



**В. В. ШЕВЧЕНКО**

**СОВРЕМЕННАЯ  
СЕЛЕНОГРАФИЯ**



**В. В. ШЕВЧЕНКО**

# СОВРЕМЕННАЯ СЕЛЕНОГРАФИЯ



МОСКВА «НАУКА»  
ГЛАВНАЯ РЕДАКЦИЯ  
ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКОЙ ЛИТЕРАТУРЫ  
1980



**Современная селенография.** Шевченко В. В., Главная редакция физико-математической литературы издательства «Наука», М., 1980, с. 288.

Книга посвящена современным проблемам изучения лунной поверхности и изложению методов, с помощью которых эта задача решается. Приводятся сведения о Луне, как небесном теле; подробно описано строение лунной поверхности. Кратко изложены основы современной лунной картографии и дан обзор общеселенографических карт различного масштаба. Рассмотрены принципы физической селенографии как нового комплексного метода исследования природы лунной поверхности. В книге приводятся физические карты лунного шара, содержится много конкретных сведений, которые могут служить современными справочными данными по лунной поверхности.

Рассчитана на астрономов, геологов, геохимиков и географов, интересующихся проблемами планетоведения. Может оказаться полезной аспирантам и студентам указанных специальностей. Описательные главы книги привлекут внимание широкого круга любителей астрономии.

Табл. 32, илл. 93, библи. 182.

*Владислав Владимирович Шевченко*

**СОВРЕМЕННАЯ СЕЛЕНОГРАФИЯ**

М., 1980 г., 288 стр. с илл.

Редактор *И. Е. Рахлин*

Техн. редакторы *И. Ш. Аксельрод, Н. В. Кошелева*  
Корректоры *Е. А. Велицкая, Л. С. Сомова*

ИБ № 11318

Сдано в набор 04.01.80. Подписано к печати 11.06.80. Т-08170. Бумага 84×108<sup>1/2</sup>. Тип. № 2. Высокая печать. Обыкновенная гарнитура. Условн. печ. л. 15,12. Уч.-изд. л. 15,72. Тираж 2000 экз. Заказ № 33. Цена книги 2 р. 60 к.

Издательство «Наука»

Главная редакция физико-математической литературы  
117071, Москва, В-71, Ленинский проспект, 15

4-я типография издательства «Наука». 630077, Новосибирск, 77, Станиславского, 25

III  $\frac{20604-070}{053(02)-80}$  196-80. 1705050000

© Издательство «Наука»,  
Главная редакция  
физико-математической  
литературы, 1980

## ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение . . . . .	5
Глава I. Луна в Солнечной системе . . . . .	7
1. Движение Луны и вращение вокруг оси . . . . .	7
2. Размеры, масса, средняя плотность, общее строение поверхности Луны . . . . .	12
3. Гравитационное поле Луны, магнетизм лунных пород, тепловой режим поверхности . . . . .	19
4. Химический состав, внутреннее строение и происхождение Луны . . . . .	25
5. Атмосфера Луны и окололунное пространство . . . . .	32
6. Сравнение Луны с другими телами Солнечной системы . . . . .	44
Глава II. Основные особенности строения лунной поверхности . . . . .	46
1. Глобальное строение поверхности лунного шара . . . . .	46
2. Физическая поверхность и фигура Луны . . . . .	51
3. Планетарные кольцевые структуры на поверхности Луны . . . . .	62
4. Общая асимметрия лунного шара . . . . .	69
5. Линейные структуры на лунной поверхности . . . . .	73
6. Лунные кратеры . . . . .	80
7. Кратеры с лучевыми системами . . . . .	87
8. Лунный реголит . . . . .	95
Глава III. Лунная картография . . . . .	103
1. Системы селенографических координат . . . . .	103
2. Картографические проекции, применяемые в лунной картографии . . . . .	110
3. Селенографическая привязка снимков и методы создания лунных карт . . . . .	121
4. Номенклатура и топонимика лунных образований . . . . .	133
5. Современные селенографические карты и глобусы . . . . .	139

Глава IV. Физическая селенография и астрофизические исследования Луны . . . . .	146
1. Лунная среда — объект исследования физической селенографии . . . . .	146
2. Дистанционные астрофизические методы исследования лунной поверхности . . . . .	152
3. Фотометрические свойства лунной поверхности . . . . .	163
4. Природа оптических свойств лунной поверхности . . . . .	184
5. Карты оптических характеристик поверхности Луны . . . . .	195
6. Картографическое моделирование особенностей строения лунной поверхности . . . . .	206
7. Физиографическое деление поверхности лунного шара . . . . .	217
Глава V. Палеоселенография . . . . .	226
1. Возраст лунных образований и общая история эволюции поверхности . . . . .	226
2. Кратерированность поверхности как показатель относительного возраста . . . . .	235
3. Многофазность формирования лунных ландшафтов . . . . .	243
4. Древний рельеф Луны . . . . .	265
Литература . . . . .	274
Предметный указатель . . . . .	284

## ВВЕДЕНИЕ

Селенография — традиционная для астрономов область исследований Луны — занимается изучением строения поверхности естественного спутника нашей планеты.

В прошлом селенография включала зачатки практической всех других направлений лунных наук — селенологию, селенохимию, селенофизику, лунное грунтоведение и т. д. Резкое увеличение объема информации о природе Луны привело к тому, что каждое из этих направлений получило самостоятельное развитие. Подобно наукам о Земле возник целый комплекс лунных наук. Широко известны результаты изучения лунного грунта и химического состава пород, определения абсолютного возраста вещества и изучения особенностей строения гравитационного и магнитного полей, полученные за последние 40—15 лет интенсивных исследований Луны с помощью космической техники.

На этом фоне селенография не утратила своего значения, обогатившись новыми методами и новым содержанием. Выявились ее современные особенности: селенография стала как бы платформой взаимного перекрытия и стыковки отдельных узких направлений.

По достижении определенного уровня знаний о природе планеты важно не только представлять, какие разнородные процессы происходят на ней, но и понимать их взаимосвязи. Отсюда проистекает требование комплексного подхода к изучению среды небесного тела. Такой подход к изучению земной среды характерен для физической географии. Эта наука определила понятие земной ландшафтной оболочки или сферы и сделала вывод о ее единстве и целостности, о взаимозависимости и взаимодействии ее составляющих — атмосферы, гидросферы, литосферы, биосферы и т. д. Использование данного методологического принципа представляется целесообразным

и в отношении других тел Солнечной системы с ростом информации об их природе; прежде всего это касается наиболее подробно изученного в настоящее время инопланетного тела — Луны. Исследование свойств и природы компонентов лунной ландшафтной сферы в их диалектическом единстве должно стать, по аналогии с физической географией, предметом физической селенографии.

Луна как объект, входящий в состав Солнечной системы и вместе с другими планетами и спутниками представляющий определенную стадию эволюции вещества во Вселенной, продолжает интересовать астрономов. Современная селенография является в значительной степени наукой астрономической и широко пользуется астрономическими и астрофизическими методами дистанционного изучения природы небесных тел. Применение космической техники не только помогло уточнить и расширить сведения о природе поверхности Луны, но также способствовало существенной модернизации ряда традиционных методов селенографии и появлению новых, — таких, например, как фотометрические исследования Луны по данным космических съемок.

В предлагаемой читателю монографии изложены материалы разработок в области современной селенографии, проведенных за последние 10—15 лет в нашей стране и за рубежом. Наиболее подробно рассмотрены результаты, полученные коллективом Отдела исследований Луны Государственного астрономического института им. П. К. Штернберга и самим автором.

Первая глава монографии содержит сводку данных о Луне как небесном теле. Вторая глава посвящена описанию лунной поверхности — ее общему строению и характеристике наиболее типичных образований. Третья глава дает общее представление о современной лунной картографии. Четвертая глава отведена изложению проблем физической селенографии, предметом которой является исследование свойств и природы компонентов лунной ландшафтной сферы. В пятой главе делается попытка обобщить материалы, которые с позиций селенографии представляли бы сведения о прошлом поверхности Луны. Это направление можно назвать палеоселенографией по аналогии с соответствующей земной наукой.

## ЛУНА В СОЛНЕЧНОЙ СИСТЕМЕ

## 1. Движение Луны и вращение вокруг оси

В процессе своего движения в пространстве Луна испытывает влияние в основном двух небесных тел, существенно превышающих ее по массе: Земли и Солнца.

При двукратном превазировании солнечного притяжения кривая движения Луны по отношению к Солнцу

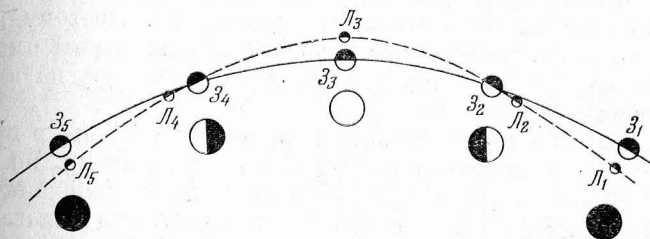


Рис. 1. Схема движения Земли и Луны вокруг Солнца. Фазы Луны, наблюдаемые с Земли.

оказывается вогнутой во всех своих точках. Однако, поскольку такое движение происходит в постоянной близости от Земли, величина кривизны лунной гелиоцентрической орбиты периодически изменяется.

На рис. 1 представлена схема перемещения Луны в пространстве и наблюдаемые с Земли фазы в зависимости от взаимного расположения Солнца, Земли и Луны. Допустим, что в момент, когда Земля занимает положение  $Z_1$ , Луна проходит точку своей орбиты  $L_1$ , находясь как бы между Землей и Солнцем. В этом случае к Земле оказывается обращенным темное, неосвещенное полушарие Луны. Следовательно, для земного наблюдателя Луна находится в фазе новолуния. Двигаясь на отрезке  $L_1L_2$ , Луна постепенно меняет свое положение относи-



тельно Земли и Солнца. С Земли становится возможным наблюдать часть освещенного полушария Луны — сначала в виде узкого серпа, а из положения  $Z_2$  — уже как половину видимого диска Луны. Таким образом, в точке  $L_2$  Луна находится в момент первой четверти. Минувя положение  $L_3$ , соответствующее фазе полнолуния для земного наблюдателя, и положение  $L_4$ , соответствующее последней четверти, Луна придет в точку  $L_5$ , т. е. займет по отношению к Земле и Солнцу положение, подобное в нашей схеме начальному. Завершение полного фазового цикла происходит через 29,53059 суток после его начала. Этот период носит название синодического месяца. В течение года, когда вместе с Землей Луна совершит полный оборот вокруг Солнца, цикл изменения фаз повторится более двенадцати раз. Следует учесть также, что Луна движется не в плоскости эклиптики. Поэтому реальная кривая гелиоцентрического движения Луны имеет еще более сложный вид, чем это можно показать на плоском чертеже.

Чтобы упростить модель перемещения Луны в пространстве в отношении наглядного представления, но не потерять при этом математической и небесно-механической строгости, авторы теории движения Луны полагают Землю неподвижной и рассматривают Луну только лишь как спутник нашей планеты, обращающийся вокруг нее по орбите. Влияние, которое оказывают на это движение Солнце и другие тела Солнечной системы, учитывается соответствующими поправками. Согласно такой схеме орбита Луны представляет собой эллипс при среднем значении эксцентриситета  $e = 0,05490$ . Большая полуось этого эллипса по величине равна среднему расстоянию  $a_{\zeta}$ , т. е. 384 400 км. В апогее это расстояние увеличивается до 405 500 км, а в перигее уменьшается до 363 300 км. Плоскость лунной орбиты наклонена к плоскости эклиптики на угол  $i = 5^{\circ}08'43''{,}4$ . Среднее расстояние  $a_{\zeta}$  можно вычислить по данным радиолокационных измерений расстояний  $\rho$  между точкой на земной поверхности, из которой излучен радиоимпульс, и областью на лунной поверхности, отразившей сигнал. Непосредственно измеряемой величиной служит время  $T$  прохождения радиосигналом двойного расстояния  $\rho$ . Таким образом, отрезок времени  $T$  определяется промежутком между моментом

посылки исходного импульса и моментом регистрации отраженного импульса (радиоэха). В формулу входит также скорость распространения радиоволн  $c$ :

$$\rho = \frac{T}{2} c. \quad (1.1)$$

Как следует из рис. 2, расстояние  $S$  между центрами Земли и Луны в момент наблюдения и значение величин

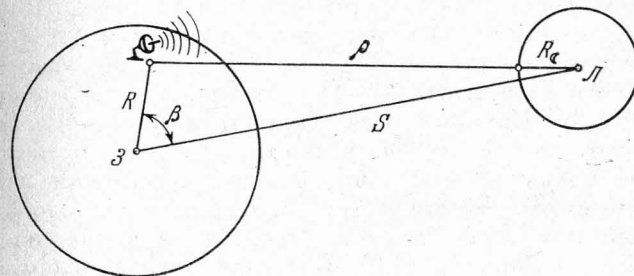


Рис. 2. Схема определения расстояния до Луны методом радиолокации.

ны  $\rho$  связаны соотношением

$$\rho = (R^2 + S^2 - 2RS \cos \beta)^{1/2} - r, \quad (1.2)$$

где  $R$  — геоцентрический радиус-вектор точки наблюдения на земной поверхности,  $r$  — селеноцентрический радиус-вектор области на лунной поверхности, расположенной в центре видимого диска и отразившей радиосигнал. Угол  $\beta$  определяется по формуле

$$\cos \beta = \sin \varphi' \sin \delta + \cos \varphi' \cos \delta \cos t_{\zeta}, \quad (1.3)$$

в которой  $\varphi'$  — геоцентрическая широта точки наблюдения,  $\delta$  — склонение Луны,  $t_{\zeta}$  — местный часовой угол Луны.

В основу определения величины  $a_{\zeta}$ , принятой в настоящее время, положены радиолокационные наблюдения на установке Морской научно-исследовательской лаборатории в Вашингтоне [1]. При вычислениях приняты следующие значения постоянных:  $c = 299792,8$  км/с,  $R = 6369936$  м,  $R_{\zeta} = 1738$  км. С учетом ошибок в значении постоянных величин, величина среднего расстояния Зем-

ля — Луна определяется выражением:

$$a_{\zeta} = 384400,3 \text{ км} + 0,712\Delta R + \Delta r + 1,3\Delta c.$$

Для определения окончательного результата использованы такие величины погрешностей:  $\Delta R = -0,1$  км,  $\Delta r = \pm 1,0$  км,  $\Delta c = \pm 0,3$  км [2]. Следовательно,

$$a_{\zeta} = 384400,2 \pm 1,1 \text{ км}.$$

Применение лазерной техники и измерение расстояний Земля — Луна по методу светолокации позволяет еще более повысить точность определения среднего расстояния  $a_{\zeta}$  и в первую очередь за счет меньшей погрешности величины  $\rho$ . Принцип расчетов при лазерных определениях тот же: непосредственно измеряемой величиной служит время прохождения двойного расстояния лазерным сигналом. Вместе с тем, особенности светолокаций предъявляют более жесткие требования к знанию постоянных в формуле (1.2). Поскольку отражателем сигнала служит уже не обширная область в центре видимого диска Луны, а специально созданное оптическое устройство, возникает необходимость для точных расчетов использовать селеноцентрический радиус-вектор отражателя вместо среднего радиуса Луны. Собственно, расстояние между точкой наблюдения на Земле и отражателем на лунной поверхности измеряется с точностью на порядок более высокий, чем в случае радиолокационного метода. Опыт первых наблюдений показал, что ошибка в измерении расстояния  $\rho$  не превышает  $\pm 3$  м [3].

Многочисленность определений обеспечивает еще более высокую точность. Так, например, в 1972 г. с помощью 2,7-метрового телескопа обсерватории Мак-Дональд было проведено 3226 отдельных измерений времени прохождения лазерного сигнала с использованием светоотражателей, установленных экипажами кораблей «Аполлон-11», «Аполлон-14» и «Аполлон-15». Точность определения расстояний, достигнутая при этом, составила около 15 см [4].

Период геоцентрического движения Луны определяется как промежуток времени между двумя последовательными одинаковыми положениями Луны среди звезд при наблюдении с Земли. Этот период носит название сидерического месяца и составляет 27,32166 суток. Разница в продолжительности синодического и сидерического

месяцев возникает в результате учета в первом случае орбитального движения Земли. Во втором случае, как очевидно, это движение не сказывается. Величины обоих периодов связаны соотношением

$$\frac{1}{S} = \frac{1}{T} - \frac{1}{E}, \quad (1.4)$$

где  $S$  — продолжительность синодического месяца,  $T$  — продолжительность сидерического месяца,  $E$  — продолжительность сидерического (звездного) года, т. е. промежуток времени между двумя одинаковыми положениями Луны при наблюдении с Земли среди звезд после завершения гелиоцентрического цикла движения.

Приведенные выше параметры геоцентрической орбиты Луны, как оговорено, являются средними, т. е. описывают невозмущенное (кеплеровское) движение Луны. При учете различных периодических возмущений, порождаемых влиянием на движение Луны других тел Солнечной системы, указанные значения несколько изменяются во времени.

Осевое вращение Луны в первом приближении описывается тремя законами, сформулированными Кассини и носящими его имя. Согласно этим законам лунный экватор имеет постоянный наклон к плоскости эклиптики (угол наклона  $I = 1^{\circ}32'47'' \pm 24''$ ), ось вращения Луны лежит в одной плоскости с осью эклиптики и осью лунной орбиты так, что восходящий узел лунного экватора на эклиптике совпадает с нисходящим узлом лунной орбиты и вращение происходит с постоянной угловой скоростью в том же направлении, в котором Луна движется вокруг Земли, т. е. против часовой стрелки, если смотреть со стороны северного полюса. Период вращения Луны равен продолжительности сидерического месяца. Равенство периодов осевого и геоцентрического вращений Луны приводит к известной уникальной особенности системы «Земля — Луна», при которой к Земле обращено одно и то же полушарие Луны — видимая сторона. Сочетание равномерного вращения вокруг оси с неравномерным движением по эллиптической орбите порождает еще одну особенность — оптическую либрацию по долготе. Поскольку в точки пересечения малой оси эллипса своей орбиты Луна приходит раньше или позже того, как завершится

соответствующий полуоборот вокруг оси, земной наблюдатель имеет возможность каждый раз заглядывать на территорию обратной стороны. Так как эксцентриситет лунной орбиты невелик, видимые покачивания Луны относительно направления на центр Земли, составляющие оптическую либрацию по долготе, не превышают нескольких селеноцентрических градусов в каждую сторону. Если учесть также, что в результате наклона лунной орбиты происходит аналогичное кажущееся покачивание по широте — оптическая либрация по широте, можно подсчитать, что в общем наблюдению с Земли доступно 59% лунной поверхности. Конечно, наблюдения краевых и либрационных областей затруднены неблагоприятным ракурсом.

Так как лунная ось вращения составляет с плоскостью эклиптики почти прямой угол ( $\sim 88^\circ,5$ ), лунные солнечные сутки, равные продолжительности синодического месяца, делятся поровну на темное и светлое время вне зависимости от положения Луны на гелиоцентрической орбите. Таким образом, на лунной поверхности нет наблюдаемых астрономических признаков сезонных изменений внешних условий.

Реальное вращение Луны вокруг своей оси несколько отличается от определяемого законами Кассини. Так же как и в случае Земли, вращение Луны сопровождается малыми по абсолютной величине колебаниями нутационного типа. Эти малые колебания носят название физической либрации. При выполнении некоторых высокоточных исследований, связанных с Луной, величины физической либрации подлежат учету. Вместе с тем, изучение самого явления физической либрации имеет самостоятельное значение, поскольку характеризует физические особенности Луны, как небесного тела. (Подробное современное изложение теории вращения Луны можно найти в [5].)

## 2. Размеры, масса, средняя плотность, общее строение поверхности Луны

Размеры Луны в первом приближении описываются величиной среднего радиуса. Классическим способом определения этой величины являлось измерение углового радиуса видимого диска. Высокоточные измерения подоб-

ного характера возможны, например, во время кольцевых солнечных затмений или при наблюдении покрытий звезд диском Луны. Принятое в настоящее время значение среднего радиуса  $R_{\zeta} = 1738$  км. Очевидно, что использование для получения  $R_{\zeta}$  только точек края видимого диска дает представление лишь о единственном меридиональном сечении лунного шара. Краевая зона, которая благодаря оптической либрации становится доступной изучению, невелика по протяженности и не позволяет существенно расширить область измерений.

Более обоснованное значение радиуса лунной сферы можно вывести по измерениям абсолютных высот точек лунной поверхности в пределах видимого полушария. Полученные подобным образом из обработки различных каталогов абсолютных высот значения  $R_{\zeta}$  колеблются в пределах от 1736,74 км до 1738,9 км [6]. В качестве примера определения среднего радиуса на основании данных, распространяющихся не только на видимое, но и на обратное полушарие, можно привести результаты лазерной альтиметрии. Во время полета орбитальных отсеков кораблей «Аполлон-15» и «Аполлон-16» были получены два полных (круговых) профиля лунного рельефа с различными наклонами относительно экватора. Сфера, наилучшим образом вписывающаяся в физическую поверхность Луны, согласно этим данным имеет радиус 1737,4 км. Таким образом, принятое в астрономии значение среднего радиуса, вероятно, с достаточной точностью характеризует размеры лунного шара. В соответствии с этим значением площадь поверхности Луны составит

$$S_{\zeta} = 37,958 \cdot 10^6 \text{ км}^2 (0,074 S_{\oplus}),$$

а объем

$$V_{\zeta} = 21,991 \cdot 10^9 \text{ км}^3 (0,020 V_{\oplus}).$$

Для определения величины массы Луны можно прибегнуть к различным способам. Классический способ, применяемый в астрономии, использует особенности совместного движения Земли и Луны, если учитывать влияние лунной массы на характер этого движения. Поскольку величина лунной массы не бесконечно мала по сравнению с массой Земли, оба тела должны совершать перемещения вокруг общего центра масс (барицентра). Подобно тому как в простой схеме геоцентрического дви-



жения Луна обращается вокруг Земли с месячным периодом, в схеме, учитывающей взаимное влияние масс этих тел, центр масс Земли также будет с тем же периодом перемещаться по эллиптической орбите вокруг барицентра. Большая полуось этого эллипса или расстояние от центра масс Земли до барицентра « $b$ » входит в соотношение:

$$\frac{b}{a_{\odot}} = \frac{M_{\odot}}{M_{\oplus} + M_{\odot}},$$

откуда

$$b = a_{\odot} \frac{\mu}{1 + \mu}, \quad (1.5)$$

где

$$\mu = \frac{M_{\oplus}}{M_{\odot}}.$$

Таким образом, по эллиптической орбите вокруг Солнца, строго говоря, движется точка, в которой находится барицентр, а центр Земли постоянно удален от этой точки на среднее расстояние, равное « $b$ ». Следовательно, в видимом положении Солнца и планет возникают параллактические смещения, зависящие от величины « $b$ ». Параллактическое смещение в положении Солнца по долготе, носящее название лунного неравенства, в угловой радианной мере можно выразить следующим образом:

$$L = \frac{b}{a_{\odot}} = \frac{a_{\oplus}}{a_{\odot}} \cdot \frac{\mu}{1 + \mu}. \quad (1.6)$$

Величина  $L$  определяется из наблюдений Солнца во время квадратур Луны, когда  $\lambda_{\oplus} - \lambda_{\odot} = \pm 90^{\circ}$ . Тогда, приняв в качестве известных величин  $a_{\oplus}$  и  $a_{\odot}$ , можно вычислить относительную массу Луны  $\mu$ .

На практике более удобно определять величину лунного неравенства из наблюдений близких к Земле тел — планет или проходящих вблизи Земли астероидов. Известная серия определений величины  $\mu$  подобным способом основана на наблюдениях малой планеты Эрос в периоды 1900—1901 и 1930—1931 годов.

Более поздняя переработка этих определений дала величину отношения масс Земли и Луны  $\mu$ , близкую к значению  $1/81,30$ .

Принципиальную основу изложенного способа можно использовать, измеряя вариации в дальностях до небесных тел, соответствующие отклонения центра масс Земли от барицентра. По радиолокационным определениям расстояний до планет выведено значение  $\mu^{-1} = 81,3020 \pm \pm 0,0020$ .

Другим независимым способом определения величины лунной массы в единицах массы Земли является использование траекторных измерений, проводящихся в процессе слежения за космическими аппаратами. Как известно, скорость движения аппарата относительно Земли определяется с использованием эффекта Доплера. Однако, для того чтобы полученные величины использовать для вычисления положения аппарата в пространстве, необходимо учесть собственную скорость Земли и в том числе скорость перемещения земного центра относительно барицентра системы «Земля — Луна». Этот компонент движения Земли имеет месячный период и амплитуду, равную произведению среднего суточного движения Луны на величину большой полуоси барицентрической орбиты центра масс Земли:

$$n_{\oplus} b = \frac{n_{\oplus} a_{\oplus} \mu}{1 + \mu}. \quad (1.7)$$

Если обозначить  $v$  исходную частоту и  $c$  — скорость распространения радиоволн, изменение частоты, обусловленное эффектом Доплера, можно записать в виде [7]

$$v_D = \frac{v}{c} \frac{n_{\oplus} a_{\oplus} \mu}{1 + \mu}. \quad (1.8)$$

где  $c$ ,  $n_{\oplus}$ ,  $a_{\oplus}$  — известные постоянные. Следовательно, возникает возможность, используя (1.7) и (1.8), вычислить значение  $\mu$ . Подобные определения в последние годы были неоднократно повторены в процессе запусков аппаратов, уходящих в дальний космос. В таблице 1 приведены средние величины  $\mu^{-1}$  по каждому из типов космических аппаратов «Маринер-2, -4, -5, -6, -7» [8, 9], «Пионер-6, -7, -8, -9» [10], «Венера-4, -5, -6, -7» [11].

Наконец, величину относительной массы Луны могут дать также и результаты траекторных измерений по космическим аппаратам, находящимся непосредственно в сфере притяжения Луны. В таблице 2 приведены такие

данные, полученные по наблюдениям движения аппаратов «Рейнджер-6, -7, -8, -9», «Сервейор-1, -3, -4, -5, -6, -7» и «Лунар орбитер-1» [9].

Массу Луны можно также получить из величины произведения  $gM_{\zeta}$ , где  $g = 6,672 \cdot 10^{-23} \text{ км}^3/\text{с}^2 \cdot \text{г}$  — постоянная

Таблица 1

Тип космического аппарата	$\mu^{-1}$	$gM_{\zeta} (\text{км}^3/\text{с}^2)$
«Маринер»	81,3008	—
«Пионер»	81,3014	4902,75
«Венера»	81,3018	4902,72

ньютоновского тяготения. Величина  $gM_{\zeta}$ , определенная по возмущениям траекторий космических аппаратов, испытывающих влияние тяготения Луны, приведена в соответствующих колонках таблиц 1 и 2.

Таким образом, несколько независимых способов определения дают весьма близкие значения относительной

Таблица 2

Тип космического аппарата	$\mu^{-1}$	$gM_{\zeta} (\text{км}^3/\text{с}^2)$
«Рейнджер»	81,3034	4902,63
«Сервейор»	81,3034	4902,64
«Лунар орбитер»	81,3030	4902,73

массы Луны. В качестве эфемеридной величины  $\mu^{-1}$  в настоящее время принято значение 81,30. Эта величина соответствует среднему значению большой полуоси эллипса барицентрической орбиты центра масс Земли  $b = 4670 \text{ км}$  (барицентр системы Земля — Луна находится внутри земного шара). Если принять массу Земли равной  $5,977 \cdot 10^{27} \text{ г}$ , то масса Луны определится величиной  $M_{\zeta} = 7,351 \cdot 10^{25} \text{ г}$ .

Данные о размерах и массе Луны позволяют подсчитать среднюю плотность лунного шара. Эта величина при указанных выше значениях  $M_{\zeta}$  и  $V_{\zeta}$  составит  $\bar{\rho}_{\zeta} = 3,343 \text{ г/см}^3$ , что значительно меньше средней плотно-

сти Земли ( $5,517 \text{ г/см}^3$ ). Если сравнивать  $\bar{\rho}_{\zeta}$  с плотностью различных земных пород, то окажется, что наиболее подходящими являются изверженные породы типа силикатов, в частности, — ортосиликаты с четырехвалентным радикалом  $\text{SiO}_4$ . Из типичных горных пород Земли можно указать на перидотит и эклогит, имеющих плотность около  $3,3 \text{ г/см}^3$ . Наиболее распространенными породообразующими минералами для земных силикатов с подобной плотностью являются пироксены  $(\text{Mg}, \text{Fe}, \text{Ca}) \text{SiO}_3$  и плагиоклазы:  $\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$ . Близкую по величине плотность ( $3,27 \text{ г/см}^3$ ) имеет также минерал оливин:  $(\text{Mg}, \text{Fe})_2\text{SiO}_4$ . В случае Земли названные выше породы — это изверженные аналоги вещества, слагающего верхнюю мантию и имеющего плотность  $3,32\text{—}3,65 \text{ г/см}^3$  на глубинах  $33\text{—}400 \text{ км}$ .

Низкая средняя плотность Луны согласуется с отсутствием тяжелого металлического ядра. Очевидно, глубинное вещество лунного шара также относится к силикатным породам.

Традиционно на лунной поверхности выделяют две основные ландшафтные категории: материки и моря. Лунный шар покрыт единым материковым щитом, в котором отдельными вкраплениями располагаются моря. На рис. 3 показана схема глобального строения лунной поверхности. На схеме нанесены контуры морских областей и кратеров, достигающих в диаметре более  $20 \text{ км}$ . Основные морские образования сосредоточены в центральной части видимого полушария. Крупнейшее из них — Океан Бурь, к которому примыкают Море Дождей с северо-востока, Море Влажности и Море Облаков с юга. В восточной половине видимого с Земли полушария с северо-запада на юго-восток цепочкой протянулись Море Ясности, Море Спокойствия и Море Изобилия. С юга к этой цепочке примыкает Море Нектара, а с северо-востока — Море Кризисов. На границе видимого и обратного полушарий расположены сравнительно небольшие по площади моря: Море Восточное (к западу от Океана Бурь), Море Краевое, Море Смита и Море Южное (к востоку от Моря Изобилия). На обратной стороне обнаружено лишь одно значительное образование морского типа: Море Москвы. Кроме перечисленных, на лунной поверхности выделено еще несколько небольших образований морского типа, часть

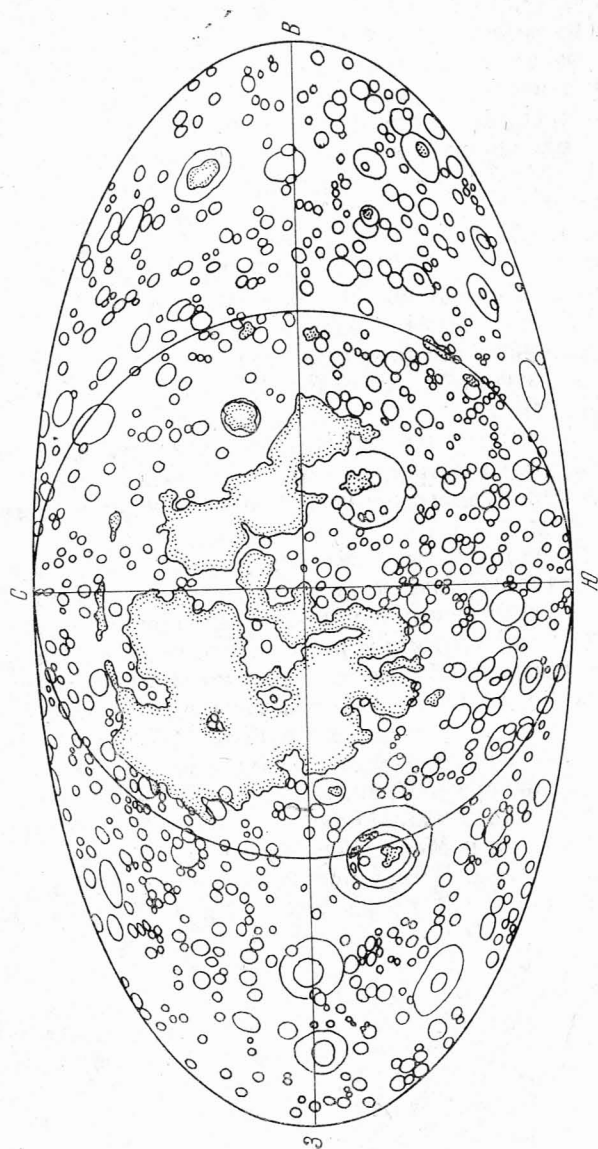


Рис. 3. Схема общего строения поверхности Луны.

из которых носит название «озер». Несколько образований, граничащих с морями и не имеющих замкнутой береговой линии получили название «заливов».

Морские области отличаются низкой отражательной способностью покровного вещества, пологими формами рельефа и меньшим числом крупных кратеров на единицу площади. Морфометрические измерения показывают следующие различия встречаемости углов склонов для площадок поперечником несколько километров в морях и материках. В морях участки поверхности, имеющие наклон менее  $1^\circ$ , занимают 63% общей площади. Участки, наклон которых менее  $2^\circ$ , составляют 93% площади. А на долю участков с наклоном менее  $5^\circ$  приходится 99% поверхности.

В материковых областях 21% поверхностных форм рельефа имеют наклон менее  $1^\circ$ , углы наклона менее  $2^\circ$  встречаются на 30% общей площади, наклоны менее  $5^\circ$  занимают 64%, менее  $10^\circ$  — 90% и менее  $12^\circ$  — 99% поверхности.

Различие в плотности кратеров на единицу площади между морским и материковым ландшафтами в первом приближении можно оценить по карте-схеме на рис. 3. Кратеры размером более 30 км редко встречаются в пределах морских равнин. В среднем, как показывают подсчеты, число кратеров в материковых областях в 30 раз превышает число кратеров в морях (на единицу площади).

### 3. Гравитационное поле Луны, магнетизм лунных пород, тепловой режим поверхности

Каждый элемент массы  $dM$  на расстоянии  $l$  создает поле, характеризуемое гравитационным потенциалом:

$$dU = g \frac{dM}{l}, \quad (1.9)$$

где  $g$  — постоянная тяготения.

Элементарную массу  $dM$  можно представить произведением плотности вещества  $\rho$  на элемент объема  $dV$ :  $dM = \rho dV$ . Тогда полный гравитационный потенциал, создаваемый небесным телом в точке на расстоянии  $l$ , получится в результате интегрирования по всему объему



тела (1.9):

$$U = \int_V dU = g \int_V \frac{\rho dV}{l}. \quad (1.10)$$

Если затем расстояние  $l$  выразить через полярные или сферические координаты в системе координат, отнесенной к центру гравитирующей массы, то  $l^{-1}$  можно разложить в ряд по полиномам Лежандра. Используя далее сферические функции для представления подынтегрального выражения в (1.10) и интегрируя по всему объему, можно получить разложение гравитационного потенциала в произвольной точке пространства.

Внешний гравитационный потенциал Луны в виде суммы сферических гармоник имеет следующее выражение:

$$U = \frac{gM_{\zeta}}{r} \left[ 1 + \sum_{n=2}^{\infty} \sum_{m=0}^n \left( \frac{R_{\zeta}}{r} \right)^n P_{nm}(\sin \varphi) \times \right. \\ \left. \times (C_{nm} \cos m\lambda + S_{nm} \sin m\lambda) \right], \quad (1.11)$$

где  $M_{\zeta}$  — масса Луны,  $R_{\zeta}$  — средний радиус Луны,  $\varphi$ ,  $\lambda$  — сферические координаты (широта и долгота),  $r$  — радиус-вектор текущей точки пространства,  $P_{nm}(\sin \varphi)$  — присоединенные функции Лежандра,  $C_{nm}$ ,  $S_{nm}$  — независимые коэффициенты разложения.

Пространственная структура внешнего гравитационного поля может быть описана с помощью эквипотенциальных поверхностей. В каждой точке такой поверхности величина  $U$  остается постоянной. В случае, если распределение масс в гравитирующем поле однородно, эквипотенциальные (уровневые) поверхности имеют сферическую форму и значение потенциала зависит лишь от  $r$ , т. е. от удаленности текущей точки пространства. Если же реальное распределение масс оказывается неоднородным и для точки на поверхности тела с координатами  $(\varphi_i, \lambda_i)$  отмечается избыток или недостаток массы вещества, то  $M_{\zeta}^i = M_{\zeta} \pm \Delta M_i$ . Следовательно, в области такой аномальной точки эквипотенциальная поверхность деформируется. В случае избытка массы ( $+\Delta M_i$ ) увеличивается также и значение  $r_k^i = r_k + \Delta r_i$ , в случае недостатка массы — уменьшается.

В настоящее время основным методом изучения гравитационного поля Луны является исследование гравитационных возмущений орбит искусственных спутников Луны. Результаты траекторных измерений движения первого ИСЛ «Луна-10» позволили определить значения 11 коэффициентов в разложении гравитационного поля Луны [12].

Мюллер и Сьегрен, измеряя доплеровское изменение частоты радиосигналов ИСЛ «Лунар орбитер», определили компоненты скорости и ускорения спутников по направлению к Земле. На основании этих данных была построена детальная гравиметрическая карта видимого полушария Луны в области  $\pm 60^\circ$  по широте и  $\pm 60^\circ$  по долготе.

На карте обнаружались гравитационные аномалии, которые могут создаваться местными концентрациями масс (масконами) [13]. В отдельных районах были выявлены также и отрицательные аномалии. Таким образом, кроме общей нецентральной, поле тяготения Луны обладает значительными местными аномалиями, вызывающими деформацию эквипотенциальных поверхностей в пространственной модели поля. Наиболее крупные масконы имеют местный избыток масс около  $20 \cdot 10^6 M_{\zeta}$  [14]. Общее представление о структуре гравитационного поля Луны в пределах широтного пояса  $\pm 30^\circ$  дают карты радиальных ускорений, построенные по данным об эволюции средних элементов орбит субспутников «Аполлона-15» и «Аполлона-16» [15] (рис. 4). Характерной особенностью поля тяготения является корреляция положительных аномалий, — масконов, — с круговыми морями видимого полушария и отрицательных аномалий с крупными кольцевыми структурами обратной стороны.

