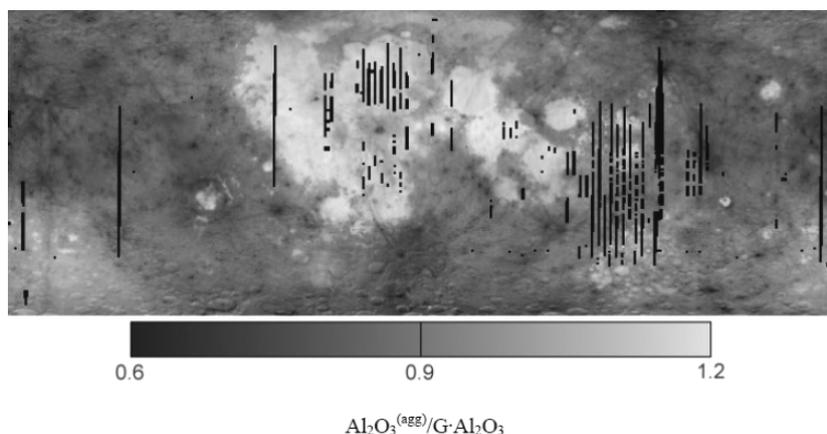


Рис. 4.23. Карта распределения отношения  $\frac{Al_2O_3^{(agg)}}{(Al_2O_3)_G}$  по данным LSCC и КА «Клементина»

Аналогичное исследование было проведено для окисла  $Al_2O_3$ . На рис. 4.23 приведена карта распределения отношения содержания  $Al_2O_3$  в агглютинатах к общему содержанию  $Al_2O_3$  и содержанию агглютинатов на лунной поверхности. Относительное превышение  $Al_2O_3$  в агглютинатах морей существует глобально. Нормировка изображений на рис. 4.23 на содержание агглютинатов позволяет сравнить относительное содержание  $FeO$  и  $Al_2O_3$  в агглютинатах грунтов различной зрелости. На картах отношений  $\frac{FeO^{(agg)}}{(FeO)_G}$  и  $\frac{Al_2O_3^{(agg)}}{(Al_2O_3)_G}$  (рис. 4.22 и 4.23) хорошо видны лучевые системы молодых кратеров: относительное содержание  $FeO$  в агглютинатах лучевых систем материковых кратеров оказывается выше, а  $Al_2O_3$  – ниже, чем в агглютинатах более зрелых грунтов окружающих районов. Это связано с тем, что изображения на рис. 4.22 и 4.23 нормированы на валовые содержания  $FeO$  и  $Al_2O_3$ , которые, соответственно, ниже и выше для лучевых систем, чем для окружающего материкового грунта. Описанные аномалии могут быть связаны только с процессами глобального переноса вещества на лунной поверхности. Рассмотрим эти процессы подробнее.

Метеоритные удары являются наиболее изученным механизмом перемещения и перемешивания морского и материкового вещества. Почти весь материал из кратеров диаметром более 100 м переносится в виде камней и блоков. Прежде чем войти в состав агглютинатов, они должны быть измельчены. В процессе измельчения они перемешиваются с местным реголитом по его глубине, так что дадут вклад в его валовый состав, но не могут создать избыток тех или иных окислов в агглютинатах. Благодаря этому механизму, могут быть объяснены уже упоминавшиеся небольшие аномалии валового содержания  $FeO$  и  $Al_2O_3$  у

молодых материковых кратеров и их лучевых систем: там меньше FeO и больше Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, потому что из-за своей молодости они меньше загрязнены морским веществом.

Агглютинаты образуются при ударах микрометеоритов. Из спектров масс для ударников следует, что 90% агглютинатов образуются за счет ударов микрометеоритов размером менее 1 мм. Такие удары не только формируют локальный реголит, но и способны обеспечить перенос реголитовых частиц на большие расстояния. В глобальном перемешивании участвуют выбросы с начальной скоростью выше 1 км/с, что соответствует переносу на расстояния около 1000 км, до скорости убегания с поверхности Луны, 2.37 км/с. Такие скорости ниже скорости звука в твердом веществе. Поэтому физические процессы, сопровождающие вторичные удары, отличаются от тех, которые имеют место при сверхзвуковых столкновениях первичных ударников с Луной. Различие состоит, главным образом, в том, что при высокоскоростном столкновении происходит взрыв на поверхности, в то время как дозвуковое столкновение по последствиям напоминает полет пули, проникающей в твердую или сыпучую мишень. Оно может образовать выбоину в твердом материале или углубление в реголите, не вызывая плавления или испарения. Частицы таких выбросов проникают в реголит на глубину порядка нескольких собственных размеров и дают вклад как в валовый состав реголита, так и в состав агглютинатов. При этом если на данном участке поверхности отношение агглютинатов к общему количеству частиц меньше, чем такое же отношение для прилетевших частиц, то это может обеспечить изменение относительного состава агглютинатов на этом участке. То есть, этот механизм эффективен для участков, покрытых незрелым реголитом. Он мог бы объяснить аномалии отношений  $\frac{\text{FeO}^{(\text{agg})}}{(\text{FeO})\text{G}}$  и  $\frac{\text{Al}_2\text{O}_3^{(\text{agg})}}{(\text{Al}_2\text{O}_3)\text{G}}$  для лучевых систем молодых кратеров.

Кроме переноса вещества, связанного с метеоритными и микрометеоритными ударами, существуют механизмы атомного переноса вещества на большие расстояния. Это разлет и осаждение продуктов ударного испарения при метеоритной бомбардировке, а также продуктов распыления поверхности ионами солнечного ветра. Оценки вклада этих двух механизмов в обмен железом и алюминием между морями и материками были сделаны в работе харьковского астронома Л. В. Старухиной (2003 год). Этот вклад оказался существенным. Осаждение испаренных и распыленных атомов происходит на поверхности всех частиц, однако частицы агглютинатов статистически дольше экспонировались и, следовательно, накопили большее количество чужеродного вещества.