У Луны практически отсутствует глобально магнитное дипольное поле. Первые измерения, проведенные с помощью магнитометра, установленного на борту АМС «Луна-2», показали, что дипольный момент Луны в  $10^4$  раз меньше магнитного момента Земли. Подобная величина соответствует напряженности магнитного поля на лунной поверхности не более 230 гамм. Однако последующие исследования с окололунной орбиты заставили снизить значение магнитного момента Луны еще на два порядка. Данные, полученные с борта ИСЛ «Эксплорер-

35», привели к выводу, что максимальная величина глобального магнитного поля на поверхности Луны не должна превышать 4 гамм. Последние магнитометрические измерения, проведенные с помощью субспутника, выведенного на круговую орбиту с высотой около 120 км над

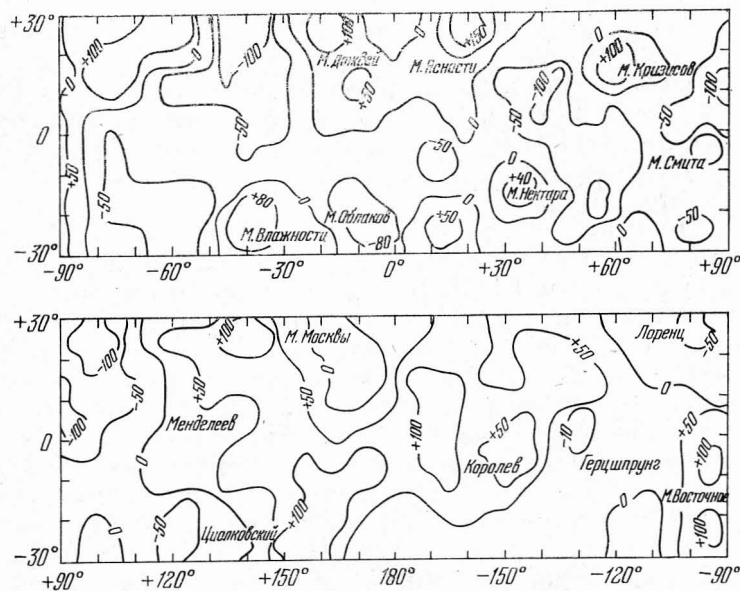


Рис. 4. Карты радиальных ускорений в широтном поясе  $\pm 30^\circ$  видимого и обратного полушарий Луны. Изолинии проведены через 50 мгал.

поверхностью Луны с борта КК «Аполлон-15», дают основание для еще более низкой оценки. Анализ результатов измерений, относящихся к периоду, когда Луна находилась внутри геомагнитного хвоста Земли, позволил определить величину постоянного глобального дипольного момента, равную  $10^{19}$  Гс · см<sup>3</sup>. Это весьма низкое значение магнитного момента соответствует величине магнитного поля на поверхности всего лишь не более 0,5 гамм.

Вместе с тем оказалось, что на Луне существуют заметные локальные вариации магнитного поля, обуслов-

ленные местной намагниченностью лунных пород. Согласно материалам экспедиций «Аполлон» наибольшая величина магнитного поля обнаруживается в материковых районах. В области кратера Декарт на материке в центре видимого полушария Луны измерения показали наличие магнитного поля напряженностью от 100 до 300 гамм.

Следует отметить, что пункты, в которых производились измерения, расположены в сравнительно небольшом по размерам участке и удалены друг от друга всего лишь на несколько километров. Значительные вариации в направлении местного магнитного поля отмечались на расстоянии менее чем 1 км между пунктами измерений.

В районе образования Фра-Мауро, которое по морфологическим признакам можно отнести к формации промежуточного типа, в двух местах измерений была зарегистрирована величина магнитного поля соответственно 103 и 43 гамм. Пункты измерений также удалены друг от друга на незначительное расстояние около 1 км [16].

В морских участках напряженность магнитного поля составила от 3—6 гамм в районе Борозды Хэдли у юго-восточной окраины Моря Дождей до примерно 40 гамм в близэкваториальной области Океана Бурь (место посадки КК «Аполлон-12»).

Обширный материал, показывающий изменение величины и направления местного магнитного поля в зависимости от характера рельефа и, в частности, связь этих вариаций с последствиями ударного метаморфизма, накоплен в процессе исследований на «Луноходе-2». Среднее значение магнитного поля в обследованной части кратера Лемонье оказалось равным 20—30 гамм. При пересечении луноходом кратеров, размеры которых превышают 50 м, отмечались аномалии местного магнитного поля, по величине достигавшие 10—15 гамм. Наибольшие изменения величины магнитного поля наблюдались над кромкой кратеров [17].

Лунная поверхность имеет довольно низкий коэффициент отражения. В среднем поверхность освещенного полушария Луны рассеивает около 10% падающего излучения. Следовательно, 90% солнечной энергии поглощается лунным веществом и превращается в тепло. Теплопроводность поверхностных слоев Луны низка и поэтому

нагревается лишь очень тонкий (по сравнению с лунным радиусом) слой пород. Но поскольку вся поглощенная солнечная энергия сосредотачивается в этом небольшом

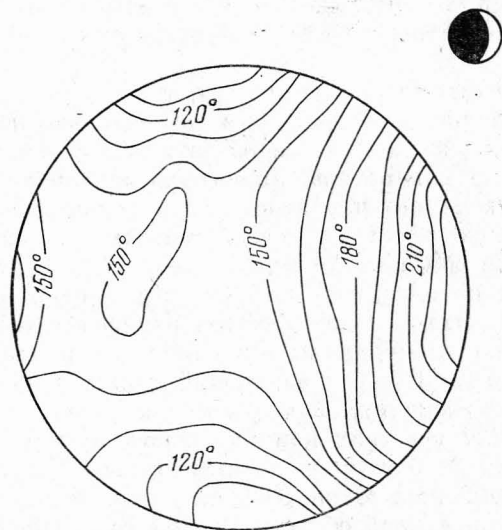


Рис. 5. Изотермы для фазового угла  $78^\circ$ . Значения температуры даны в кельвинах.

объеме, поверхностный слой разогревается до температуры более 400 К вблизи подсолнечной точки. В ночное время поверхностный слой сравнительно быстро излучает полученное тепло в окружающее пространство и к концу лунной ночи температура поверхности падает несколько ниже 100 К. Таким образом, суточные перепады температуры превышают  $300^\circ$  [18]. Представление о распре-

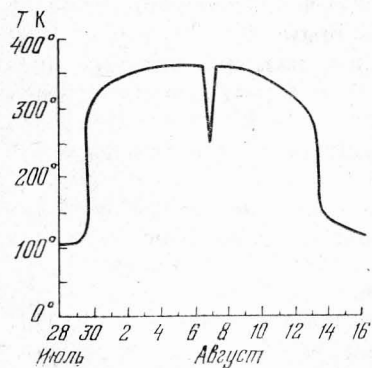


Рис. 6. Суточный ход температуры поверхности для избранной точки на широте  $+26^\circ$  (данные КК «Аполлон-15»).

делении ночных и дневных значений температуры могут дать, например, изотермы видимого с Земли полушария Луны, полученные при фазовом угле  $78^\circ$  (рис. 5). Это распределение яркости получено по результатам наблюдений в радиодиапазоне на волне 3 мм с разрешением  $2,8$  [19]. Суточный ход температуры для избранного участка Луны приведен на рис. 6. Кривая соответствует изменениям температуры поверхности в течение лунного дня и части лунной ночи на широте  $+26^\circ$  (район посадки КК «Аполлон-15»). Кратковременное падение температуры в середине дня вызвано прохождением земной тени по лунному диску, т. е. солнечным затмением для лунного наблюдателя [20].

#### 4. Химический состав, внутреннее строение и происхождение Луны

Поверхностные породы Луны, доставленные на Землю из районов посадки космических кораблей «Аполлон-11», -12, -14, -17» и автоматических станций «Луна-16», «Луна-20» и «Луна-24», детально исследовались в отношении структурных особенностей, генезиса и химического состава. Обобщение обширной информации о химическом составе лунного вещества содержится, в частности, в работах А. П. Виноградова [22] и Дж. А. Вуда [21]. Образцы вещества, относящегося к темным морским областям, содержатся в пробах, доставленных на Землю «Аполлоном-11, -12, -15 и -17» и «Луной-16, -24». Образцы светлого материкового вещества были доставлены «Аполлоном-14, -16» и «Луной-20». Элементный и минералогический состав лунных пород весьма близок к земным породам типа базальтов, норитов и анортозитов. Основными породообразующими минералами оказались пироксен, плагиоклаз, ильменит и оливин.

Отличительной особенностью лунных морских базальтов является высокое содержание  $\text{FeO}$ , а в некоторых случаях также и  $\text{TiO}_2$ . Содержание  $\text{FeO}$ , как правило, выше 25%, что примерно в два раза больше среднего содержания этого окисла в земных толеитовых базальтах. Содержание  $\text{TiO}_2$  в морских базальтах для отдельных изученных районов доходит до 13% (в толеитовых базальтах Земли в среднем содержится лишь 2%  $\text{TiO}_2$ ).



Основным минералом, содержащим титан, является ильменит:  $\text{FeTiO}_3$ . Если продолжать сопоставление лунных и земных базальтов, можно указать еще одно отличие: в морских базальтах Луны на порядок ниже содержание щелочей. Другие основные окислы —  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{CaO}$  и  $\text{Al}_2\text{O}_3$  входят в состав лунного вещества примерно в тех же пропорциях, которые характерны для земных аналогов.

Неморские базальты — нориты — отличаются от морских более высоким содержанием  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , входящим в левошпатовую молекулу. Вместе с тем, в норитах ниже содержание  $\text{FeO}$  и  $\text{TiO}_2$ . Образцы норитовых пород имеют более светлую окраску и типичны для районов, которые принято считать материковыми.

Некоторые образцы базальтовых и норитовых пород имеют повышенное содержание калия, редкоземельных элементов и фосфора. Они получили название криповых пород (KREEP-породы).

Материковое вещество Луны имеет своим земным аналогом анортозиты. Эти практически мономинеральные породы содержат богатый кальцием анортит. От морских базальтов и норитов анортозиты отличает еще более высокое содержание  $\text{Al}_2\text{O}_3$  — до 35%, и  $\text{CaO}$  — до 20%. Соответственно понижено содержание  $\text{FeO}$ . По степени содержания  $\text{Al}_2\text{O}_3$  и  $\text{CaO}$  анортозитовые породы подразделяют на собственно анортозиты, габбро-анортозиты и анортозитовые габбро.

На Земле анортозиты встречаются на древних щитах и в доколе древних платформ докембрийского возраста на Украине, в Канаде и т. д. [22].

Обширные пространства лунных материков сложены породами анортозитового ряда, плотность которых составляет примерно  $2,9 \text{ г/см}^3$ , что меньше средней плотности Луны. Плотность морских базальтов около  $3,3 \text{ г/см}^3$ , т. е. почти совпадает со средней плотностью лунного шара. Следовательно, можно предположить, что легкие анортозитовые породы образуют внешнюю оболочку — кору Луны, тогда как морские базальты имеют прямую связь с глубинным веществом лунных недр. Более подробное представление о внутреннем строении лунного шара дают сейсмические исследования, выполненные на Луне. Сейсмическое зондирование недр основано на возможности

определять плотность различных слоев, а следовательно, и типы пород, по скорости распространения в них упругих волн. В теле лунного шара, как в упругой сплошной среде, при искусственном или естественном возмущении (лунотрясения, удары падающих тел) появляются объемные и поверхностные волны. Объемные волны, которые делятся на продольные и поперечные, при прохождении поверхности раздела между двумя средами с различной плотностью изменяют скорость распространения. Распространение продольных волн сопровождается изменением объема вещества вдоль направления перемещения волны. Скорость распространения продольных волн ( $P$ ) в твердом теле равна

$$V_P = \sqrt{\frac{K + 4/3g}{\rho}},$$

где  $K$  — модуль сжатия — постоянный коэффициент, определяющий способность сопротивляемости среды силам сжатия;  $g$  — модуль сдвига — постоянный коэффициент, характеризующий сопротивляемость среды сдвигу;  $\rho$  — плотность среды.

При распространении поперечных волн происходит сдвиговая деформация, смещающая вещество среды перпендикулярно к направлению движения волны, но без изменения объема вещества. Скорость распространения поперечных волн ( $S$ ) также зависит от плотности среды:

$$V_S = \sqrt{\frac{g}{\rho}}.$$

Как выяснилось в процессе проведения сейсмического эксперимента на поверхности Луны, естественная сейсмическая активность Луны относительно невелика.

Выделение полной сейсмической энергии в теле Луны составляет менее  $10^{15}$  эрг в год, что в  $10^9$  раз меньше, чем на Земле, а средняя магнитуда колебаний не превышает два балла по шкале Рихтера [23]. Однако чувствительность современной регистрирующей аппаратуры позволяет отмечать от 600 до 3000 лунотрясений за год. Выделено два основных типа лунотрясений. Лунотрясения первого типа связаны с процессами в глубоких недрах Луны. Обнаружено, что эти глубокофокусные колебания возникают в точках, располагающихся на глубине

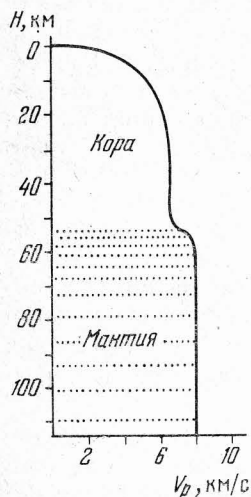
600—800 км. К настоящему времени выявлено несколько десятков подобных очагов. Установлено также, что своеобразным спусковым механизмом глубокофокусных лунотрясений являются приливные силы. Период возникновения лунотрясений, связанных с прохождением Луной точек апогея и перигея, составляет 13,6 суток. Активность, вызываемая солнечным возмущением лунной орбиты, имеет период 206 суток.

Второй тип лунотрясений порождается подвижками в лунной коре. Амплитуда этих колебаний максимальна, однако происходят они гораздо реже — за три года наблюдений было зарегистрировано лишь 11 подобных случаев.

Кроме основных лунотрясений, сейсмометры регистрируют большое количество слабых колебаний, возникающих в результате падения метеоритов малой массы и микрометеоритов, а также поверхностного смещения материала, вызываемого тепловыми напряжениями.

Рис. 7. Модель изменения скорости  $P$ -волн с глубиной, построенная на основании сейсмических данных по девяти искусственным ударам (падение последних ступеней и лунных модулей) и одному метеоритному удару.

Для построения структурной модели недр Луны используются данные регистрации сейсмических явлений, в процессе которых возникают объемные волны. С этой целью, например, были проведены наблюдения ударов о лунную поверхность последних ступеней ракеты-носителя «Сатурн» и лунных модулей кораблей «Аполлон», что позволило построить сейсмическую скоростную модель для верхних 150 км лунного шара [24]. На рис. 7 приводится график изменения скорости продольных волн с глубиной. На глубинах между 50 и 55 км отмечается резкое увеличение скорости от 7,0 км/с до 8,1 км/с. Скорость продольных волн порядка 6—7 км/с соответствует породам типа анортозитовых габбро и алюмобазальтов. Поверхностные выходы этих пород, как известно, слага-



ют лунные материк. Скорость 8,1 км/с соответствует породам оливино-пироксенового состава. Слой, лежащий выше 55 км и слагаемый анортозитовыми породами, по аналогии с Землей был назван корой, а область ниже этой границы — началом лунной мантии.

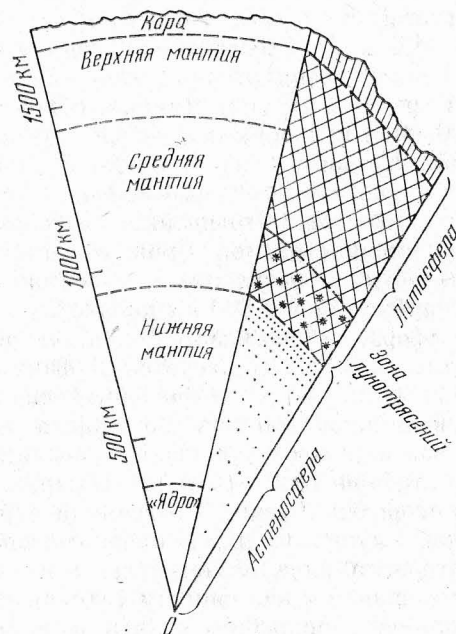


Рис. 8. Модель внутреннего строения Луны, предложенная Латемом и др. [24] на основе обобщения сейсмических данных.

Исследование характера распространения объемных волн при глубокофокусных лунотрясениях и удаленных от сейсмометра ударах позволили в первом приближении построить общую модель внутреннего строения Луны (рис. 8). Лунные недра условно разделены на пять зон. Верхняя зона, имеющая в исследованной области мощность 50—60 км, отождествляется с лунной корой анортозитового состава. Не исключено, что в случае существования подобной глобальной коры мощность ее может изменяться. Вторая зона названа верхней мантией Луны. Мощность этого слоя оценивается около 250 км. Скорость

*P*-волн лежит в пределах от 8,1 км/с до 7,8 км/с (в нижней части слоя). Предполагается, что основными составляющими могут быть оливин и пироксен. Некоторое уменьшение  $V_p$  с глубиной в верхней мантии можно объяснить увеличением температуры. Третья зона, — средняя мантия, — имеет мощность около 500 км. Характерным для этой зоны является уменьшение скорости *S*-волн (3,6—4,0 км/с). Высказано предположение, что морские базальты возникли как следствие частичного плавления в средней мантии. Нижняя область зоны (на глубинах 600—800 км) включает очаги глубокофокусных лунотрясений. Четвертая зона, — нижняя мантия, — характеризуется полным исчезновением поперечных волн. В качестве объяснения этого явления высказано предположение, что нижняя мантия Луны в настоящее время находится в частично расплавленном состоянии. Иными словами, на глубине около 800 км кончается твердая оболочка — литосфера, и начинается лунная астеносфера. С этим предположением согласуется и факт концентрации фокусов глубинных лунотрясений непосредственно над границей нижней мантии. Возможная температура в верхней части зоны оценивается значением около 1500°C. На глубине 1380—1570 км обнаружено резкое уменьшение скорости *P*-волн. Эта граница отмечает начало пятой зоны — лунного ядра. В предположении полного расплава материала ядра расчеты дают величину  $V_p = 5$  км/с. Имеющаяся к настоящему времени информация не позволяет более подробно судить о природе самой центральной области Луны. В качестве предварительной интерпретации выдвигается гипотеза ядра, состоящего из сульфида железа. В этом случае его масса составит не более 1% массы всей Луны [24].

Отсутствие вполне определенных представлений о характере процесса магматической дифференциации Луны не позволяет сделать надежную оценку состава вещества лунных недр на основании анализов поверхностных пород. Этим обстоятельством объясняется то, что несмотря на большой объем новых данных, полученных прямыми методами исследования, ни одна из существовавших ранее гипотез происхождения Луны не получила бесспорных подтверждений. На современном этапе изучения Луны продолжают обсуждаться три гипотезы ее образования.

Гипотеза отделения Луны от Земли, предложенная в начале века Дж. Дарвином, имеет своих сторонников и в наше время. Однако противники этой гипотезы указывают на трудности, с которыми встречается обоснование самого механизма отделения. Кроме того, необъяснимыми остаются также различия средней плотности и химического состава земных и лунных пород. В случае отделения Луны в период до образования земного ядра или начала процесса дифференциации, средняя плотность Луны должна была бы совпадать со средней плотностью Земли. Если же процесс отделения имел место уже после завершения глобальной дифференциации земного шара, Луна должна состоять из пород земной коры и верхней мантии. Однако подобие химического состава лунных пород и предполагаемых аналогов из названных горизонтов земного шара не настолько однозначно, чтобы служить свидетельством в пользу гипотезы отделения.

Гипотеза захвата Луны предполагает, что первоначально земной спутник сформировался отдельно от Земли. Впоследствии, при случайном сближении двух этих тел, Луна была в результате приливного трения заторможена в своем движении и перешла на гелиоцентрическую орбиту. Сторонников гипотезы захвата привлекает возможность объяснить различия в химизме пород Земли и Луны тем, что эти тела сформировались на разном расстоянии от Солнца. Однако расчеты возможного механизма захвата приводят к выводу, что обязательным условием является первоначальное движение Луны по гелиоцентрической орбите, практически совпадающей с орбитой Земли. Кроме того, для осуществления захвата необходимы дополнительные условия, вероятность которых в действительности ничтожно мала.

Наиболее перспективной гипотезой образования Луны часто называют гипотезу О. Ю. Шмидта, согласно которой Луна аккумулировалась в окрестностях растущей Земли из околоземного роя тел. Механическое обоснование совместного образования Луны и Земли не вызывает возражений. Но и эта гипотеза встречается с некоторыми трудностями. В частности, указывают на то, что в рамках гипотезы остаются несогласованными такие положения, как горячее начальное состояние Луны и различия состава Земли и Луны.



## 5. Атмосфера Луны и окололунное пространство

Попытки оценить плотность лунной атмосферы с помощью наземных оптических наблюдений по яркости и поляризации света вблизи лунных рогов показали, что верхний предел концентрации частиц у поверхности составляет  $10^{10} \text{ см}^{-3}$ . Наблюдения в радиодиапазоне эффектов, сопровождающих покрытие Луной дискретных радиоисточников, привели к заключению, что указанный предел концентрации частиц может быть снижен до  $10^4 \text{ см}^{-3}$ . Наблюдения в радиодиапазоне характеризуют лунную ионосферу, но при подобной степени разреженности газовой оболочки вся лунная атмосфера должна быть ионизована.

Современные данные о составе и плотности лунной атмосферы получены с помощью спектральных измерений с окололунной орбиты и непосредственных измерений ионизационным манометром и масс-спектрометром на лунной поверхности [25]. Некоторые данные получены также при изучении газов, содержащихся в лунных образцах, доставленных на Землю.

Основными компонентами лунной газовой оболочки оказались водород, гелий, неон и аргон.

Водород находится в лунной атмосфере главным образом в молекулярном виде. Орбитальная ультрафиолетовая спектрометрия показала, что дневная концентрация атомарного водорода менее, чем  $10 \text{ см}^{-3}$ . Для молекулярного водорода вблизи подсолнечной точки верхний предел числа молекул  $\text{H}_2$  в  $\text{см}^3$  составляет  $6 \cdot 10^3$ . В условиях лунной ночи самое низкое значение концентрации  $\text{H}_2$  составило  $3,5 \cdot 10^4 \text{ см}^{-3}$ , т. е. почти в шесть раз выше. Расчетное распределение количества  $\text{H}_2$  на широте около  $20^\circ$  (широта измерений непосредственно на Луне по программе КК «Аполлон-17») в течение лунных суток показано на рис. 9. Кривая показывает изменение значений концентрации по аргументу местного фазового угла Солнца.

Концентрация гелия достигает максимума также в ночное время лунных суток и равна  $4 \cdot 10^4 \text{ см}^{-3}$ . С наступлением дня эта величина уменьшается примерно в 20 раз [26]. На рис. 10 приведена расчетная кривая суточного изменения концентрации гелия по местному фазовому углу Солнца, соответствующая отдельным изме-

рениям, выполненным автоматическим масс-спектрометром в течение пяти лунаций по программе КК «Аполлон-17» [25].

Доминирующим компонентом лунной атмосферы является неон, точнее, ионы  $^{20}\text{Ne}$ . Его максимальная кон-

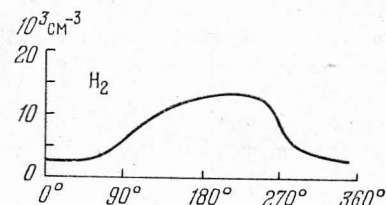


Рис. 9. Суточные изменения концентрации  $\text{H}_2$ . По горизонтальной оси отложен местный фазовый угол Солнца  $\alpha_{\odot}$ . Значение  $\alpha_{\odot} = 90^\circ$  соответствует местному заходу,  $\alpha_{\odot} = 270^\circ$  — восходу Солнца. Местный полдень:  $\alpha_{\odot} = 0^\circ$ , полночь:  $\alpha_{\odot} = 180^\circ$ .

центрация составляет  $8 \cdot 10^4 \text{ см}^{-3}$  в ночное время. В дневное время лунных суток — около  $4 \cdot 10^3 \text{ см}^{-3}$ , что примерно вдвое выше концентрации  $\text{He}$ . Расчетная кривая и отдельные измерения концентрации  $^{20}\text{Ne}$  в течение лунных суток показаны на рис. 11.

Аргон в лунной атмосфере зарегистрирован по содержанию двух изотопов  $^{36}\text{Ar}$  и  $^{40}\text{Ar}$ . Наибольшая концентрация  $^{40}\text{Ar}$  отмечается перед восходом Солнца и достигает  $4 \cdot 10^4 \text{ см}^{-3}$  [25]. Другой пик концентрации  $^{40}\text{Ar}$  наблюдается около момента местного захода Солнца и составляет  $8 \cdot 10^3 \text{ см}^{-3}$  [27]. После захода концентрация снижается до  $3,5 \cdot 10^3 \text{ см}^{-3}$ . В ночное время минимально регистрируемое количество  $^{40}\text{Ar}$  составляет около  $10^2 \text{ см}^{-3}$ . На рис. 12 представлена расчетная кривая общего суточного изменения концентрации  $^{40}\text{Ar}$ , соответствующая измерениям аппаратуры, оставленной на Луне по программе КК «Аполлон-17» [25]. Максимальная концентрация  $^{36}\text{Ar}$

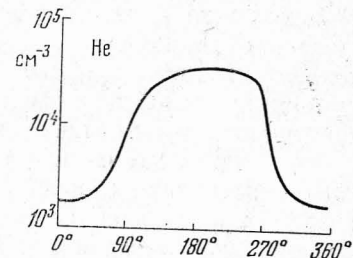


Рис. 10. Суточные изменения концентрации  $^4\text{He}$ .

достигает  $3 \cdot 10^3 \text{ см}^{-3}$ . Суточные вариации этой величины происходят по той же схеме, что и для  $^{40}\text{Ar}$ , сохраняя примерное отношение 1:10.

Суммарное количество газовых частиц в лунной атмосфере в ночное время составляет, таким образом, около  $2 \cdot 10^5$  молекул/см<sup>3</sup>, что и соответствует наибольшей плотности газовой оболочки Луны. В дневное время предполагаемая концентрация всех обнаруженных газов, вероятно, менее  $10^4$  молекул/см<sup>3</sup>.

Итак, лунная атмосфера является экзосферой, начинающейся непосредственно у поверхности. Процессы,

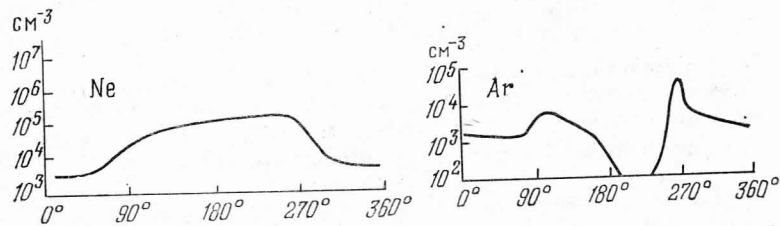


Рис. 11. Суточные изменения концентрации  $^{20}\text{Ne}$ .

Рис. 12. Суточные изменения концентрации  $^{40}\text{Ar}$ .

происходящие в ней, в значительной мере определяются тепловым движением частиц, а температура задается степенью нагрева лунного поверхностного слоя. Поэтому состояние лунной экзосферы зависит во многом от температурного режима поверхности.

Располагая данными о тепловом режиме поверхности, можно вычислить скорости теплового движения молекул в лунной экзосфере. Средняя тепловая скорость движения молекул определяется выражением

$$v = 2 \sqrt{\frac{2kT}{\pi m}}, \quad (1.12)$$

где  $k$  — постоянная Больцмана ( $1,38 \cdot 10^{-16}$  эрг · град<sup>-1</sup>),  $T$  — температура по Кельвину,  $m$  — масса молекул или атомов газа в граммах ( $m = 1,67 \cdot 10^{-24} \cdot \mu$ ,  $\mu$  — молекулярная или атомная масса газа). В табл. 3 приведены средние тепловые скорости движения частиц соответствующих газов для наибольшей дневной температуры  $T = 400 \text{ К}$  ( $v_1$ ) и ночной температуры  $T = 100 \text{ К}$  ( $v_2$ ) в км/с согласно (1.12). В скобках указано массовое число.

Параболическая скорость  $v_{\text{п}}$ , превысив которую частица вещества может преодолеть гравитационное притяжение, для Луны равна

$$v_{\text{п}} = \sqrt{\frac{2gM_{\text{C}}}{R_{\text{C}}}},$$

где  $g = 6,670 \cdot 10^{-8} \text{ см}^3 \cdot \text{г}^{-1} \cdot \text{с}^{-2}$ ,  $M_{\text{C}}$  — масса Луны и  $R_{\text{C}}$  — лунный радиус. При  $M_{\text{C}} = 7,351 \cdot 10^{25} \text{ г}$  и  $R_{\text{C}} = 1,738 \cdot 10^8 \text{ см}$   $v_{\text{п}} = 2,38 \text{ км/с}$ .

Таким образом, крайне низкая дневная концентрация  $\text{H}$  и  $\text{H}_2$  становится очевидной, поскольку в первом слу-

Таблица 3

$\text{H}$ (1)	$\text{H}_2$ (2)	$\text{He}$ (4)	$\text{Ne}$ (20)	$\text{Ar}$ (36)	$\text{Ar}$ (40)
2,76	1,95	1,38	0,62	0,46	0,44
1,38	0,98	0,69	0,31	0,23	0,22

чае средняя тепловая скорость частиц превышает критическую (параболическую) скорость, а во втором — близка к ней. Следовательно, в дневное время частицы  $\text{H}$  и  $\text{H}_2$  интенсивно рассеиваются в окружающее пространство. Та же причина, хотя и в меньшей степени, может влиять на дневную концентрацию более тяжелых компонентов атмосферы.

В ночное время величины средней тепловой скорости ( $v_2$ ) для легких газов таковы, что интенсивное рассеивание за счет теплового движения частиц прекращается и концентрация возрастает. Тяжелый газ аргон при понижении температуры адсорбируется лунной поверхностью, что объясняет ночной минимум концентрации частиц.

Другой особенностью теплового движения частиц в лунной атмосфере является характер миграции с освещенной части поверхности на темную.

Располагая данными о концентрации частиц вблизи лунной поверхности, можно оценить длину свободного пробега атомов и молекул, т. е. расстояния между двумя последовательными столкновениями частиц.

Как известно, эта величина определяется формулой

$$l = (4\sigma n \sqrt{2})^{-1},$$

где  $\sigma = 10^{-15} \text{ см}^2$  — газовое поперечное сечение для рассеяния при столкновениях двух частиц,  $n$  — концентрация частиц.

В ночное время, когда общая концентрация всех газовых составляющих лунной атмосферы  $n = 2 \cdot 10^5 \text{ см}^{-3}$ ,  $l = 8,8 \cdot 10^8 \text{ см}$ . Днем, при  $n = 10^4 \text{ см}^{-3}$ ,  $l = 1,8 \cdot 10^{10} \text{ см}$ . Таким образом, ночью длина свободного пробега почти на порядок, а днем более чем на два порядка превышает величину лунного радиуса. Следовательно, взаимные столкновения частиц оказывают весьма малое влияние на характер траектории атома или молекулы газа в лунной атмосфере. Поэтому можно рассматривать как типичный случай движение единичного атома (или молекулы) в гравитационном поле. Если скорость теплового движения не превышает критическую, но отличается от круговой (для Луны  $v_{кр} = 1,68 \text{ км/с}$ ), частица движется по эллиптической орбите, в одном из фокусов которой находится центр Луны. Параметры эллиптической орбиты определяются в зависимости от начальных условий движения частицы следующими формулами:

$$\left. \begin{aligned} e &= \sqrt{1 - \left(\frac{v_0}{v_{кр}}\right)^2 \left[2 - \left(\frac{v_0}{v_{кр}}\right)^2\right] \cos^2 \theta_0}, \\ a &= \frac{r_0}{2 - \left(\frac{v_0}{v_{кр}}\right)^2}, \end{aligned} \right\} \quad (1.13)$$

где  $e$  — эксцентриситет орбиты,  $a$  — большая полуось,  $v_0$  — начальная скорость движения,  $r_0$  — расстояние точки выхода частицы на орбиту от центра Луны,  $\theta_0$  — угол наклона вектора скорости к горизонту.

Если для упрощения модели движения частицы принять  $\theta_0 = 0^\circ$ , то

$$e = \sqrt{1 - \left(\frac{v_0}{v_{кр}}\right)^2 \left[2 - \left(\frac{v_0}{v_{кр}}\right)^2\right]}. \quad (1.14)$$

Начальная скорость движения может быть приравнена средней тепловой скорости. Расстояние точки выхода на

орбиту  $r_0 = R_{\text{л}} + h$ . Максимальное значение  $h$  определяется высотой, на которую может быть заброшена частица, удаляющаяся по нормали к поверхности со средней скоростью теплового движения  $v$ . В экстремальной точке кинетическая энергия начального движения полностью превратится в потенциальную энергию падения:

$$\frac{mv_0^2}{2} = mgh.$$

Отсюда  $v_0^2 = 2gh$ . Но поскольку  $v_0 = v$ , то

$$h = \frac{4kT}{\pi gm}.$$

Величина  $\frac{kT}{gm} = H$  носит название шкалы высот атмосферы и равна высоте, на которой давление падает в  $e$  раз ( $e$  — основание натуральных логарифмов). Тогда

$$h_{\max} \approx \frac{4}{3}H.$$

В таблице 4 приведены параметры эллиптических орбит для частиц газовых составляющих лунной атмосферы. Величины эксцентриситета, большой и малой полуосей и

Таблица 4

	H	H <sub>2</sub>	He	Ne	<sup>36</sup> Ar	<sup>40</sup> Ar
Днем						
<i>e</i>	1	0,35	0,33	0,86	0,94	0,94
<i>a</i>	—	2,71	1,04	0,58	0,54	0,54
<i>b</i>	—	2,54	0,98	0,30	0,19	0,19
<i>c</i>	—	0,95	0,34	0,50	0,51	0,51
Ночью						
<i>e</i>	0,33	0,66	0,83	0,97	0,98	0,98
<i>a</i>	1,04	0,74	0,59	0,52	0,51	0,51
<i>b</i>	0,98	0,56	0,32	0,13	0,10	0,10
<i>c</i>	0,34	0,49	0,49	0,50	0,50	0,50

фокусного расстояния рассчитаны при  $h_{\max} = \frac{4}{3}H$  для дневных ( $T = 400 \text{ К}$ ) и ночных ( $T = 100 \text{ К}$ ) условий. Значения  $a$ ,  $b$  и  $c$  приведены в единицах лунного радиуса  $R_{\text{л}}$ .

Из данных таблицы 4 следует, что днем атомы водорода свободно диссипируют из лунной атмосферы, а мо-



лекулы  $H_2$  выходят на высокую, близкую к круговой, окололунную орбиту. Ионы гелия также выходят на орбиту, близкую к круговой, но поскольку большая и малая полуоси этого эллипса мало отличаются по величине от лунного радиуса, частицы возвращаются на лунную поверхность и начинают новый цикл движения. Орбиты ионов

Т а б л и ц а 5

		H	$H_2$	He	Ne	$^{36}Ar$	$^{40}Ar$
Днем	$S_R$	—	—	1,35	0,16	0,07	0,07
	$S_H$	—	—	4,50	2,26	2,09	2,33
Ночью	$S_R$	1,35	0,49	0,18	0,04	0,02	0,02
	$S_H$	0,29	0,20	0,15	0,14	0,15	0,17

неона и аргона представляют собой более вытянутые эллипсы, которые входят в лунный шар на еще меньших расстояниях от точки выхода на орбиту. Ночью атомы водорода движутся по эллиптическим орбитам, возвращающим их на лунную поверхность. Исходя из параметров орбит, можно оценить расстояния, проходимые частицей от точки выхода на эллиптическую траекторию движения до столкновения с поверхностью в проекции на сферу лунного шара. В таблице 5 приведены эти величины для дневных и ночных условий в единицах лунного радиуса и в единицах шкалы высот для каждой составляющей атмосферы.

Таким образом, проекция на поверхность траектории движения гипотетической частицы днем оказывается в несколько раз большей, чем ночью, поскольку пропорциональна шкале высот, т. е. температуре атмосферы. Следовательно, процесс миграции частиц с дневной стороны на ночную идет более интенсивно, чем в обратном направлении. Эта особенность движения частиц в лунной атмосфере служит дополнительным объяснением более высокой ночной концентрации легких газов и всплесков ионов аргона вблизи восхода и захода. Большая величина утреннего пика объясняется еще и процессами освобождения

аргона, адсорбированного поверхностными породами в ночное время. Исходя из предыдущего изложения, движение гипотетической частицы в лунной атмосфере можно представить схематически, как это показано на рис. 13.

Очевидно, что отклонения реальных скоростей движения частиц от средних значений неизбежны. За счет того, что какая-то доля атомов или молекул движется со скоростями большими, чем средняя тепловая, в лунной экзосфере, как и в экзосферах других планет, происходит процесс диссипации, захватывающий не только легкие, но и тяжелые газы. Общее число диссипирующих частиц  $L$  в единицу времени определяется формулой Джинса:

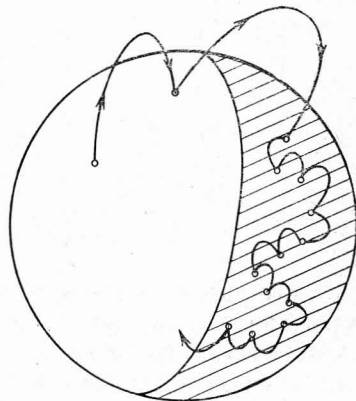


Рис. 13. Схема движения в лунной атмосфере молекулы газа.

$$L = 4\pi R^2 \frac{v}{\sqrt{6\pi}} n e^{-\frac{R}{H}} \left(1 + \frac{R}{H}\right),$$

где  $v$  — средняя тепловая скорость движения частиц,  $n$  — концентрация частиц у основания экзосферы ( $\text{см}^{-3}$ ),  $H$  — шкала высот,  $R$  — уровень диссипации, измеряемый от центра планеты. В случае Луны можно предположить, что  $R = R_L$ . Общее число частиц в атмосфере определяется величиной

$$N = 2\pi R^2 n H.$$

Частное от деления общего числа частиц на число диссипирующих в единицу времени дает величину времени диссипации, т. е. времени, за которое общее число частиц в атмосфере падает в  $e$  раз

$$t = \frac{\sqrt{6\pi} H}{2v} e^{\frac{R}{H}} \left(1 + \frac{R}{H}\right)^{-1}. \quad (1.15)$$

В таблице 6 приведены средние скорости, значения шкалы высот и времени диссипации ( $t$ ) для различных составляющих лунной экзосферы при максимальных температурах ( $T = 400$  К).

Время  $t$ , вычисленное по формуле (4.15), определяется лишь термической диссипацией. Однако для элементов более тяжелых, чем водород и гелий, существенную роль играет так называемый процесс фотоионизации и связанное с ним увеличение интенсивности рассеивания ионов.

Т а б л и ц а 6

	H	H <sub>2</sub>	He	Ne	<sup>36</sup> Ar	<sup>40</sup> Ar
$v, \text{см/с}$	$2,76 \cdot 10^5$	$1,95 \cdot 10^5$	$1,38 \cdot 10^5$	$0,62 \cdot 10^5$	$0,46 \cdot 10^5$	$0,44 \cdot 10^5$
$H, \text{см}$	$2040 \cdot 10^5$	$1020 \cdot 10^5$	$510 \cdot 10^5$	$120 \cdot 10^5$	$57 \cdot 10^5$	$51 \cdot 10^5$
$t, \text{с}$	$2 \cdot 10^3$	$2 \cdot 10^3$	$5 \cdot 10^3$	$3 \cdot 10^7$	$8 \cdot 10^{13}$	$2 \cdot 10^{15}$
$t, \text{лет}$	$10^{-6}$	$10^{-6}$	$4 \cdot 10^{-5}$	$10^{-2}$	$10^5$	$10^6$

Как уже упоминалось, лунная атмосфера находится в ионизованном состоянии, поскольку нейтральные молекулы и атомы газов, появляющиеся в ней, под действием жесткого ультрафиолетового излучения Солнца приобретают заряд. Поскольку Луна не обладает собственным магнитным полем значительной напряженности, ионы лунной атмосферы захватываются межпланетным магнитным полем, ускоряются им и, двигаясь по спирали вокруг силовых линий, покидают лунную экзосферу. Следовательно, с учетом фотоионизации процесс диссипирования Ne и Ar идет более интенсивно и время диссипации  $t$  следует сократить. Соответствующие расчеты были выполнены Ходжесом и др. [25]. Согласно этим данным время диссипации неона изменится незначительно, а время диссипации аргона сократится до  $10^7$  с, т. е. на несколько порядков.

Согласно оценкам Рускол [28] максимальная плотность ранней лунной атмосферы в эпоху наиболее активной дегазации лунных недр соответствовала концентрации  $n_0 = 10^{10} - 10^{11} \text{ см}^{-3}$ . Если предположить, что эти процессы происходили в период интенсивного лунного вулканизма  $(4,0 - 3,5) \cdot 10^9$  лет назад, то современная концентрация с учетом времени диссипации должна бы быть в лучшем случае на шесть-семь порядков ниже наблюдаемого значения. Следовательно, в настоящее время газовая оболочка Луны не является остатками ранней атмосферы. Толь-

ко постоянное пополнение могло бы сохранить плотность лунной атмосферы на ее существующем уровне.

Наиболее вероятным источником, пополняющим содержание водорода, гелия и неона в лунной атмосфере, является солнечный ветер. Происхождение лунного аргона двояко. Изотоп <sup>36</sup>Ar также приносится потоком солнечного ветра, как и более легкие газы. Но <sup>40</sup>Ar несомненно, внутрилунного происхождения и является радиогенным, возникающим в результате распада <sup>40</sup>K. В лунную атмосферу <sup>40</sup>Ar попадает в результате дегазации твердого вещества Луны. Ходжес и др. подсчитали, что потеря атмосферного аргона в результате ускорения частиц процессом фотоионизации составит лишь 0,4% общего количества радиогенного <sup>40</sup>Ar, что эквивалентно выделению в атмосферу всего аргона, образованного в результате распада <sup>40</sup>K в верхних трех километрах пород лунного шара [25]. Всего же в лунную атмосферу может выделяться около 8% радиогенного <sup>40</sup>Ar [29]. Полагают, что аргон может поступать в атмосферу с довольно больших глубин и даже из частично расплавленного лунного ядра.

При крайней разреженности лунной атмосферы даже самые малые метеоритные частицы беспрепятственно достигают поверхности Луны и вызывают интенсивную эрозию верхних слоев. Оценки, сделанные Уипплом по данным наземных наблюдений распространения метеоритного вещества в околоземном пространстве, показывают, что общий поток падающих на Луну твердых тел составляет около  $4 \cdot 10^{-16} \text{ г} \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ . Эти оценки учитывают тела с массой от  $10^{-14}$  г (микрометеориты) до  $10^{18}$  г (крупные метеориты и астероиды) [30]. Встречаемость частиц различных размеров обычно представляется зависимостью вида  $N = aD^b$ , где  $N$  — число частиц диаметра  $D$ , выпадающее на единицу площади в единицу времени. Тот же самый вид зависимости используется и для представления распределения выпадающих частиц по массе:

$$N = cM^d.$$

Показатели степени  $b$  и  $d$  являются отрицательными для реально наблюдаемых распределений. На рис. 14 (кривая 1) показан вид распределения частиц по массе (нижняя шкала) и поперечнику (верхняя шкала), полученный Чепменом [31] путем обобщения данных Уиппла

и данных по микрометеоритной эрозии на Луне [32]. Результаты пассивного сейсмического эксперимента на Луне [24] позволили оценить поток метеоритного вещества, реально выпадающего на лунную поверхность. В пересчете числа частиц, выпадающих на  $\text{см}^2$  в секунду

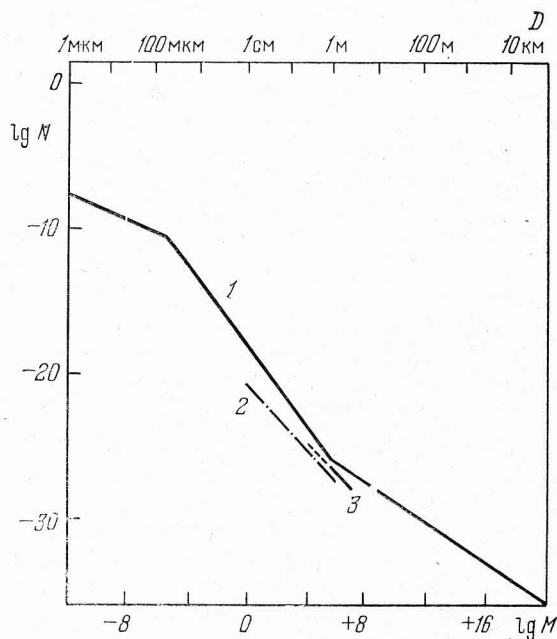


Рис. 14. Распределение выпадающих на лунную поверхность частиц по массе и размерам. По вертикальной шкале дано число частиц  $N$  (в логарифмической шкале), выпадающих на площади  $1 \text{ см}^2$  за секунду. Нижняя шкала — логарифм массы в граммах, верхняя — поперечник частиц в метрах. 1 — распределение метеоритных частиц по наземным наблюдениям метеоров и данным о микрометеоритной эрозии лунных пород, 2, 3 — данные, полученные с помощью лунных сейсмометров, регистрирующих ударные явления.

времени при массе, выраженной в граммах, эта зависимость имеет вид

$$\lg N = -20,92 - 1,16 \lg M \text{ (кривая 2 на рис. 14).}$$

Зарегистрированный поток оказался в 10—1000 раз меньше величины, предполагавшейся на основе наземных

наблюдений. Более поздние по времени наблюдения данные пассивного сейсмического эксперимента, относящиеся к интервалу значений масс  $5 \cdot 10^3 - 10^5 \text{ г}$  (кривая 3), несколько уменьшают указанное расхождение [33].

На характеристики приповерхностного окололунного пространства особое влияние оказывает микрометеоритная эрозия. Плотность потока микрометеоритов с массой больше  $10^{-13} \text{ г}$  и скоростью падения около  $25 \text{ км/с}$  составляет  $2 \cdot 10^{-8} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$  по данным непосредственных измерений на Луне [34]. Эта величина микрометеоритного потока позволяет предположить постоянное присутствие в приповерхностном окололунном пространстве рассеянного мелкодисперсного вещества, т. е. своеобразной «аэрозольной составляющей» лунной атмосферы. Отдельные наблюдения избыточных свечений лунного неба подтверждают это предположение. По наблюдениям свечения западной части лунного горизонта в течение нескольких часов после захода Солнца был сделан вывод о существовании в зоне терминатора облака пылевых частиц с диаметрами около  $10 \text{ мкм}$  [35]. Свечение это зарегистрировано на снимках, сделанных телекамерами КА «Сервейор». Позднее эффект повышенной концентрации микрочастиц также был зарегистрирован вблизи моментов местного восхода и захода Солнца при восьми лунациях [34]. Скорость регистрации микрочастиц возрастала почти в 100 раз за время от нескольких часов до 40 часов перед восходом и в течение 30 часов после восхода. Было установлено, что преимущественное перемещение частиц происходит в направлении от Солнца. Предполагаемый механизм такого горизонтального переноса частиц по поверхности заключается во взаимодействии электростатических зарядов пылинок с электростатическими полями, возникающими на лунной поверхности под воздействием солнечного излучения. Кроме того, постоянный фон избыточной яркости, обнаруженный в видимой и ультрафиолетовой областях спектра благодаря наблюдениям с борта «Лунохода-2», предполагает существование над поверхностью пылевого слоя толщиной около  $10^3 \text{ км}$  при размерах частиц  $70 \text{ мкм}$  и концентрации порядка  $7 \cdot 10^{-10} \text{ см}^{-3}$  [36]. Найденная величина плотности «аэрозольной составляющей» в  $10^4 - 10^5$  превышает концентрацию пылевых частиц в межпланетном пространстве.



## 6. Сравнение Луны с другими телами Солнечной системы

Представляет интерес сопоставление Луны с другими подобными ей телами Солнечной системы, масса которых на один-два порядка меньше массы Земли. К этой группе прежде всего относятся крупные спутники планет, такие, как галилеевы спутники Юпитера, спутник Сатурна —

Таблица 7

Название объекта	Масса, $M_{\oplus}$	$v_{кр}$ , км/с	Радиус, $R_{\oplus}$	Средняя плотность, $\rho$ , г/см <sup>3</sup>	Отношение масс спутника и планеты	Среднее расстояние спутника от планеты, $D_{\oplus}$
Луна	1,00	2,4	1,00	1,00	1 : 81,3	1,00
Марс	8,73	5,0	1,95	1,18		
Меркурий	4,50	4,3	1,40	1,64		
Ио	1,21	2,3	1,05	1,05	1 : 26300	1,10
Европа	0,66	2,0	0,88	0,98	1 : 40000	1,75
Ганимед	2,03	2,9	1,52	0,58	1 : 12200	2,78
Каллисто	1,45	2,2	1,44	0,49	1 : 19600	4,89
Титан	1,87	2,8	1,67	0,68	1 : 4000	3,18
Тритон	1,9	3,2	0,92	1,50	1 : 769	0,92

Титан и спутник Нептуна — Тритон. По некоторым характеристикам Луну можно сопоставить с Меркурием и Марсом. В таблице 7 собраны данные о массе, размерах, средней плотности и других параметрах перечисленных планет и спутников по сравнению с аналогичными характеристиками Луны.

Для галилеевых спутников Юпитера использованы данные, полученные по результатам полета КА «Вояджер» [37].

По массе сравниваемые тела, за исключением Европы, превышают Луну. Однако сочетание других параметров приводит в ряде случаев к близким условиям на объекте сравнения и на Луне. Например, несмотря на то, что  $v_{кр}$  для Меркурия почти в два раза выше, близость его к Солнцу и, следовательно, более высокая дневная температура, приводит к более высоким скоростям теплового движения молекул газа. Поэтому на Меркурии, так же как и на Луне, атмосфера практически отсутствует. Это

обстоятельство обусловило в свою очередь преобладание ударных форм рельефа и почти полное подобие ландшафтов того и другого тела.

Примером, иллюстрирующим различие условий на поверхности при общем сходстве параметров, приведенных в таблице 7, может служить Ио. Критическая скорость для этого спутника практически совпадает с лунной. Однако поскольку дневная температура поверхности составляет около 130 К, диссипация газов за счет теплового движения замедлена. Удаленность Ио от Солнца, вероятно, в сильной степени снижает эффективность рассеяния за счет фотоионизации. В результате на Ио обнаружена атмосфера всего лишь в  $10^4$  раз менее плотная, чем на Земле [37]. Согласно последним данным атмосфера Ио, вероятно, постоянно пополняется за счет обнаруженной на этом спутнике вулканической активности.

Исходя из данных таблицы 7, можно заключить, что в случае Луны не нарушается тенденция уменьшения величины средней плотности с увеличением расстояния спутника от планеты. Существуют предположения, что высокая средняя плотность вещества планет земного типа может объясняться наличием металлического ядра как конечного продукта процесса дифференциации. Примерами подобных планетных тел в таблице 7 могут служить Меркурий, Марс и Тритон. Малое различие плотности поверхностных кристаллических пород и средней плотности Луны указывает на практическое отсутствие металлической фазы в лунных недрах. Вероятно, в этом отношении к Луне близки Ио и Европа. Ганимед и Каллисто имеют столь низкую среднюю плотность, что их внутреннее строение должно резко отличаться от строения и химического состава лунного шара.

Наконец, если рассматривать особенности системы «планета — спутник» в целом, то следует обратить внимание на уникальность соотношения масс «Луна — Земля». Столь малое отличие масс планеты и спутника, как видно из таблицы 7, не встречается в Солнечной системе.

## ГЛАВА II

ОСНОВНЫЕ ОСОБЕННОСТИ СТРОЕНИЯ  
ЛУННОЙ ПОВЕРХНОСТИ

## 1. Глобальное строение поверхности лунного шара

Возможности изучения планетарных особенностей строения лунного шара появились после завершения глобального обзора Луны в 1965 г. К этому времени благодаря фотографированию обратной стороны с борта АМС «Луна-3» (1959 г.) и «Зонд-3» (1965 г.) были получены сведения о макрорельефе 95% лунной поверхности.

Впоследствии многочисленная серия обзорных снимков полушарий Луны при различных направлениях съемки была получена с помощью ИСЛ «Лунар орбитер». Снимки, сделанные на борту АМС «Зонд-6 и -8» и в процессе экспедиций по программе «Аполлон», доставленные на Землю, позволили получить высококачественные изображения Луны по полушариям. В первом случае серия снимков охватывает западное полушарие Луны, включая часть видимой и обратной стороны (рис. 15), во втором случае — восточное полушарие. Разрешение данных глобальных изображений соответствует подробности лучших наземных фотографий или несколько выше.

Таким образом, к настоящему времени обзорная съемка покрывает 99,6% лунной поверхности. Неизвестной осталась лишь небольшая территория в районе южного полюса Луны.

Общие особенности строения поверхности лунного шара определяются размещением и размерами морей.

В таблице 8 приведен список морских образований с указаниями размеров по измерениям, выполненным Родионовой [38]. Величины площадей соответствуют территориям, занятым темным базальтовым веществом.

Общая площадь морских образований на поверхности лунного шара составляет 16,9%.

На рис. 16 приведена карта-диаграмма широтного распределения морских образований. Измерения проводились по широтных десятиградусным поясам [38]. Около 65%

всех лунных морей сосредоточены в полосе от 40° северной широты до 10° южной широты. В полярных областях морские образования полностью отсутствуют.

Границы между морем и материком весьма неоднородны по степени выраженности. В морях правильной округ-

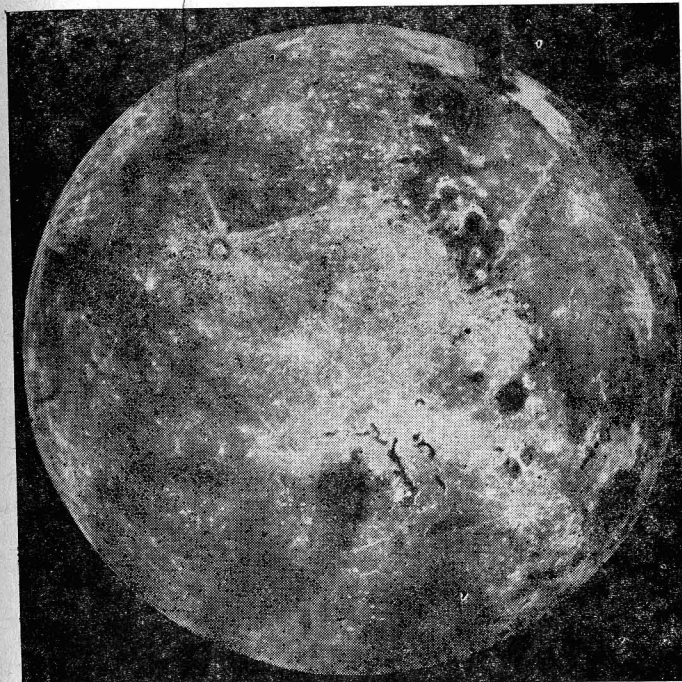


Рис. 15. Глобальный снимок Луны, полученный АМС «Зонд-6», западное полушарие. Граница видимой и обратной стороны проходит через центр видимого диска.

лой формы и в больших кратерах с затопленным дном отмечается резкий, четкий переход как по отражающей способности, так и в отношении насыщенности кратерами.

В случае неправильных морей граница оказывается размытой и переходная зона растягивается на несколько десятков километров. Наглядным примером может служить западная окраина Океана Бурь, где большое число

Таблица 8

Название	Площадь, тыс. км <sup>2</sup>	Название	Площадь, тыс. км <sup>2</sup>
Океан Бурь	2102	Море Восточное	54
Море Дождей	829	Залив Центральный	52
Море Холода	436	Море Москвы	50
Море Спокойствия	421	Залив Зноя	40
Море Изобилия	326	Залив Радуги	39
Море Ясности	303	Море Гумбольдта	22
Море Облаков	254	Море Волн	21
Море Кризисов	176	Море Пены	16
Море Южное	151	Море Мечты	15
Море Влажности	113	Море Мирное	13
Море Смита	104	Море Весны	12
Море Нектара	101	Озеро Смерти	12
Озеро Сновидений	72	Море Змеи	10
Море Краевое	62	Море Осени	3
Море Паров	55	Море Лета	1

затопленных или полузатопленных морскими породами материковых кратеров создает очень изрезанную границу. Такими же особенностями характерны границы Моря Облаков, Моря Спокойствия и ряда других морей.

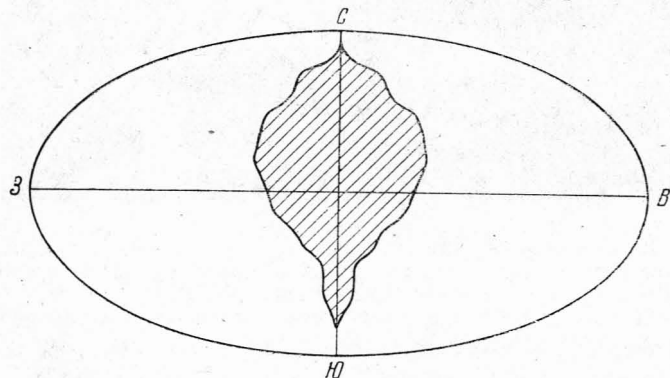


Рис. 16. Карта-диаграмма широтного распределения морских образований.

Схему глубинного строения лунной коры в местах расположения морей можно представить следующим образом [40, 41, 42]. Впадины, возникшие, вероятно, в ре-

зультате ударно-взрывных процессов, сопровождавших падение крупных метеоритов (или планетезималей), создали первоначальное ложе будущих круглых морей. Развитие этих форм могло сопровождаться процессами обрушения и дальнейшего усложнения образовавшейся при взрыве системы глубинных трещин. Одновременно недостаток массы поверхностных пород, выброшенных и рассеянных взрывом, мог привести к внедрению вещества

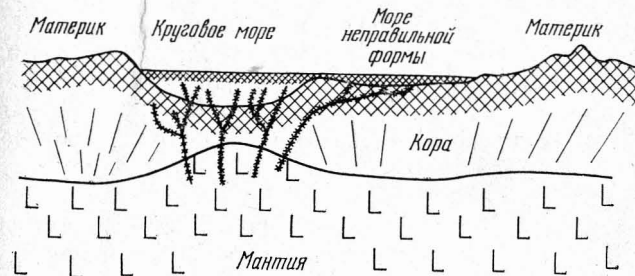


Рис. 17. Схема глубинного строения лунных недр в области морей.

мантии и постепенному заполнению впадины глубинными расплавами базальтового состава. При такой модели находит объяснение факт совпадения масконов по местоположению с круговыми морями, поскольку местные гравитационные аномалии могут вызываться глубинным внедрением в кору вещества мантии. Описанная схема показана на рис. 17.

Моря неправильной формы, как правило, примыкают к круговым морям, непосредственно соединяясь с ними. Поэтому закономерно предположить, что расплав, образовавший моря неправильной формы, поступал не столько по глубинным каналам, сколько из соседних круговых морей.

Мощность анортозитовой коры составляет около 50—60 км (см. гл. I). При средней плотности 2,9 г/см<sup>3</sup> общая масса пород анортозитового состава равна  $5,5 \cdot 10^{24}$  г или 7,5% от массы всего лунного шара.

Различные оценки мощности напластования морских базальтов в среднем указывают величину 1—2 км. При плотности базальтовых пород 3,3 г/см<sup>3</sup> общая масса мор-



ского вещества оказывается равной  $3,2 \cdot 10^{22}$  г, что составляет 0,6% от массы лунной аноксидной коры или 0,04% от массы лунного шара.

Кроме категорий глобального масштаба (моря и материка) номенклатура лунных образований включает ряд морфологических категорий, объединяющих типичные формы рельефа.

Решениями Международного астрономического союза (МАС) была установлена единая система номенклатурных обозначений деталей рельефа на поверхности планет земной группы и спутниках с помощью латинских терминов [43]. В приводимом ниже списке дан полный перечень латинских обозначений по системе МАС с описанием соответствующих форм рельефа. Обозначения, употребляемые в настоящее время также и в лунной номенклатуре, помечены звездочкой (\*), а употребляемые только применительно к Луне помечены двумя звездочками (\*\*); в скобках приводится эквивалентное обозначение в русской терминологии:

Catena\* — (цепочка кратеров),

Chasma — глубокая, протяженная с обрывистыми склонами впадина,

Crater\* — впадина округлой формы (кратер),

Dorsum\* — гребень (гряда),

Fossa — длинная, узкая неглубокая впадина,

Labirinthus — комплекс пересекающихся узких впадин,

Mensa — утес с плоской вершиной,

Mons\* — отдельная вершина (гора, пик),

Patera — неправильной формы кратер или комплекс подобных образований,

Planitia\* — равнина,

Planum\* — плато, плоскогорье,

Rupes\* — обрыв (сброс),

Rima\* — трещина (борозда),

Tholus\* — пологая возвышенность (холм),

Vallis\* — (долина),

Vastitas — обширная равнина,

Lacus\* — (озеро),

Mare\* — (море),

Palus\*\* — (болото),

Promontorium\*\* — (мыс),

Sinus\* — (залив)

Название «болото» в лунной номенклатуре — след, оставленный изучением контактов моря и материка на ранних стадиях телескопических исследований Луны при малой разрешающей способности инструментов. Три района лунной поверхности, традиционно относимые к этой категории, имеют лишь один общий признак — отражательную способность, несколько большую, чем у морских областей, но меньшую, чем у типичной материковой поверхности. Однако, по характеру рельефа Болото Сна является определенно материковой областью, в то время как Болото Эпидемий и Болото Гниения ближе к морской поверхности. Поэтому современные критерии физиографической классификации лунных областей заставляют критически относиться к названной категории. Вместе с тем, неоднородности строения материкового щита потребуют, вероятно, в дальнейшем дополнения лунной номенклатуры на промежуточном уровне между глобальными и морфологическими категориями с тем, чтобы обозначить отдельные материковые провинции.

Номенклатура МАС не выделяет категорию кольцевых образований, достигающих нескольких сотен километров в поперечнике. Гартман и Койпер [44] предложили называть подобные объекты «бассейнами», рассматривая кольцевые структуры, окружающие некоторые моря видимого полушария. Липский и др. [45] по результатам изучения первых фотографий восточного сектора обратной стороны Луны выделили образования, относящиеся к этой категории, под названием «талассоиды» (море-подобные).

## 2. Физическая поверхность и фигура Луны

Физическую поверхность лунного шара можно представить разложением по сферическим функциям, в котором число сохраняемых членов обеспечит соответствующую детальность моделирования рельефа. Методику гармонического анализа лунного рельефа с использованием наблюдательных данных впервые разработал и применил в практике лунных исследований Гудас (авторский обзор этих работ содержится в [46]).

Если радиус-вектор  $r$  текущей точки поверхности записать в виде суммы среднего радиуса Луны  $R_{\text{ср}}$  и высоты

$h$  данной точки над средней сферой,

$$r = R_{\zeta} + h,$$

то представив  $h$  в виде ряда по полиномам Лежандра и присоединенным функциям, получим

$$r = R_{\zeta} + \left[ \sum_{n=0}^n \sum_{m=0}^{m=n} (C_{nm} \cos m\lambda + S_{nm} \sin m\lambda) P_{nm}(\sin \beta) \right], \quad (2.1)$$

где  $\lambda, \beta$  — сферические координаты (широта и долгота),  $C_{nm}, S_{nm}$  — независимые коэффициенты разложения,  $P_{nm}(\sin \beta)$  — присоединенные функции Лежандра (при  $m=0$  называются полиномом Лежандра). Значения  $P_{nm}(\sin \beta)$  выводятся из рекуррентного соотношения:

$$(n+1)P_{n+1,n} = \\ = (2n+1) [\sin \beta P_{nm} + m(1 - \sin^2 \beta)^{1/2} P_{n,m-1}] + nP_{n-1,m}. \quad (2.2)$$

Величина  $n$  определяет порядок разложения. При  $n=0, 1, 2$  выражения для  $P_{nm}(\sin \beta)$  приобретают следующий вид, согласно уравнению (2.2):

$$P_{00} = 1, \\ P_{10} = \sin \beta, \quad P_{11} = (1 - \sin^2 \beta)^{1/2}, \\ P_{20} = \frac{1}{2}(3 \sin^2 \beta - 1), \quad P_{21} = 3 \sin \beta (1 - \sin^2 \beta)^{1/2}, \\ P_{22} = 3(1 - \sin^2 \beta).$$

Гармоники при  $m=0$  носят название зональных, при  $n=m$  — секториальных, при  $n \neq m \neq 0$  — тессеральных.

На практике по ряду точек, в которых измерены абсолютные высоты (отнесенные к единому центру координатной системы), определяют значения коэффициентов  $C_{nm}$  и  $S_{nm}$ , используя выражения вида

$$C_{n0} = \frac{2n+1}{4\pi} \int_0^{2\pi} \int_{-1}^{+1} h(\lambda, \beta) P_{n0} d(\sin \beta) d\lambda, \\ S_{n0} = 0, \\ C_{nm} = \frac{2n+1}{4\pi} \frac{n-m}{n+m} \int_0^{2\pi} \int_{-1}^{+1} h(\lambda, \beta) P_{nm} \cos m\lambda d(\sin \beta) d\lambda \quad (m \neq 0),$$

$$S_{nm} = \frac{2n+1}{4\pi} \frac{n-m}{n+m} \int_0^{2\pi} \int_{-1}^{+1} h(\lambda, \beta) P_{nm} \sin m\lambda d(\sin \beta) d\lambda \quad (m \neq 0).$$

Порядок разложения может быть задан любым, однако, реально величину  $n$  определяют количество используемых точек и точность проведенных измерений. Современная плотность точек, в которых измерены абсолютные высоты, и точность этих измерений не позволяют получить разложение более высоких порядков, чем  $n=10$ .

В качестве вычислительного аппарата как правило используется способ наименьших квадратов.

Если для определения коэффициентов  $C_{nm}$  и  $S_{nm}$  используется  $N$  равномерно распределенных по лунной поверхности точек, координаты которых  $(\lambda, \beta, h)$  известны, то система нормальных уравнений, полученных из (2.1), имеет вид

$$\sum_{k=1}^N \sum_{n=0}^n \sum_{m=0}^{m=n} P_{st} \frac{\cos}{\sin} t\lambda_k (C_{nm} \cos m\lambda_k + S_{nm} \sin m\lambda_k) P_{nm} = \\ = \sum_{k=1}^N h_k P_{st} \frac{\cos}{\sin} t\lambda_k, \quad (2.3)$$

где  $s=0, 1, \dots, n, t=0, 1, \dots, s$ .

Ошибки определения коэффициентов  $\delta C_{nm}$  и  $\delta S_{nm}$ , зависящие от ошибок измерения абсолютных высот  $\delta h_k$ , вычисляются путем решения системы уравнений (2.4), аналогичных по виду уравнениям (2.3):

$$\sum_{k=1}^M \sum_{n=0}^n \sum_{m=0}^n P_{st} \frac{\cos}{\sin} t\lambda_k (\delta C_{nm} \cos m\lambda_k + \delta S_{nm} \sin m\lambda_k) P_{nm} = \\ = \sum_{k=1}^M P_{st} \frac{\cos}{\sin} t\lambda_k \delta h_k. \quad (2.4)$$

В описанной схеме гармонического анализа предполагается, что аппроксимирующей поверхностью, которая одновременно является и поверхностью относимости для отсчета абсолютных высот, является сфера радиусом  $R_{\zeta}$ . Координаты центра аппроксимирующей сферы в системе отсчета высот для конкретного ряда измерений можно найти по значениям гармоник первого порядка (если

коэффициенты разложения известны). В прямоугольных координатах, связанных с центром Луны, положение искомого центра фигуры обозначим  $\xi_0(X)$ ,  $\xi_0(Y)$ ,  $\eta_0(Z)$ . Ось  $X$  лежит в плоскости лунного экватора и направлена к Земле, ось  $Y$  расположена в той же плоскости нормально к оси  $X$  и направлена вправо, если смотреть со стороны Земли, ось  $Z$  совпадает с осью вращения Луны и направлена к северу. Из уравнения (2.1) получаем

$$r = R_{\zeta} + \eta_0 P_{10} + (\zeta_0 \cos \lambda + \xi_0 \sin \lambda) P_{11}. \quad (2.5)$$

Величина среднего радиуса  $R_{\zeta}$  вычисляется по точкам данного ряда измерений, как правило, с использованием метода наименьших квадратов. Согласно анализу рядов наземных измерений абсолютных высот в пределах видимого полушария, проведенному Гавриловым, отклонения геометрической фигуры Луны от правильной сферы не превышают 0,5% [47]. Используя данные нескольких селенодезических каталогов, включая точки в краевой зоне, Гаврилов вычислил значения среднего радиуса Луны для видимого полушария в различных вариантах (с разделением исходных данных по топографии и без разделения), которые заключены в пределах от  $1734,71 \pm 0,27$  до  $1737,92 \pm 0,03$  км. Эти значения оказались близкими к определенным по траекторным измерениям радиусам-векторам лунной поверхности в местах падения КА «Рейнджер-6—9» ( $1735,2—1735,7$  км) и полученным с помощью отдельных орбитальных определений ( $1734,8 \pm 0,3$  км) [16]. Различие величин среднего лунного радиуса, полученной по данным наблюдений за траекториями лунных КА и принятой в астрономической практике (см. гл. I), показывает, что существует несовпадение центра масс и центра фигуры Луны. Авторы работы [48] провели определения положения центра масс в системе каталога Милза [49] по данным различных определений радиусов-векторов точек лунной поверхности, заведомо отнесенных к центру масс Луны (таблица 9). Средние значения координат центра масс по этим определениям равны:  $X = +2,39 \pm 0,20$  км,  $Y = -0,26 \pm 0,35$  км,  $Z = +1,18 \pm 0,36$  км, следовательно, центр масс расположен ближе к Земле (примерно на 2 км), чем центр фигуры.

Кроме сферической аппроксимации физической поверхности Луны, существуют попытки представить фигу-

ру Луны в виде эллипсоида, ориентированного по осям инерции  $(X, Y, Z)$  или произвольно.

Исходя из уравнения (2.1), можно заключить, что в случае эллипсоида вращения уравнение поверхности имеет вид [46]

$$r = R_{\zeta} + C_{20} P_{20}(\sin \beta). \quad (2.6)$$

В случае трехосного эллипсоида в правой части (2.6) появится еще член, соответствующий секториальной гар-

Т а б л и ц а 9

Исходные данные	Число измерений	Ошибки высот, км	Положение центра масс Луны в системе каталога Милза [49]		
			X, км	Y, км	Z, км
«Лунар орбитер-1»	73	$\pm 0,7$	$+2,24 \pm 0,08$	$+0,04 \pm 0,14$	—
Фотограмметрич. измерения («Лунар орбитер-1»)	9	$\pm 0,2$	$+3,36 \pm 0,17$	$+0,08 \pm 0,22$	—
Радиолокационные измерения «Рейнджер-6—9»	32	$\pm 0,2$	$+2,14 \pm 0,08$	$-2,28 \pm 1,15$	$+1,20 \pm 1,54$
«Аполлон-11»	4	$\pm 0,3$	$+3,02 \pm 0,15$	$-1,54 \pm 0,36$	$+0,82 \pm 0,26$
«Сервейор-1, -3, -6, -7»	1	$\pm 0,2$	—	—	—
	4	—	$+3,14 \pm 0,92$	$-2,10 \pm 0,40$	$+1,91 \pm 0,37$

монике второго порядка, и эллипсоидальные составляющие фигуры при условии однородного распределения плотности внутри лунного шара запишутся в виде

$$r = R_{\zeta} + \frac{1}{2} C_{20} (3 \sin^2 \beta - 1) + 3C_{22} (1 - \sin^2 \beta) \cos 2\lambda, \quad (2.7)$$

поскольку  $S_{22} = 0$  [46]. В качестве примера эллипсоидальной аппроксимации физической поверхности Луны по результатам наземных измерений можно привести данные гармонического анализа селенодезического каталога DOD-66 [50]. Для этого ряда измерений были получены значения:  $R_{\zeta} = 1737,5$ ,  $C_{20} = 0,30$ ,  $C_{22} = 0,18$ . Подставляя эти величины в (2.7), получим следующие значения полу-



осей эллипсоида, ориентированного по осям инерции:

$$a = 1737,89 \text{ км,}$$

$$b = 1737,36 \text{ км,}$$

$$c = 1737,80 \text{ км.}$$

Приведенные значения позволяют сделать вывод, что в пределах ошибок измерений эллипсоидальная аппроксимация по данным видимого полушария Луны практически не отличается от сферической. Аналогичные результаты были получены при вычислении параметров произвольно ориентированных эллипсоидов Гавриловым [47], Хабибуллинским и Чикановым [51], а также другими авторами [16].

Основные трудности анализа фигуры Луны и, в частности, гармонического анализа по результатам наземных наблюдений, состоят в ограниченности исследуемой территории только видимых полушарием.

Биллс и Феррари [52] использовали для гармонического анализа физической поверхности Луны объединенные данные по видимому и обратному полушариям. В обработку были включены 5800 измерений высот лазерным альтиметром с КК «Аполлон» с ошибкой 0,3 км, 1400 пунктов фотограмметрических измерений по съемкам с КК «Аполлон» (ошибка определения высот 0,3 км), 3300 пунктов селенодезической сети на видимом полушарии, полученной по наземным измерениям с ошибкой 1,0 км, причем наземные измерения были приведены в систему центра масс. В разложении участвовали гармоники до восьмого порядка включительно. В системе координат, отнесенной к центру масс, координаты центра фигуры оказались равными:

$$X = -1,57 \pm 0,08 \text{ км,}$$

$$Y = -0,30 \pm 0,04 \text{ км,}$$

$$Z = -0,75 \pm 0,13 \text{ км.}$$

Значение среднего радиуса составило  $R_c = 1737,46 \pm 0,04$  км. Физическая поверхность Луны в этой модели аппроксимируется произвольно ориентированным трехосным эллипсоидом при следующих значениях и ориента-

ции полуосей:

$$a = 1738,04 \pm 0,09 \text{ км (23 °Ю, 20 °В),}$$

$$b = 1737,68 \pm 0,06 \text{ км (33 °С, 94 °В),}$$

$$c = 1736,67 \pm 0,13 \text{ км (48 °С, 317 °В).}$$

В другом варианте обработки, используя, кроме перечисленных выше материалов, карты краевой зоны Уотса и измерения лимбов по фотографиям АМС «Зонд-6», Биллс и Феррари получили разложение до 10 порядка включительно [53]. В этой аппроксимации средний радиус, отнесенный к центру масс, равен 1737,42 км, а координаты центра фигуры имеют значения:

$$X = -1,67 \text{ км,}$$

$$Y = -0,45 \text{ км,}$$

$$Z = -0,28 \text{ км.}$$

Таким образом, совместное рассмотрение данных по видимому и обратному полушариям подтверждает сдвиг центра масс в сторону Земли по отношению к центру фигуры Луны.

На рис. 18 представлены изогипсы, соответствующие разложению Биллса и Феррари при сохранении гармоник 10 порядка. Оригинал карты [53] перестроен в проекцию карты-схемы рис. 3, передающую без искажений соотношение площадей. Изогипсы охватывают широтный пояс  $\pm 45^\circ$  всего лунного шара. Таким образом, исключая области высоких широт, можно получить представление об общих характеристиках глобального строения физической поверхности Луны. Прежде всего, необходимо отметить различные высотные уровни видимого и обратного полушарий, а также морских и материковых образований. Поскольку лунные моря сосредоточены в пределах одного — видимого полушария, сдвиг точки отсчета высот (все гипсометрические уровни карты на рис. 18 отнесены к центру масс) в направлении на Землю приводит к тому, что обе возможные причины — полушарная асимметрия и различие ландшафтных уровней, изменяют высоты образований одинаково — в сторону уменьшения на видимом полушарии и увеличения на обратном.

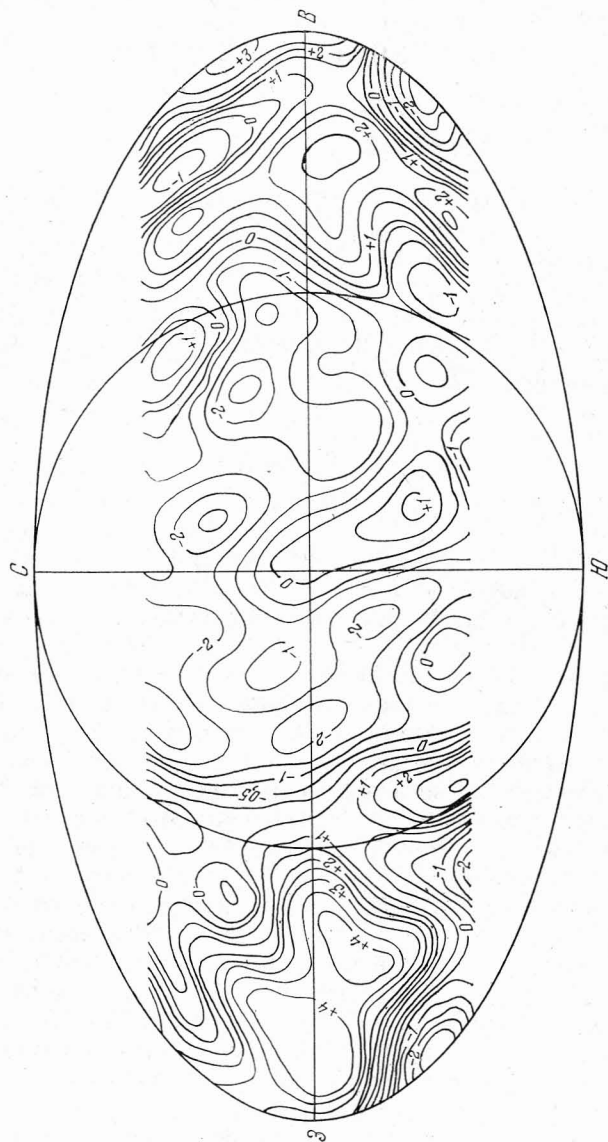


Рис. 18. Гипсометрическая карта широтного пояса  $\pm 45^\circ$ , построенная по разложению Биллса и Феррари с сохранением гармоник 10 порядка. Проекция карты та же, что на рис. 16.