### 4.3. Толщина реголитового слоя

Оценки мощности (толщины) слоя лунного реголита важны для понимания эволюции исследуемого участка поверхности и создания инженерных моделей, необходимых для планирования строительства будущих лунных баз. Определения мощности делаются несколькими методами. Геологические определения основаны на анализе морфологии кратеров и характеристик кратерной популяции. С помощью анализа морфологии кратеров получена нижняя оценка для мест посадок КА «Луна-9», «Луна-13» и «Сервейер-1» по снимкам КА «Лунар Орбитер-1». При этом использовались результаты экспериментов, показавших, что образование кратера определенного морфологического типа зависит от отношения диаметра кратера к толщине слоя сыпучего материала, покрывающего твердое основание. Второй метод основан на модели развития реголита и использует наблюдаемые распределения кратеров по размерам. Считается, что слой реголита образуется в процессе заполнения существующих кратеров выбросами вновь формирующихся. Мощность реголита определяется по глубине кратера того размера, с которого начинается отклонение наблюдаемого распределения кратеров от равновесного. Этот подход использовался при определении мощности реголита на валу кратера Тихо в месте посадки КА «Сервейер-7». Оценки толщины слоя реголита в местах работы аппаратов «Луноход-1 и -2» опирались на определение размеров кратеров, на валу которых обнаруживались крупные камни. Наличие камней являлось признаком того, что затронуто скальное основание. Определения мощности реголита были сделаны в местах посадок КК «Аполлон-11», «Аполлон-12», «Аполлон-14» – «Аполлон-17» в ходе сейсмических экспериментов. В месте посадки КК «Аполлон-17» производилось электромагнитное зондирование лунной поверхности; его результаты позволили сделать вывод о существовании слоя мегареголита на глубине ~ 100 метров.

Перечисленные методы позволяют исследовать лишь небольшие участки поверхности. Однако разработан подход, позволяющий оценивать мощность реголита на больших площадях по данным дистанционных радарных и оптических измерений (Шкуратов и Бондаренко, 2001 год). Для демонстрации этого оптико-радиолокационного метода используются: (1) данные радиолокационных измерений Томпсона (1987 год) на частоте 430 Мг (длина волны 70 см); (2) определения содержания радиохромофорных элементов, Fe и Ti; (3) модель рассеяния радиоволн в реголитовом слое.

Пространственное разрешение радиолокационных данных Томпсона около 3 км в центре диска Луны. Для оценок содержания в лунном реголите основных хромофорных элементов, Fe и Ti (они являются также и радиохромофорами), мы использовали данные

наземной телескопической съемки, которые позволили получить распределение железа и титана, вроде тех, что представлены на рис. 4.3, 4.4, 4.7 и 4.8. Коэффициент рассеяния радиоволн поверхностью в случае бистатической локации может быть представлен (по аналогии с тем, как это делается в оптическом диапазоне) в виде  $R = R_0 F(i, e, \varphi)$ , где  $R_0$  – коэффициент отражения при нулевом фазовом угле (аналог нормального альбедо),  $F(i, e, \varphi)$  – функция распределения яркости по поверхности (аналог фотометрической функции),  $i$  – угол падения,  $e$  – угол рассеяния,  $\varphi$  – азимутальный угол. Данные Томпсона получены при моностатической локации ( $i = e$ ,  $\varphi = 0$ ); они освобождены от влияния функции  $F(i, e, \varphi)$  и содержат информацию только об относительных вариациях величины  $R_0$ .

Далее для оценок  $R_0$  использовалась простая модель, которая развивает известную модель Стокса-Бодо (многократное рассеяние в стопе полупрозрачных пластин), см. рис. 4.24. Модель использует следующие параметры:  $\varepsilon_1$  и  $\varepsilon_2$  – диэлектрические проницаемости реголита и подложки;  $\text{tg}\Delta$  – тангенс угла потерь, описывающий поглощение волн в реголитовом слое, и  $h$  – толщина реголитового слоя. Согласно этой модели, величина  $R_0$  поверхности, представляющей собой слой реголита на скальной подложке, описывается формулой:

$$R_0 = (1 - r_{1e})(1 - r_{1i})r_{2i}e^{-2\tau} / (1 - r_{1i}r_{2i}e^{-2\tau}), \quad (19)$$

где  $\tau$  – коэффициент поглощения в реголите,  $\tau = 2\pi h(\text{tg}\Delta)\sqrt{\varepsilon_1}/\lambda$ , ( $\lambda$  – длина волны падающего излучения), величины  $r_{1e}, r_{2i}, r_{1i}$  – усредненные по углам коэффициенты отражения Френеля, соответственно, для границ раздела: вакуум-реголит (при входе излучения в среду), реголит-подложка, вакуум-реголит (при выходе излучения из среды) (рис. 4.24).

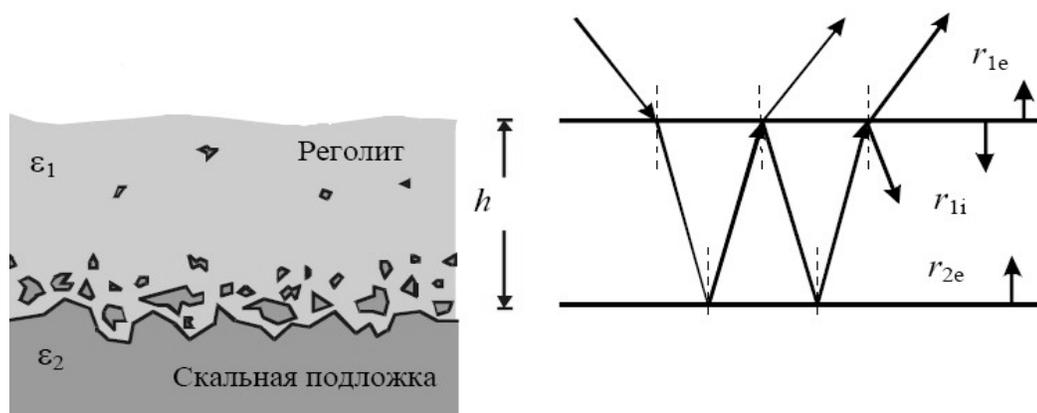


Рис. 4.24. Модель реголитового слоя Луны

Величина компонента, многократно рассеянного между границами раздела, определяется параметрами  $\text{tg}\Delta$  и  $h$ . В свою очередь,  $\text{tg}\Delta$  зависит от плотности среды  $\rho$  и содержания в ней радиохромофоров – Fe и Ti. Плотность среды влияет также и на вещественную часть диэлектрической проницаемости. Эмпирические калибровочные зависимости, связывающие диэлектрические характеристики реголита с его плотностью и содержанием окислов железа и титана, имеют следующий вид:

$$\varepsilon(\rho) = 0,74 \exp(0,82\rho), \quad (20)$$

$$\text{tg}\Delta(\rho, Q) = 8,8 \cdot 10^{-4} \exp(0,085Q + 0,5\rho), \quad (21)$$

где  $Q = (\text{FeO} + \text{TiO}_2)\%$ . Для построения этих зависимостей использовались данные для образцов лунного грунта.

Информация о пространственных вариациях плотности лунного реголита очень бедна. Изменения  $\rho$  с глубиной изучались в местах посадки космических аппаратов. Так, по данным КА «Аполлон» плотность реголита растет с увеличением глубины от значения  $\sim 1,0 \text{ г/см}^3$  на поверхности до  $\sim 1,7 \text{ г/см}^3$  на глубине 60 см, а затем меняется слабо, стремясь примерно к  $2,0 \text{ г/см}^3$  на глубине около трех метров. Лабораторные исследования зависимости сжимаемости лунных образцов под действием уплотняющего давления показали, что в условиях естественного залегания, когда на поверхности  $\rho = 1,0 \text{ г/см}^3$  и уплотнение происходит под действием собственного веса, на глубине 20 см плотность равна  $1,4 \text{ г/см}^3$ , а на глубине 1 метра –  $1,6 \text{ г/см}^3$ ; реголит, с исходной плотностью  $1,7 \text{ г/см}^3$ , до глубин 10 метров под действием собственного веса почти не уплотняется. Таким образом, основные изменения плотности верхнего слоя лунного грунта происходят в толщинах порядка 1 метра, т.е., при средних толщинах реголитового слоя около 5 метров в морях и около 10 метров в материковых областях вклад переходного слоя в радио отклик должен быть сравнительно мал. Примем в качестве первого приближения модель, в которой плотность реголита не зависит от глубины, задавая  $\rho = 1,7 \text{ г/см}^3$ .

Как уже отмечалось, данные Томпсона представляют распределение  $R_0$  в относительных единицах. Для “абсолютизации” этих данных необходимо воспользоваться независимыми оценками толщины реголитового слоя хотя бы в одной точке лунной поверхности. Мы приняли далее, что средняя морская поверхность имеет  $h = 5$  метров.

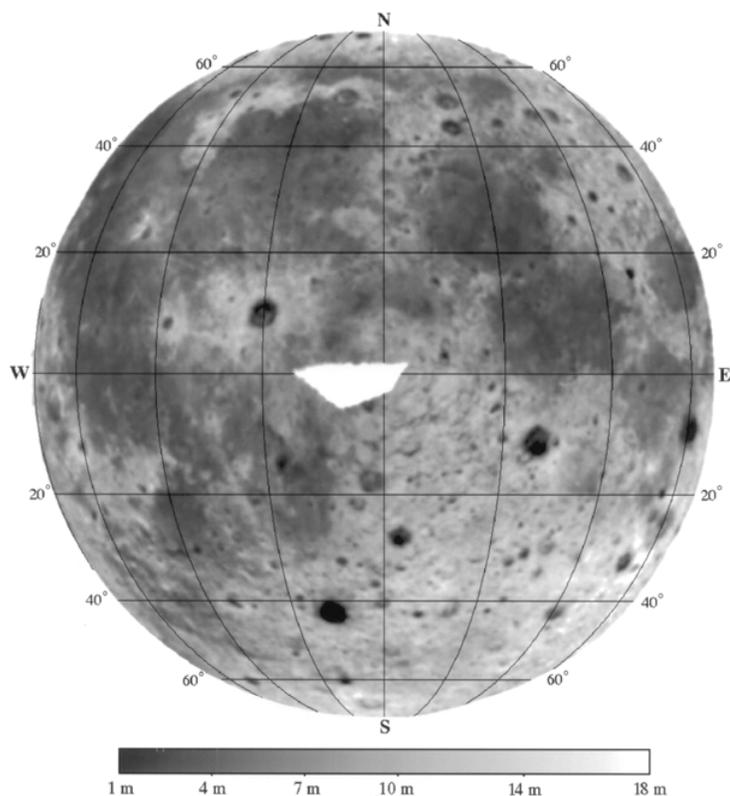


Рис. 4.25. Карта распределения толщины реголитового слоя для видимого полушария Луны. В темной области в центре данные отсутствуют

На рис. 4.25 представлена карта распределения мощности реголитового слоя видимого полушария Луны, построенная в предположении, что плотность скальных пород равна  $3,0 \text{ г/см}^3$ . Вариации  $h$  в морях лежат в пределах 1,5 – 18,0 метров. Сравнительно тонкий слой реголита,  $\sim 2,0$  метра, покрывает некоторые участки поверхности Моря Ясности и Моря Облаков; площадь этих участков небольшая. Мощный реголит, 16 – 18 метров, располагается в районах, прилегающих к некоторым кратерам (кратер Аристилл). Самая низкая средняя мощность реголита оказалась в Море Влажности (4,1 метра), а самая высокая – в Море Нектара (8,5 метра). Для материковых районов характерен более широкий диапазон изменения  $h$ , от 1 до 18 метров. Низкие значения соответствуют днищам кратеров и части материковой поверхности около кратера Шиккард. Большие мощности реголита характерны для юго-восточной части лунного диска.

Сравнение существующих оценок мощности реголита для мест посадок экспедиций «Аполлон» с картой, представленной на рис. 4.25, показывает неплохое согласие (рис. 4.26). На

рис. 4.27 приведены зависимости мощности реголита от абсолютного возраста поверхности. Хорошо заметно повышение мощности реголита с увеличением возраста.

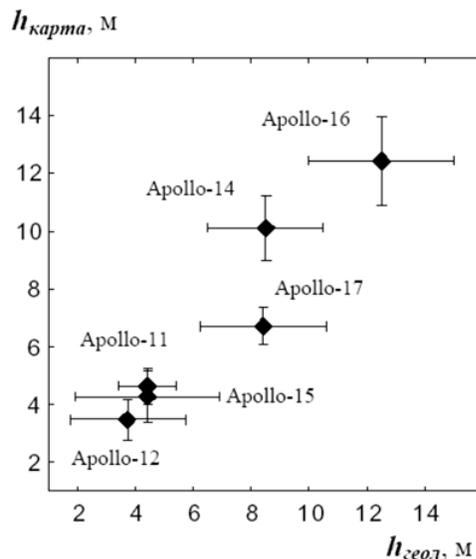


Рис. 4.26. Сопоставление данных карты на рис. 4.25 (ось ординат) и данных о толщине реголитового слоя для мест посадок экспедиций «Аполлон»