Статистическую картину распределения гипсометрических уровней физической поверхности Луны дают гипсографические кривые. Гипсографическая кривая строится по данным измерения площадей, занимаемых определенным высотным уровнем поверхности. На графике по оси

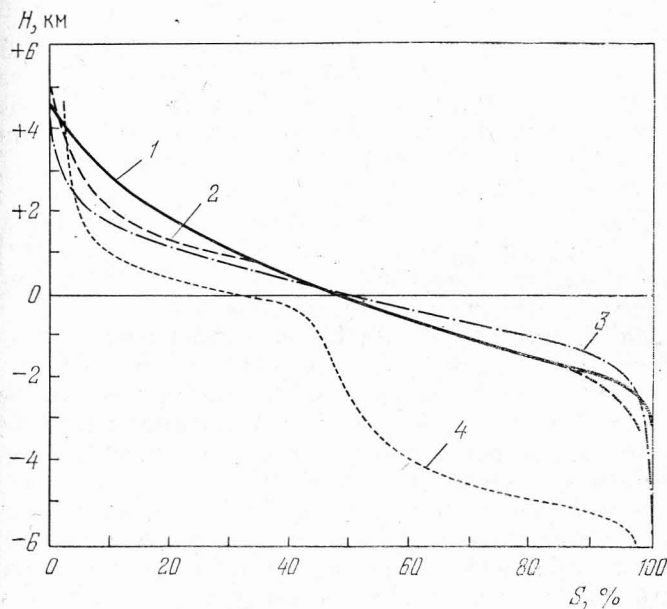


Рис. 19. Гипсографические кривые Луны (1—3) и Земли (4). Пояснения приводятся в тексте.

абсцисс откладываются площади территорий, расположенных выше уровня, отмечаемого шкалой абсолютных высот на оси ординат. Рис. 19 показывает различные варианты гипсографической кривой Луны (1—3) и для сравнения гипсографическую кривую Земли (4). Кривая (1) построена по измерению площадей внутри соответствующих изогипс на рис. 18. Абсолютные высоты отнесены к центру масс. Средний уровень соответствует  $R_C = 1737,42$  км. В первом приближении эту гипсографическую кривую можно назвать общей для всей лунной поверхности, поскольку исходные данные охватывают около 70% территории лунного шара. Кривая (2) построена

Гавриловым [54] и является экстраполяцией на всю лунную поверхность плотности распределения уровней видимого полушария. Исходным материалом для построения кривой послужили измерения абсолютных высот из различных каталогов, сведенные в одну систему. Общее число точек составляло 2260. Высоты отнесены к центру масс Луны. Кривая (3) построена Родионовой [55] по результатам измерения площадей высотных уровней на гипсометрической карте, составленной В. А. Никоновым. Исходные данные в этом случае охватывают 60% видимого полушария. Значения абсолютных высот отнесены к центру фигуры. Средний уровень соответствует сфере радиусом 1738,0 км.

Основные отличия гипсографических кривых (1) и (2) сводятся к разнице экстремальных значений высот и разнице в области положительных значений высот. Первое обстоятельство, по-видимому, объясняется характером исходных данных. Кривая (1) построена по сглаженным изогипсам, описывающим глобальные неровности поверхности. Кривая (2) построена по статистической обработке измерений высот отдельных точек, поэтому на ее вид в области максимальных и минимальных высот, вероятно, оказали влияние местные особенности — высоты отдельных гор и глубины кратеров. Второе отличие можно объяснить существованием аномального поднятия поверхности на обратной стороне Луны в западном полушарии (см. рис. 18), которое, очевидно, выходит за пределы возможностей экстраполирования. Однако для территории, занимающей 60% всего лунного шара, обе кривые полностью совпадают.

Гипсографическая кривая (3) отличается от кривых (1) и (2) прежде всего исходным пунктом отсчета высот. Отклонения в области положительных высот объясняются ограниченностью данных видимым полушарием Луны.

Во всем остальном все три кривые носят одинаковый характер и, в отличие от гипсографической кривой Земли, не выделяют господствующие уровни, что является отличительной особенностью строения физической поверхности Луны. Если отделить 83,5% поверхности, занимаемой материковыми областями, то высотный уровень, разделяющий оба типа ландшафта, окажется равным примерно

—1,6 км. Статистически морские области должны располагаться ниже этого уровня, если принять за основу вытекающий из данных рис. 18 принцип низинного расположения морей. При этом средний уровень морской поверхности по кривой (1) составляет —2,0 км, по кривой

Т а б л и ц а 10

Регионы	Число точек	X, км	Y, км	Z, км
Материки*	532	1740,2	1737,3	1736,5
Все моря*	385	1739,1	1736,0	1734,7
Моря с масконами*	95	1738,7	1734,5	1734,0
Другие моря*	290	1739,3	1736,1	1735,2
Моря	196	1736,6	1735,0	1732,7
Округлые моря	20	1737,3	1734,6	1733,8
Округлые моря и Океан Бурь	157	1736,8	1734,8	1736,4
Моря неправильной формы и кратеры обратной стороны	109	1736,0	1736,2	1735,4
Моря неправильной формы	75	1737,1	1735,5	1734,5
Материки	136	1738,1	1738,2	1738,0

(2) около —2,2 км. Средний уровень материкового ландшафта составляет +0,3 км. Таким образом, в масштабах всего лунного шара разность средних уровней материков и морей достигает 2,3 км. В пределах видимого полушария это значение оценивается величиной 1,4 км [47]. Такое же расхождение дает и оценка по кривой (3). Другим наглядным способом выявления различий между ландшафтными уровнями является региональная эллипсоидальная аппроксимация физической поверхности Луны. В таблице 10 сведены результаты, полученные по наземным измерениям [56] (первые четыре региона, отмеченные звездочкой \*), и полученные по данным орбитального лазерного альтиметрирования в субэкваториальном поясе Луны [57]. В первой колонке таблицы 10 приводится характеристика региона, который аппроксимировался референц-эллипсоидом, во второй колонке приводится число измеренных абсолютных высот, по которым проводились вычисления, и в трех последних колонках даны величины полуосей трехосных эллипсоидов, ориентированных по осям инерции Луны. Центры эллипсоидов имеют некоторые смещения относительно центра масс Луны.



Данные таблицы 10 подтверждают, что моря и материки имеют различный высотный уровень, что выражается в различии параметров региональных референц-эллипсоидов. Кроме того, округлые моря, т. е. области, как правило, связанные с масконами Луны, располагаются на более низком уровне, чем моря вообще. Этот последний результат согласуется с данными статистического анализа распределения высот на видимом полушарии [58]. Средний уровень округлых морей по этим данным ниже на 1,3 км среднего уровня морей неправильной формы и почти на 4 км ниже уровня материков.

### 3. Планетарные кольцевые структуры на поверхности Луны

Основой планетарных структур на лунной поверхности являются кольцевые образования. Если воспользоваться устоявшейся рабочей терминологией, не вошедшей в номенклатуру МАС (см. выше), планетарные кольцевые структуры Луны можно представить генетической последовательностью «талассоид — море», объединив их общим названием «бассейны». Основными отличительными особенностями бассейнов являются размеры (более 300 км) и многокольцевая структура образования. Современный вид бассейнов, определяемый стадией эволюции каждого отдельного образования, в определенной степени зависит от его местоположения. На обратной стороне Луны бассейны встречаются в виде талассоидов — круговых депрессий с одним или несколькими кольцевыми валами. Примером подобных образований могут служить Королев или Герцшпрунг. Поверхность дна талассоидов имеет тот же характер изрытости кратерами меньших размеров, что и окружающая материковая поверхность. Подобным же образом талассоиды обратной стороны не выделяются на фоне светлых материковых пород при полнолунных условиях наблюдения.

Однако в ряде случаев центральная часть талассоидов оказывается покрытой темным морским веществом — Море Восточное, Море Москвы, Море Мечты. Подобные образования служат примером следующей стадии эволюции бассейнов. В пределах видимого с Земли полушария, как правило, все бассейны заполнены морскими породами

до границ внешнего кольца и представляют собой конечную стадию эволюции — круговые моря. Исключением является Море Нектара, в котором подобно некоторым талассоидам обратной стороны морские породы занимают лишь часть кольцевой структуры, ограниченную внутренним

Таблица 11

Название	D, км	Название	D, км
Море Дождей	1104	56° Ю, 46° З	367
Море Восточное	961	Менделеев	345
Море Нектара	729	Море Мечты	344
Море Ясности	641	Биркгоф	342
Герцшпрунг	586	Лоренц	340
Море Кризисов	516	57° Ю, 162° В	339
Аполлон	502	Планк	332
Море Москвы	460	Шрёдингер	324
Королев	450	Ван-де-Грааф	315
Море Влажности	442	Байи	295
Море Смита	433		

кольцом (горы Пиренéи, диаметр 413 км). Внешнее кольцо этого образования хорошо сохранилось лишь частично (горы Алтай, диаметр предполагаемого внешнего кольца 729 км).

В таблице 11 приведены крупнейшие кольцевые структуры Луны (300 км и более в диаметре), большинство из которых, вероятно, можно назвать бассейнами [38].

Самое крупное круговое море, Море Дождей, сохранило первоначально существовавшее внешнее кольцо бассейна в виде горных цепей Альп, Кавказа, Апеннин и Карпат.

Наиболее наглядно многокольцевая структура крупных лунных бассейнов прослеживается на примере Моря Восточного. Внутри этого образования можно выделить четыре концентрических вала. Первое кольцо ограничивает центральную область, занятую темными морскими породами и имеет диаметр около 300 км. Два кольца Гор Рук (внутреннее и внешнее) имеют диаметры 480 км и 642 км. Между ними располагается узкая полоса Моря Весны. Внешним кольцом, определяющим

размеры всего образования, являются Кордильеры, диаметр которых составляет в среднем 961 км.

Кольца бассейнов, как правило, имеют довольно правильную форму. Исследования показали, что отклонения реальной формы внешних колец от окружности на поверхности лунного шара составляют для талассоида

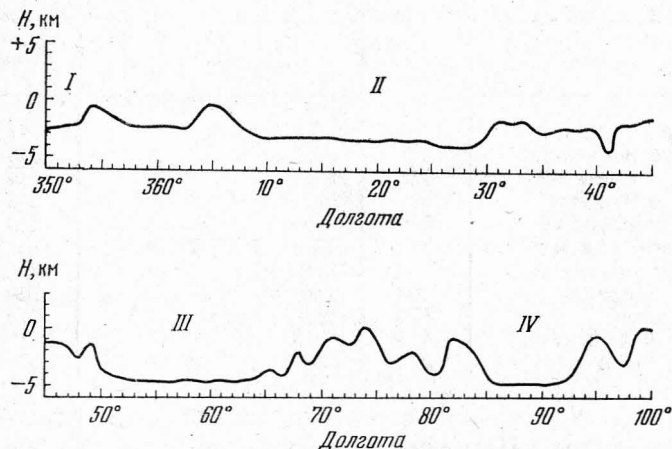


Рис. 20. Высотный профиль, построенный по данным лазерной альтиметрии, в области Моря Дождей (I), Моря Ясности (II), Моря Кризисов (III) и Моря Смита (IV). Вертикальный масштаб примерно в 25 раз больше горизонтального.

Герцшпрунг 1%, для талассоида Королев 4%, для Моря Москвы 4% и для бассейна Моря Восточного 2% [55].

На рис. 20 показан сглаженный высотный профиль вдоль траектории движения орбитального отсека КК «Аполлон-15», построенный по данным лазерной альтиметрии. Профиль дает высотный разрез нескольких планетарных кольцевых структур: восточной окраины Моря Дождей (I), Моря Ясности (II), Моря Кризисов (III) и Моря Смита (IV). На горизонтальной оси отмечены селенографические долготы вдоль большого круга, имеющего наклон к лунному экватору  $26^\circ$  и восходящий узел на долготу  $93^\circ$ . Вертикальный масштаб профиля примерно в 25 раз больше горизонтального. Высоты отсчитываются от сферы радиусом 1738 км [59].

Профиль показывает, что внешние валы бассейнов в среднем возвышаются над уровнем окружающей местности на 1,5—2,0 км. Во всех трех случаях поверхность моря не отражает в явном виде существование внутренних колец. Однако, по крайней мере в случае Моря Ясности, погребенную структуру внутреннего кольца можно наметить по наличию концентрической системы морских валов (складок), высота которых над окружающей местностью незначительна. Следовательно, можно сделать вывод, что гребень внутренних валов первоначальной кольцевой структуры не возвышался над современным уровнем моря, т. е. был на 2,5—3,0 км ниже гребня внешнего кольца. Если допустить, что мощность напластования морских пород не превышает, как указывалось выше, 1—2 км, максимальная глубина первоначальной кольцевой структуры могла составлять около 4—5 км (от гребня внешнего кольца).

Внутренние склоны вала, судя по приведенному профилю, в среднем имеют наклон  $2-3^\circ$ .

Насколько типичны названные характеристики планетарных кольцевых структур, можно судить, сравнив их с ранее проведенными оценками фотометрическим методом [60]. Для талассоида Королев были получены углы наклона внутреннего склона валов около  $1,5-2,0^\circ$ , а глубина наиболее низких мест оценивалась величиной 5—6 км относительно гребня вала.

На рис. 20 представлен также профиль двух горных цепей — Гор Гем и Апенин (между Морем Дождей и Морем Ясности). Лунные горы как категория рельефа не являются, за редким исключением, самостоятельными образованиями. Из приведенного выше описания планетарных кольцевых структур с очевидностью следует, что под понятие «гор» подпадают в основном внешние и внутренние валы этих гигантских образований. Кроме названных ранее, можно упомянуть Горы Юра, окружающие кольцевую структуру Залива Радуги. Продолжение этой структуры проявляется пологими валами на поверхности Моря Дождей. Внутри Моря Дождей цепочка, в которую входят Прямой Хребет, Горы Тенерифе, Пик Пико и Шпицберген, продолженная кольцом пологих валов, явно обозначает внутреннее кольцо (или одно из внутренних колец) этой планетарной структуры. Вероятно, остат-

ками погребенной кольцевой структуры являются Горы Рифей, по которым проведена северо-западная граница Моря Познанного.

Как оказалось, Хребет Советский, обнаруженный еще при дешифрировании первых фотографий обратной стороны Луны, также входит в систему колец крупного бассейна на материковом массиве в восточном полушарии [61].

Одним из немногих исключений из этого правила можно назвать горную местность Тавр, расположенную между Морем Ясности и Морем Кризисов и представляющую собой протяженную по площади область весьма изрезанного неровностями рельефа.

Чрезвычайно интересной проблемой, занимавшей многих исследователей, является поиск закономерности в расположении планетарных кольцевых структур на лунной поверхности.

Существование «пояса морей» пытался еще в начале нашего века показать Ю. Франц. Объединяя цепочку морей в субэкваториальном поясе видимого полушария, Ю. Франц считал закономерным существование на обратной стороне обширного образования морского типа. Идею «пояса морей» разделял также Хабаков [62], полагая, что «пояс морей» имеет некоторый наклон к экватору Луны и на обратной стороне переходит в южное полушарие, продолжаясь Морем Южным и Морем Мечты (восточный сектор обратной стороны Луны тогда еще не был сфотографирован). После завершения глобального обзора лунной поверхности в 1965 г. и обнаружения на обратной стороне кольцевых структур — талассонидов, была выдвинута гипотеза о существовании «пояса депрессий», который включает на видимом полушарии морские образования, а на обратном продолжается рядом кольцевых структур [45]. Окончательное решение этого вопроса затрудняется малым числом планетарных кольцевых структур, при котором разделить элементы случайности и закономерности в расположении, используя какой-либо математический аппарат, представляется невозможным. Липский и Родионова, используя картометрические методы анализа, указали на два возможных вида закономерности в распределении планетарных кольцевых структур: расположение вдоль

двух взаимно перпендикулярных больших кругов на лунной сфере при антиподальном размещении образований видимого и обратного полушарий [63]. Одна окружность имеет наклон к лунному экватору  $+37^{\circ}16'$  и пересекается с ним в точке с долготой  $-81^{\circ}45'$ . Другая окружность имеет угол наклона  $-52^{\circ}44'$  и точку пересечения с экватором на долготе  $124^{\circ}50'$ . На первой окружности располагаются такие образования, как Море Дождей, Море Ясности, Море Кризисов, Море Смита, Море Мечты, Аполлон, Море Восточное и др. В частности, вдоль этого пояса расположены и все крупные масконы Луны. Перпендикулярный пояс также включает крупные кольцевые структуры и такие моря, как Море Влажности и Море Москвы.

Однако в поисках закономерности расположения планетарных структур нельзя ограничиться рассмотрением только собственно кольцевых образований. Сама идея закономерности вытекает из предположения о тесной связи генезиса этих форм и общего строения лунного шара. Поэтому следует учитывать также общие формы физической поверхности Луны. На рис. 21 представлена схема, объединяющая упомянутые два элемента. Штриховкой выделены области, расположенные ниже принятого среднего высотного уровня лунного шара ( $R_{\text{с}} = 1738$  км). Внешняя изогипса соответствует этому уровню, внутренняя — высоте — 4,6 км, которая, как было показано выше, статистически разделяет уровни морского и материкового ландшафтов. Изогипсы построены согласно гипсометрической карте на рис. 18. Округлыми контурами нанесены крупнейшие кольцевые структуры Луны согласно таблице 11. Цифры на схеме соответствуют порядковой нумерации образований в таблице 11.

Оказывается, что не только в пределах морских образований, но и на материковом щите кольцевые структуры, как правило, совпадают по расположению с глобальными понижениями физической поверхности Луны. Этой закономерности подчиняются такие образования, как Море Восточное, Аполлон, Море Москвы, Море Мечты, Биркгоф, Ван-де-Грааф, а также, возможно, и Байи, Планк и некоторые другие, расположенные на материковой поверхности кольцевые структуры. Проекция больших кругов, нанесенные на схему, соответствуют взаим-



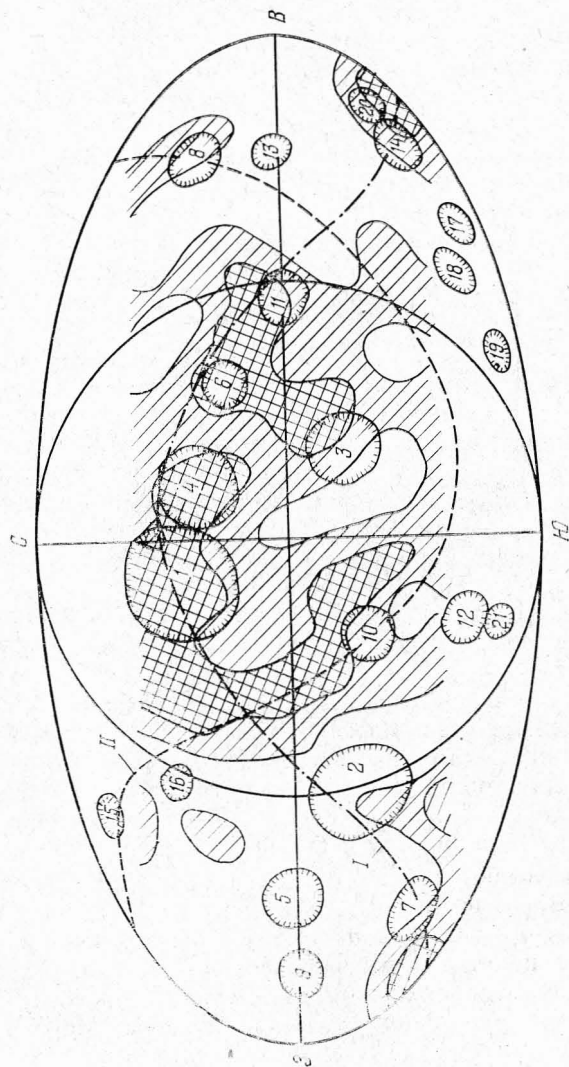


Рис. 21. Схема гипотетических поясов депрессий Луны (I и II). Обозначения кольцевых образований соответствуют данным таблицы 11. Заштрихованы области глобальных понижений.

но перпендикулярным окружностям, выведенным Липским и Родионовой [63]. Как следует из рис. 21, если эти круги принять в качестве центральных окружностей полос некоторой ширины ( $10^\circ - 20^\circ$ ), мы получим систему двух поясов глобальных депрессий, включающих почти все планетарные кольцевые структуры Луны. Поскольку элемент случайности в появлении отдельных форм, учитывая возможность их экзогенного происхождения, исключать нельзя, оставшиеся за пределами «поясов депрессий» кольцевые структуры могут быть причислены именно к такого рода образованиям.

#### 4. Общая асимметрия лунного шара

Асимметричное строение лунного шара является одной из главных селенографических закономерностей Луны. Внешним признаком общей асимметрии служит распределение на поверхности Луны морских образований.

Как показывают картометрические исследования [38], наиболее резко проявляется полушарная асимметрия при сопоставлении видимого с Земли и обратного полушарий Луны. В пределах видимого полушария морские области, выделенные в основном по морфологическим признакам, занимают 31,2% от общей площади поверхности полушария. На обратной стороне доля морских образований составляет всего лишь 2,6%. В таблице 12 приведены данные о распределении морских областей по квадрантам видимого и обратного полушарий, основанные на измерениях Родионовой [38]. Доля, приходящаяся на морские области, выражена в процентах от площади поверхности полушария.

Различие в распространенности морей в северном и южном полушариях следует уже из характера карты-диаграммы широтного распределения морских образований, приводившейся ранее (см. рис. 16). Согласно данным таблицы 12 это различие выражается следующим образом: в северном полушарии моря занимают 22,9% территории, в южном — 10,9%.

Полушарная асимметрия наблюдается также и при сопоставлении западного и восточного полушарий Луны.

Таблица 12

Видимое полушарие	Обратное полушарие			
	Зап. полушарие	Восточное полушарие	Зап. полушарие	Восточное полушарие
Северное полушарие	14,1	8,3	—	0,5
Южное полушарие	5,5	3,3	1,0	1,1

В западном полушарии моря занимают 21,2%, в восточном — 12,6% территории.

Таким образом, морские территории сосредоточены в основном в северной половине видимого полушария с некоторым увеличением в северо-западном квадранте.

Выше приводились данные, согласно которым сдвиг центра масс относительно центра фигуры также имеет общее направление в сторону Земли и к северу от плоскости экватора. Все приводившиеся сводки определений с небольшими отклонениями в конкретных величинах подтверждают эту тенденцию. Данные о смещении центра масс вдоль оси  $Y$  (восток — запад) не совпадают. Но отклонения по оси  $Y$  во всех определениях незначительны по величине при наибольших ошибках вычислений, что дает основание ими пренебречь и рассматривать смещение центра масс относительно центра фигуры только лишь в плоскости  $XZ$ . Наклон вектора смещения к оси  $X$  составляет около  $26^\circ$  по совпадающим между собой результатам вычислений из координат центра масс в системе центра фигуры, приведенным в работах [48] и [52]. Следовательно, вектор смещения центра масс и прямая пересечения плоскости  $XZ$  с плоскостью, в которой лежит средняя окружность главного «пояса депрессий» (см. выше), почти совпадают. Эта особенность может служить указанием на взаимосвязь строения поверхности лунного шара и структуры его недр. Наглядное представление о подобной взаимосвязи дает схема на рис. 22. Вдоль большого круга, имеющего в плоскости  $XZ$  угол наклона к лунному экватору  $26^\circ$ , построен профиль рельефа, высоты которого отнесены к центру масс и профиль напря-

женности гравитационного поля. Для построения высотного профиля использованы орбитальные измерения с помощью лазерного альтиметра по программе КК «Аполлон-15», расположение которых на местности совпадает с названным большим кругом [59]. Высоты откладывались от условного нулевого уровня в масштабе, указан-

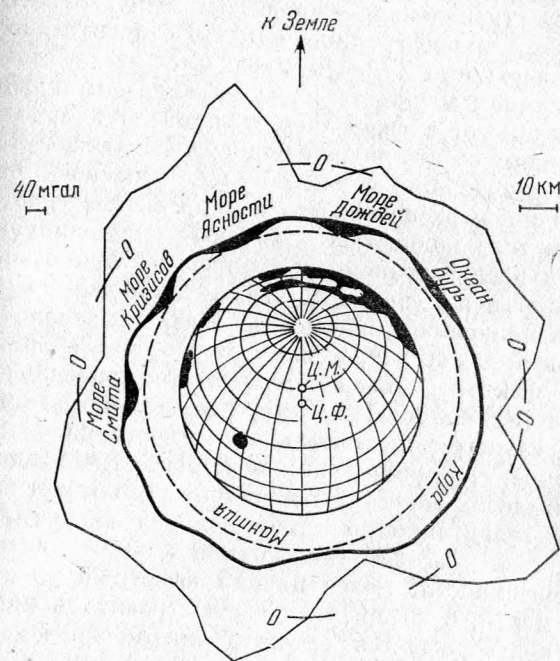


Рис. 22. Схема, показывающая соответствие особенностей строения физической поверхности и гравитационного поля Луны. Пояснения в тексте.

ном на схеме. Гравитационный профиль построен по карте, составленной Феррари на основании анализа долгопериодических возмущений орбит ряда искусственных спутников Луны, включая данные по движению двух спутников «Аполлон» [64]. Напряженность поля соответствует высоте 100 км над поверхностью. Масштаб и отметки нулевого уровня указаны на схеме. В центре помещена схематическая карта полушария в косоугольной проекции, соответствующей положению выбранного круга в

картинной плоскости, с указанием взаимного смещения центра масс (Ц. М.) и центра фигуры (Ц. Ф.). Стрелкой на схеме указано направление к Земле. Граница коры и мантии проведена условно, без учета соотношения масштабов.

Сдвиг центра масс в направлении к Земле, вероятно, обусловлен глобальным смещением центрального тела (в пределах верхней границы мантии) относительно физической поверхности лунного шара. Следствием этого явилась различная мощность коры на видимом и обратном полушариях, что в свою очередь привело к заполнению впадин видимого полушария подкорковым веществом при отсутствии подобного процесса на обратной стороне. Асимметричное расположение и направление сдвига центрального тела полностью объясняют полушарную асимметрию в распространенности морей на лунной поверхности. Согласно рис. 22 гравитационные аномалии видимого полушария однозначно связаны с заполненными базальтовой лавой депрессиями морей, что является известным фактом, объяснение которого приведено выше. Особенности, вытекающие из рассмотрения схемы на рис. 22, служат дополнительной иллюстрацией к этому объяснению. Профиль напряженности гравитационного поля в пределах видимого полушария показывает большие значения гравитационных аномалий над более глубокими морями, т. е. в местах, где верхняя граница мантии ближе к поверхности. Более низкий высотный уровень округлых морей, с которыми связаны гравитационные аномалии, подтверждается также данными, приводившимися выше.

Структура гравитационного поля на обратной стороне, вероятно, определяется в основном рельефом.

Учитывая вышесказанное, заполнение депрессий темными породами базальтовых лав можно считать прямым следствием внутренней асимметрии лунного шара. Однако в отношении поясов глобальных депрессий для подобного утверждения пока еще нет оснований. Единственным связующим звеном в этом случае является расположение вектора сдвига центра масс (т. е. центра сместившегося центрального тела) почти в плоскости главного пояса депрессий. Наличие такой взаимосвязи, пока не подтвержденное убедительными фактами, могло бы по-

служить указанием на некоторые события ранней истории Луны. В частности, экзогенное, ударно-взрывное происхождение планетарных кольцевых образований предполагает, что пояс депрессий должен располагаться в плоскости, параллельной плоскости эклиптики, в которой лежат орбиты большинства тел Солнечной системы, в том числе и крупных астероидов. Но тогда существенный наклон к плоскости эклиптики главного пояса депрессий может означать изменение ориентации оси вращения Луны в эпоху, следовавшую за возникновением планетарных кольцевых структур — предположение, которое уже неоднократно высказывалось в связи с изучением строения поверхности и фигуры лунного шара. К аналогичным выводам может привести и предположение об эндогенном происхождении пояса депрессий, поскольку влияние приливных сил, например, также связано с взаимной ориентацией оси вращения Луны и направления на Землю.

### 5. Линейные структуры на лунной поверхности

Кроме кольцевых структур, распространенным элементом лунного рельефа являются протяженные линейные образования в виде возвышенностей — валов или гряд, и понижений — трещин, борозд и долин. Однако генетически линейные элементы связаны с кольцевыми образованиями. Линейные структуры планетарного масштаба многие исследователи считают проявлением лунного тектонизма [65, 66].

Валы или гряды наблюдаются внутри морских областей и, вероятно, представляют собой складчатые структуры, порожденные динамикой лавовых потоков при формировании морей. В круглых морях валы, как правило, концентричны внешнему кольцу впадины. На местности эти образования выглядят пологими протяженными грядами. Ширина морских валов составляет несколько километров, а высота гребня над подножием не превышает 300—500 м. Протяженность отдельных звеньев может составлять десятки километров, а общий размер структуры доходит до сотен километров. Интересно проследить характер системы валов на границе Моря Дождей и Залива Радуги. В этом случае наиболее наглядно проявляется



связь складчатых гряд с продвижением лавовых потоков в период заполнения впадины Моря Дождей и большого кратера, ставшего ложем современного Залива Радуги.

По данным Трифонова [67] и Козлова и Сулиды-Кондратьева [68] построена схема планетарных линейных структур Луны, приведенная на рис. 23. Морские валы на этой схеме показаны одинарными линиями. Двойными линиями показаны борозды и долины, представляющие собой глобальную систему тектонических разломов. Нетрудно убедиться в том, что разломы главным образом связаны с областями понижений — морями и крупными кратерами. Типичная форма борозды или долины имеет вид трещины с различной степенью эрозированности краев. Разломы, сопровождаемые вертикальными сдвигами краев, на лунной поверхности не найдены, поэтому специалисты склоняются к раздвиговой природе этих образований [68].

Особенно интересным районом тектонических нарушений являются окрестности Моря Восточного. Разломы в этой области ассоциируются с гигантскими по протяженности кратерными цепочками [69]. Основной особенностью обнаруженных на обратной стороне кратерных цепочек оказалась их четко выраженная радиальная направленность по отношению к Моря Восточному. Цепочки, расположенные в северо-западном, юго-западном и южном секторах, и сопутствующие им разломы вытянуты вдоль направлений, сходящихся в северной части бассейна Моря Восточного. Всего обнаружено около двенадцати цепочек и разломов, вдоль которых идут цепочки кратеров. Наиболее протяженные образования находятся в северо-западном секторе. Здесь цепочки начинаются на расстоянии около 150 км от внешнего кольца бассейна Моря Восточного. Кратерная цепочка «ГДЛ» (названия крупнейшим кратерным цепочкам этой системы присвоены в честь первых советских организаций, создавших научную и техническую основу для космических исследований) имеет длину около 1500 км, цепочки «ГИРД» и «РНИИ» — более 600 км. Подсчеты плотности кратеров в этом районе показали, что на фоне равномерного распределения объектов размером более 30 км число кратеров диаметром менее 30—25 км возрастает вдоль отдельных направлений. Для трех названных

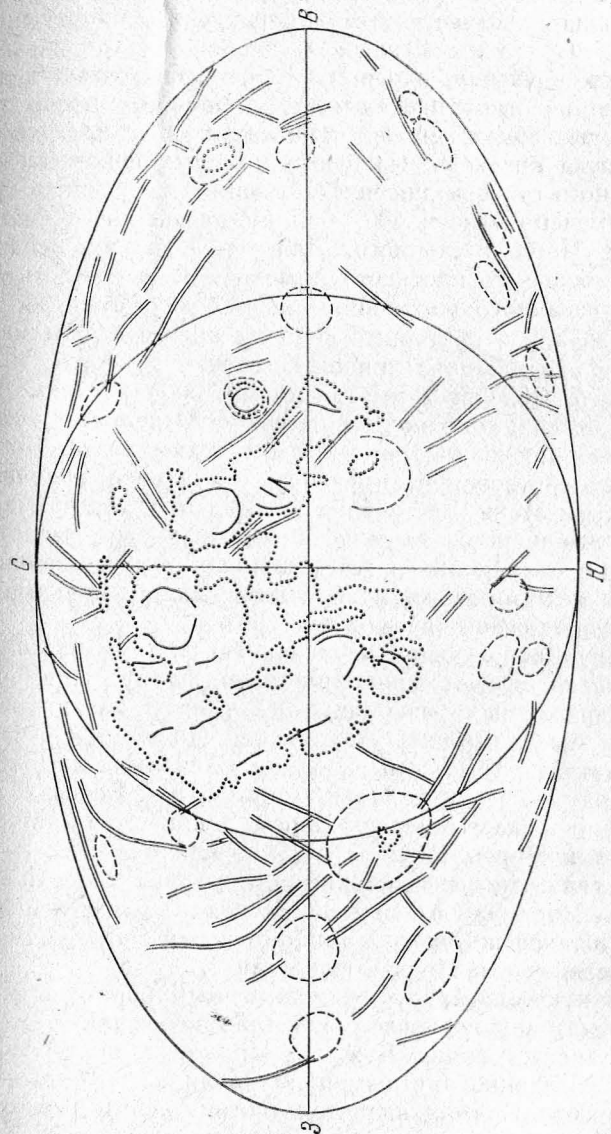


Рис. 23. Примерная схема расположения планетарных линейных структур на Луне. Одинарной линией обозначены валы в морях. Двойной линией — борозды, долины и трещины. Пунктир — контуры морей и крупных кольцевых образований.

наиболее протяженных цепочек число кратеров на единицу площади возрастает в 4—5 раз вдоль направления цепочки.

Размер кратеров, входящих в цепочки, остается постоянным на всем протяжении линейной структуры. В некоторых зонах цепочек отмечается небольшое увеличение числа кратеров. Из шести крупных цепочек северо-западного сектора для четырех наибольшее число кратеров отмечено в зоне 400—650 км от внешнего кольца бассейна Моря Восточного. Для двух других цепочек зона наибольшей плотности кратеров смещена относительно указанного расстояния, но не более, чем на 200 км.

Протяженные кратерные цепочки вместе с разломами образуют как бы пояс линейных структур вокруг Моря Восточного. Пояс этот имеет ширину 500—1500 км, начинаясь от внешнего кольца бассейна. Отдельные участки цепочек продолжаются и за пределами пояса. Кроме линейных образований, имеющих радиальное направление, вокруг Моря Восточного встречаются тангенциальные по отношению к кольцевой структуре разломы. В отличие от радиально направленных, тангенциальные разломы не сопровождаются кратерными цепочками и представляют собой борозды и долины.

Борозды, образующие планетарную систему разломов, как правило, имеют прямолинейную форму. Примером четко выраженных разломов этого типа в материковых областях могут служить Альпийская Долина (к северо-востоку от Моря Дождей), Долина Снеллиуса и Долина Рейта (к юго-востоку от Моря Нектара) или Борозды Гутенберга (в области между Морем Спокойствия, Морем Изобилия и Морем Нектара). В морских областях к подобному типу относятся, например, Борозда Гигина (в южной части Моря Паров), Борозда Гесиода (в области между Морем Облаков и Болотом Эпидемий) или Борозда Коши (в восточной части Моря Спокойствия).

Типичную структуру прямолинейных борозд в морской области можно представить себе по результатам детального исследования Борозды Прямой в кратере Лемонье, проведенного с помощью аппарата «Луноход-2» [70]. Борозда Прямая является тектоническим разломом меньшего масштаба, чем указанные на схеме рис. 23 и названные выше. Однако, морфология этого образования

имеет большое сходство с типичными трещинами и прямолинейными бороздами, наблюдаемыми в морях. Общая протяженность южного, обследованного отрезка Борозды Прямой составляет 6 км. К северу от этой борозды расположено еще одно линейное образование и несколько депрессий прямоугольной формы, продолжающих ее.

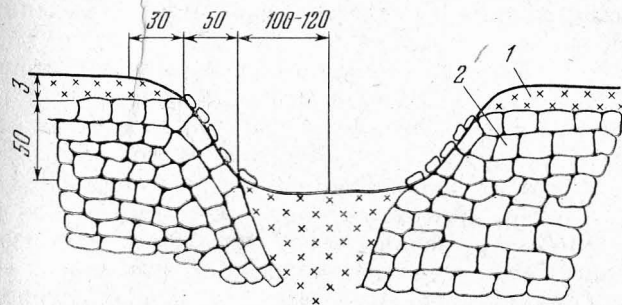


Рис. 24. Схема поперечного разреза Борозды Прямой.  
1 — слой раздробленного материала (реголит),  
2 — слой базальтовых пород. Размеры даны в метрах.

Ширина Борозды Прямой равна 400—500 м при глубине 50—60 м. На рис. 24 показана схема строения в поперечном разрезе, составленная на основе интерпретации внешних форм, сделанной авторами работы [70]. На рис. 24 условное обозначение 1 имеет слой раздробленного поверхностного материала (реголита), 2 — слой базальтовых пород. На расстоянии 30—50 м от четко отождествляемой кромки борозды окружающая местность имеет наклон в сторону впадины от 1—3° до 10—15°. В этой верхней части склона начинаются глыбовые россыпи, которые усиливаются при переходе к средней части склона. Крутизна средней части склона (на расстоянии 50—60 м от бровки) достигает 30—35°. Отдельные глыбы, располагающиеся по склону, имеют размеры до 3—5 м, изредка — до 7—10 м. Вдоль бровки борозды отмечены уступы и террасы высотой до 5 м и длиной до 100 м, которые, возможно, являются результатом оползневых процессов в верхней и средней части склона. На склонах борозды не были обнаружены следы качения камней. Глыбовая россыпь в своей основной массе кончается на нижней части склонов, имеющих еще существ-



венную крутизну. На дне борозды замечены лишь отдельные, в общем малочисленные глыбы. Исходя из этого, сделано предположение, что часть наблюдаемых глыб является, возможно, выступами скальных пород, частично покрытых на склоне реголитом. В то же время основной механизм перемещения свободно лежащих глыб, по видимому, состоит в медленном сползании и оседании по склону.

Ниже глубины 25—30 м крутизна склонов постепенно изменяется до 15—20° и поверхность переходит в плоское дно борозды, образованное, как это следует из схемы на рис. 24, раздробленным материалом реголита.

В отличие от прямолинейных форм планетарной системы разломов, трещины и борозды, возникшие в районах местных нарушений, имеют большей частью извилистый характер, весьма напоминающий русла рек. Извилистые борозды меньше по размерам и обнаруживаются при детальном обследовании отдельных районов. В качестве примера крупнейших извилистых борозд можно назвать Долину Шретера (в районе кратеров Аристарх и Геродот) и Борозду Хэдли (в районе Апеннин).

Участок Борозды Хэдли детально исследовался во время лунной экспедиции по программе полета РК «Аполлон-15». Эти результаты помогают составить представление о строении одной из типичных извилистых борозд [26].

Борозда Хэдли имеет ширину в среднем около 1500 м при глубине около 400 м. Общая протяженность борозды составляет 100 км.