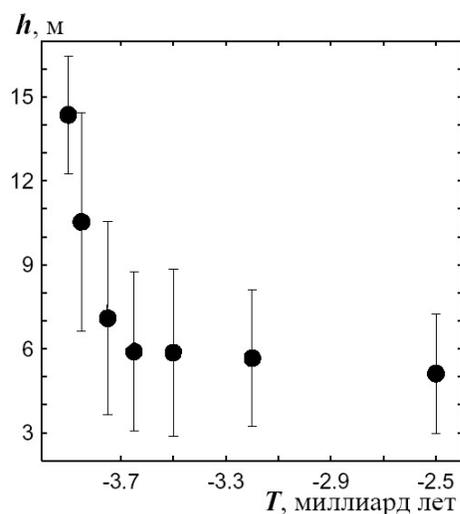


Рис. 4.27. Зависимость толщины реголита (карта на рис. 4.25) от абсолютного возраста поверхности (карта Бойса и Джонса, 1978 год)

Исследовалась также корреляция между мощностью реголита и его составом. Оказалось, что в области малых значений  $Q = \text{FeO} + \text{TiO}_2$  (материки) зависимость между  $h$  и  $Q$  отсутствует. При больших  $Q$  прослеживается тенденция: чем меньше  $Q$ , тем больше  $h$ . Подобные зависимости характерны не только для морской поверхности в целом, но и для

отдельных морских областей. Эта взаимосвязь может быть объяснена тем, что в процессе метеоритной переработки (по мере роста мощности реголита) на поверхность в морских районах извлекается материковый материал, подстилающий базальтовые покровы. Для материковых районов связь между  $Q$  и  $h$  не заметна; это может говорить о химической однородности материкового материала, вовлеченного в переработку.

#### 4.4. Содержание гелия-3 в реголите

Изотоп  $^3\text{He}$  может служить очень эффективным источником энергии. В качестве термоядерного горючего этот изотоп имеет ряд преимуществ в сравнении с обычно используемым в реакторах тритием ( $^3\text{H}$ ). Во-первых, тритий сам по себе радиоактивен и, следовательно, опасен. Кроме того, в стандартной схеме реакции синтеза с использованием  $^3\text{H}$  образуются высокоэнергетичные нейтроны, разрушающие реактор, тогда как в реакциях с  $^3\text{He}$  присутствуют, в основном, протоны высоких энергий, не дающие такого эффекта.

На Земле гелий распространен, главным образом, в форме  $^4\text{He}$ . В противоположность этому, в лунном грунте кроме  $^4\text{He}$  содержится заметное количество изотопа  $^3\text{He}$ . Его источником служит солнечный ветер, миллиарды лет облучающий поверхность Луны. Гелий солнечного ветра внедряется в поверхностные зоны частиц лунного грунта толщиной несколько сотен ангстрем, частично сохраняясь там.

Впервые на возможность использования лунного  $^3\text{He}$  для производства термоядерной энергии обратили внимание Виттенберг и др. в 1986 году. По оценкам Ларри Тейлора (1994 год), в одном кубическом метре морского лунного грунта может содержаться  $^3\text{He}$  в среднем около 10 мг (для материкового грунта эта величина примерно вдвое меньше). Запасы  $^3\text{He}$  в слое морского реголита толщиной 3 м площадью  $1,5 \text{ км}^2$  могут обеспечить работу 500 Мвт станции в течение года. Станции, использующие  $^3\text{He}$ , могли бы обеспечивать лунные базы в течение многих лет практически неограниченным количеством энергии. По некоторым оценкам, использование  $^3\text{He}$  с лунной площадки  $40 \times 40 \text{ км}^2$  полностью покрывает энергопотребление США за 1987 год.

Очевидно, что такие перспективы в полной мере определяют интерес к задаче прогнозирования содержания  $^3\text{He}$  в лунном грунте и оценкам толщины реголитового слоя.

Мы рассматриваем здесь возможность построения карты концентрации  $^3\text{He}$  оптическим методом. На первый взгляд такие попытки могут показаться странными: гелий – оптически нейтральное вещество. Оказывается, однако, что концентрация  $^3\text{He}$  зависит от содержания такого хромофорного элемента, как титан, количество которого может быть определено

оптически. Этот косвенный путь оценки концентрации  $^3\text{He}$  (через титан) представляется очень перспективным, благодаря своей простоте и возможностям глобального охвата поверхности Луны оптической съемкой.

Концентрация гелия в лунном грунте зависит от двух факторов: (1) падающего потока солнечного ветра и (2) процессов дегазации грунта. Если концентрацию определяет первый фактор, то ее распределение по лунному диску будет зависеть от широты и долготы точки на Луне. Если содержание гелия контролируется в основном дегазацией, то распределение концентрации будет зависеть от температуры поверхности и концентрации насыщения при данной температуре. Концентрация насыщения связана с составом и структурой материала поверхности.

О количественном соотношении факторов, определяющих распределение гелия по лунной поверхности, можно говорить только предположительно. Однако в пользу дегазации как определяющего фактора можно привести сильный аргумент. Оказывается, что в частицах реголита соотношения концентраций элементов, источником которых является солнечный ветер, не соответствуют отношениям концентраций этих элементов в солнечном ветре. В качестве причины этого указывается различие в скорости дегазации для различных элементов. Содержание атомов элементов с высокими коэффициентами диффузии (H, He) на 1 – 3 порядка ниже, чем можно было бы ожидать, исходя из их доли в солнечном ветре. Это означает, что почти весь гелий покидает частицы грунта, а малая оставшаяся доля определяется способностью реголита удерживать гелий, а не его поступающим количеством.

По типу структурной аккомодации гелий, имплантированный в твердое тело, можно условно разделить на два компонента: сильно и слабо удерживаемый гелий. Сильно удерживаемый гелий должен иметь большую энергию активации диффузии в твердом теле. Такое возможно, если атомы гелия находятся в эффективных ловушках, каковыми могут быть, например, вакансии в кристаллической решетке. Атомы слабо удерживаемого гелия располагаются в межузельном пространстве и могут легко диффундировать в твердом теле.