На рис. 25 показана блок-диаграмма, представляющая профиль одного из участков борозды на протяжении 6 км. Соотношение масштабов по осям показано в правой части рисунка. Поперечные профили Борозды Хэдли приводятся через 1 км по оси блок-диаграммы. Высота сечения рельефа горизонталями соответствует 100 м. Блок-диаграмма построена по данным топографической карты района Борозды Хэдли [71]. Внутренние склоны борозды имеют угол наклона в среднем от 25 до 30° и переходят в корытообразное дно. Как следует из рис. 25, на отдельных участках борозды донная часть ее может сужаться или расширяться. Вблизи от края борозды реголит залегает слоем мощностью около 5 м. Однако на расстоянии при-

мерно 25 м от бровки вниз по склону реголит полностью исчезает и на поверхности появляются каменные глыбы и выходы скальных пород при средней величине фрагментов от 1 до 3 м. Еще ниже по склону вновь появляется мелкораздробленный материал, который, вероятно,

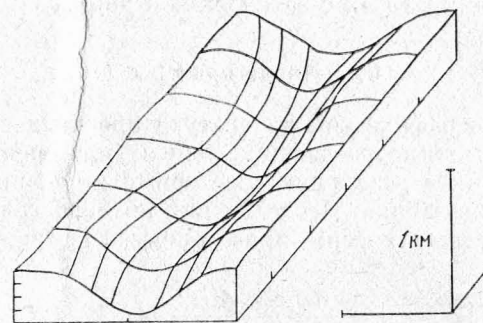


Рис. 25. Блок-диаграмма участка Борозды Хэдли. Справа приводится масштаб по трем осям.

толстым слоем покрывает дно борозды. Вместе с тем увеличивается и размер отдельных глыб. На склонах и дне борозды были обнаружены глыбы поперечником 15—18 м. Наибольший из замеченных фрагментов имел размеры около 30 м. На склоне исследованного участка Борозды Хэдли наблюдались также отдельные обнажения скальных пород высотой до 8 м.

Из приведенного описания можно сделать вывод, что по основным морфологическим признакам Борозда Хэдли похожа на Борозду Прямую в кратере Лемонье. Вероятно, несмотря на различие форм и размеров этих двух линейных образований природа их одинакова, а описанные особенности строения являются типичными для подобных элементов лунного рельефа.

Многочисленные линейные нарушения в рельефе встречаются на окраинах морей и в зонах контакта морского и материкового ландшафтов. В частности, в такой зоне — на восточной окраине Моря Облаков — существует уникальное линейное образование — Прямая Стена. Этот уступ не имеет аналогов подобного размера в других областях Луны. Протяженность сбросового обрыва, которым является Прямая Стена, составляет более 100 км.



Высота уступа около 150—300 м. Склон сброса довольно крутой и достигает  $40^\circ$ .

Системы борозд и трещин в виде радиальных и концентрических структур можно наблюдать и в масштабах отдельных кратеров. Наиболее часто местные разломы возникают в кратерах с затопленным дном.

## 6. Лунные кратеры

В селенографической литературе прошлых лет можно было встретить подразделение лунных кратеров на типы, связанные с их размерами: кратерные моря, цирки, кратеры, кратеры-лунки. Исследования по морфологии и статистике кратерных форм, проведенные в последнее время,

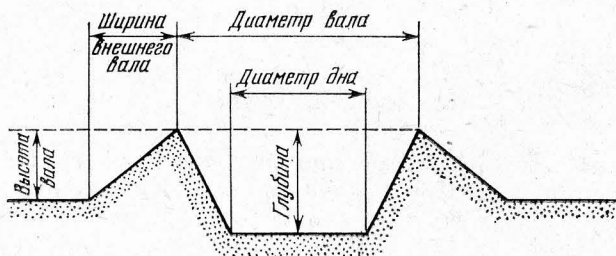


Рис. 26. Схема типичного строения крупного лунного кратера.

все более убеждают в том, что существует единая большая последовательность лунных кратеров. Учитывая, что известную роль играют масштабы процессов кратерообразования, можно указать на некоторые особенности строения, связанные с размером кратера. Однако при выделении типов решающими признаками следует считать генетические и возрастные особенности.

Крупные лунные кратеры (100 км и более в диаметре) имеют сложное строение со множеством индивидуальных отличий. Типичная форма крупного лунного кратера схематически показана на рис. 26. Общим для всех подобных структур является возвышающийся над окружающей местностью вал и углубленное дно. Глубина кратера, как правило, больше, чем высота внешнего вала. Склоны вала кратера в большинстве случаев пологи. Внешние склоны

вала не превышают в среднем  $6-8^\circ$ , внутренние —  $10-12^\circ$ . Примером профиля большого кратера с плоским дном может служить разрез, полученный радиовысотометром ИСЛ «Луна-22» [72]. Вертикальный масштаб на рис. 27, показывающий высотный профиль вдоль траектории полета ИСЛ «Луна-22», увеличен более чем в 20 раз по сравнению с горизонтальным. Поперечник кратера Птолемея составляет на профиле около 150 км, расстояние между гребнями вала кратера Дэви — около 35 км. Высоты указаны относительно среднего уровня сферы радиусом 1738 км.

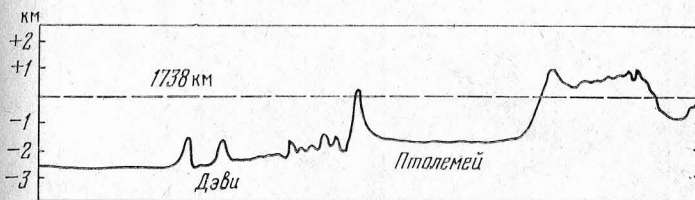


Рис. 27. Высотный профиль кратеров Дэви и Птолемея (по данным ИСЛ «Луна-22»). Вертикальный масштаб увеличен более чем в 20 раз.

Характерным для многих крупных кратеров является наличие центральной горки и террасированность внутренних склонов. В последнем случае местные углы наклона сбросов могут превышать в два-три раза приведенную выше величину общего склона. Обследование более 3000 лунных кратеров различных размеров показывает, что для образований диаметром более 40—50 км наличие центральной горки и террас на внутреннем склоне является весьма распространенным [73]. В таблице 13 приводятся данные о наличии центральных горок и террас у кратеров в процентах от общего числа обследованных образований указанного размера. Данные таблицы 13 учитывают кратеры только хорошо сохранившейся формы, без видимых следов изменения и разрушения.

Другой распространенной особенностью крупных кратеров является частично или полностью затопленное дно. Такие кратеры встречаются как вблизи границ материковых массивов и материковыми ландшафтами, так и внутри материковых массивов. Наглядным примером кратера,

соединяющего в себе описанные выше особенности, может служить кратер Циолковский, на обратной стороне Луны (рис. 28), имеющий диаметр около 190 км. Средний уровень затопленной части дна кратера расположен на 4 км ниже гребня вала. Наиболее высокая точка центральной горки кратера возвышается над уровнем дна на

Таблица 13

Диаметр, км	Центральные горки, %	Террасы, %
<10	2	0
11—20	11	0
21—30	40	40
31—40	75	68
41—50	96	88
51—60	91	91
>60	100	100

3245 м [26]. Внутренние склоны вала сильно террасированы перепадами высот отдельных террас в несколько сотен метров. Если воспользоваться примерной зависимостью высоты центральной горки от диаметра кратера, выведенной Ч. Вудом, можно оценить мощность лавового покрова. Высота центральной горки в км равна  $h \approx 0,026D - 0,26$ . В случае кратера Циолковский первоначальное (до затопления) значение  $h \approx 4,7$  км. Следовательно, современный слой лавового покрытия может достигать толщины 1,5 км.

Кратеры километрового диапазона размеров имеют более регулярные формы и для них выведены функции зависимости размеров от некоторых параметров. Наиболее употребительной является зависимость глубины кратера от диаметра. В общем случае эта зависимость имеет вид

$$H = aD^b,$$

где  $H$  — глубина,  $D$  — диаметр кратера,  $a$  и  $b$  — параметры, которые постоянны для значительных интервалов  $D$ .

По оценке, сделанной на основании измерений  $H$  и  $D$  204 молодых, хорошо сохранившихся кратеров, для размеров  $D < 15$  км  $a = 0,196$  и  $b = 1,010$  [74]. Измерения

проводились по материалам, полученным во время экспедиций «Аполлон-15», «Аполлон-16» и «Аполлон-17». Согласно каталогу, составленному по снимкам «Лунар орбитер-4», для послемерских кратеров  $a = 0,18$  и  $b = 1,03$ , для материковых

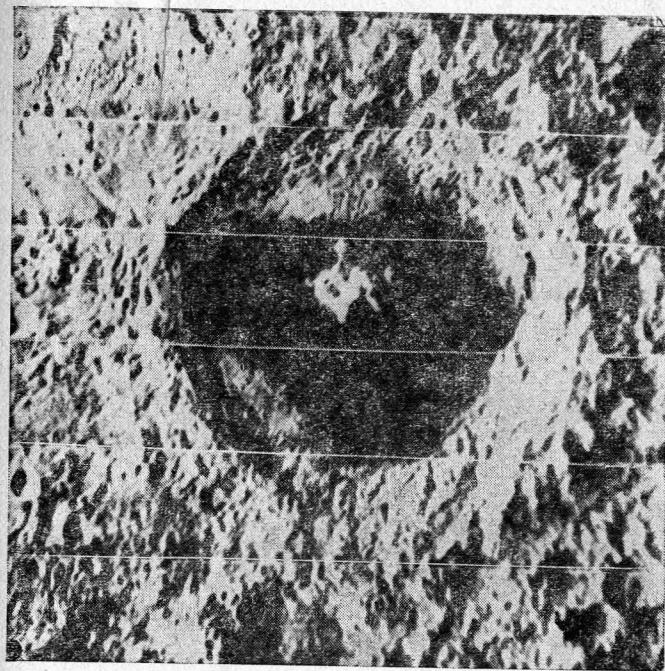


Рис. 28. Кратер Циолковский.

кратеров  $a = 0,15$  и  $b = 1,09$ . Анализ измерений 1078 кратеров размером от 0,6 км до 40,0 км по тем же снимкам привел к значениям  $a = 0,198$  и  $b = 0,910$ . Для измерений также отбирались четкие, хорошо сохранившиеся объекты [75]. Таким образом, в первом приближении зависимость глубины от диаметра кратера можно представить простым соотношением

$$H \approx 0,2D$$

для размеров от одного километра до первых десятков километров.



Для кратеров диаметром менее одного километра разработаны несколько классификационных систем, отражающих различия форм и степень сохранности образований. Согласно исследованиям Флоренского и др. [76] можно выделить четыре морфологических типа кратеров, размеры которых лежат в интервале от 10 до 600 м — это кратеры чашеобразные (форма аппроксимируется сферическим сегментом), конические, плоскодонные и концентрические (с двойным валом). По численности преобладают кратеры первого типа; они составляют не менее 80—95% от общего числа всех объектов. Соотношение глубины и диаметра кратеров этого типа примерно соответствует приведенному выше.

Конические кратеры составляют 3—10% от общего числа. Отношение глубины к диаметру для них достигает величины 0,3. Наиболее часто конические кратеры встречаются среди более мелких — размером до 50 м. В противоположность этому, плоскодонные кратеры, как правило, имеют размер, достигающий сотен метров. От общего числа кратеров плоскодонные составляют 5—15%. Наиболее редким морфологическим типом являются концентрические кратеры, составляющие менее 5% от общего числа объектов.

Характерным для кратеров диаметром менее километра является отсутствие возвышающегося над окружающей местностью вала. Для различных участков лунной поверхности возвышающийся вал имеет лишь от 5 до 25% кратеров подобного размера. Правда, существенную роль в этой статистике играет общая степень сохранности образования. Морфологическая классификация кратеров Флоренского и др. рассматривает пять степеней сохранности объектов для каждого из названных морфологических типов. Согласно этой классификации четко выраженный вал кратера постепенно разрушается и исчезает на второй или третьей стадии деградации объекта. Вместе с тем изменяется и отношение глубины к диаметру. Средняя величина  $H/D$  на последней стадии деградации чашеобразных кратеров падает до 0,07, конических до 0,08, плоскодонных — до 0,06 и концентрических — до 0,06.

Соответственно этому изменяются и другие геометрические параметры кратеров. Например, для свежих об-

разований с возвышающимся валом, ширина которого достигает от 0,3 до 0,16 диаметра кратера, внутренние склоны в верхней части чаши составляют 35—40°, а внешний склон вала в верхней его части может доходить до 15—20°. При начавшемся разрушении формы кратера, первым признаком которого является исчезновение четко выраженного вала, внутренние склоны становятся более пологими и характеризуются углами 20—25°. Для сильно разрушенных форм этот параметр составляет всего лишь 10—15° [77].

Анализ частоты встречаемости кратеров различной степени сохранности показывает, что около 80% объектов относится к наиболее древним, имеющим сглаженные, сильно разрушенные формы. Кратеры зрелые, с разрушающимися первичными формами, составляют около 15% от общего числа. Наиболее молодые кратеры, сохранившие четкие очертания, встречаются довольно редко — на их долю приходится лишь 3—4% от общего числа исследованных образований [76].

Важной особенностью строения кратеров является сопутствующее им поле выбросов, в котором сосредоточены камни различных размеров и форм. Наиболее интенсивные зоны выбросов окружают молодые, свежие кратеры. В этом случае камни располагаются как на внутренних склонах кратера, так и на его бровке и в ближайших окрестностях. Для кратеров диаметром 100 м и более характерны размеры камней в зоне выбросов, достигающие нескольких метров, а в отдельных случаях 15—16 м в поперечнике. Как правило, зона выбросов вокруг кратера имеет несимметричную, подковообразную форму, причем наибольшая плотность камней приходится на зону, удаленную от кромки кратера на расстояние от 0,5 до 1,0 его диаметра. Очевидно, что степень сохранности самого кратера влияет и на характер поля выбросов, связанного с ним. Вокруг старых, деградировавших образований, как и внутри них, следы выбросов сохраняются в редких случаях, а остальные камни почти не встречаются.

Общее распределение числа кратеров по размерам описывается зависимостью плотности от диаметра, которая имеет вид степенной функции:

$$N = aD^k,$$



где  $N$  — плотность кратеров, выражаемая числом объектов, по диаметру больших некоторой величины  $D$  на постоянную меру площади,  $a$  и  $k$  — постоянные параметры для отдельных областей Луны и определенных интервалов  $D$ , причем  $k < 0$  во всех случаях.

Примерная плотность кратеров с размерами более 1 км на видимом полушарии Луны описывается выражениями [78]:  $\lg N = 11,05 - 2,12 \lg D$  — для материковых областей и  $\lg N = 8,12 - 1,71 \lg D$  — для морских областей. В приведенных формулах  $N$  — число кратеров на площади  $10^6$  км<sup>2</sup>, по размеру больших диаметра  $D$ , выраженного в метрах.

Подсчеты кратеров размером от 25 км до 200 км на всей поверхности лунного шара [79] также отражают различия в плотности кратеров по морским и материковым областям. Количество кратеров в южном полушарии в 1,5 раза больше, чем в северном, и во столько же раз больше на обратном полушарии, чем на видимом. Эти соотношения повторяют особенности распределения морей на лунной поверхности.

Среднюю плотность кратеров для всей поверхности Луны, полученную в [79], можно представить формулой

$$\lg N = 12,08 - 2,28 \lg D,$$

в которой  $N$  дано в пересчете на  $10^6$  км<sup>2</sup>, а  $D$  выражается в метрах. Изменение величин параметров  $a$  и  $k$  объясняется, вероятно, выбранным интервалом диаметров кратеров. Это предположение подтверждается результатами, полученными Флоренским и др. в [76]. Распределение кратеров по размерам для участков в Океане Бурь и Заливе Центральном показывает, что существует некоторое критическое значение  $D$ , при переходе через которое в степенном законе распределения изменяется параметр  $k$ . Величина  $D_{кр}$  для различных участков колеблется от нескольких десятков метров до первых сотен метров. Для указанных морских областей при  $D < D_{кр}$  средняя плотность распределения совпадала с подсчетами, проведенными в различных частях Луны по снимкам «Лунар Орбитер» [80]. Параметры формулы распределения в логарифмическом виде в обоих случаях составляли:

$$A = \lg a = 10,9, \quad k = -2,0.$$

Распределение кратеров с диаметром  $D > D_{кр}$  описывается функцией, в которой  $k = -3$ . Величина  $a$  может меняться от одного района к другому при том же значении  $k$ .

Однако можно привести примеры, когда для одних и тех же размеров кратеров в различных районах морской поверхности  $a$  остается почти постоянным, в то время как  $k$  заметно изменяется. В юго-восточной части Моря Спокойствия на площади около 342 км<sup>2</sup> (19 км × 18 км) подсчеты кратеров выявили два вида распределения по размерам [81]: типичный для морской поверхности и с аномально низкой частотой кратеров. В первом случае вид распределения можно представить логарифмической зависимостью с параметрами  $A = 11,36$ ,  $k = -2,68$ . Во втором случае:  $A = 11,80$ ,  $k = -3,31$ . Размеры кратеров в изученной популяции заключены в интервале от 10 до 1000 м.

Таким образом, при общем отрицательно-степенном законе распределения числа кратеров по размерам, конкретные значения параметров  $a$  и  $k$  определяются рядом условий — типом ландшафта, возрастом поверхности, выбранным интервалом диаметров кратеров и т. п.

## 7. Кратеры с лучевыми системами

Лучевые системы, окружающие некоторые яркие кратеры, видимы наиболее отчетливо при полнолунных условиях освещения. Яркость этих образований резко возрастает с увеличением высоты Солнца над горизонтом места и столь же резко падает при косом освещении ландшафта. Поэтому вблизи терминатора детали лучевых систем не просматриваются. Насколько можно судить по результатам исследования лучевых образований при большом разрешении деталей на местности, эти участки отличаются повышенной плотностью вторичных кратеров и раздробленных фрагментов, а также, вероятно, тонким слоем мелкодисперсного вещества выбросов из кратера — центра системы. Вблизи вала лучевого кратера венцом располагаются радиально-струйчатые элементы рельефа, переходящие затем в радиально направленные лучи. Для крупных кратеров (несколько десятков километров в диаметре) область подобного рельефа соответствует тем-

ному ореолу. Вероятно, это связано с экранированием выбросов внешним валом кратера. У кратеров меньшего размера, не имеющих заметно возвышающегося внешнего вала, светлые элементы лучевой системы или сплошной светлый ореол начинаются непосредственно от кромки кратера.

Как правило, лучи состоят из отдельных ярких элементов, ориентированных в одном направлении, при общем падении яркости с удалением от кратера. Лучевые системы, проходящие по морской поверхности, имеют более низкую общую яркость, чем лучевые системы на материке. Иногда можно отметить и различие в строении морских и материковых лучевых систем. Примером может служить сопоставление двух гигантских лучевых систем, доминирующих на видимом полушарии Луны — кратеров Коперник и Тихо. В первом случае форма лучевой системы имеет вид светлого ореола с паутинным переплетением отдельных лучевых элементов. При общем радиальном направлении ярких элементов система осложнена многочисленными разрывами, что создает впечатление искривления отдельных лучей.

В случае Тихо лучевые элементы очерчены более четко, их направленность сохраняется на очень большом расстоянии от кратера. В отличие от ажурности лучей Коперника, система Тихо имеет небольшое число широких, резко выделяющихся радиальным направлением лучей.

Даже не прибегая к измерениям, можно заметить меньшую общую яркость системы лучей Коперника по сравнению с яркостью лучей Тихо.

Светлыми ореолами и лучами окружены многие лунные кратеры, как правило, небольшие по размерам. Вместе с тем на Луне существуют лучевые системы, которые по размерам можно отнести к планетарным образованиям. На рис. 29 представлена схема расположения наиболее крупных лучевых систем Луны, список которых с координатами и размерами центральных кратеров приведен в таблице 14. Можно полагать, что эти данные не являются полными в отношении обратной стороны Луны, поскольку эта часть лунного шара недостаточно покрыта съемками при полнолунных условиях освещения, позволяющих выявить лучевые системы.

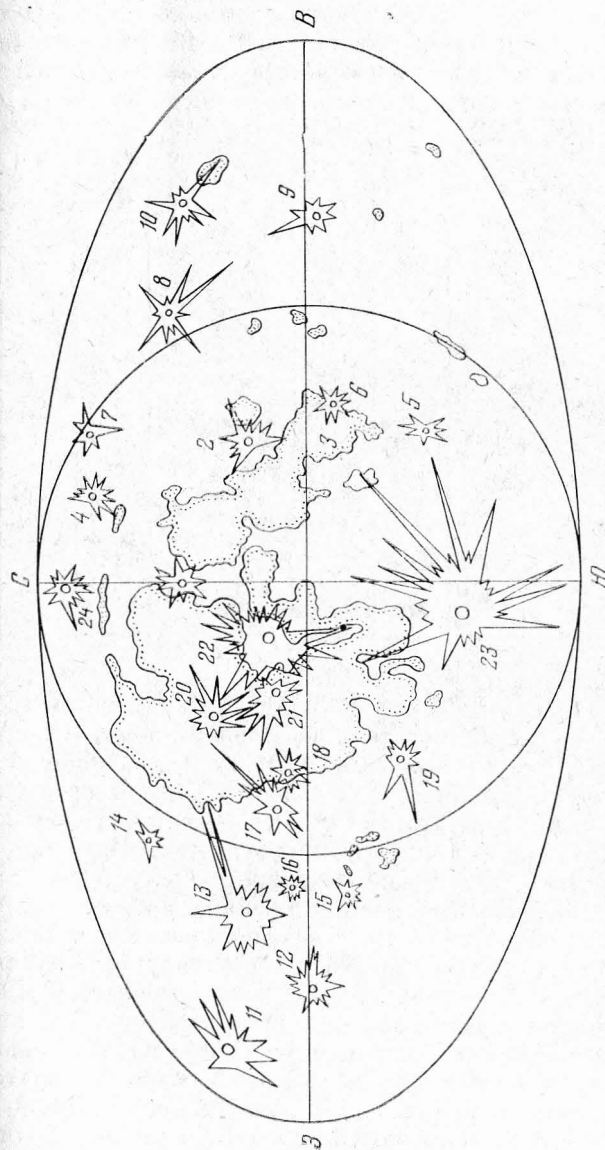


Рис. 29. Схема расположения планетарных лучевых систем на поверхности Луны. Обозначения соответствуют списку, приводимому в таблице 14.



Наиболее протяженные лучи имеет кратер Тихо. В северном и северо-восточном направлениях отдельные лучи прослеживаются на расстоянии 1200—1500 км от центра кратера. На севере это соответствует Заливу Центральному, на северо-востоке луч от Тихо достигает Моря Нек-

Таблица 14

№ п/п	Название кратера	Координаты		Диаметр, км	№ п/п	Название кратера	Координаты		Диаметр, км
		долгота	широта				долгота	широта	
1	Аристил	1°В	34°С	55	13	Ом	114°З	18°С	70
2	Прокл	47°В	16°С	30	14	—	108°З	44°С	30
3	Мессье	48°В	2°Ю	12	15	—	108°З	41°Ю	20
4	Фалес	50°В	62°С	35	16	Ленц	102°З	3°С	20
5	Стевин А	52°В	32°Ю	10	17	Ольберс А	78°З	8°С	45
6	Лангрен	61°В	9°Ю	140	18	Кавальери	67°З	5°С	65
7	—	83°В	63°С	20	19	Бюрги А	63°53	24°С	15
8	Джордано Бруно	103°В	36°С	25	20	Аристарх	48°З	24°Ю	40
9	—	122°В	3°Ю	25	21	Кеплер	38°З	8°С	30
10	—	140°В	33°С	15	22	Коперник	20°З	10°С	90
11	Джексон	163°З	22°С	85	23	Тихо	11°З	43°Ю	90
12	—	135°З	2°Ю	20	24	Анаксагор	10°З	73°С	55

тара. В западном направлении лучевые элементы протягиваются почти до окрестностей Моря Южного. Вероятно, подобную протяженность имеют и лучи, уходящие в направлении южной полярной области. Однако проследить их дальше из-за отсутствия съемок и особых условий освещения полярных областей не удастся. По диаметру Тихо принадлежит к наиболее крупным лучевым кратерам. Но значительные по протяженности лучевые системы имеют также кратеры и меньших размеров. В качестве примера можно назвать одну из крупных лучевых систем обратной стороны, принадлежащую кратеру Джордано Бруно. Структурным отличием этой системы является большое число отдельных лучей при незначительном по размерам сплошном светлом ореоле вблизи кратера. В юго-западном направлении лучи кратера Джордано Бруно имеют протяженность около 1200 км, переходя на видимое полушарие и частично перекрывая Море Кризисов

и его окрестности. В южном направлении лучи этой системы прослеживаются до окрестностей Моря Смита.

Система лучей кратера Джордано Бруно вместе с лучевой системой небольшого безымянного кратера (9) до-

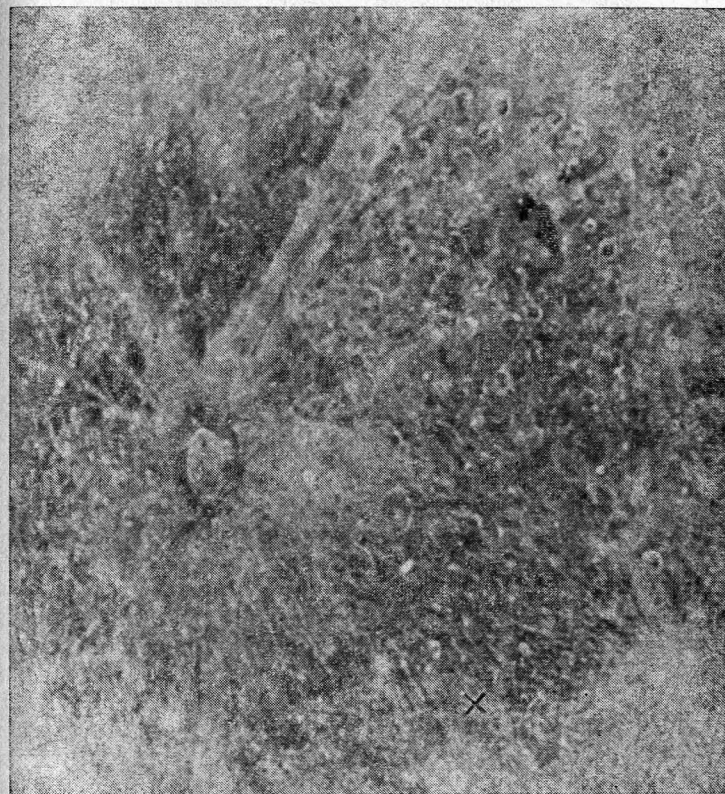


Рис. 30. Снимок центральной части системы светлых лучей кратера Ом.

минирует на обратной стороне в восточном полушарии, что было обнаружено еще на первых снимках обратной стороны Луны.

В материковой части западного полушария одним из крупнейших лучевых кратеров является Ом. На рис. 30



показана область центральной части лучевой системы кратера Ом. Юго-восточнее располагается лучевая система кратера Ленц, диаметр которого в 3,5 раза меньше. Сопоставление строения двух этих систем иллюстрирует указанную выше особенность, отличающую крупные лучевые кратеры — темный нимб вокруг внешнего вала. Подобный нимб появляется у лучевых кратеров при размерах, больших 30—40 км.

Отдельные лучи кратера Ом имеют также довольно значительную протяженность. Луч, уходящий в северо-западном направлении, прослеживается на расстоянии около 1300 км от кратера. Весьма необычен двойной, как бы расширяющийся с удалением от кратера, северо-восточный луч. Наиболее отчетливо просматривается северная кромка луча, проходящая через северный вал кратера Рессел, южнее кратера Лихтенберг и далее по Океану Бурь. Следы этого образования остаются заметными еще на удалении 1400—1500 км от центра лучевой системы. Южная граница гигантского луча теряется в пересекающихся с ним лучевых элементах кратеров Ольберс А и Аристарх.

Система кратера Ом обладает еще одной, типичной для крупных лучевых кратеров, особенностью — сектором отсутствия лучей. Практически все крупные лучевые кратеры имеют какие-то преимущественные направления распространения лучей, в отличие от малых кратеров, лучи которых расходятся равномерно во всех направлениях. У некоторых лучевых кратеров сектор отсутствия лучей выделяется особенно явно, что создает неповторимую индивидуальность очертаний лучевой системы. На видимом полушарии Луны таким выделяющимся образованием является кратер Прокл (рис. 31). Протяженность лучей Прокла сравнительно небольшая — около 200—300 км в северо-западном, южном и юго-восточном направлениях, и около 400 км в западном направлении, проходящих через Море Кризисов. Детальные визуальные наблюдения с окололунной орбиты и крупномасштабная съемка района [26] показали, что причиной неравномерности распространения лучей в данном случае может служить структура района, в котором образовался кратер. С юго-востока на северо-запад через кратер Прокл проходит сброс. Внутри кратера к его юго-запад-

ному валу примыкает стенка сброса, что отразилось и на форме самого кратера. Юго-западный вал Прокла, обращенный к сектору отсутствия лучей, несколько выступает за пределы круга, описывающего границы кратера.

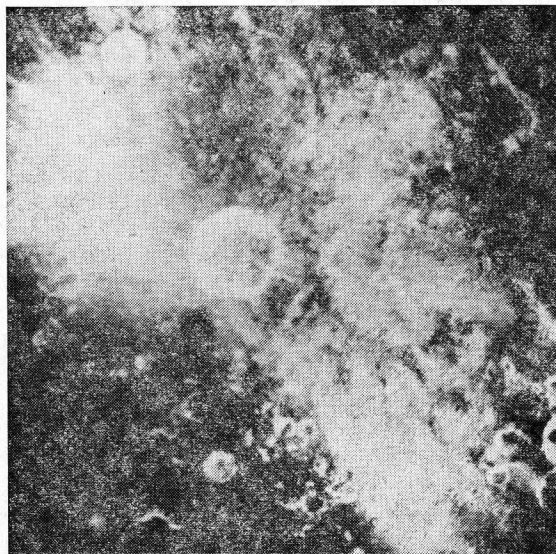


Рис. 31. Снимок кратера Прокл и части системы светлых лучей, окружающей этот кратер. Снимок получен с окололунной орбиты [26].

Не исключено, что стенка сброса, существовавшего до образования кратера, определила характер разлета выбросов в момент удара.

Другими общими причинами возникновения сектора отсутствия лучей в лучевых системах могут быть [26]:

1) падение кратерообразующего тела под очень низким углом; со стороны направления падения остается зона, свободная от выбросов, а преимущественные направления разлета фрагментов располагаются на продолжении траектории движения кратерообразующего тела;

2) топографическое затенение; возвышающиеся формы рельефа могут препятствовать разлету выбросов в каком-то определенном секторе;

3) различие в подстилающих породах; возможен случай, когда в районе образования кратера могут быть породы, по-разному реагирующие на ударное воздействие выбросов, что впоследствии проявляется в различной яркости отдельных лучей.

Уникальной схемой распространения лучей является система Мессье. От пары кратеров Мессье и Мессье А, приблизительно одинаковых размеров, отходит вдоль направления, их соединяющего, прямой двойной луч, простирающийся примерно на 200 км по Моря Изобилия. Перпендикулярно к направлению этого луча от кратера Мессье распространяются симметрично к северу и югу две широкие светлые полосы, имеющие протяженность около 100 км каждая. Эти полосы не так ярки и заметны, как двойной луч Мессье, но просматриваются уверенно, особенно на крупномасштабных снимках.

Еще более интересным фактом, пожалуй, является то, что схема Мессье имеет аналог. В соседнем Море Нектара точно такая же форма распространения лучей окружает кратер Росс. Одиночный яркий прямой луч этого кратера прослеживается на расстоянии 100 км по Моря Нектара. Симметричные относительно этого направления и перпендикулярные к нему выбросы имеют протяженность около 50 км каждый и несколько расширяются с удалением от кратера.

Схему Мессье, по-видимому, трудно объяснить какой-нибудь из перечисленных выше причин неравномерного разлета выбросов по азимуту. Но в то же время существование по крайней мере двух подобных лучевых систем свидетельствует в пользу определенного процесса, а не просто случайно возникшей формы.

Лучевые кратеры — центры современных лучевых систем, без сомнения, являются наиболее поздними образованиями. Но многочисленность светлых ореолов и лучевых выбросов вокруг кратеров небольшого размера, диаметры которых составляют километры или сотни метров, может говорить о том, что эта особенность присуща всем ударным кратерам в начальный период их эволюции. С течением времени лучевые системы могут, вероятно,

тускнеть и пропадать совсем. Подтверждением служит слабо выделяющиеся лучевые системы у таких кратеров, как Лангрэн (см. таблицу 14 и рис. 29) или Тарунций, расположенный на стыке Моря Спокойствия и Моря Изобилия. Вероятно, не случайно Лангрэн имеет самый большой размер среди лучевых кратеров. Согласно приведенному выше закону зависимости числа кратеров от их размера появление большого кратера — более редкое явление и поэтому он с большей вероятностью может окзаться старым образованием. Лучи Лангрэна прослеживаются на сравнительно небольшом расстоянии от него, всего лишь в 1,5—2 раза превышающем диаметр кратера, и только на морской поверхности. На фоне более светлого материка к востоку от Лангрэна лучи уже не различаются. Следовательно, можно сделать вывод, что лучевые системы являются временным признаком определенного кратера и по мере его старения лучи теряют свою яркость и исчезают как образование.

## 8. Лунный реголит

Поверхностный слой Луны представляет собой рыхлый покров раздробленных пород — реголит, состоящий из фрагментов различной крупности, включая тонкую пылевидную фракцию.

Все формы лунного рельефа перекрыты слоем реголита. Редким исключением могут быть крупные склоны отдельных образований, на которых просматриваются выходы коренных скальных пород. Примерами могут служить участки обрывистых склонов Борозды Хэдли и соседних с ней возвышенностей, а также Борозды Прямой в кратере Лемонье.

В зависимости от строения местности мощность реголита меняется. Предполагают, что в понижениях и подсклоновых участках слой реголита особенно значителен и может достигать десятков метров. На вершинных поверхностях и склонах мощность реголита, вероятно, уменьшается до десятков сантиметров. В среднем обломочный слой тоньше в морских областях и более значителен в материковых [82].

Рисунок 32 дает представление о типичном внешнем виде реголита морской поверхности.



Формируется реголит в основном под влиянием кратерообразующих ударных процессов и микрометеоритной эрозии. Дополнительным фактором перемещения и перемешивания материала служат склоновые процессы. Базилевским сделаны оценки интенсивности перемешивания реголита на определенную глубину в результате

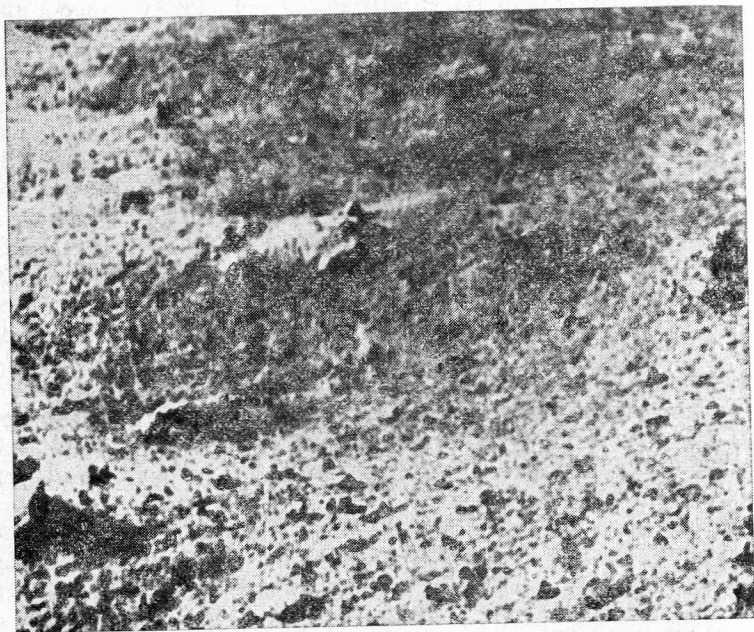


Рис. 32. Фрагмент панорамы, переданной самоходным аппаратом «Луноход-2». Типичный внешний вид реголита морской поверхности.

переработки поверхности кратерами различного размера [83]. График на рис. 33 показывает зависимость между числом поколений кратеров различных размеров и глубиной переработки поверхностного вещества. Данные для построения графика получены в районах, исследованных с помощью автоматических аппаратов «Луноход-1» и «Луна-16».

Принцип подобной оценки заключается в определении общего числа кратеров, возникших в данном районе, учитывая и те, что в процессе эволюции поверхности были уничтожены последующими ударами и засыпаны выбросами из более поздних кратеров. Обнаружено, что

при длительной переработке значительного слоя обломочных фрагментов небольшими метеоритами, общее число кратеров и их распределение по размерам остаются постоянными. Поскольку в этом случае не возникают глубокие кратеры, достигающие монолитного подстилающего слоя, процесс возникновения новых кратеров уравнивается уничтожением старых в результате засыпки. Исходя из типичного соотношения глубины и диаметра кратеров можно заключить, что минимальный размер образования, которое продолжает сохранять

ся в обломочном слое, должен составлять пятикратную толщину реголита. В районе исследований «Луноход-1» отмечено, что наиболее обильные каменные выбросы появляются при увеличении диаметра кратеров до 20—30 м [84]. Этому соответствует средняя мощность реголита 4—6 м. Оценка минимальной мощности реголита для этого района получена из распределения крупных кратеров. Подсчеты показали, что число кратеров  $N$ , диаметр которых больше величины  $D$  (в метрах) на площади нормирования  $10^6 \text{ км}^2$  составляет

$$N = 10^{12,9} D^{-3}.$$

Экстраполяция этого соотношения в область равновесного распределения дает оценку общего числа кратеров, возникших за всю историю изучаемого района.

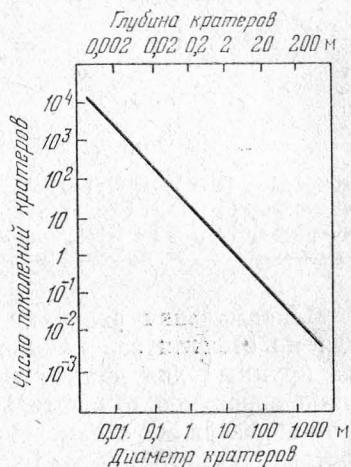


Рис. 33. График зависимости числа поколений кратеров от степени и глубины переработки поверхностного материала ударными процессами.



В предположении, что обломочный слой глубиной  $H$  метров образуется в результате двухкратного перекрытия поверхности кратерами диаметром больше, чем  $5H$ , был сделан вывод, что минимальная мощность реголита составляет 2—3 м.

Т а б л и ц а 15

АЛС	Слой реголита, метры		
	мини-мальный	в среднем	максимальный
«Сервейор-1» (Океан Бурь)	1,6	3,1	14,0
«Сервейор-5» (Море Спокойствия)	1—2	3,2	47,0
«Сервейор-6» (Залив Центральный)	2,7	4,6	25,0

Максимальная величина обломочного слоя оценивается по степени заполнения центральных частей наиболее крупных для данной местности кратеров. Сопоставление вероятной относительной глубины кратера в момент образования с измеренной глубиной эродированного кратера диаметром около 500 м привело к выводу, что в его центральной части слой реголита может достигать 50 м.

Аналогичные исследования, проведенные для района работы «Лунохода-2» в кратере Лемонье, позволили оценить среднюю мощность реголита, равную 2—3 м при крайних значениях от 1 м до 10 м [70].

Результаты оценки мощности реголита для мест посадки автоматических станций серии «Сервейор» (морские районы) сведены в таблицу 15 (данные взяты из [85]).

Аномально незначительной оказалась мощность реголита в месте посадки «Сервейор-7» (материковый район вблизи кратера Тихо). В среднем толщина обломочного слоя составляет там 0,09 м, при минимальной величине 0,05 м и максимальной 0,7 м.

Крупнообломочный материал — камни, входящие в состав реголита, распределены по поверхности неравномерно. Выше, при описании кратеров, упоминалось, что камни являются одним из признаков зоны выбросов вокруг ударных кратеров. Крупнообломочный материал

занимает в среднем от 4 до 18% поверхности. Результаты статистических подсчетов показывают, что распределение камней по размерам соответствует функции [84]:

$$n = AD^B,$$

где  $n$  — число камней, поперечником более  $D$ ,  $A > 0$  и  $B < 0$  — постоянные, значения которых различны для отдельных участков местности. Так, при нормировании на площадь в  $1 \text{ м}^2$  число камней на валу и внутренних

Т а б л и ц а 16

Размер фрагментов, см	Выбросы из свежих кратеров	Выбросы около эродированных кратеров	Межкратерная поверхность
1—2	2	2,7	5,5
2—4	2	1,8	1,7
4—8	2	1,3	0,9
8—16	2	0,9	0,25
16—32	2	0,6	0,08

склонах свежих ударных кратеров соответствует значениям  $A = 7,0 \times 10^3$ ,  $B = -1,8$  (при измерении  $D$  в см). Менее сохранившиеся кратеры имеют не столь каменистое окружение, а межкратерная поверхность характеризуется функцией распределения, при  $A = 2,0 \times 10^4$ ,  $B = -3,5$ .

Площадь поверхности, занимаемая обломками поперечником от  $D_1$  до  $D_2$ , определяется величиной [84]:

$$S = 0,9AB \int_{D_1}^{D_2} D^{B+1} dD.$$

Поверхностная плотность распределения камней может служить оценкой доли крупнообломочного материала в реголите до глубины 1—2 м. Для района, исследованного «Луноходом-1», распространенность камней (по весовым %) в реголите описывается величинами, приведенными в таблице 16.

Характер изменения величин в таблице 16 показывает, что по мере старения реголита возрастает доля мелких фрагментов и резко падает количество крупных.

Поскольку процесс измельчения направлен с поверхности в глубину, по-видимому, существует также изменение распределения обломков по вертикали. С глубиной возрастает грубозернистость реголита.

Мелкозернистая (менее 1 мм) фракция реголита состоит из частиц со средней крупностью 60—70 мкм. Выделяют несколько типов частиц. Одни из них представляют собой фрагменты первичных пород и мономинеральные зерна. Содержание этих частиц зависит от зрелости реголита, т. е. степени его переработки. Например, в образце зрелого морского реголита, доставленного АЛС «Луна-16», содержится около 20% фрагментов первичных пород среди обломков крупностью более 0,5 мм. Образец, доставленный АЛС «Луна-20», имеет меньший экспозиционный возраст и содержание первичных пород в мелкозернистой фракции возрастает до 50% [82].

Другой тип частиц носит название брекчий, сложных образований, формирование которых происходило при участии процессов плавления на контактах отдельных зерен. В составе обломков брекчий в спекшемся состоянии встречаются частицы кристаллических пород, мономинеральные частицы и фрагменты стекол, в том числе стеклянные шарики. Поскольку брекчии являются продуктом вторичной переработки лунного мелкодисперсного вещества, их содержание в реголите растет с увеличением экспозиционного возраста. Для фракции частиц крупнее 0,5 мм в образцах, доставленных «Луной-16» и «Луной-20», на долю брекчий падает около 40% и 20% частиц соответственно.

Третий тип частиц реголита назван агглютинатами — слипшимися в неоднородную массу осколками минералов, пород и стекол. Полагают, что агглютинаты возникают в результате просачивания в пористом грунте расплавленного стекла. Эти сложные частицы, так же как и брекчии, продукт вторичной переработки. Отличие агглютинатов от брекчий состоит в том, что связывающее их стекло проникает извне, тогда как брекчии образуются непосредственно на месте падения метеорита в момент ударно-взрывного процесса. Содержание агглютинатов примерно такое же, как и брекчий, и возрастает по мере зрелости реголита.

Особый вид частиц составляют стеклянные фрагменты — сферические, цилиндрические и гантелеобразные. Благодаря их присутствию лунный грунт при близком рассмотрении приобретает искрящийся вид. Стеклянные шарики и подобные им частицы образуются в результате

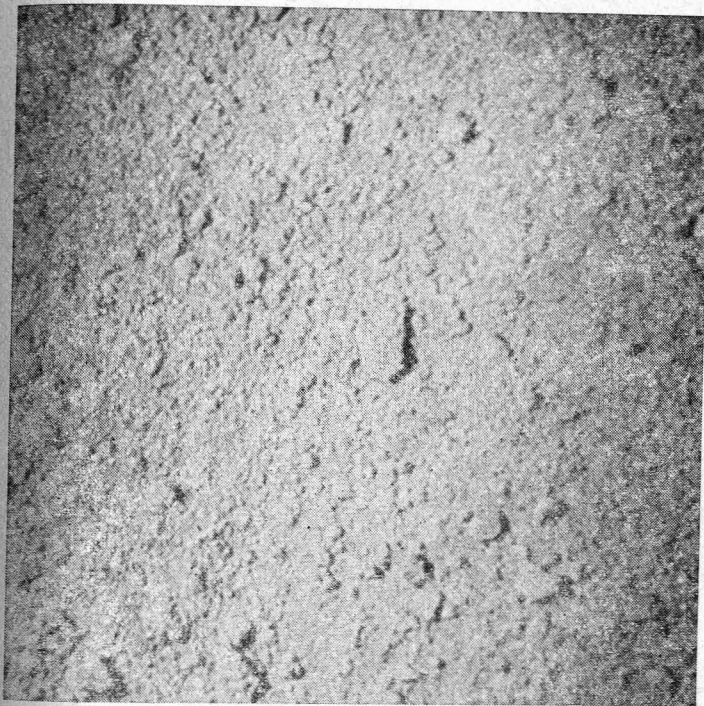


Рис. 34. Крупномасштабный снимок структуры микрорельефа лунной поверхности. Снят участок размером 72×83 мм.

застывания брызг и мелких капель стекловидного расплава, появление которого сопутствует ударно-взрывному процессу.

Однако общее содержание стеклянных частиц в реголите незначительно — по весу они составляют всего лишь 0,01% мелкодисперсной фракции исследованных образцов. Очевидно, что доля стеклянных частиц также

зависит от зрелости реголита, как содержание брекчий и агглютинатов.

На поверхности реголита мелкозернистая часть образует отдельные комки, которые по внешнему виду бывают очень похожими на кристаллические обломки. Согласно глазомерным оценкам, комья составляют около 10% всех выступающих над общей поверхностью деталей микрорельефа (рис. 34).

В общем случае мелкозернистая часть реголита находится в рыхлом состоянии. Пористость поверхностного слоя составляет от 32 до 58% в зависимости от особенностей местности. С глубиной плотность реголита возрастает. Если максимально уплотненный образец (1,8—2,0 г/см<sup>3</sup>) реголита принять за 100% плотности, то на поверхности слоя в естественном залегании лунный грунт будет иметь плотность 48%, на глубине около 10 см плотность составит уже 82%, а затем возрастет до 93% на глубине 30 см и до 99% на глубине 60 см. Плотность каменных обломков колеблется от 2,4 до 3,4 г/см<sup>3</sup>, в зависимости от структуры фрагментов и своим верхним значением приближается, вероятно, к плотности подстилающих скальных пород [85].

## ЛУННАЯ КАРТОГРАФИЯ

### 1. Системы селенографических координат

Положение точек лунной поверхности в прямоугольной системе координат определяется величинами  $\zeta(x)$ ,  $\xi(y)$ ,  $\eta(z)$ . Центр прямоугольной системы может совпадать либо с центром фигуры, либо с центром масс Луны. Ось  $\eta$  направлена вдоль оси вращения Луны. Оси  $\zeta$  и  $\xi$  лежат в плоскости лунного экватора; при этом ось  $\zeta$  направлена к Земле (в центр видимого полушария), а ось  $\xi$  — к востоку (в сторону Моря Кризисов). В отличие от традиционной «астрономической» ориентации направлений сторон света, в современной лунной картографии север располагается вверху, юг — внизу, восток — справа и запад — слева, т. е. так же, как на картах Земли.

Положение плоскости лунного экватора и первого радиуса, как иногда называют ось, направленную в центр видимого полушария, определяется системой углов  $l$ ,  $b$ ,  $P$ , именуемых физическими координатами Луны. Величины  $l$  и  $b$  представляют собой значения оптической либрации по долготе и широте соответственно, а  $P$  — позиционный угол при центре видимого диска Луны, отсчитываемый на небесной сфере от северного направления круга склонений к востоку. На селеноцентрической сфере (рис. 35) центр видимого диска обозначен  $O_{\zeta}$ ,  $LO_0$  — первый радиус (ось  $\zeta$ ),  $O_0$  — центр видимого полушария при нулевых значениях  $l$  и  $b$ ,  $L$  — центр Луны,  $QQ$  — лунный экватор,  $P_{\zeta}$  — северный полюс Луны,  $EE$  — эклиптика,  $P_E$  — северный полюс эклиптики,  $NN$  — небесный экватор (в земной экваториальной системе астрономических координат),  $P_N$  — северный полюс мира,  $HH$  — орбита Луны,  $\Upsilon$  — точка весеннего равноденствия,  $\Omega$  — восходящий узел лунного экватора на эклиптике, который совпадает с нисходящим узлом лунной орбиты,  $I$  — угол наклона лунного экватора к эклиптике,  $j$  — угол наклона



лунного экватора к небесному экватору,  $i$  — угол наклона лунной орбиты к эклиптике,  $\varepsilon$  — угол наклона небесного экватора к эклиптике.

Решая соответствующие сферические треугольники, можно получить систему уравнений (3.1), которая позволяет определить величины  $l$  и  $b$ :

$$\left. \begin{aligned} \sin b &= \cos \delta_{\zeta} \sin j \sin (\alpha_{\zeta} - \Omega') - \sin \delta_{\zeta} \cos j, \\ \cos b \cos (l + l_{\zeta} - \Omega + \Delta) &= -\cos \delta_{\zeta} \cos (\alpha_{\zeta} - \Omega'), \\ \cos b \sin (l + l_{\zeta} - \Omega + \Delta) &= -\sin \delta_{\zeta} \sin j - \\ &\quad -\cos \delta_{\zeta} \cos j \sin (\alpha_{\zeta} - \Omega'). \end{aligned} \right\} (3.1)$$

В (3.1) долгота восходящего узла лунного экватора на небесном экваторе (точки  $M$ ) обозначена  $\Omega'$ , а рас-

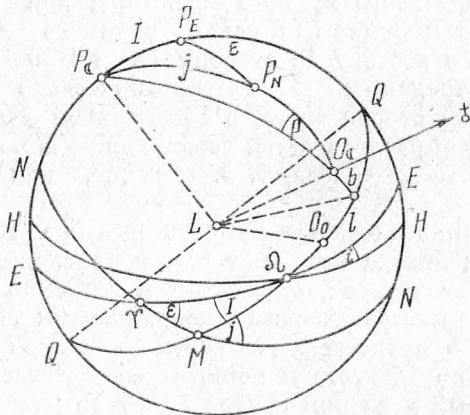


Рис. 35. Селеноцентрическая сфера.

стояние точки  $M$  от узла  $\Omega$  обозначено  $\Delta$ . Координаты Луны в земной экваториальной системе астрономических координат, входящие в уравнения (3.1), имеют обозначения:  $\alpha_{\zeta}$  — прямое восхождение,  $\delta_{\zeta}$  — склонение.

В свою очередь элементы, определяющие положение лунного экватора относительно земного, можно получить из формул (3.2):

$$\left. \begin{aligned} \cos j &= \cos I \cos \varepsilon + \sin I \sin \varepsilon \sin \Omega, \\ \sin \Omega' &= -\sin I \operatorname{cosec} j \sin \Omega, \\ \sin \Delta &= -\sin \varepsilon \operatorname{cosec} j \sin \Omega. \end{aligned} \right\} (3.2)$$

Значения  $l$  и  $b$  также находятся по известным эклиптическим координатам Луны:

$$\left. \begin{aligned} \sin b &= -\cos \beta_{\zeta} \sin I \sin (\lambda_{\zeta} - \Omega) - \sin \beta_{\zeta} \cos I, \\ \cos b \cos (l + l_{\zeta} - \Omega) &= \cos \beta_{\zeta} \cos (\lambda_{\zeta} - \Omega), \\ \cos b \sin (l + l_{\zeta} - \Omega) &= \cos \beta_{\zeta} \cos I \sin (\lambda_{\zeta} - \Omega) - \\ &\quad - \sin \beta_{\zeta} \sin I. \end{aligned} \right\} (3.3)$$

В формулах (3.3)  $\lambda_{\zeta}$  — долгота Луны в геоцентрической эклиптической системе координат,  $\beta_{\zeta}$  — широта Луны в той же системе.

Если воспользоваться значением угла наклона лунной орбиты к эклиптике ( $i$ ), то для  $\sin \beta_{\zeta}$  и  $\cos \beta_{\zeta}$  можно получить следующие выражения [86]:

$$\left. \begin{aligned} \sin \beta_{\zeta} &= \sin \{ \operatorname{tg}^{-1} [ \operatorname{tg} (\lambda_{\zeta} - \Omega) \sec i ] \} \sin i, \\ \cos \beta_{\zeta} &= \cos \{ \operatorname{tg}^{-1} [ \operatorname{tg} (\lambda_{\zeta} - \Omega) \sec i ] \} \sec (\lambda_{\zeta} - \Omega). \end{aligned} \right\} (3.4)$$

Подставляя (3.4) в (3.3), получим выражения для непосредственного вычисления  $l$  и  $b$ :

$$\left. \begin{aligned} l &= \operatorname{tg}^{-1} [ \operatorname{tg} (\lambda_{\zeta} - \Omega) \cos (I + i) \sec i ] - (l_{\zeta} - \Omega), \\ b &= \operatorname{tg}^{-1} [ \sin (l_{\zeta} - \Omega + l) \operatorname{tg} (I + i) ]. \end{aligned} \right\} (3.5)$$

Позиционный угол  $P$  определяется через предварительно вычисленные величины  $l$  и  $b$ :

$$\left. \begin{aligned} \sin P \cos b &= -\sin i \cos (\alpha_{\zeta} - \Omega'), \\ \sin P \cos \delta_{\zeta} &= \sin i \cos (l + \Delta + l_{\zeta} - \Omega). \end{aligned} \right\} (3.6)$$

Таким образом, с помощью формул (3.1), (3.3) или (3.5) можно найти значения оптической либрации по долготе и широте, а из формул (3.6) — значение позиционного угла, и определить на момент наблюдений ориентацию в пространстве осей прямоугольной системы координат, жестко закрепленной в теле Луны. Астрономические постоянные, использованные в указанных выражениях, имеют следующие значения (в системе МАС 1976 г.):

$$\begin{aligned} I &= 1^{\circ} 32' 32'', 7, \\ \varepsilon &= 23^{\circ} 26' 21'', 448. \end{aligned}$$

Величина угла наклона лунной орбиты к эклиптике,

используемая в теории Брауна движения Луны, составляет  $i = 5^{\circ}08'43''$ , 4.

На практике для целей лунной картографии достаточно точность, с которой значения  $l$ ,  $b$  и  $P$  даются в таблицах Астрономических ежегодников.

В сферической системе селенографических координат долготы ( $\lambda$ ) отсчитываются от нулевого меридиана, который лежит в плоскости  $P \subset LO_0$  (см. рис. 35). Долгота определяется двугранным углом между плоскостью нулевого меридиана и плоскостью меридиана  $P \subset LK$  точки поверхности  $K$ , положение которой необходимо зафиксировать. Положительное направление отсчета долгот идет к востоку от нулевого меридиана. В лунной картографии используются два варианта опифровки меридианов: от  $0^{\circ}$  до  $360^{\circ}$  или от  $0^{\circ}$  до  $+180^{\circ}$  (к востоку) и от  $0^{\circ}$  до  $-180^{\circ}$  (к западу). Селенографические широты ( $\beta$ ) определяются длиной дуги вдоль меридиана фиксируемой точки поверхности и отсчитываются от экватора к северу (положительные) и к югу (отрицательные). Поскольку фигура Луны с достаточной для целей картографии точностью (см. гл. I) описывается сферой, значения широт, определяемые длиной дуги меридиана и центральным углом, равны между собой.

Прямоугольные и сферические селенографические координаты связаны выражениями (3.7):

$$\left. \begin{aligned} \zeta &= \rho \cos \lambda \cos \beta, \\ \xi &= \rho \sin \lambda \cos \beta, \\ \eta &= \rho \sin \beta, \end{aligned} \right\} \quad (3.7)$$

где  $\rho$  — селеноцентрический радиус-вектор точки лунной поверхности.

В качестве поверхности относимости для задач лунной картографии целесообразно использовать сферу радиусом  $R_{\zeta} = 1738$  км, что часто на практике и делается. Тогда, в дополнение к плановым координатам  $\lambda$  и  $\beta$ , можно использовать высоту  $H$  над поверхностью относимости, и радиус-вектор точки будет суммой величин:

$$\rho = R_{\zeta} + H.$$

На лунной поверхности система координат закреплена с помощью селенодезических сетей опорных пунктов,

координаты которых определены высокоточными измерениями.

Исходным пунктом селенодезических сетей служит небольшой (диаметром около 15 км) четкий кратер вблизи центра видимого полушария — Мёстинг А. Координаты этого кратера определялись неоднократно с использованием длительных рядов наблюдений. Например, Козел, переработав все гелиометрические наблюдения за период с 1877 по 1915 годы, получил следующие координаты Мёстинга А [86]:

$$\lambda = -5^{\circ}09'53'',$$

$$\beta = -3^{\circ}10'41''.$$

При этом точность определения положения кратера составила по долготе  $\pm 5''$ , по широте  $\pm 4''$  ( $\pm 35$ — $40$  м на поверхности Луны). Однако эти погрешности характеризуют лишь внутреннюю сходимость результатов данного ряда наблюдений. Сопоставление нескольких независимых рядов показывает, что расхождения результатов могут достигать примерно  $3'$  [5].

В каждом квадранте видимого полушария выбрано по два кратера, которые составляют опорные точки селенодезической основы «первого класса». Координаты этих кратеров определяются либо относительно точек края видимого диска, либо относительно положения кратера Мёстинг А.

Селенодезической основой лунных карт практически являются точки «второго» и «третьего» классов, координаты которых определяются относительно положения «первоклассных» опорных пунктов. В каталогах, объединяющих точки селенодезической основы, как правило, приводятся их прямоугольные координаты ( $\zeta$ ,  $\xi$ ,  $\eta$ ) или плановые координаты ( $\lambda$ ,  $\beta$ ) и абсолютные высоты ( $H$ ), отнесенные к сфере стандартного радиуса. Наиболее обширные каталоги опорных пунктов на видимом полушарии Луны содержат координаты нескольких тысяч точек. В отечественной лунной картографии наиболее часто используются каталоги Гаврилова, Кислюка [87] и Липского, Никонова, Скобелевой [48]. Оба каталога являются сводными, объединяющими различные ряды измерений отечественных и зарубежных авторов. В каталоге [87]

содержатся координаты 2580 опорных пунктов. Каталог [48] содержит координаты 2890 опорных пунктов, приведенные в единую селенодезическую систему, центр которой совмещен с центром масс Луны, а координатные оси совпадают с главными осями инерции.

Средняя точность определения прямоугольных координат в названных каталогах составляет  $\pm 1$  км по каждой из осей, а погрешность наилучших определений около  $\pm(0,2-0,4)$  км.

Построение систем опорных пунктов на обратном полушарии выполняется несколькими способами, и в большинстве из них с использованием уже существующих селенодезических сетей видимого полушария.

По снимкам, полученным с расстояний в несколько лунных радиусов автоматическими станциями серии «Зонд» и космическими кораблями «Аполлон», составлен каталог селенографических координат ( $\lambda$ ,  $\beta$ ), охватывающий большую часть территории обратного полушария и либрационные зоны Луны [88]. Каталог включает 300 опорных пунктов, координаты которых определены в единой системе селенодезических координат видимого полушария [48]. Из каталога [48] были использованы 250 хорошо отождествляемых на космических снимках опорных пунктов, по которым была ориентирована вся вновь получаемая сеть обратного полушария. В восточном секторе обратной стороны Луны и прилегающей либрационной зоне расположено 195 точек, а в западном секторе и прилегающей к нему либрационной зоне — 105 точек каталога [88]. Среднеквадратичные погрешности определения координат, вычисленные для объектов, положение которых измерено по 5 и более снимкам, составили от  $\pm 1'$  до  $\pm 10'$  селенографических долготы и широты (от  $\pm 0,5$  до  $\pm 5$  км на местности).

Плановые координаты 206 точек западного сектора обратного полушария Луны содержатся в каталоге 635 пунктов видимой и невидимой части восточного полушария, составленного Артуром по снимкам КК «Аполлон-8» [89]. Средние расхождения в значениях координат общих точек каталогов [88] и [89] характеризуются систематической составляющей  $+9',0$  по долготе и  $-11',0$  по широте, и случайными отклонениями  $\pm 9',8$  по долготе и  $\pm 7',4$  по широте.

На область восточного сектора обратной стороны Луны методами фотограмметрических построений были созданы каталоги координат опорных пунктов в прямоугольной системе, отнесенной к центру Луны, по результатам измерений снимков АМС «Зонд-6» и «Зонд-8». Каталог [90] содержит 377 точек обратной стороны и либрационной зоны. Среднеквадратичные ошибки измерения координат составляют  $\pm 3 \div 4$  км по каждой из осей. Кроме того, возможен общий сдвиг и разворот всей системы относительно стандартных осей, ориентация которых задается селенодезической сетью видимого полушария.

Каталог [91] включает 131 точку обратного полушария и либрационной зоны. В качестве ориентирующих пунктов для этой сети послужили точки каталога [87]. Среднеквадратичные погрешности определения прямоугольных координат точек, входящих в каталог, относительно опорной системы [87] составили (для обратного полушария):

$$\sigma_{\xi} = \pm 0,55 \text{ км,}$$

$$\sigma_{\eta} = \pm 1,35 \text{ км,}$$

$$\sigma_{\eta} = \pm 0,45 \text{ км.}$$

Оценка абсолютной точности каталога [91] должна учитывать также ошибки определения координат и ориентации осей опорной системы на видимом полушарии.

Попытки построить высокоточную единую систему селенодезических координат, охватывающую оба полушария Луны, предпринимаются по материалам съемок с «Аполлона-14, -16, -17» [86]. В процессе этих полетов около 20% поверхности лунного шара (полоса между параллелями  $+30^\circ$  и  $-30^\circ$ ) было покрыто орбитальными снимками, пригодными для высокоточных фотограмметрических измерений. Элементы ориентирования съемочной аппаратуры относительно небесной системы координат определялись с помощью синхронного фотографирования звезд специальной бортовой камерой. Перекрытие между соседними маршрутными снимками и между маршрутами составляло 50%—60%. Дополнительной информацией в этом комплексе служили показания бортового лазерного альтиметра, точность измерений дальностей которого составляет  $\pm 2$  м.



Полагают, что внутренняя точность селенодезической основы, построенной по этим данным, будет достигать 20—40 м в положении опорных пунктов на лунной поверхности.

## 2. Картографические проекции, применяемые в лунной картографии

Использование картографических проекций в лунной картографии имеет двоякую направленность. Проекция используется в процессе обработки исходных материалов для установления математической картографической основы телевизионного, фототелевизионного или фотографического изображения. В этом случае вид и характеристики проекции определяются параметрами данного материала.

При составлении карт общего и специального назначения проекция выбирается заранее с учетом характеристик требуемой математической основы. В этом случае выбор определяется назначением и содержанием проектируемой карты.

Ниже приводится обзор картографических проекций, которые уже применяются в практике лунной картографии. Указанным перечнем не исчерпываются все проблемы, связанные с использованием проекций при подготовке и составлении лунных карт. Но многие вопросы представляют уже более специальный интерес и должны рассматриваться особо.

Современная лунная картография наиболее часто встречается с исходным материалом, отображающим значительные территории поверхности лунного шара на одном снимке. Следовательно, каждое такое изображение содержит перспективные искажения за счет кривизны поверхности лунного шара. Поэтому особое значение при создании лунных карт имеют перспективные проекции, являющиеся математической основой глобальных снимков Луны.

Перспективные проекции относятся к азимутальным, в которых вспомогательной поверхностью для построения изображения в заданном виде служит плоскость. Точки лунной поверхности, принимаемой за шар радиусом  $R$ , в перспективных проекциях переносятся на плоскость

по законам линейной перспективы. Центр проектирования находится на диаметре лунного шара или его продолжении, перпендикулярном к картинной (вспомогательной) плоскости.

В зависимости от расстояния  $D$  между центром проектируемого шара и «точкой глаза» (центром проектирования) перспективные проекции делятся на внешние ( $R < D < \infty$ ), ортографические ( $D = \infty$ ), стереографические ( $D = R$ ) и центральные ( $D = 0$ ). В общем случае математической моделью изображения Луны, полученного из произвольной точки пространства устройством с оптической строящей системой, является внешняя перспективная косая проекция с позитивным изображением. В косой проекции центр видимого диска располагается произвольно. В частных случаях совпадение центра видимого диска с полюсом даст прямую проекцию, а его расположение на экваторе — поперечную. К позитивному изображению приводит размещение картинной плоскости между проектируемым шаром и «точкой глаза» так, что расстояние от картинной плоскости до центра проектирования составляет  $L = D - R$  (рис. 36). На картинную плоскость переносятся точки полусферы, более близкой к центру проектирования. Такое построение внешней перспективной проекции с позитивным изображением отличается от классического вида подобных проекций [92].

Расположение картинной плоскости симметрично относительно точки глаза, очевидно, не меняет геометрию проектирования, что и позволяет отождествить построение данной проекции с ходом лучей в любой оптической системе, используемой для получения фотографических снимков.

На рис. 36:  $O$  — центр проектируемой сферы,  $S$  — центр проектирования,  $KK$  — картинная плоскость (плос-

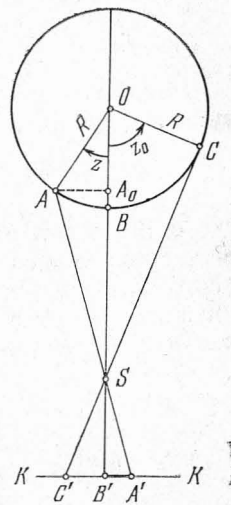


Рис. 36. Схема построения внешней перспективной проекции с позитивным изображением.

кость снимка),  $R$  — радиус сферы,  $A, B, C$  — точки поверхности сферы,  $A', B', C'$  — проекция точек на картинной плоскости,  $z, z_0$  — зенитные расстояния точек  $A$  и  $C$  соответственно.

Согласно рис. 36:

$$\frac{AA_0}{A'B'} = \frac{SA_0}{SB'},$$

что можно записать, обозначив радиус-вектор  $A'B' \doteq \rho$

$$\frac{R \sin z}{\rho} = \frac{D - R \cos z}{L}.$$

Полярные плоские координаты во внешней перспективной позитивной проекции равны

$$\delta = a, \quad \rho = \frac{LR \sin z}{D - R \cos z}, \quad (3.8)$$

где  $a$  — азимут, отсчитываемый от центрального меридиана, проходящего через точку  $B$ . Если селенографические координаты центра видимого диска (точки  $B$ ) обозначить  $\lambda_0, \beta_0$ , то формулы, определяющие прямоугольные плоские координаты текущей точки на картинной плоскости ( $x, y$ ) через селенографические координаты на сфере ( $\lambda, \beta$ ), имеют вид:

$$\left. \begin{aligned} x &= \frac{LR (\cos \beta_0 \sin \beta - \sin \beta_0 \cos \beta \cos \lambda')}{D - R (\sin \beta_0 \sin \beta + \cos \beta_0 \cos \beta \cos \lambda')} \\ y &= \frac{LR \cos \beta \sin \lambda'}{D - R (\sin \beta_0 \sin \beta + \cos \beta_0 \cos \beta \cos \lambda')} \end{aligned} \right\} \quad (3.9)$$

Формулы (3.9) получены из (3.8) с использованием зависимостей между прямоугольными и полярными координатами на плоскости, а также между азимутом и зенитным расстоянием и селенографическими координатами на сфере.

Применительно к съемочному процессу в формулах (3.9)  $L$  является фокусным расстоянием (или приведенным фокусным расстоянием) оптической системы, определяющим масштаб изображения,  $D$  — расстояние от центра Луны до точки съемки,  $\beta_0$  — селенографическая широта точки съемки,  $\beta$  — селенографическая широта текущей точки поверхности,  $\lambda' = \lambda_0 - \lambda$  — разность селенографических долгот точки съемки и текущей точки лунной поверхности.

Вводя величину  $k = \frac{D}{R}$  и полагая, что  $L$  — задаваемый масштабный множитель, выраженный в линейной мере, получим из (3.9)

$$\left. \begin{aligned} x &= \frac{L (\cos \beta_0 \sin \beta - \sin \beta_0 \cos \beta \cos \lambda')}{k - (\sin \beta_0 \sin \beta + \cos \beta_0 \cos \beta \cos \lambda')} \\ y &= \frac{L \cos \beta \sin \lambda'}{k - (\sin \beta_0 \sin \beta + \cos \beta_0 \cos \beta \cos \lambda')} \end{aligned} \right\} \quad (3.10)$$

Следует отметить, что, как видно из формул (3.10), центр прямоугольной плоской системы координат совпадает с центром видимого диска, ось  $x$  идет вдоль центрального меридиана и имеет положительное направление к северу, ось  $y$  имеет положительное направление к западу.

Альмукантарат, ограничивающий видимую часть проектируемой сферы, имеет зенитное расстояние  $z_0$  (см. рис. 36), определяемое величиной

$$\cos z_0 = \frac{1}{k},$$

т. е. радиус-вектор, ограничивающий проекцию, равен

$$\rho_0 = r \operatorname{tg} \frac{z_0}{2},$$

где  $r$  — радиус проектируемой сферы в масштабе изображения (снимка).

При работе с лунными снимками часто возникает необходимость в решении обратной задачи — определения селенографических координат точек изображения по прямоугольным плоским координатам на снимке с использованием известных селенографических координат центра видимого диска (точки съемки). Для решения этой задачи предварительно необходимо установить связь между селенографическими координатами и нормальными координатами (азимутом  $a$  и зенитным расстоянием  $z$ ) на сфере. Из решения сферического треугольника «центр видимого диска — текущая точка поверхности — полюс

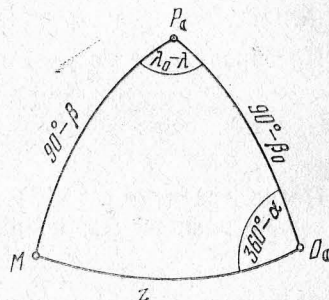


Рис. 37 Сферический треугольник, показывающий связь между селенографическими и нормальными координатами.

Луны» ( $O_{\zeta}MP_{\zeta}$ ) находим (рис. 37):

$$\left. \begin{aligned} \operatorname{ctg}(\lambda_0 - \lambda) &= -\frac{\cos \beta_0 \operatorname{ctg} z - \sin \beta_0 \cos a}{\sin a}, \\ \sin \beta &= \sin \beta_0 \cos z + \cos \beta_0 \sin z \cos a, \\ \cos \beta \sin(\lambda_0 - \lambda) &= -\sin z \sin a. \end{aligned} \right\} \quad (3.11)$$

Зенитное расстояние  $z$  текущей точки можно выразить через прямоугольные координаты ( $x, y$ ) и радиус изображения Луны ( $r$ ):

$$\sin z = \frac{1}{r} \sqrt{x^2 + y^2}. \quad (3.12)$$

Преобразуя  $\operatorname{ctg} z$  с учетом (3.12), получим

$$\operatorname{ctg} z = \frac{\sqrt{1 - \sin^2 z}}{\sin z} = \sqrt{\frac{r^2 - (x^2 + y^2)}{x^2 + y^2}}. \quad (3.13)$$

После введения (3.12) и (3.13) в (3.11), формулы для селенографических координат запишутся в таком виде:

$$\left. \begin{aligned} \operatorname{ctg}(\lambda_0 - \lambda) &= -\frac{\sqrt{\frac{r^2 - (x^2 + y^2)}{x^2 + y^2}} \cos \beta_0 - \sin \beta_0 \cos a}{\sin a}, \\ \sin \beta &= \frac{\sin \beta_0}{r} \sqrt{r^2 - (x^2 + y^2)} + \frac{\cos \beta_0}{r} \cos a \sqrt{x^2 + y^2}, \\ \cos \beta \sin(\lambda_0 - \lambda) &= -\sin a \frac{\sqrt{x^2 + y^2}}{r}. \end{aligned} \right\} \quad (3.14)$$

Азимут  $a$  либо измеряется непосредственно на снимке, либо вычисляется по значению

$$\operatorname{tg} a = -\frac{y}{x}.$$

Два первых выражения формул (3.14) решают задачу определения селенографических координат, а третье может служить контрольным при вычислениях.

Линейный масштаб проектируемых отрезков во внешней перспективной позитивной проекции изменяется вдоль вертикалов по формуле

$$\mu_1 = \frac{L(D \cos z - R)}{(D - R \cos z)^2}$$

и вдоль альмукантаратов по формуле

$$\mu_2 = \frac{L}{D - R \cos z}.$$

Определить величину неискаженных проекций длин отрезков, имеющих направление параллельно оси абсцисс, располагая прямоугольными координатами концов изображений этих отрезков на снимке, можно следующим образом.

Масштаб всякой проекции определяется как отношение бесконечно малых отрезков на проектируемой поверхности ( $dL$ ) и на проекции ( $dl$ ):

$$\mu = \frac{dl}{dL}.$$

Далее,

$$L = \int_0^l \frac{1}{\mu} dl. \quad (3.15)$$

Частный масштаб  $\mu$  отрезка, имеющего угол  $\alpha$  с направлением вертикала в данной точке, равен

$$\mu_\alpha = \sqrt{\cos^2 z \cos^2 \alpha + \sin^2 \alpha}.$$

Углу на проектируемой поверхности соответствует угол  $\gamma$  на плоскости, причем

$$\operatorname{tg} \alpha = \operatorname{tg} \gamma \cos z. \quad (3.16)$$

В рассматриваемом случае

$$\operatorname{tg} \gamma = \frac{x}{y}. \quad (3.17)$$

Выразим  $\sin^2 \alpha$  и  $\cos^2 \alpha$  через  $\operatorname{tg}^2 \alpha$ :

$$\sin^2 \alpha = \frac{\operatorname{tg}^2 \alpha}{1 + \operatorname{tg}^2 \alpha}, \quad \cos^2 \alpha = \frac{1}{1 + \operatorname{tg}^2 \alpha},$$

тогда, с учетом (3.16),

$$\mu = \sqrt{\frac{\cos^2 z + \cos^2 z \operatorname{tg}^2 \gamma}{1 + \cos^2 z \operatorname{tg}^2 \gamma}}. \quad (3.18)$$



Далее, подставляя в (3.18) выражения (3.17) и (3.12), получим

$$\mu = \sqrt{\frac{(r^2 - x^2) - y^2}{r^2 - x^2}}.$$

Тогда

$$L = \int_0^l \sqrt{\frac{r^2 - x^2}{(r^2 - x^2) - y^2}} dl. \quad (3.19)$$

Учитывая, что в данном случае  $x = \text{const}$ , а  $y = l$ , выражение (3.19) можно записать в виде

$$L = \sqrt{r^2 - x^2} \int_0^y \frac{dy}{\sqrt{(r^2 - x^2) - y^2}},$$

интегрируя которое, приходим к формуле

$$L = \sqrt{r^2 - x^2} \arcsin \frac{y}{\sqrt{r^2 - x^2}}. \quad (3.20)$$

Следовательно, для произвольно расположенного отрезка направление которого параллельно оси  $x$  на проекции, получим в линейной мере неискаженное расстояние:

$$L = \frac{\sqrt{r^2 - x^2}}{\rho} \left( \arcsin \frac{y_1}{\sqrt{r^2 - x^2}} - \arcsin \frac{y_2}{\sqrt{r^2 - x^2}} \right) \frac{1}{\mu_0},$$

где  $\mu_0$  — общий масштаб проекции.

Масштаб площади в рассматриваемой проекции равен произведению величин линейных масштабов:

$$p = \mu_1 \cdot \mu_2.$$

Наибольшие угловые искажения определяются из выражения

$$\sin \frac{\omega}{2} = \frac{a - b}{a + b},$$

где  $a$  — максимально возможная для данной проекции величина линейного масштаба,  $b$  — минимально возможная величина. Геометрически  $a$  и  $b$  являются полуосями эллипса искажений.

Если внешняя перспективная позитивная проекция используется в случае наземных наблюдений, то расстояние  $D$  в формулах (3.9) с достаточной точностью можно представить выражением

$$D = \frac{a_0 (1 - \sin p)}{\sin p}, \quad (3.21)$$

где  $a_0$  — средний экваториальный радиус Земли,  $p$  — горизонтальный параллакс Луны. По малости величины последнего (3.21) можно упростить:

$$D = \frac{a_0 (1 - p)}{p}.$$

Значения  $\lambda_0$  и  $\beta_0$  в (3.9) для случая наземной съемки численно равны величинам либрации по долготе и широте на момент наблюдений, исправленным за уклонение положения точки съемки от центра диска Земли, наблюдаемого с Луны. Величина множителя подбирается с таким расчетом, чтобы размеры рабочего изображения и вычисляемой проекции совпадали.

В общем случае меридианы и параллели селенографической сетки внешней перспективной позитивной проекции изображаются кривыми второго порядка. Центральный меридиан (с долготой  $\lambda_0$ ) изображается прямой.

Когда  $D$  достаточно велико по сравнению с лунным радиусом, можно воспользоваться более простой — ортографической — проекцией ( $D = \infty$ ). В ряде случаев мелкомасштабные снимки Луны, получаемые наземными телескопами, представляются ортографической проекцией с целью упрощения вычислений прямоугольных координат.

При  $k \rightarrow \infty$  формулы (3.10) приводятся к виду [93]:

$$\left. \begin{aligned} x &= R (\cos \beta_0 \sin \beta - \sin \beta_0 \cos \beta \cos \lambda'), \\ y &= R \cos \beta \sin \lambda', \end{aligned} \right\} \quad (3.22)$$

где  $R$  — радиус проектируемой сферы, является также и масштабным множителем, поскольку  $L = D = \infty$  (проектирование ведется параллельным пучком лучей).

В лунной картографии наиболее употребительна поперечная ортографическая проекция, в которой параллели изображаются прямыми линиями, а меридианы —

эллипсами, отнесенными к центру проекции, за исключением центрального, который изображается прямой. При  $\beta_0 = 0^\circ$  формулы (3.22) для поперечной ортографической проекции имеют такой вид:

$$\left. \begin{aligned} x &= R \sin \beta, \\ y &= R \cos \beta \sin \lambda. \end{aligned} \right\} \quad (3.23)$$

Геометрические особенности изображения описываются формулами (3.24):

$$\left. \begin{aligned} \mu_1 &= \cos z, \\ \mu_2 &= 1, \\ p &= \cos z, \\ \sin \frac{\omega}{2} &= \operatorname{tg}^2 \frac{z}{2}. \end{aligned} \right\} \quad (3.24)$$

В поперечной ортографической проекции часто составляются мелкомасштабные карты видимого с Земли полушария Луны и различные схемы обзорного характера.