Гелий, найденный в лунных образцах, является, главным образом, сильно удерживаемым. В лунном грунте имеются минеральные фазы, которые в большом количестве содержат эффективные ловушки. Концентрация гелия зависит, прежде всего, от объемной доли таких фаз и степени дефектности кристаллической решетки (зрелости грунта). Хорошими ловушками для гелия являются минералы с относительно высокой проводимостью – например, ильменит ( $\text{FeTiO}_3$ ). В таких минералах при бомбардировке солнечным ветром не происходит аморфизации поверхностного слоя, а радиационные дефекты, образующиеся на фоне сохранившейся кристаллической структуры, связывают внедренные атомы гелия значительно

сильнее, чем менее выраженные дефекты аморфной ионной сетки. Энергия связи гелия в таких ловушках-вакансиях порядка одного электрон-вольта и более, так что температура лунной поверхности даже на экваторе слишком низка для их термического освобождения. Таким образом, концентрация сильно удерживаемого гелия должна быть сравнительно стабильна при падающих температурных и радиационных воздействиях на лунный грунт.

Концентрация слабо удерживаемого гелия может быть не всегда мала. При низкой температуре, характерной для высоких широт лунной поверхности, она может быть сравнима с концентрацией сильно удерживаемого гелия.

В областях, близких к полюсам, концентрация гелия может не только не убывать, но даже возрасти за счет вклада слабо удерживаемого компонента. Отметим, однако, что слабо удерживаемый гелий должен быть весьма нестабилен при температурных и механических воздействиях на лунный грунт; он будет быстро улетучиваться в случае повышения температуры или при механической переработке (транспортировке) грунта.

Высокая эффективность захвата гелия ильменитом наблюдается экспериментально. В частности, установлена корреляция между содержанием  $\text{TiO}_2$  и  $^3\text{He}$  в образцах лунного грунта. Эта корреляция оказалась не очень тесной; ее нарушают вариации степени зрелости грунта: чем выше значения  $I_s/\text{FeO}$ , тем большее количество  $^3\text{He}$  внедрено в лунный грунт. Для описания зависимости концентрации  $^3\text{He}$  от содержания  $\text{TiO}_2$  и степени зрелости реголита Ларри Тейлор (1994 год) предложил использовать параметр  $\text{TiO}_2 \cdot I_s/\text{FeO}$ . Корреляция концентрации  $^3\text{He}$  с величиной  $[\text{TiO}_2 \cdot I_s/\text{FeO}]$ , построенная Тэйлором (1994) по данным лабораторных исследований примерно 40 образцов лунного грунта, взятых из разных мест посадок миссий «Аполлон», оказывается довольно тесной (коэффициент корреляции около 0,91). Уравнение регрессии этой зависимости имеет вид:

$$^3\text{He}[\text{ppb}] = 0,2043 [\text{TiO}_2 \cdot I_s/\text{FeO}]^{0,645}, \quad (22)$$

где содержание  $\text{TiO}_2$  дано в %. Зависимость (22) используется далее как калибровочная (аббревиатура ppb (part per billion) означает миллиардную долю).

Следует отметить, что содержание  $^3\text{He}$  зависит также от размеров частиц реголита. Суммарная площадь поверхности у мелких частиц больше, чем у равного по весу количества крупных частиц. Более 80% всего количества гелия содержится в тонкой фракции лунного грунта (средний размер частиц  $\leq 50$  мкм); однако у крупной фракции ( $\geq 50$  мкм) отношение  $^4\text{He}/^3\text{He}$  составляет около 1000, тогда как для мелкой фракции оно равно примерно 3000. Гранулометрический состав лунного грунта достаточно унифицирован; существенные отклонения наблюдаются только в зонах выбросов молодых кратеров, т.е. там, где залегают

незрелый грунт. Реголит в этих зонах в среднем более крупнозернистый. Этот фактор, как только что отмечалось, работает в сторону снижения концентрации  $^3\text{He}$ .

Таким образом, для определения концентрации  $^3\text{He}$  необходимо иметь данные о содержании  $\text{TiO}_2$  в лунном грунте и его степени зрелости  $I_s/\text{FeO}$ . Информацию об этом можно получить с помощью оптических измерений. Отметим, что возможность использования карты содержания  $\text{TiO}_2$  в лунном грунте для прогнозирования концентрации  $^3\text{He}$  обсуждается давно. Однако лишь в последнее время появились количественные данные, касающиеся распределения параметра, описывающего степень зрелости реголита. Поэтому только сейчас удалось начать реализовывать достаточно очевидную идею картографирования концентрации  $^3\text{He}$  в лунном грунте.

Мы использовали распределения  $\text{TiO}_2$  и степени зрелости реголита  $I_s/\text{FeO}$  по видимому полушарию Луны. Использовалась калибровочная зависимость (22) для построения изображения, передающего распределение концентрации  $^3\text{He}$  (см. рис. 4.28). Светлым тонам на этом изображении соответствует повышенная концентрация  $^3\text{He}$ . Карта на рис. 4.28 дает представление о содержании  $^3\text{He}$  в единице объема реголитового слоя Луны. Однако для того, чтобы оценить запасы этого изотопа в заданной точке лунной поверхности, необходимо также знать толщину реголитового слоя и закон изменения концентрации  $^3\text{He}$  с глубиной.

Интенсивность перемешивания лунного реголита (по крайней мере, в прошлом) довольно высокая. Так, в месте посадки КК «Аполлон-11» по оценкам Дж. Мелоша (1989 год) грунт перемешивался 2000, 100 и 10 раз, соответственно, на глубины 10 см, 1 м и 3 – 4 м за период существования поверхности в этом районе. Такая скорость перемешивания делает допустимым предположение о том, что распределение  $^3\text{He}$  по глубине можно грубо считать равномерным. В поддержку этого отметим, что, хотя перемешивание реголита в основном происходило на ранних стадиях формирования реголитового чехла, когда интенсивность метеоритной переработки была высока, этого времени вполне достаточно, чтобы насытить гелием частицы грунта, вышедшие на открытую поверхность, даже при современном потоке солнечного ветра. Действительно, согласно некоторым оценкам, среднее время пребывания частиц реголита на открытой лунной поверхности составляет около  $10^3$  лет. В то же время, насыщение этой частицы гелием происходит в течение нескольких десятков лет.