Другие виды азимутальных проекций наиболее часто используются при составлении карт полярных областей (прямые проекции) или различных карт полушарий (поперечные проекции). В частности, многие карты полушарий Луны обзорного масштаба, как общеселенографические, так и специальные, построены в стереографической конформной проекции, т. е. при отсутствии угловых искажений. Такие карты лунной поверхности полностью сохраняют геометрическое подобие форм отображаемого рельефа.

Из цилиндрических проекций, в которых вспомогательной поверхностью для построения изображения служит касательный или секущий цилиндр, наиболее употребительна в современной лунной картографии проекция Меркатора. Рисунок параллелей и меридианов в этой проекции наиболее простой — прямые линии, перпендикулярные друг другу. Градусное деление долгот (вдоль параллелей) равномерно. Длина отрезка, соответствующего одному градусу широты к полюсам возрастает до бесконечности. Поэтому проекция Меркатора применяется для отображения экваториальных поясов лунного шара. Су-

щественным преимуществом проекции Меркатора является ее конформность, т. е. отсутствие искажений углов. В сочетании с прямоугольной сеткой параллелей и меридианов это свойство делает рассматриваемую проекцию особенно удобной для различных маршрутных построений и решения других навигационных задач. Общие формулы проекции Меркатора имеют вид:

$$\left. \begin{aligned} x &= \frac{R \cos \beta_k}{M} \operatorname{lg} \operatorname{tg} \left( 45^\circ + \frac{\beta}{2} \right), \\ y &= R \cos \beta_k \mathcal{N}', \\ m &= n = \frac{\cos \beta_k}{\cos \beta}, \\ p &= m^2, \\ \omega &= 0^\circ. \end{aligned} \right\} \quad (3.25)$$

Формулы (3.25) описывают наиболее общий случай проекции, когда масштаб  $n$  на параллели с широтой  $\beta_k$  равен  $n_k = 1$ , т. е. в проекции эта параллель сохраняет свою длину. Если единичный масштаб соответствует экватору, т. е.  $\beta_k = 0^\circ$ , то формулы (3.25) упрощаются. Постоянная  $M = \operatorname{lg} e$ , т. е. 0,4342945.

В проекции Меркатора построены многие крупномасштабные карты лунной поверхности.

Для изображения областей, относящихся к средним широтам Луны, часто используют одну из конических проекций — проекцию Ламберта. В конических проекциях вспомогательной поверхностью служит касательный или секущий конус, который после «развертки» образует плоское изображение проектируемой сферы.

Проекция Ламберта является прямой конформной конической проекцией. Искажения углов в ней отсутствуют, а масштабы длин в данной точке не зависят от направления ( $m = n$ ), т. е. сохраняется подобие в изображении бесконечно малых фигур. Меридианы в этой проекции изображаются прямыми, сходящимися в одной точке и пересекающимися под углами, пропорциональными разности соответствующих долгот, параллели — дуги окружностей с общим центром в точке пересечения меридианов. Формулы прямой конформной конической

проекции [93]:

$$\left. \begin{aligned} x &= \rho_s - \frac{\rho_0 \cos \alpha \lambda'}{\operatorname{tg} \left( 45^\circ + \frac{\beta}{2} \right)}, \\ y &= \frac{\rho_0 \sin \alpha \lambda'}{\operatorname{tg} \left( 45^\circ + \frac{\beta}{2} \right)}, \\ m = n &= \frac{\alpha \rho_0}{R \cos \beta \operatorname{tg} \left( 45^\circ + \frac{\beta}{2} \right)}, \\ p &= m^2, \\ \omega &= 0, \end{aligned} \right\} \quad (3.26)$$

где  $\rho_s$  — радиус параллели с наименьшей широтой для изображаемой части поверхности лунного шара,  $\rho_0$  — радиус параллели с  $\beta = 0^\circ$ , т. е. экватора, для данной проекции,  $\alpha$  — коэффициент пропорциональности при разности долгот  $\lambda' = \lambda_0 - \lambda$ . Величины  $\rho_0$  и  $\alpha$  являются постоянными, с помощью которых задаются различные условия при построении проекции в каждом частном случае.

Проекция Ламберта используется как для построения отдельных, главным образом крупномасштабных карт, так и в сочетании с проекцией Меркатора при построении многолистных крупномасштабных карт Луны. Благодаря конформности проекции Ламберта при ее использовании так же, как в случае проекции Меркатора, упрощается решение навигационных задач и выполнение других приемов, связанных с угломерными построениями.

Если возникает необходимость в проведении измерений площадей, исследовании равномерности распределения отдельных характеристик поверхности (например, форм рельефа), или в получении других данных статистического характера, целесообразно использовать эквивалентные (равноплощадные) проекции. Примером подобной проекции, изображающей всю поверхность шара, является псевдоцилиндрическая проекция Мольвейде [93].

Параллели и меридиан с долготой  $\lambda = 0^\circ$  в проекции Мольвейде изображаются прямыми линиями. Меридиан с долготой  $\lambda = \pm 90^\circ$  имеет форму окружности с центром в точке  $\lambda = 0^\circ$ ,  $\beta = 0^\circ$ . Остальные меридианы — эллипсы, одна из осей которых совпадает с центральным меридианом.

ном. Основные формулы проекции:

$$\left. \begin{aligned} x &= \sqrt{2} R \sin \alpha, \\ y &= \frac{2\sqrt{2}R}{\pi} \lambda \cos \alpha, \\ m &= \frac{\pi}{2\sqrt{2}} \cos \beta \sec \alpha \sec \varepsilon, \\ n &= \frac{2\sqrt{2}}{\pi} \cos \alpha \sec \beta, \\ \operatorname{tg} \frac{\omega}{2} &= \frac{1}{2} \sqrt{m^2 + n^2 - 2}. \end{aligned} \right\} \quad (3.27)$$

Как следует из формул (3.27) прямоугольные плоские координаты в проекции Мольвейде зависят от вспомогательного параметра  $\alpha$ , который является функцией широты:

$$2\alpha + \sin 2\alpha = \pi \sin \beta. \quad (3.28)$$

Уравнение (3.28) трансцендентное и решается методом последовательных приближений.

В формулу масштаба по меридианам  $m$  входит еще одна вспомогательная величина  $\varepsilon$ , которая определяется из уравнения:

$$\operatorname{tg} \varepsilon = \frac{2\lambda}{\pi} \operatorname{tg} \alpha.$$

Проекция Мольвейде удобна для построения мелкомасштабных карт, отражающих глобальные особенности всего лунного шара. В частности, в этой проекции построены карты-схемы всей лунной поверхности, помещенные в настоящем издании.

По мере расширения круга специальных задач в исследованиях Луны, вероятно, и более разнообразные виды картографических проекций будут использоваться для составления карт, схем, атласов и других картографических материалов.

### 3. Селенографическая привязка снимков и методы создания лунных карт

Основным исходным материалом для составления современных лунных карт общего назначения служат фотокарты — первичные или трансформированные сним-



ки с нанесенной на них селенографической сеткой. Процесс нанесения сетки (селенографической привязки снимка) начинается с определения координат точки фотографирования, т. е. центра проектирования. В случае наземных телескопических съемок подобная задача решается просто, так как момент экспозиции определяет нужные значения либрации по долготе и широте, которые содержатся в таблицах Астрономического Ежегодника или в других справочных изданиях. Поэтому рассмотрим подробно более общую методику определения центра проектирования и селенографической привязки снимков применительно к результатам космических съемок.

Положение точки фотографирования в пространстве, как правило, известно из траекторных данных. Вместе с тем селенографические координаты центра проектирования можно получить из решения обратной фотограмметрической задачи, если на обрабатываемых снимках можно отождествить некоторое число пунктов с известными селенографическими координатами [94]. Если принять в качестве рабочей систему пространственных прямоугольных координат, отнесенную к центру Луны, то связь их с селенографическими координатами можно выразить известными соотношениями:

$$\left. \begin{aligned} X &= D \cos \beta \sin \lambda, \\ Y &= D \sin \beta, \\ Z &= D \cos \beta \cos \lambda, \end{aligned} \right\} \quad (3.29)$$

где  $D$  — расстояние от центра проектирования до центра Луны.

Зависимость между плоскими прямоугольными координатами точек снимка и их пространственными координатами в рабочей системе  $XYZ$  определится функциями  $F_x$  и  $F_y$ :

$$\left. \begin{aligned} x &\equiv F_x = x_0 - f \frac{a_1(X - X_S) + b_1(Y - Y_S) + c_1(Z - Z_S)}{a_3(X - X_S) + b_3(Y - Y_S) + c_3(Z - Z_S)}, \\ y &\equiv F_y = y_0 - f \frac{a_2(X - X_S) + b_2(Y - Y_S) + c_2(Z - Z_S)}{a_3(X - X_S) + b_3(Y - Y_S) + c_3(Z - Z_S)}, \end{aligned} \right\} \quad (3.30)$$

где  $x, y$  — плоские прямоугольные координаты текущей точки снимка,  $x_0, y_0$  — плоские прямоугольные координаты

ты центра снимка,  $X_S, Y_S, Z_S$  — координаты центра проектирования в пространственной системе координат,  $X, Y, Z$  — координаты соответствующей текущей точки поверхности в той же системе,  $f$  — приведенное фокусное расстояние,  $a_i, b_i, c_i$  — направляющие косинусы углов, определяющих положение осей системы координат снимка  $(x, y, f)$  по отношению к осям системы  $(X, Y, Z)$ , т. е. углов  $\alpha, \omega, \kappa$ .

Уравнения (3.30) можно представить в линейном виде, используя частные производные функции  $F_x$  и  $F_y$ :

$$\begin{aligned} F_x &= F_{x_0} + \frac{\partial F_x}{\partial X_S} dX_S + \frac{\partial F_x}{\partial Y_S} dY_S + \frac{\partial F_x}{\partial Z_S} dZ_S + \frac{\partial F_x}{\partial \alpha} d\alpha + \\ &\quad + \frac{\partial F_x}{\partial \omega} d\omega + \frac{\partial F_x}{\partial \kappa} d\kappa + \frac{\partial F_x}{\partial x_0} dx_0 + \frac{\partial F_x}{\partial y_0} dy_0 + \frac{\partial F_x}{\partial f} df, \\ F_y &= F_{y_0} + \frac{\partial F_y}{\partial X_S} dX_S + \frac{\partial F_y}{\partial Y_S} dY_S + \frac{\partial F_y}{\partial Z_S} dZ_S + \frac{\partial F_y}{\partial \alpha} d\alpha + \\ &\quad + \frac{\partial F_y}{\partial \omega} d\omega + \frac{\partial F_y}{\partial \kappa} d\kappa + \frac{\partial F_y}{\partial x_0} dx_0 + \frac{\partial F_y}{\partial y_0} dy_0 + \frac{\partial F_y}{\partial f} df. \end{aligned}$$

Перейдя к конечным приращениям, получим уравнения погрешностей, в которых число неизвестных  $k = 9$ :

$$\begin{aligned} A_1 \Delta X_S + A_2 \Delta Y_S + A_3 \Delta Z_S + A_4 \Delta \alpha + A_5 \Delta \omega + A_6 \Delta \kappa + \\ + A_7 \Delta x_0 + A_8 \Delta y_0 + A_9 \Delta f + l_x = v_x, \\ B_1 \Delta X_S + B_2 \Delta Y_S + B_3 \Delta Z_S + B_4 \Delta \alpha + B_5 \Delta \omega + B_6 \Delta \kappa + \\ + B_7 \Delta x_0 + B_8 \Delta y_0 + B_9 \Delta f + l_y = v_y, \end{aligned}$$

где  $A_i$  и  $B_i$  — частные производные функций  $F_x$  и  $F_y$  соответственно.

Если число отождествленных на снимке точек с известными селенографическими координатами  $n > k$ , то уравнения решаются по способу наименьших квадратов, что приводит к определению элементов ориентирования снимка и координат центра проектирования.

Известные координаты точки съемки, т. е. селенографические координаты центральной точки проекции, и расстояние до центра проектирования позволяют считать сетку параллелей и меридианов, соответствующую

щую обрабатываемому снимку. Для этого используются формулы внешней перспективной позитивной проекции (3.10). Для изображений, построенных не по законам линейной перспективы (например, с помощью различных сканирующих устройств), следует применять иные приемы построения селенографической сетки с учетом геометрии подобных снимков.

На построенной в проекции снимка селенографической сетке отмечается положение опорных пунктов, что позволяет совместить по одноименным точкам сетку и снимок. В некоторых случаях операция совмещения селенографической сетки и снимка сопровождается трансформированием изображений (или сетки), если в момент экспозиции направление оптической оси съёмочной камеры не проходило через центр видимого диска Луны или не было нормальным к поверхности снимаемого участка местности при крупномасштабном фотографировании.

Кроме описанного аналитического метода получения фотокарт лунной поверхности, применяется метод аналоговых построений с помощью проекционной техники и сферического экрана.

Методика проектирования на сферический экран наземных фотографий Луны описана Спрэдли в [95]. Применительно к обработке космических снимков метод был разработан Липским и Чикмачевым [88]. Сконструированный ими унифицированный мультиплекс состоит из системы проектирующих камер и сферического экрана (рис. 38). В качестве проектирующих устройств в унифицированном мультиплексе использованы одиночные фотограмметрические проекторы с переменной фокусировкой, что позволяет с нужной точностью восстанавливать связку проектирующих лучей. Полное воспроизведение геометрии съемки обеспечивает получение на сферическом экране изображения с высокой степенью подобия реальной поверхности. Экраном в установке служит изготовленная с высокой точностью обработки поверхности полая сфера диаметром 562 мм. Внешняя поверхность сферы отшлифована и покрыта несколькими слоями прочной белой матовой эмали. Отклонение текущего радиуса сферы от номинального для покрытой эмалью поверхности около  $\pm 0,1$  мм. На поверхности экрана делительной машиной нанесена сетка параллелей и меридианов через

$2^\circ$  с ошибкой нанесения, не превышающей  $\pm 2'$ . Ширина линий и глубина нареза 0,1 мм.

При наличии на снимке изображений объектов с известными селенографическими координатами унифицированный мультиплекс позволяет одновременно определять

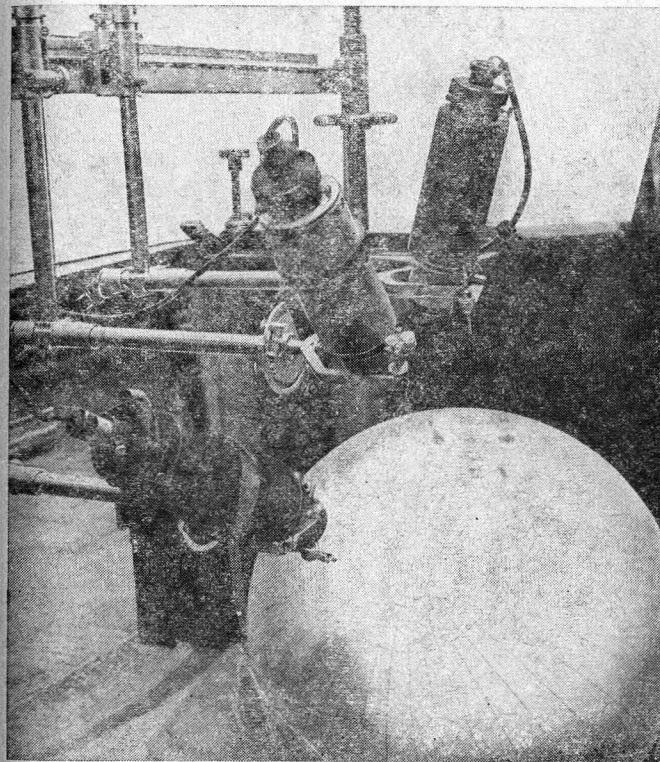


Рис. 38. Унифицированный мультиплекс с шаровым градуированным экраном.

положение центра проектирования в пространстве и совмещать изображение с селенографической сеткой на экране. Фотокарта получается путем последующей пересъемки совмещенного с сеткой изображения с экрана. Существенным преимуществом описанного метода явля-



ется возможность устранения в процессе пересъемки перспективных искажений на краю проектируемого снимка, и пересъемка сферического изображения с любого



Рис. 39. Снимок поверхности Луны, полученный АМС «Зонд-8». Селенографическая сетка нанесена с помощью унифицированного мультиплекса.

направления. Последнее обстоятельство особенно важно при подготовке исходных материалов для составления лунных карт. На рис. 39 приведен образец снимка, пере-

проектированного на унифицированном мультиплексе с одновременным нанесением селенографической сетки.

Съемка и последующая селенографическая привязка снимков местности, на которой отсутствуют опорные пункты, требует дополнительных данных для определения координат центра проектирования и элементов ориентирования изображения. Такими данными могут быть,

например, синхронные фотографии звезд. Другой возможностью независимой селенографической привязки изображений является использование снимков Земли над лунным горизонтом [96]. Основы этого способа сводятся к следующему. Из дополнительных данных, касающихся обстоятельств съемки, необходимо знать время фотографирования и расстояние космического аппарата от Луны. На рис. 40, изображающем селеноцентрическую сферу,

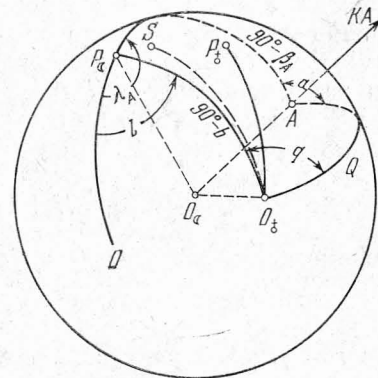


Рис. 40. Селеноцентрическая сфера.

селеноцентрическую сферу,  $P_C$  — полюс Луны,  $O_S$  — проекция центра Земли на селеноцентрическую сферу,  $A$  — проекция положения космического аппарата в момент экспозиции,  $P_S$  — проекция полюса Земли,  $P_C O$  — нулевой меридиан Луны,  $O_S S$  — положение линии рогов лунного терминатора,  $\lambda_A$ ,  $\beta_A$  — селенографические координаты точки  $A$ ,  $l$ ,  $b$  — селенографические координаты Земли,  $a$ ,  $q$  и  $Q$  — вспомогательные углы. Из решения сферического треугольника  $P_C A O_S$  вытекают формулы для вычисления селенографических координат подаппаратной точки:

$$\left. \begin{aligned} \sin \beta_A &= \cos Q \sin b + \sin Q \cos b \cos q, \\ \cos(\lambda_A - l) &= \frac{\cos Q - \sin \beta \sin b}{\cos \beta \cos b}. \end{aligned} \right\} (3.31)$$

Величины  $l$  и  $b$  должны быть исправлены за параллактическое смещение в результате перехода от центра Луны к точке нахождения космического аппарата в про-



странстве. Поправки находятся по известным формулам суточного параллакса, видоизмененным применительно к рассматриваемому случаю. Величины  $Q$  и  $q$  определяются из измерений на снимке.

Угол  $q$  является алгебраической суммой углов  $P$ ,  $T$  и  $N$ . Угол  $P(\angle P_0 O_0 P_{\odot})$  — позиционный угол оси вращения Луны,  $T(\angle P_0 O_0 S)$  — позиционный угол линии рогов. Величины углов  $P$  и  $T$  выбираются из соответствующих таблиц Астрономического Ежегодника и используются в вычислениях после введения поправок за изменение точки наблюдения. Угол  $N$  между вертикалом и линией рогов Земли измеряется по снимку. Если угол  $N$  измеряется от северного направления линии рогов Земли по часовой стрелке, то

$$q = N + (T - P).$$

Вспомогательный угол  $Q$  определяется по формуле

$$Q = 180^\circ - (r + h),$$

где  $r$  — угловой радиус видимого диска Луны,  $h$  — высота Земли над лунным горизонтом (краем лунного диска), измеряемая по снимку.

Координаты центра проектирования, вычисленные по формулам (3.31), и известное расстояние КА от центра Луны позволяют по формулам (3.10) рассчитать селенографическую сетку. Совмещение сетки с изображением производится по краю диска Луны и направлению вертикала Земли. Предварительно необходимо выполнить трансформирование изображения (или сетки), учитывающее наклон картинной плоскости.

Положение вертикала Земли на сетке определяется величиной азимута  $a$  (см. рис. 40), который вычисляется из решения сферического треугольника  $P_{\odot} O_0 A$ :

$$\sin a = \frac{\cos b \sin (\lambda_A - l)}{\sin Q},$$

$$\cos a = \frac{\sin b - \cos Q \sin \beta_A}{\sin Q \cos \beta_A}.$$

На рис. 41 приведен снимок части лунного диска и Земли, полученный АМС «Зонд-6», селенографическая привязка которого выполнена описанным способом.

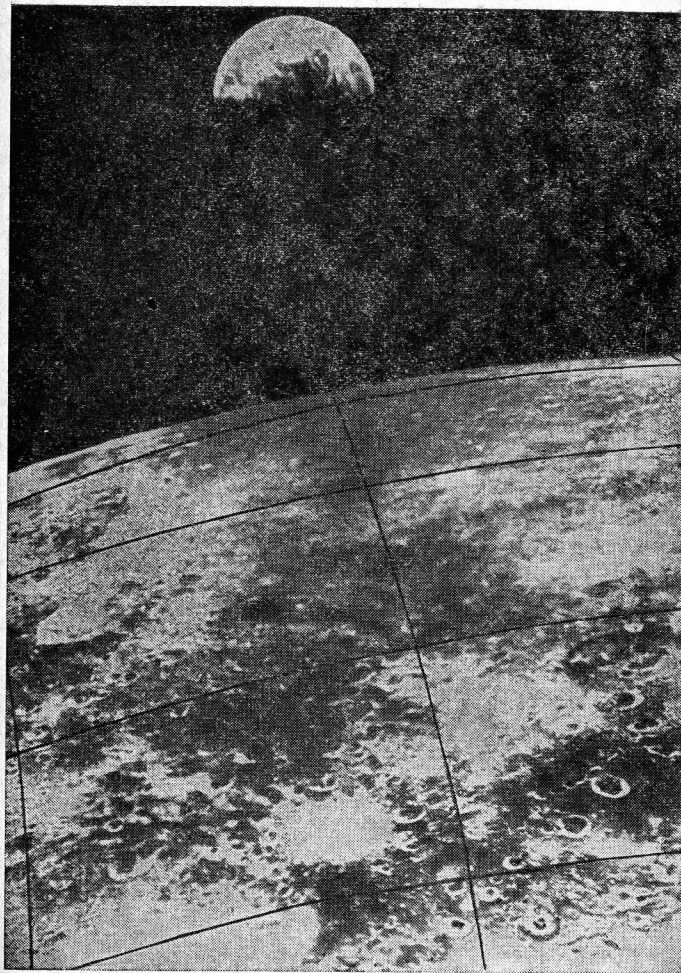


Рис. 41. Снимок поверхности Луны с Землей у лунного лимба, полученный АМС «Зонд-6». Селенографическая сетка нанесена с помощью вычислений координат точек лунной поверхности по положению Земли относительно лимба Луны.

Следующим этапом (после построения фотокарт) в технологической схеме создания лунных карт общего назначения является составление фотомозаики в проекции будущей карты. На математической основе — сетке параллелей и меридианов, построенной в заданной проекции, монтируются отдельные фрагменты оригинальных или перепроектированных снимков (фотокарт) с использованием имеющейся на них сетки так, чтобы в пределах каждого малого фрагмента различие в геометрии фотоснимка и создаваемой карты было незначительным. На основе фотомозаики «отмывкой», т. е. полутонным рисунком, создается изображение карты. Рисованные карты имеют свои преимущества перед фотокартами, уступая последним в детальности передачи рельефа, так как при отмывке неизбежно обобщение, генерализация форм и пренебрежение мелкими подробностями. Преимуществом рисованных карт прежде всего заключается в возможности передать вид каждого образования при наиболее благоприятных для него условиях освещения. На снимках лунной поверхности при косом освещении наиболее отчетливо выделяются благодаря отбрасываемым теням такие детали рельефа, как кратеры, отдельные вершины, сильно иссеченный рельеф материков. Но в этом случае почти не прослеживаются лучевые системы и другие детали, выделяющиеся благодаря яркостным особенностям, которые хорошо видны при высоком Солнце или в условиях полнолунного освещения. Также не различимы и пологие валы морских областей, которые выявляются только при низком Солнце, вблизи терминатора. Фотоснимок и построенная на его основе фотокарта фиксируют лишь определенные, мгновенные условия освещения, удобные для дешифрирования какой-то одной группы лунных образований. Рисованная карта позволяет создать синтезированный образ лунного ландшафта, соединяя в одном изображении различные условия съемки.

Таким образом, фотомозаика служит лишь плановой, контурной основой для рисовки карты. Для создания окончательного рисунка карты составитель пользуется большим числом дополнительного материала, прослеживая изменение вида изображаемого лунного образования при различных условиях освещения. Очевидно, при та-

ком подходе исключается также неравномерность освещения на всей изображаемой территории, особенно заметная на глобальных, т. е. охватывающих значительную часть видимого диска, снимках Луны.

Обычно для рисованных карт принимают в качестве среднего значения угла падения солнечных лучей  $60^\circ$ , при западном или восточном направлении освещения. В этих условиях воспроизводится вид основных форм рельефа. Кратеры малого размера, относительная глубина которых больше, и возвышенности с большим перепадом местных высот изображаются при более высоком Солнце (размеры тени уменьшаются). Крупным формам рельефа, морским валам и другим образованиям с пологими склонами придается вид, соответствующий более косому падению солнечных лучей. Вместе с тем при создании подобной синтетической модели рельефа, вариацией полутонов учитываются пропорции в местных высотах и наклонах так, чтобы качественная оценка характера рельефа давала возможность судить о крутизне склонов и относительных высотах образований, относящихся к различным группам. Как уже упоминалось, яркостные контрасты деталей поверхности — морские и материковые области в целом, светлые лучевые системы, отдельные участки темного или светлого вещества на поверхности отображаются соответственно своему виду при полнолунных условиях освещения [97].

Цветовая гамма рисованных лунных карт, как правило, подбирается в диапазоне от серо-стальных до желто-коричневых тонов, что в какой-то мере соответствует естественной окраске лунных ландшафтов и в то же время отвечает требованиям наибольшей выразительности рисунка.

В ряде случаев наглядное изображение рельефа Луны дополняется количественными сведениями о высотах в виде изогипс на мелкомасштабных картах или горизонталей при крупномасштабном картировании.

Абсолютная система высотного обоснования задается одновременно с плановой опорной селенодезической сетью и закреплена точками селенодезических каталогов (см. выше). Для определения относительных высот отдельных деталей рельефа разработано несколько способов. Классическим способом определения относительных



высот, широко применявшемся в технике наземного картирования Луны, является измерение длин теней. Подробное описание способа и его практическое использование содержатся в работе Копала и Кардера [86]. Современные приемы картирования Луны предполагают использование высокоточных фотограмметрических определений, позволяющих на основе космических съемок построить пространственную модель лунного рельефа. Особенности фотограмметрических процессов, возникающих при этом, разобраны Тюфлиным в [98]. Примером применения фотограмметрической обработки космических снимков Луны с последующим построением топографической карты может служить работа Большакова и др. [90].

Рисованные карты по сравнению с фотокартами открывают несравненно более широкие возможности применения различных картографических проекций соответственно целям и задачам составления конкретной карты.

Помимо полутонного рисунка рельефа в последнее время все большее распространение получает контурное изображение и изображение условными знаками. Основой построения таких карт служат фотокарты и фотоснимки или карты с полутонным изображением. Контурные карты, как правило, служат пояснительными схемами и бланковыми картами для нанесения дополнительной или специальной информации. Техника составления контурных карт более проста и сводится к перенесению общих очертаний деталей ландшафта или границ природных образований с одной картографической основы на другую, используя соответствующие сетки параллелей и меридианов. Учитывая схематический характер таких карт, к ним обычно не предъявляют высоких требований к точности положения контуров. В противном случае возникает необходимость в вычислении прямоугольных картографических координат переносимых деталей.

Система условных знаков для лунных карт находится пока еще в стадии предварительных разработок. Это объясняется, с одной стороны, отсутствием широкого круга задач, для решения которых были бы необходимы изображения лунной поверхности в условных знаках. С другой стороны, тесно связанные с условными знаками вопросы классификации лунных образований также еще детально не разработаны.

#### 4. Номенклатура и топонимика лунных образований

Современный номенклатурный ряд лунных образований установлен системой терминов, принятых Международным астрономическим союзом [43] (см. гл. II). Этот ряд можно разбить на группы, для которых задачи присвоения собственных имен несколько различаются. К одной группе можно отнести протяженные объекты глобального или местного характера, такие как моря, озера, заливы, равнины, плато, мысы, холмы, горные массивы и пики, хребты, цепочки кратеров, сбросы, трещины, долины. Перечисленные виды образований неравномерно распределены по поверхности лунного шара. Индивидуальные названия протяженных образований помогают выделить конкретный объект из некоторого числа подобных ему по виду. Другую группу составляет лишь одна номенклатурная единица — кратер. Однако эта группа образований по численности превосходит первую. Кратеры распределены повсеместно с известной степенью равномерности. Следовательно, наименованные кратеры создают сплошную сеть объектов, которые обеспечивают идентификацию небольших по размерам районов своего расположения. Подобная система охватывает всю поверхность Луны и создает благоприятные условия для равномерности распределения наименованных объектов.

В обоих случаях индивидуальные названия лунных образований являются кратким, запоминающимся кодом местоположения объекта.

Использование названий деталей поверхности в картографии позволяет давать удобные, связанные с местностью названия отдельных листов карт различных масштабов. Лунная топонимика аналогично земной является наукой о селенографических названиях, их происхождении, развитии и современном состоянии, написании, произношении, передаче с одного языка на другой, первичном наименовании и перенаименовании объектов.

Современная система лунных наименований складывалась на протяжении четырех последних столетий. До настоящего времени используются названия, данные областям и отдельным образованиям видимого полушария Гевелием (1647 г.) и Риччиоли (1651 г.), а также названия, введенные в начале XIX века Шретером, и, несколь-



ко позднее, Медлером. В 1921 г. Международный астрономический союз (МАС) принял решение об упорядочении системы наименований объектов на Луне и процесса дальнейшего развития лунной номенклатуры. Первоначальная система МАС была оформлена каталогом, составленным Мэри Блэгг и Карлом Мюллером (1935 г.), а затем переработана Койпером и Артуром (1966 г.). С 1961 г. началось распространение системы наименований на обратную сторону Луны. К настоящему времени объектам лунной поверхности присвоено около 1500 собственных имен. Кроме того, большое число образований имеют обозначения с буквенными добавлениями к названию.

В настоящее время действует следующая процедура присвоения наименований лунным объектам, установленная МАС. Предложения научных или общественных коллективов, организаций и отдельных ученых собираются и систематизируются Тематической группой по лунной номенклатуре. Принятые этой группой рекомендации являются «предлагаемыми» наименованиями. После рассмотрения Рабочей группой по планетной номенклатуре (в которую входят пять тематических групп: по Луне, Марсу, Венере, Меркурию, внешним планетам Солнечной системы) название считается «одобренным». Затем наименование рассматривается Исполнительным Комитетом МАС и в случае одобрения становится «временным» названием объекта. Окончательное утверждение происходит на Генеральной ассамблее МАС, после чего наименование квалифицируется как «принятое» МАС.

В своей работе номенклатурные группы руководствуются следующими общими принципами, одобренными Международным астрономическим союзом:

1. Номенклатура является рабочим инструментом и должна быть прежде всего простой, ясной и однозначной.

2. Число наименований на каждом объекте должно быть минимальным и определяться предстоящими задачами научных исследований.

3. Следует избегать дублирования одного и того же имени для двух или более объектов, хотя могут быть и отдельные исключения.

4. Выбранные индивидуальные названия должны выражаться одним словом на языке страны происхождения. Для различных алфавитов надо приводить трансли-

терацию и произношение, но не следует переводить название с одного языка на другой.

5. Построение каждой номенклатурной системы должно вестись на традиционной основе, где возможно, при условии, что это не приводит к нарушению упорядоченности.

6. Планетная номенклатура должна быть интернациональной в выборе имен. Все рекомендации национальных комитетов МАС должны учитываться. Ответственность за окончательно принятое решение возлагается на Международный астрономический союз.

7. При обсуждении проблем планетной номенклатуры необходимо смотреть в будущее и попытаться заложить основы, которые смогли бы удовлетворить потребности предстоящего развития космических исследований.

Принципы присвоения индивидуальных имен образованиям лунной поверхности с учетом существовавших традиций и современной тенденции развития лунной номенклатуры в основном были сформулированы на XI Генеральной ассамблее МАС (1962 г.).

Протяженные образования, которые можно отнести к одному из понятий: океан, море, озеро, залив, получают латинизированные названия, имеющие эмоциональный характер. Традиционно сохранившиеся названия с современной точки зрения являются абстрактными, хотя в свое время (XVII век) отражали широко распространенные заблуждения относительно влияния Луны на погоду (Море Дождей, Море Ясности), вероятно, астрологические верования (Море Кризисов, Море Изобилия, Море Спокойствия) и т. д. Наша эпоха утверждает новую традицию в наименовании обширных областей лунной поверхности, согласно которой в названиях отражаются этапы развития человеческой цивилизации и прежде всего прогресс в исследовании Луны: Море Москвы, Море Познание, Море Мечты, Залив Лунника и т. д.

Горные массивы получают латинизированные названия, соответствующие географическим названиям гор на Земле: Алтай, Альпы, Кавказ, Пиренеи и т. д.

Кратеры называются именами астрономов или выдающихся ученых посмертно. Согласно договоренности общим правилом планетной номенклатуры является условие не использовать имен политических или религиозных

деятелей, полководцев и философов XIX и XX веков. Традиции в наименовании кратеров, утвердившиеся в отношении видимого полушария, а затем перенесенные на обратное полушарие Луны, превратили ее в своеобразный интернациональный пантеон науки.

Отдельные горные вершины — пики и мысы — получают наименования по тем же правилам, что и кратеры. Борозды, долины и кратерные цепочки называются по близлежащему кратеру. Исключение сделано для трех гигантских цепочек в районе Моря Восточного на обратной стороне Луны, которые, кроме традиционно образованного названия по ближайшему кратеру, имеют собственные наименования: ГДЛ, ГИРД, РНИИ в честь первых советских исследовательских организаций, заложивших основы отечественной ракетной и космической техники.

Одна из сложных проблем связи системы лунных наименований с картографией заключается в установлении рационального количества названных кратеров, которые, как подчеркивалось выше, являются основными объектами лунной номенклатуры.

Накопленную плотность кратеров более определенно-го диаметра можно оценить, например, по формулам Шумейкера и др. [78], приводимых в гл. II. Учитывая соотношение общей площади морей и материков, получим накопленные плотности кратеров более диаметра  $D$ , указанные в таблице 17.

Практические потребности картирования лунной поверхности требуют присвоения названий такому числу кратеров, чтобы на листе определенного масштаба было хотя бы одно образование, имеющее собственное название. В таблице 18 дается оценка числа кратеров различных диаметров на площади, соответствующей листам карт наиболее употребительных в настоящее время масштабов.

Следовательно, с учетом потребностей процесса картосоставительства до масштаба 1 : 250 000 включительно в морских областях следует давать названия всем кратерам более 5 км в диаметре, а в материковых — всем кратерам более 20 км в диаметре. Тогда каждый лист карты этого масштаба в среднем будет содержать не менее одного кратера с собственным наименованием. В соответ-

ствие с данными таблицы 17 общее число наименованных кратеров на всей поверхности Луны составит не менее 3207 (367 + 2840), что в два с лишним раза превышает существующее в настоящее время.

Таблица 17

$D$ , км	Моря		Материки		На всей поверхности
	на $10^6$ км <sup>2</sup>	поверхность морей	на $10^6$ м <sup>2</sup>	поверхность материков	
>5	60	367	1580	50 402	50 769
>10	19	116	355	11 324	11 440
>15	9,3	57	141	4 500	4 557
>20	5,9	36	89	2 840	2 876
>30	3,0	18	35	1 116	1 134
>50	1,2	7	11	350	357

Если проанализировать распределение этих наименований по времени жизни и деятельности ученых, в честь которых названы кратеры, обнаружится закономерность,

Таблица 18

Масштаб карты	Площадь листа карты $10^6$ км <sup>2</sup>	Число кр. >5 км		Число кр. >10 км		Число кр. >15 км	
		моря	материки	моря	материки	моря	материки
1 : 500000	0,074	4	117	1,4	26	0,69	10
1 : 250000	0,018	1,0	28	0,34	6	0,17	2,5

которую в период от раннего средневековья до настоящего времени можно представить в виде эмпирической формулы:

$$N = e^{k(T+T^2)},$$

где  $N$  — число имен за столетие,  $T$  — столетие (век: I, II, ... и т. д.),  $k = 0,015$ .

Потребности картирования в масштабе 1 : 250 000 в наименованных кратерах согласно этой оценке будут полностью удовлетворены лишь в середине будущего века,



В настоящее время завершается подготовка карт указанного масштаба на территории, составляющую около 20% всей лунной поверхности. Можно предположить, что процесс картирования будет проходить более интенсивно, чем рост мемориальных имен. В частности, требования топографического картирования Луны в масштабе 1:100 000 уже на первом этапе подразумевают введение около 20 000 новых названий.

Таким образом, согласование практических потребностей картографии с условиями сохранения установившихся традиций является весьма сложным процессом. Немедленное удовлетворение запросов картосоставительства способствовало бы снижению существующих высоких требований к оценке научного вклада ученых, чьи имена становятся мемориальными. Следует учитывать также историческую перспективу и стараться не ускорять искусственно рост числа мемориальных имен.

Решение описанной проблемы относится к числу перспективных задач развития лунной номенклатуры и топонимики.

Другим перспективным направлением в этой области является появление новых названий в результате прогресса лунных исследований. Например, разработка географического деления лунной поверхности потребует в недалеком будущем наименования выделенных материковых регионов, по размерам, вероятно, сравнимых с морскими областями, носящими собственные имена. Это в свою очередь вызовет необходимость сформулировать соответствующие топонимические принципы.

В небольших районах Луны процесс возникновения наименований идет благодаря исследованиям, проводимым непосредственно на поверхности экспедициями и автоматическими аппаратами. Так появилась система рабочих наименований, не носящая, как правило, персонально-мемориальный характер, в районах, исследованных по программе «Аполлон» и самоходным автоматическим аппаратом «Луноход-2». В основе подобных наименований лежат либо морфологические признаки объектов, например, кратер Коун (конус), кратер Уэйд (странный), Борозда Прямая, Мыс Ближний и т. д., либо особенности проведения исследований: Пик Лунохода, кратер Сервейер и т. д.

Из предложений по дальнейшему развитию лунной топонимики можно отметить использование мужских и женских имен или мифологических имен различного национального происхождения для наименования малых кратеров в процессе крупномасштабного картирования.