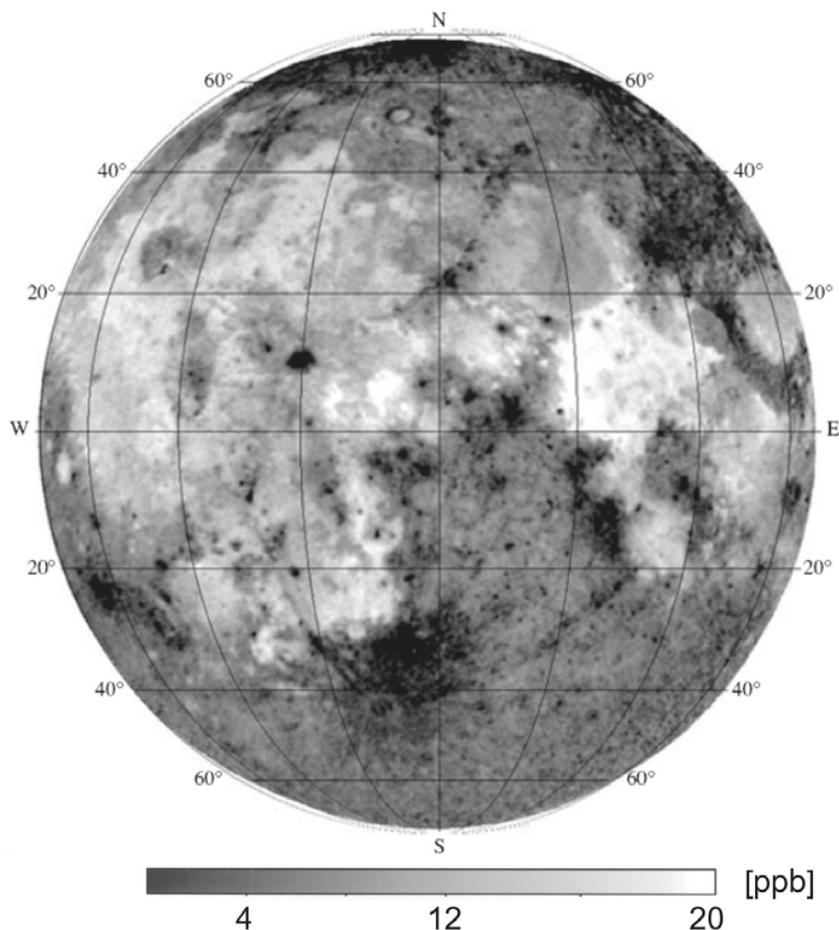


Рис. 4.28. Концентрация  $^3\text{He}$  в единице объема реголитового слоя видимого полушария Луны. Диапазон изменений концентрации  $^3\text{He}$  составляет примерно 2 – 15 (чем темнее тон, тем ниже концентрация)

Выше рассматривалась задача оценки толщины реголитового слоя Луны по радиолокационным и оптическим данным. Сравнение карты мощности этого слоя с оценками для мест посадок космических аппаратов обнаружило хорошее согласие данных, что говорит о надежности карты. Эту карту можно использовать для совместного анализа с данными о распределении концентрации  $^3\text{He}$ . На рис. 4.29 приведено изображение, передающее распределение параметра, который является произведением концентрации  $^3\text{He}$  на толщину слоя  $h$ . Этот параметр характеризует полное содержание  $^3\text{He}$  в слое реголита, т.е. это количество  $^3\text{He}$ , которое можно добыть из реголита на  $1 \text{ м}^2$  площади лунной поверхности.

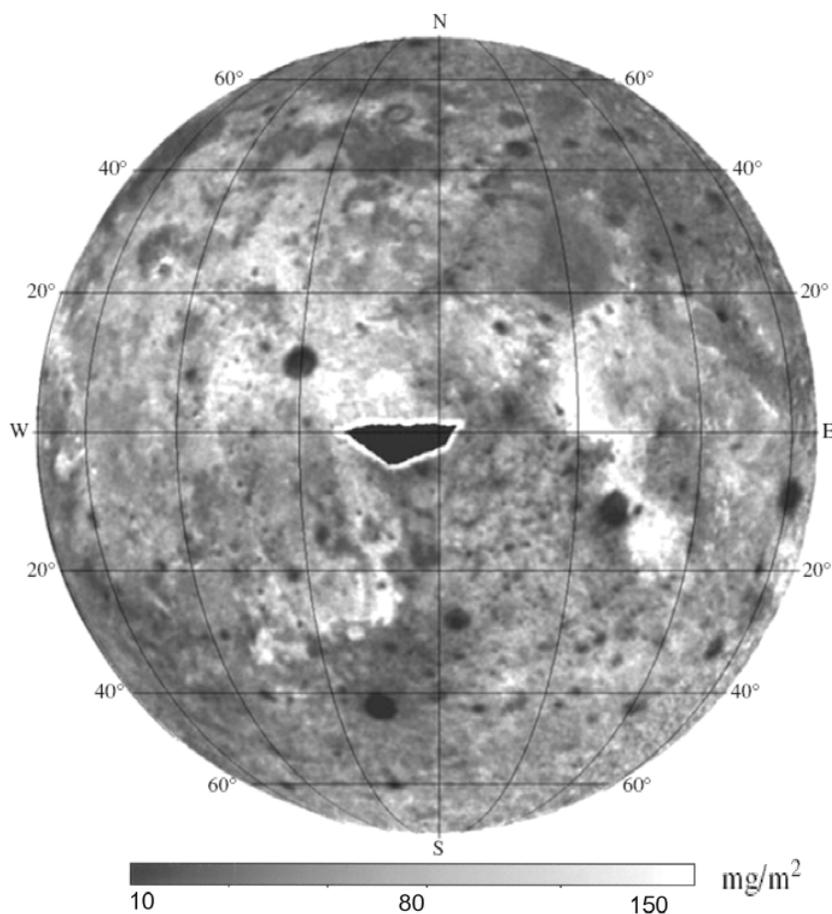


Рис. 4.29. Карта полного содержания  $^3\text{He}$  в реголите на  $1 \text{ м}^2$  площади лунной поверхности. Полный диапазон изменений параметра примерно от 20 до  $140 \text{ мг/м}^2$ . Темные тона означают меньшее содержание  $^3\text{He}$

Коротко опишем карты распределения гелия-3. Как видно из рис. 4.28, области с высокой концентрацией  $^3\text{He}$  находятся в Море Спокойствия, особенно в его западной части. Низкие концентрации  $^3\text{He}$  характерны для материков. Особенно низки эти концентрации для молодых кратеров и зон их выбросов – это незрелый крупнозернистый грунт (см., например, кратер Тихо). По полному содержанию  $^3\text{He}$  на  $1 \text{ м}^2$  лунной поверхности (рис. 4.29) наиболее перспективными районами представляются западная часть Моря Спокойствия, Море Нектара, Залив Центральный, а также морские области к востоку от кратеров Коперник и Кеплер. Это места, перспективные для создания лунных баз, работающих от энергетических установок, которые используют гелий-3.

\*\*\*

Краткий очерк примеров прогнозирования состава и некоторых физических характеристик лунной поверхности по данным спектральных измерений показывает, что эти методики разработаны все еще недостаточно. Часто не ясны границы применимости того или иного подхода; не всегда понятна физическая подоплека корреляций, лежащих в основе прогнозирования; точность определений пока невысокая, и ее трудно контролировать независимо. Здесь автору вспоминается одна из бесед с известным планетологом Кириллом Павловичем Флоренским (рис. 2.5), которая состоялась примерно 25 лет назад. Он задал вопрос как раз о точности прогнозирования состава лунного грунта по оптическим данным. Я сообщил реальные цифры. После чего Флоренский сказал: «если вы укажете мне произвольное место на Луне, то я назову состав поверхности в этой точке с указанной вами точностью без всяких оптических методов, просто, оценивая геологическую ситуацию». С тех пор многое, конечно, изменилось. Методики стали точнее и надежнее (да и Кирилла Павловича давно уж нет), но они все же не столь совершенны, как хотелось бы.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Книга подошла к концу. Читатель, осиливший ее, увидел этапы истории исследований Луны и узнал, как лунная поверхность изучается оптическими дистанционными методами в наши дни. В заключение автор может предложить только несколько прогнозов в дальнейшем освоении Луны и свой субъективный перечень важнейших научных открытий, сделанных благодаря многолетним телескопическим наблюдениям и реализации лунных космических программ. Начнем с такого перечня:

1. Луна необитаема: на ней нет живых организмов, нет следов прошлой жизни, не найдено даже следов органических соединений, образовавшихся *in situ*.
2. Луна – древнее тело, поверхность которого сохранила следы ранней истории Солнечной системы. В огромном диапазоне масштабов (от сотен километров до долей микрона) основным морфологическим элементом поверхности Луны являются кратеры. В подавляющем большинстве они ударного происхождения.
3. Луна сформировалась из вещества, принадлежащего, скорее всего, тому же источнику, из которого сформировалась Земля. Луна прошла сложную эволюцию (химическую дифференциацию) за сравнительно короткое время и имеет внутреннее строение, типичное для планеты земной группы.
4. Поверхностные лунные породы сформировались в высокотемпературных процессах в условиях отсутствия воды. В полярных районах Луны, находящихся в зоне вечной тени (днища кратеров), возможно присутствие льдов, привнесенных столкновениями с кометами, однако, едва ли их количество велико.
5. Все лунные породы имеют земные аналоги. Они подразделяются на два основных типа: базальты (моря) и анортозиты (материки). Поверхность Луны покрыта слоем реголита – рыхлого материала, состоящего из фрагментов пород, брекчий, стекла ударного и даже вулканического происхождения. Реголит несет информацию о солнечной активности за последние 3 – 4 миллиарда лет.
6. История Луны многоэтапна. В частности, был период, когда поверхность Луны была расплавлена полностью или почти полностью; возможно существовал океан магмы глубиной многие десятки километров (современные материки сохраняют остатки материала этого океана). Первичная лунная поверхность, образованная застывшей магмой, разрушалась ударами крупных тел, которые породили бассейны, заполненные позднее потоками лавы (современные моря) из источников, находящихся на больших глубинах.

7. Луна немного асимметрична в объеме – ее кора на обратном полушарии почти вдвое толще, чем на видимом. Луна неоднородна, по крайней мере, в поверхностном объеме – обнаруживаются концентрации масс, обычно ассоциирующиеся с ударными бассейнами.
8. Некоторые лунные породы обладают остаточной намагниченностью, что говорит о существовании в прошлом планетарного магнитного поля, хотя сейчас такого поля у Луны нет.
9. Луна – не совсем мертвое тело. Зарегистрированы лунотрясения, порожденные глубоко расположенными источниками (на глубинах порядка 1000 км). Найдены области повышенной эманации радона, что говорит о слабом потоке вулканических газов. Наблюдались перемещения пылевых облаков, образованных заряженными пылевыми частицами лунного грунта.

Сейчас в исследованиях Луны наблюдается этап интегрирования, осмысления имеющихся данных и подготовки новых космических миссий. В частности, оптические методы исследования по-прежнему занимают важное место в арсенале средств дистанционной диагностики. В настоящее время наиболее разработанным методом представляется спектрофотометрический метод. Однако весьма перспективными представляются фотометрический (фазовые отношения) и поляриметрический методы, которые пока еще не оценены по достоинству. Здесь имеется возможность получить много нового с помощью телескопических исследований.

Среди направлений последних лет в исследовании Луны дистанционными оптическими методами отметим несколько.

1. Работы с мозаиками спектрональных изображений Луны, полученных UVVis камерой КА «Клементина». Только эти мозаики обеспечивают глобальное покрытие лунной поверхности фотометрическими измерениями с высоким пространственным разрешением в пяти участках спектра. Измерения приведены к системе лабораторных спектров лунного грунта (прибор RELAB). Использование этих данных совместно с химико-минералогическими данными для образцов лунного грунта позволяет строить карты прогноза состава лунной поверхности и степени зрелости реголита. Методика такого прогноза пока не очень совершенна, однако ее дальнейшее развитие является одним из наиболее перспективных направлений в современных дистанционных исследованиях Луны.
2. Совместный анализ данных геохимической съемки низкого разрешения и оптических измерений среднего и высокого разрешения. Первый опыт такого анализа с использованием съемки КА «Лунар Проспектор» и «Клементина» показал возможность построения даже

таких «экзотических» распределений, как содержание кислорода в лунном грунте. Этот метод может применяться не только для анализа данных гамма съемки, но и рентгеновской съемки Луны, например, он применим к данным, полученным рентгеновским спектрометром D-CIXS космической миссии «Смарт-1».

3. Исследование процессов транспортировки материала на поверхности Луны. Как мы видели, это можно успешно делать, используя оптические измерения. Так, оптический прогноз подтверждает, что морские агглютинаты обогащены  $\text{Al}_2\text{O}_3$  и обеднены  $\text{FeO}$ , тогда как материковые агглютинаты, наоборот, обеднены  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , но обогащены  $\text{FeO}$ . Перенос материала при импактных явлениях различного масштаба может быть причиной того, что молодые материковые кратеры и их лучевые системы имеют небольшие химические аномалии по основным породообразующим окислам.
4. Исследование мощности лунного реголита видимого полушария Луны с использованием данных радарных и оптических измерений лунной поверхности. Описанная карта толщины реголитового слоя видимого полушария Луны является первым приближением, поскольку при ее построении использовался ряд допущений. Развитие этой методики очень перспективно для изучения глобальной эволюции лунной поверхности.
5. Картирование концентрации  $^3\text{He}$  в грунте. По уже построенной карте для видимого полушария Луны можно оценить количество  $^3\text{He}$ , которое можно добыть с  $1 \text{ м}^2$  площади лунной поверхности. Наибольшая концентрация  $^3\text{He}$  и наибольшее содержание его на  $1 \text{ м}^2$  поверхности прогнозируется для западной части Моря Спокойствия и Залива Центрального. Наименее перспективным районом с точки зрения добычи  $^3\text{He}$  оказывается Море Ясности. Эти оценки могут быть использованы при планировании строительства будущих лунных баз.

В ближайшие годы предполагается осуществить несколько лунных космических миссий. Благодаря этим миссиям, мы узнаем о Луне много нового. Можно надеяться, что это будет только началом широкого освоения нашего спутника. Впереди создание постоянных лунных баз, мощных энергетических установок, оптических и радио обсерваторий. Поверхность Луны, если сравнивать со временем существования цивилизации, можно считать практически неизменной. Большая часть площади этой поверхности несет информацию о событиях, происходивших сотни миллионов и даже миллиарды лет назад. Однако если начнется интенсивное освоение Луны, ее облик будет постепенно изменяться за счет техногенной деятельности. В свете этого, представляется делом общечеловеческой значимости

своевременный сбор информации о первозданном, еще не нарушенном, облике нашего спутника.

Важно и то, что новый этап в освоение Луны будет осуществляться несколькими странами или международным сообществом. К сожалению, наш мир сейчас таков, что следует иметь в виду не только научно-экономические аспекты освоения Луны, но и военные. Несмотря на существующие международные соглашения, не закрыт вопрос об испытаниях и складировании нового оружия на обратной стороне Луны – недоступной наблюдению (контролю) с Земли. Если этим будет заниматься одна страна, а остальные будут не в состоянии доставить туда даже «вымпел и герб», то возможные последствия для мирового устройства могут быть неприятными. Таким образом, повторение лунной гонки на каком-то новом уровне не кажется невозможным. Здесь ученые вновь могут попытаться, влияя на политиков, использовать значительные научно-технические ресурсы своих стран для решения задач, связанных с исследованиями космоса. К перспективным «лунным» научным направлениям относятся: исследование происхождения и эволюции Луны, Земли и Солнечной системы; космическая плазменная физика и физика высоких энергий; проведение уникальных астрофизических и радиоастрономических наблюдений; солнечный мониторинг; изучение глобальных климатических процессов на Земле; эксперименты, требующие особой изоляции от техногенных воздействий, в частности, высокой стерильности и т.п.

Завершить этот очерк хочется яркими словами астронавта-геолога Гаррисона Шмитта: «... планетное тело, которые мы называем Луной, сейчас представляет собой испещренное кратерами и запыленное окно в изучение проблем происхождения и эволюции самой Земли». К этому можно добавить лишь, что это окно, возможно, окажется окном не только в прошлое, но и будущее Земли, будущее нашей цивилизации, для которой Луна является естественным плацдармом для освоения Солнечной системы и познания Мира.

## РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

- Грунт из Моря Изобилия / Ред. А. П. Виноградов. – М.: Наука. 1979.
- Грунт из материкового района Луны / Ред. В. Л. Барсуков. – М.: Наука. 1979.
- Лунный грунт из Моря Кризисов / Под ред. В. Л. Барсукова. – М.: Наука. 1980.
- Мишин В. П. Почему мы не слетали на Луну? Сер. Космонавтика, Астрономия №12. – М.: Знание 1990. 63 с.
- Кинг А. Космическая геология. М.: Мир, 1979. 379 с.
- Космохимия Луны и планет / Ред. А. П. Виноградов. М.: Наука. 1975. С. 547-573.
- Черток Б. Е. Ракеты и люди (лунная гонка). – М.: Машиностроение. 1999. 570 с.
- Шевченко В. В. Современная селенография. – М.: Наука. 1980. 289 с.
- Шкуратов Ю. Г. Актуальные задачи наблюдения Луны наземными астрономическими средствами // Астрон. вестн. 2000. Т. 34. № 3. С. 216-232.
- Шкуратов Ю. Г., Старухина Л. В., Кайдаш В. Г., Бондаренко Н. В. Распределение содержания <sup>3</sup>Не по видимому полушарию Луны // Астрон. вестн. 1999. Т. 33. №5. С. 466-478.
- Cortright E. Apollo: expeditions to the Moon. SP-350. NASA. 1975.
- Lunar Source Book / Eds. G. Heiken et al. – Cambridge: Cambridge Univ. Press. 1991.
- Remote geochemical analysis: elemental and mineralogical composition / Eds. C. Pieters and P. Englert. Cambridge Univ. Press. 1993.
- Pieters C. A summary of spectral reflectance data // Proc. Lunar Sci. Conf. 9th. LPI Houston. 1978. P. 2825-2849.
- Shkuratov Yu. G. Opanasenko N. V. Polarimetric and photometric properties of the Moon: Telescope observation and laboratory simulation. The positive polarization // Icarus. 1992. V. 99. P. 468-484.
- Shkuratov Yu. G., Bondarenko N. V. Regolith thickness mapping of the Moon by radar and optical data // Icarus 2001. 149. P. 329-338.

Shkuratov Yu., Kaydash V., Stankevich D., Pinet P., Chevrel S., Daydou Y., Derivation of elemental abundance maps at intermediate resolution from optical interpolation of Lunar Prospector Gamma-Ray spectrometer data // *Planet. Space Sci.* 2005, 53, 1287-1301.

Sluiter E., The telescope before Galileo // *J. History Astron.* 1997. V. 28. Part 3. No. 92. P. 223-234.

Spudis P. The once and future Moon. Washington and London: Smithsonian Inst. Press. 1996. 308 p.

Taylor S. Lunar science: Post Apollo Era. N.Y. 1972. 370 p.

Wilhelms D. E. The geologic history of the Moon. Washington, USGS #1348, 1987.

New views of the Moon (Reviews in Mineralogy and Geochemistry, v. 60) / B. Jolliff et al. – Chantilly, Virginia: Min. Soc. Amer. 2006.