### 5. Современные селенографические карты и глобусы

Подобно картам земной поверхности селенографические карты можно представить совокупностью элементов, составляющих их содержание. Если взять за основу схе-

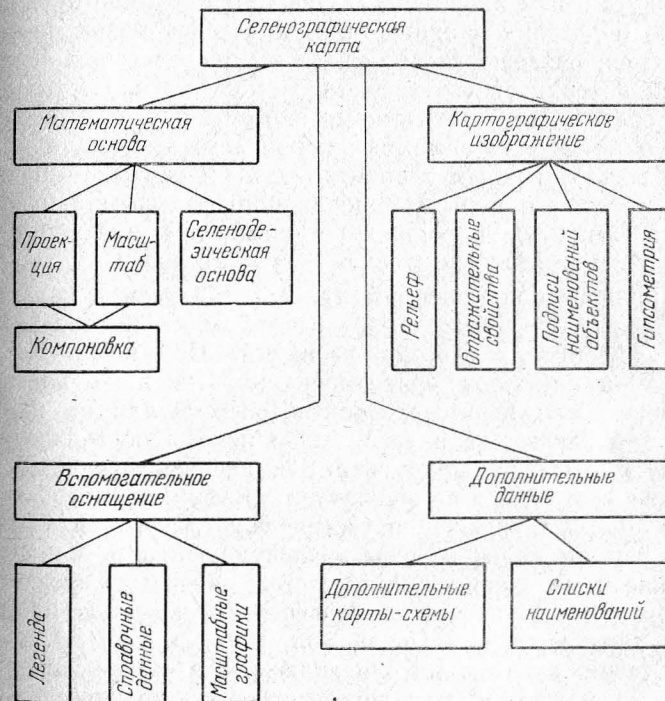


Рис. 42. Элементы селенографических карт общего назначения.

му элементов географических карт, содержание селенографической карты общего назначения расчленяется на составляющие по схеме рис. 42.



Главная часть карты — картографическое изображение на современных лунных картах включает рисунок рельефа, сведения об отражательных свойствах поверхности, систему подписей наименований объектов и в отдельных случаях сведения по гипсометрии рельефа. Многочисленные пробы и варианты изображения лунного рельефа, основной нагрузки селенографических карт общего назначения, привели картографов к выводу, что наилучшим способом наглядно передать характер лунной поверхности является полутоновой рисунок — отмывка. Поэтому в большинстве случаев современных селенографических карт рельеф изображен именно этим способом. С полутоновым рисунком, создающим объемное представление о деталях ландшафта, сочетается тоновая окраска регионов, передаются особенности отражательной способности поверхностного вещества — морские или материковые области, светлые лучевые системы и т. п. Информация о яркостных свойствах покровного материала является весьма важным элементом лунной карты, поскольку представляет в первом приближении разделение поверхности Луны по природным регионам, т. е. предварительную физиографическую схему лунного шара.

Подписи наименований лунных объектов в содержании селенографических карт имеют более важное значение, чем просто система названий. Помимо того, что названия помогают ориентироваться на поле карты и отождествлять искомые объекты, система лунных наименований включает в себе также некоторую морфологическую классификацию объектов, поскольку каждое название состоит из номенклатурного термина и собственного имени (исключение составляют кратеры, для которых термин перед именем подразумевается и в подпись на карте не выносится). Поэтому вместе с названием объекта на карте можно прочесть его краткую природную характеристику (море, пик, борозда и т. д.).

Сведения о гипсометрии включают в состав карт различного масштаба, как дополнительную количественную характеристику рельефа. В общеселенографических картах гипсометрия в виде горизонталей сочетается с полутоновым рисунком рельефа. В топографических картах специального назначения применяется также послойная окраска гипсометрических уровней, более наглядно вы-

деляющая систему горизонталей. Однако в этом случае значительно обедняется рисунок рельефа за счет исчезновения многих подробностей и деталей, не выражающихся горизонталями. Хорошо сочетаются горизонтали с изображением рельефа на фотокартах крупных масштабов. На селенографических картах общего назначения, построенных в обзорном масштабе, сведения о гипсометрии включают в виде отдельных отметок высот или не включают вовсе.

Геометрические законы, по которым построено картографическое изображение, определяются математической основой карты. Разграфка листов, их компоновка зависят от использованной проекции, которая в свою очередь в значительной степени определяется масштабом карты. Попытка установить обоснованный масштабный ряд и соответствующую разграфку листов карт различных масштабов была предпринята К. Флоренским и др. [99]. В предлагаемой схеме основными масштабами были выделены те, которые уже сейчас реально используются на практике для построения лунных карт: 1 : 5 000 000, 1 : 1 000 000, 1 : 250 000, 1 : 50 000, 1 : 10 000. Эти предложения впоследствии были закреплены в основных положениях по составлению карт Луны, разработанных совместно советскими и американскими специалистами [100].

Селенодезическая основа может быть отражена в неявном виде — самим размещением опорных пунктов относительно координатной селенографической сетки, либо нанесением на поле карты специальных отметок каталожных пунктов с подписями координат.

Большим разнообразием могут отличаться в конкретных случаях такие элементы селенографических карт, как вспомогательное оснащение и дополнительные данные. В легенду карты обычно включаются сведения об исходных материалах, послуживших основными при составлении — снимках, селенодезической основе, системе наименований, математической основе, а также условные обозначения в случае отображения каких-то элементов нагрузки условными знаками. В отдельных изданиях, кроме сведений о самой карте, помещаются справочные данные о Луне. Для облегчения измерений длин на полях карт помещают масштабные графики, отражающие изменение линейного масштаба по полю карты в соот-

ветствие с выбранной проекцией. Свободные места на полях карты используются также для размещения дополнительных данных. Во многих случаях на каждом отдельном листе многолистных карт публикуется карта-схема компоновки с отметкой данного листа. В карты общего назначения могут в качестве врезок включаться карты-схемы с тематической нагрузкой, пояснительные схемы размещения использованного материала, схемы точности составления карт и т. п. На полях или на обратной стороне некоторых селенографических карт обзорного масштаба печатаются полные списки наименований или списки наименований, использованных на конкретной карте. В большинстве случаев эти дополнительные данные сопровождают мелкомасштабные карты всей поверхности лунного шара.

Общая довольно подробная классификация лунных карт по их содержанию и назначению приводится в [99].

К настоящему времени подготовлены и опубликованы несколько десятков лунных карт, составленных на современном уровне как в отношении исходных материалов, так и в отношении их картографической интерпретации. Некоторые из этих изданий являются многолистными сериями. Подробный обзор и анализ лунных карт можно найти в [101, 102]. Остановимся на изданиях, представляющих наибольший интерес для селенографического обзора лунной поверхности, т. е. тех, которые покрывают всю территорию лунного шара.

Первой картой, отображавшей всю лунную поверхность, была «Полная карта Луны» масштаба 1 : 5 000 000, изданная в СССР в 1967 г. Картографическое изображение карты было выполнено по наземным снимкам видимого полушария и снимкам обратного полушария, полученным автоматическими станциями «Луна-3» и «Зонд-3». Современный вариант «Полной карты Луны» [103] сохранил проекцию и компоновку первого издания. В качестве селенодезической основы использованы каталоги [48] и [88]. Изображение поверхности построено по наземным снимкам и снимкам, полученным из космоса КА серии «Зонд», «Лунар орбитер» и с борта КК «Аполлон». Карта состоит из девяти листов. Субэкваториальная зона изображена на шести листах в произвольной цилиндрической проекции, рассчитанной с условием ограни-

чения искажений в высоких широтах. Границы субэкваториального пояса проходят по параллелям  $\pm 60^\circ$ . Полярные области изображены отдельно в равноугольной азимутальной проекции. Компоновкой карты предусмотрено помещение полного списка наименований объектов, отображающихся в масштабе 1 : 5 000 000, с указанием латинизированного написания и индексов квадрата десятиградусной сетки широт и долгот для облегчения отождествления объекта на поле изображения. Особым достоинством «Полной карты Луны» является детальное отображение вариаций отражательной способности лунного покровного вещества, границ распространения темного материала, светлых лучевых систем и более ярких образований на поверхности морей (рис. 43).

Подобной картой всей поверхности Луны, изданной в США, является серия LMP, состоящая из трех листов: экваториальные области видимого (LMP-1) и обратного (LMP-2) полушарий и полярные области (LMP-3) [104]. Субэкваториальный пояс на этих листах построен в проекции Меркатора, полярные зоны — в полярной стереографической проекции. Листы карты снабжены масштабными графиками, схемами компоновки и точности привязки изображения, а также краткой легендой. Исходным материалом для изображения поверхности послужили снимки КА «Лунар орбитер». В качестве селенодезической основы карт использован каталог Аэронавтического центра карт и информации США (ASIS).

Карты [103] и [104] имеют также уменьшенные варианты в масштабе 1 : 10 000 000.

Хороший обзор строения лунной поверхности представляет карта полушарий Луны, составленная в масштабе 1 : 10 000 000 на шести листах Рюклом [105]. Изображения построены в азимутальной проекции, рельеф передан контурным рисунком.

Из карт более крупных масштабов, выпускаемых отдельными листами с перспективой охвата всей поверхности Луны, следует отметить обзорно-топографическую карту масштаба 1 : 1 000 000 и топографическую карту масштаба 1 : 250 000, издание которых планируется в США [106]. Отдельные листы этих изданий уже вышли в свет. Помимо полутонного изображения поверхности на указанных картах даются горизонталы с сечением,



соответственно каждому масштабу. Планово-высотная основа карт строится по результатам фотограмметрических съемок с борта КК «Аполлон». Эти данные охватывают пока лишь около 20% лунной поверхности.

Более подробные сведения о крупномасштабном картировании лунной поверхности можно найти в [86].

Наглядное представление о строении лунной поверхности дают глобусы Луны. В СССР и США издано несколько вариантов глобусов. Основным масштабом отечественных глобусов, изданных в последние годы, является масштаб 1:10 000 000. Изображение рельефа построено на основе генерализации рисунка полной карты Луны с сохранением единства манеры отображения и цветовой гаммы. На изображение нанесена десятиградусная сетка параллелей и меридианов и наименования наиболее крупных или выделяющихся чем-либо объектов [107].

Из зарубежных изданий наиболее детальным и качественным изображением лунной поверхности отличается глобус в масштабе 1:8 533 150 (диаметр шара 16 дюймов), выпущенный НАСА в 1969 г. [86].

С целью стандартизации содержания и видов будущих картографических изданий советские и американские специалисты разработали «Совместные советско-американские основные положения по составлению карт Луны» [100]. Эта работа велась в рамках сотрудничества Академии наук СССР и Национального управления по аэронавтике и исследованию космического пространства. Основные положения содержат общую классификацию исходных материалов и создаваемых карт, а также включают ряд рекомендаций по селенодезической основе, проекциям, разграфке и номенклатуре листов, содержанию лунных карт. В частности, в основных положениях предлагается в качестве поверхности относимости использовать сферу радиусом 1730,0 км с тем, чтобы значения высот, отсчитываемые от этой сферы, имели положительные значения на всей поверхности Луны. Очень интересна попытка разработать систему условных знаков для обозначения различных образований рельефа Луны.

Стороны согласились придерживаться во всех случаях, когда это возможно и целесообразно, изложенных в основных положениях принципов при подготовке лунных карт национальными организациями СССР и США.

10 В. В. Шевченко



Рис. 43. Фрагмент «Полной карты Луны» масштаба 1:5 000 000 (3-е издание, 1979 г.). На фрагменте показан район Моря Восточного.



# ФИЗИЧЕСКАЯ СЕЛЕНОГРАФИЯ И АСТРОФИЗИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЛУНЫ

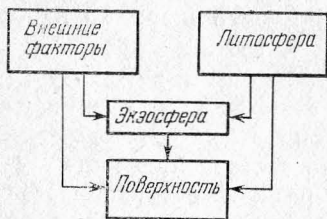
## 1. Лунная среда — объект исследования физической селенографии

При переходе от твердого планетного тела к внешнему пространству космоса возникает некий пограничный слой, строение и природа которого определяются параметрами данного небесного тела и характером его взаимодействия с межпланетной средой. В зависимости от массы небесного тела пограничный слой может обладать более или менее сложной структурой и вариациями агрегатного состояния вещества. Совокупность свойств пограничного слоя создает понятие планетной среды или ландшафтной сферы.

Лунная ландшафтная сфера представляет собой сравнительно простое явление [108]. Характерная особенность ее заключается в наличии лишь одного агрегатного состояния вещества. Жидкости не могут существовать на лунной поверхности. Газовая оболочка практически отсутствует. В связи с этим можно предположить следующую структуру лунной ландшафтной сферы (рис. 44). В противоположность условиям Земли, лунная поверхность полностью открыта воздействиям процессов, протекающих в окружающем космическом пространстве, следовательно, внешние факторы (солнечная радиация, космическое излучение и выпадение метеоритного вещества) являются полноправным компонентом лунной среды и организуют лунную ландшафтную сферу сверху.

Рис. 44. Структура ландшафтной сферы Луны.

Существующие наблюдения позволяют предполагать наличие некоторых процессов в различных горизонтах лунной литосферы (наиболее активных в прошлом). По-



этому компонентом, организующим ландшафтную сферу снизу, можно считать литосферу. Оба названных компонента являются определяющими по отношению к лунной атмосфере (чаще называемой экзосферой ввиду сильной разреженности) и поверхности.

Длительная практика комплексного исследования Земли показала, что наиболее действенным методом изучения пространственного распределения и взаимосвязей различных составляющих планетной среды является создание карт, содержащих различную информацию.

Учитывая, что при современном уровне изученности пространственную структуру распределения по лунной поверхности влияния внешних факторов и атмосферы можно принять однородной (с некоторой оговоркой относительно широтной зональности солнечного облучения или дневной и ночной атмосферы), объектом картографического изучения остаются поверхность и литосфера.

Физическим картированием Луны можно назвать процесс создания картографических изображений лунной поверхности, содержащих сведения о наличии и распределении различных физических характеристик лунного покрова и комплексный их анализ [109]. Структуру физического картирования как универсального метода обобщения разнородной информации о лунной поверхности и ландшафтной сфере в целом и его роль в общей схеме исследования природы Луны можно представить следующим образом (рис. 45). На основу, в качестве которой используются топографические карты общего назначения, накладывается физическая нагрузка, полученная дистанционными методами и дополненная селенографическим и селенологическим анализом местности. Полученные таким образом дифференцированные по различным видам информации физические карты сводятся вместе, в процессе чего выделяются комплексы свойств. Поскольку на этом этапе в качестве исходной информации используются дистанционные данные, являющиеся косвенными сведениями о природе поверхности, проведенное районирование можно назвать типологическим. Для того чтобы расшифровать выделенные типы местности, необходимо привлекать результаты прямых исследований (в естественных или лабораторных условиях). На этом этапе происходит установление взаимосвязей физико-ме-

ханических, структурных и минералогических особенностей лунного покровного вещества с их астрофизическими следствиями — характеристиками собственного и отраженного излучения Луны.

Существенной особенностью взаимного соответствия косвенных и прямых способов исследования Луны является принципиальное различие в размерах площади, к ко-

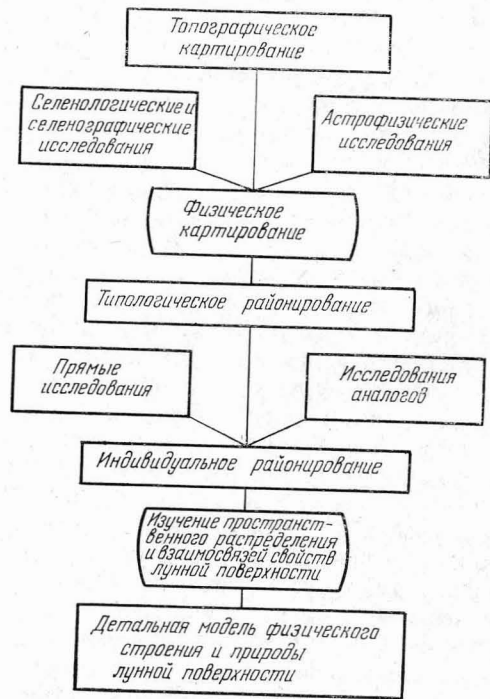


Рис. 45. Схема физического картирования Луны.

торой относится получаемая информация. Астрофизические методы могут охватывать обширные территории, практически распространяясь на всю лунную поверхность (учитывая возможность использования космической техники). Прямые исследования и в перспективе ближайших десятилетий будут территориально ограничены районом действия автоматических станций, экспедиций,

базы и т. д. Следовательно, наиболее рациональным способом получения сведений о лунной среде является сочетание косвенных и прямых исследований. При этом на этапе типологического районирования формируется информация с широким охватом территории, а затем, на этапе индивидуального районирования, эта информация по данным отдельных, как бы реперных, точек прямых исследований углубляется, наделяясь новым, конкретным содержанием. Иными словами, происходит обоснованная экстраполяция физико-механических, структурных и минералогических характеристик, полученных в ограниченной области, на территорию всего комплексно выделенного района. Очевидно, что по мере накопления подобных сведений будут вскрываться закономерности в распределении указанных участков, взаимосвязи отдельных свойств и т. д. В итоге этот процесс неизбежно приведет к построению детальной модели физической природы и строения лунной среды.

Перспективное развитие физического картирования предполагает большое разнообразие карт по отдельным видам информации. Этапы подготовки конкретных физических карт принципиально должны совпадать с этапами, описанными выше. Первичными картографическими материалами являются физические карты, содержащие разные виды информации.

Строение литосферы и предполагаемые явления, происходящие в ней, в настоящее время отражаются в основном селенологическими, гравитационными картами, картами кратковременных явлений и т. д. Карты и картографические схемы строения гравитационного поля Луны содержат известную информацию о строении литосферы в отношении распределения масс в верхних слоях лунного шара. Картографическое решение этих исследований стало особенно актуальным после обнаружения масконов и открывшихся возможностей составлять детальные карты вариаций поля тяготения Луны. Предполагаемым следствием современной эндогенной активности Луны являются кратковременные события. Пространственное размещение подобных очагов существенно обогащает комплексную характеристику ландшафта.

Многообразна роль оптических характеристик поверхности и соответствующих физических карт. Изотональ-

ные карты отдельных участков позволяют определить наклоны местности в случае, когда применение фотogramметрических способов измерения превышений невозможно. Карты альбедо и фазовых изменений яркости лунной поверхности наряду со сведениями прикладного значения содержат косвенную информацию о минералогическом составе пород и структуре верхнего отражающего слоя в широком диапазоне неровностей: от микрорельефа лунного вещества до образований в метры и сотни метров размером, в зависимости от разрешения исходных изображений. В видимой части спектра лунная поверхность не обладает заметной избирательной способностью при отражении света, т. е. для глаза и приемников света с аналогичной спектральной чувствительностью цвет лунного покровного вещества оказывается нейтральным. Однако спектральные наблюдения в более широкой области длин волн обнаруживают различия отражательной способности вещества в ближней ультрафиолетовой и далекой красной области спектра. Указанная «цветность» лунного покрова фиксируется на спектральных картах.

Качественные сведения о структуре поверхности, влияющей каким-либо образом на тепловые особенности покровного вещества, содержат изотермические карты, строящиеся на основании измерений отраженного и собственного излучения Луны в инфракрасной области спектра. По характеру изменения температуры верхнего слоя можно выделить районы с большей или меньшей мощностью пылевого покрова, выходами монокристаллических пород, обилием осколочных фрагментов и т. п.

Качественные и количественные оценки наличия неровностей определенных размеров в том или ином районе позволяют сделать радиолокационные карты.

Физические карты по отдельным видам информации можно обобщить на этапе типологического районирования, получив комплексные карты. Комплексные карты могут основываться на первичных физических картах одного или нескольких направлений. Дальнейший анализ картографической информации с привлечением результатов прямых исследований приводит к построению ландшафтных карт, которые на современном уровне теоретических разработок можно считать конечной целью физического картирования.

Таким образом, черпая фактический материал из различных по своим направлениям исследований, физическая селенография с помощью широкого применения картографического метода имеет целью объединять и анализировать данные о разнородных явлениях на основе их территориального единства. Как показывает приведенное выше краткое описание видов уже существующих физических карт, практически все явления и свойства ландшафтной сферы Луны могут быть представлены картографическими образами. В качестве общей модели во многих случаях применяется поверхность, уравнение которой в сферической системе координат имеет вид

$$S = f(\lambda, \beta, \xi),$$

где  $\lambda, \beta$  — селенографические координаты,  $\xi$  — радиус-вектор. Величина радиуса-вектора  $\xi$  пропорциональна значению картируемого параметра. Сечение поверхности  $S$  рядом концентрических сфер дает систему изолиний с интервалом (в единицах  $\xi$ ), равным расстоянию между секущими сферами. Проекция изолиний на поверхность относимости (сферу единичного радиуса или определенным образом ориентированную плоскость) представляет собой карту распространения различных величин избранного параметра. Величина радиуса-вектора может отражать и некоторые производные характеристики, например, плотность распределения объектов или явлений. В этом случае такие особенности, как вариации числа кратеров на единицу площади или числа кратковременных явлений (свечений, вспышек и т. п.), можно моделировать поверхностью описанного вида с последующим переходом к картам изолиний. Таким образом, анализ компонентов ландшафтной сферы методически заменяется анализом физических карт Луны. Результатом же поисков взаимосвязей компонентов оказывается районирование лунной поверхности. В узко математическом смысле этот процесс сводится к обнаружению средне-статистических зависимостей между формами моделируемых поверхностей. Подобное абстрагирование наблюдаемых явлений позволяет широко использовать методы математической статистики на всех этапах районирования лунной поверхности.



## 2. Дистанционные астрофизические методы исследования лунной поверхности

Дистанционные методы изучения Луны, среди которых видное место занимают астрофизические исследования, используют лунное излучение, состоящее из двух основных компонентов — отраженного и собственного. Отраженное излучение Луны состоит из рассеянной поверхностью солнечной радиации в видимой и ближней инфракрасной областях спектра.

В общем случае отраженный планетой свет оценивается величиной блеска, т. е. освещенностью  $E_{\pi}$ , которую светило создает в точке наблюдения. Эта величина пропорциональна площади видимого диска планеты (проекции шара на условную плоскость) и солнечной освещенности, и обратно пропорциональна квадратам расстояния от Солнца и от наблюдателя. На практике для расчетов используют величину солнечной освещенности  $E_{\odot}$  на стандартном расстоянии  $\Delta_0$ , равном одной астрономической единице (а. е.), поскольку измерения потока солнечного излучения проводятся около Земли. Влияние на величину  $E_{\pi}$  фазы планеты, т. е. ее положения в момент наблюдений относительно Солнца и наблюдателя, учитывается фазовой функцией.

Итак, блеск планеты выражается формулой

$$E_{\pi} = k E_{\odot} \frac{\Delta_0^2 \pi R^2}{\Delta^2 L^2} f(\alpha), \quad (4.1)$$

в которую кроме уже названных величин входят:  $k$  — коэффициент пропорциональности,  $\Delta$  — расстояние планеты от Солнца,  $R$  — радиус планеты,  $L$  — расстояние от наблюдателя,  $f(\alpha)$  — фазовая функция, которая нормируется так, что при фазовом угле  $\alpha = 0^\circ$  функция  $f(0) = 1$ .

Произведение  $p k = p$  носит название геометрического альbedo и является отношением действительного блеска планеты к блеску «абсолютно белого» экрана того же радиуса, расположенного перпендикулярно к падающим солнечным лучам при  $\alpha = 0^\circ$  и тех же расстояниях от Солнца и наблюдателя. Иными словами, геометрическое альbedo  $p$  показывает, какую часть падающего солнечного излучения отражает в сторону наблюдателя планета по сравнению с плоским идеальным отражателем,

Для случая Луны  $\Delta_0 = \Delta = 1$  а. е. Следовательно, формулу (4.1) можно представить в виде

$$E_{\odot} = p_{\odot} \frac{R_{\odot}^2}{L^2} E_{\odot} f(\alpha). \quad (4.2)$$

Освещенность измеряется либо в энергетических единицах (эрг/см<sup>2</sup> · с), либо в звездных величинах. В последнем случае звездная величина определяется как

$$m_{\odot} = -2,5 \lg E_{\odot}.$$

Выражение (4.2) описывает отраженное излучение Луны во всем спектре входящих в него длин волн, т. е. полный или интегральный поток, создающий на единичной площади освещенность  $E_{\odot}$ . Однако с помощью (4.2) можно получить также распределение энергии по спектру, т. е. описать отдельные монохроматические потоки, относящиеся к определенным интервалам длин волн электромагнитного излучения. Соответствующее выражение имеет вид

$$E_{\lambda}^{\odot} = p_{\lambda}^{\odot} \frac{R_{\odot}^2}{L^2} E_{\lambda}^{\odot}, \quad (4.3)$$

в котором индекс  $\lambda$  указывает на монохроматичность описанного излучения. В (4.3) с целью упрощения выражения фазовая функция принята равной 1, т. е. для условий полнолуния.

На рис. 46 кривая  $I$  показывает распределение энергии в спектре солнечного излучения в диапазоне от рентгеновского до инфракрасного. Величина  $E_{\lambda}^{\odot}$  дана в единицах эрг/см<sup>2</sup> · с на интервал длин волн, равный 1 мкм. Отдельные детали в спектре солнечного излучения сглажены. Кривая  $I$  построена в логарифмическом масштабе по данным [110, 111]. Используя значения  $E_{\lambda}^{\odot}$ , можно по формуле (4.3) получить набор величин  $E_{\lambda}^{\odot}$  для построения кривой распределения энергии в спектре отраженного Луной солнечного излучения. Для случая наземных наблюдений в (4.3) следует подставить среднее значение расстояния «Земля — Луна» ( $L$ ). Величина спектрального геометрического альbedo Луны возрастает

Т а б л и ц а 19

$\lambda$ , мкм	$U$	$B$	$V$	$R$	$I$
	0,353	0,448	0,554	0,690	0,820
$p_\lambda$	0,066	0,088	0,115	0,16	0,17

с длиной волны. Характер этого роста показывают данные таблицы 19 [112].

Кривая *II* на рис. 46 представляет результат проведенных расчетов. Вид этой кривой в основном повторяет характер распределения энергии в солнечном спектре с

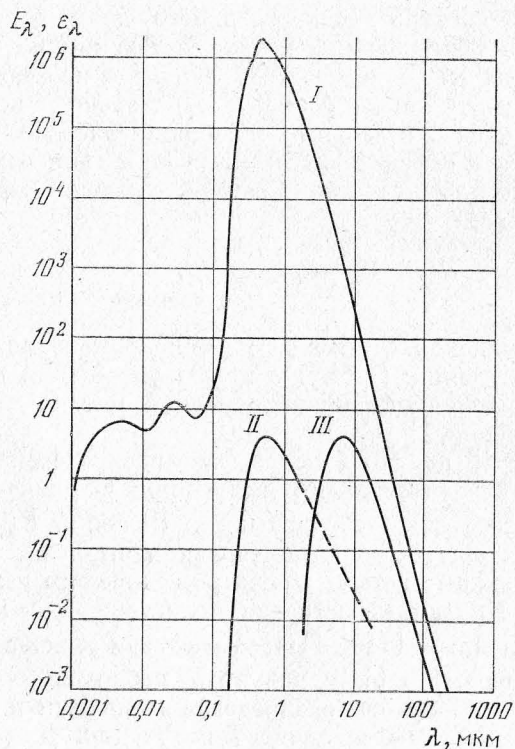


Рис. 46. Кривые распределения энергии в спектрах солнечного излучения (*I*), отраженного лунной поверхностью солнечного излучения (*II*) и собственного излучения Луны (*III*).

учетом изменения спектрального геометрического альбедо. Этим последним обстоятельством объясняется резкое падение величины излучения в ультрафиолетовой области и более пологая ветвь кривой в инфракрасной области спектра.

Низкая отражательная способность лунной поверхности, как уже упоминалось в гл. I, приводит к тому, что около 90% падающей солнечной радиации переходит в тепло. В результате этого Луна имеет собственное тепловое излучение в инфракрасной области спектра и частично в радиодиапазоне. Собственное излучение Луны можно представить планковской кривой, рассчитанной для  $T = 400$  К (в подсолнечной точке освещенного полушария). Согласно формуле Планка излучательная способность нагретого тела  $\epsilon_\lambda$  определяется так, что произведение  $\epsilon_\lambda d\lambda$  равно потоку, излучаемому  $1 \text{ см}^2$  поверхности по всем направлениям в интервале длин волн от  $\lambda$  до  $\lambda + \Delta\lambda$ . Размерность  $\epsilon_\lambda$  та же, что и  $E_\lambda$  на рис. 46. Расчеты проведены по формуле

$$\epsilon_\lambda = \frac{2hc^2}{\lambda^5} \left( e^{\frac{hc}{kT\lambda}} - 1 \right)^{-1}, \quad (4.4)$$

в которой постоянные имеют следующие численные значения:

$$\begin{aligned} h &= 6,62 \cdot 10^{-27} \text{ эрг} \cdot \text{с}, \\ k &= 1,38 \cdot 10^{-16} \text{ эрг/град}, \\ T &= 400 \text{ К}, \\ c &= 2,998 \cdot 10^{10} \text{ см/с}. \end{aligned}$$

Результаты расчетов представлены кривой *III*. Коэффициент излучения лунной поверхности принимался близким к 1.

Сравнивая кривые *II* и *III*, легко заметить, что при измерениях отраженного излучения в видимой области спектра можно не принимать во внимание вклад собственного излучения в этой области из-за его малости, и наоборот. Максимум отраженного излучения Луны приходится на  $\lambda \approx 0,6$  мкм, в то время как максимум распределения энергии в солнечном спектре находится вблизи  $\lambda = 0,47$  мкм. Из этого следует, что отраженный

лунной поверхностью солнечный свет приобретает красноватый оттенок.

Максимум собственного излучения Луны лежит в области около  $\lambda = 7$  мкм.

Изменение интенсивности инфракрасного излучения Луны позволяет определить яркостную и цветовую температуру лунной поверхности, которые мало отличаются по величине от истинной температуры при коэффициенте излучения, близком к 1. Поскольку излучательная способность вблизи максимума инфракрасного излучения достаточно велика, уже при наблюдениях с Земли можно регистрировать потоки от площадок на Луне, имеющих в поперечнике несколько километров. Эта возможность обеспечивает детальное исследование распределения инфракрасных яркостных температур по видимому диску Луны и, следовательно, допускает построение тепловых карт поверхности в соответствующих масштабах. Кроме собственно температуры, исследования лунного покрова в инфракрасной области спектра выявляют и некоторые другие его параметры. Так, измерения теплового излучения неосвещенной части лунного диска в процессе смены фаз или во время лунных затмений позволяют по скорости остывания поверхности оценить тепловую инерцию покровного вещества. Вычисленная величина тепловой инерции для лунного грунта оказывается на два порядка меньше, чем у земных горных пород. По этой характеристике можно судить о степени раздробленности вещества, так как такое низкое значение тепловой инерции свойственно только сильно измельченным породам, помещенным в условия высокого вакуума. В свою очередь вариации величины тепловой инерции могут служить признаком изменения раздробленности поверхностного слоя в различных районах лунного шара. В частности, этот метод обладает принципиальной возможностью дистанционного отождествления выходов монолитных скальных пород на поверхность, что является весьма важной, но практически не изученной особенностью лунных ландшафтов.

Правая ветвь кривой III на рис. 46 в действительности может быть продолжена и далее по шкале  $\lambda$  в область радиоволн. Однако низкий энергетический уровень излучения в радиодиапазоне не допускает детальных ис-

следований. В этом случае, как правило, регистрируется интегральный поток от освещенной части видимого диска. Подобное угловое разрешение исключает картографическую интерпретацию наблюдений. Однако, измерения яркостной радиотемпературы содержат информацию, по своему весьма важную, — они позволяют определять тепловой режим слоев, расположенных на глубине в несколько длин волн под поверхностью Луны. Радиоизмерения, в частности, установили, что на глубине около метра температура лунного реголита не претерпевает существенных изменений. Этот вывод согласуется с низким значением тепловой инерции покровных раздробленных пород Луны.

В последние годы широко используется для исследований лунной поверхности отраженное излучение Луны в радиодиапазоне, т. е. метод радиолокации. Этим методом изучаются как топографические характеристики поверхности (средняя изрытость, углы наклонов отдельных площадок), так и физические параметры (диэлектрическая постоянная). Радиолокационные исследования, как правило, проводятся в сантиметровом и метровом диапазонах длин волн. Широкие возможности подобных исследований открывает размещение излучателей и приемников на космических аппаратах [113].

Наибольшим разнообразием косвенных характеристик лунной поверхности и возможностями их интерпретации обладают оптические исследования, использующие отраженное излучение Луны в видимой области спектра. С различной степенью конкретности по результатам оптических исследований можно судить о геометрии рельефа, физических и механических параметрах грунта, химическом составе пород, возрастных и эволюционных особенностях лунного вещества. Более подробно природа различных оптических характеристик лунной поверхности будет рассмотрена ниже.

Исследования в видимом диапазоне длин волн, т. е. оптические исследования, можно разделить на три группы методов.

1. Фотометрические измерения регистрируют интенсивность отраженного излучения по всем длинам волн, т. е. его интегральный поток. Абсолютная или относительная величина отраженного излучения при совпадении на-



правлений на источник света и на наблюдателя носит название альбеда. В зависимости от условий проведения измерений в фотометрии используются различные виды альбеда.

Отношение светового потока  $F$ , рассеиваемого всем освещенным полушарием во всех направлениях, к падающему потоку солнечного излучения  $F_0$  называется сферическим альбедо:

$$A_c = \frac{F}{F_0}. \quad (4.5)$$

Если на поверхности сферы произвольного радиуса  $L$  с центром в центре Луны вырезать пояс, ограниченный малыми кругами с полярными расстояниями  $\alpha$  и  $\alpha + d\alpha$  ( $\alpha$  — селеноцентрический фазовый угол, т. е. угол между направлениями на Солнце и на наблюдателя при центре Луны), то площадь этого пояса составит величину

$$ds = 2\pi L^2 \sin \alpha d\alpha. \quad (4.6)$$

Поскольку световой поток от элементарной площадки равен произведению площади на освещенность, то с учетом (4.6) и (4.2)

$$dF = 2\pi p R_{\zeta}^2 E_{\odot} f(\alpha) \sin \alpha d\alpha,$$

откуда

$$F = 2\pi p R_{\zeta}^2 E_{\odot} \int_0^{\pi} f(\alpha) \sin \alpha d\alpha. \quad (4.7)$$

Падающий поток аналогично равен произведению солнечной освещенности на площадь видимого диска, т. е.

$$F_0 = \pi R_{\zeta}^2 E_{\odot}. \quad (4.8)$$

Подставив (4.7) и (4.8) в (4.5), получим выражения для сферического альбеда:

$$A_c = p \cdot 2 \int_0^{\pi} f(\alpha) \sin \alpha d\alpha. \quad (4.9)$$

Удвоенный интеграл в (4.9) носит название фазового интеграла. Определяется эта величина по фазовой кривой Луны, дающей изменения интегрального блеска с изменением фазового угла  $\alpha$ . Обозначив фазовый интеграл

через  $q$ , выражение (4.9) можно записать в виде

$$A_c = pq, \quad (4.10)$$

где  $p$  — геометрическое альбеда, определение которого было приведено выше.

Величины, входящие в формулу (4.10), используются при исследовании излучения от всей освещенной части лунного диска, когда измеряется блеск Луны как точечного объекта.

В случае детальной фотометрии наиболее часто употребляется нормальное альбеда  $A_n$ , которое является аналогом геометрического применительно к плоскому участку поверхности. Нормальное альбеда определяется отношением яркости рассматриваемой площадки при  $\alpha = 0^\circ$  и при произвольной ориентации ее к направлению падающих и отраженных лучей к яркости абсолютно белого экрана, помещенного в те же условия, но перпендикулярно к падающим лучам. В практике фотометрических измерений широко пользуются относительной величиной яркости, связанной с нормальным альбедо — фактором яркости.

Фактором яркости  $\rho$  называется отношение наблюдаемой яркости площадки лунной поверхности к яркости абсолютно белого экрана, помещенного в те же условия, но перпендикулярно к падающим лучам. Из этого определения следует, что фактор яркости  $\rho_0$  для площадки, наблюдаемой при местном фазовом угле  $g = 0^\circ$ , равен нормальному альбедо  $A_n$ .

При изменении ориентации исследуемой площадки к направлению падающих и отраженных в направлении к наблюдателю лучей, яркость ее изменяется по закону, определяемому фотометрической функцией. Параметрами этой функции являются угол падения  $i$ , угол отражения  $\varepsilon$ , азимутальный угол  $A$  между плоскостями падения и отражения (или местный фазовый угол  $g$ ), а также физический параметр  $H$  (или группа таких параметров), который описывает особенности строения отражающей поверхности:

$$\rho = \rho_0 f(H, i, \varepsilon, A). \quad (4.11)$$

Фотометрическая функция нормирована так, что при  $g = 0^\circ$ , т. е. когда  $i = \varepsilon = 0^\circ$ ,  $f = 1$ , и тогда текущий

фактор яркости равен нормальному альбедо:

$$\rho = \rho_0 = A_n.$$

Как следует из сказанного, фотометрические методы исследуют интенсивность интегрального отраженного потока от всей освещенной части диска или от отдельных деталей поверхности, а также законы изменения интенсивности отраженного излучения в зависимости от условий наблюдения.

2. Колориметрические и спектрофотометрические измерения позволяют исследовать интенсивность отраженного излучения в разных участках спектра и ее вариации с длиной волны.

Выше упоминалось, что отраженный лунной поверхностью свет имеет несколько красноватый оттенок. Однако визуально эта особенность Луны не воспринимается. Таким же образом глаз практически не различает цветовые особенности отдельных деталей поверхности. Но сопоставление интенсивности светового потока в участках спектра, разнесенных к краям видимой области, обнаруживает различия в окраске отдельных районов. Например, вычитание плотности двух изображений, одно из которых сделано в ближней ультрафиолетовой части спектра, а другое — в красной, показывает, что лунные моря состоят из участков с различной спектральной отражательной способностью. Подобную съемку можно назвать спектрометрическими особенностями лунной поверхности.

Световой поток от всей Луны или от отдельных деталей поверхности можно разложить в спектр и определить относительную (или абсолютную) яркость исследуемого объекта в узких интервалах длин волн. В общем случае лунный спектр повторяет солнечный и почти лишен собственных полос. Однако и в нем можно обнаружить и зарегистрировать особенности, отличающие одну область Луны от другой.

3. Поляриметрические измерения позволяют исследовать изменения интенсивности отраженного излучения в зависимости от направления колебаний. Поляризация лунного света линейна и направление колебаний электрического вектора происходит либо перпендикулярно, либо параллельно плоскости наблюдения, т. е. плоскости, про-

ходящей через падающий и отраженный луч света. Величиной, характеризующей поляризационные свойства поверхности, является степень поляризации  $P$ , определяемая из отношения

$$P = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}}, \quad (4.12)$$

$I_{\max}$  — интенсивность света с колебаниями электрического вектора в плоскости максимальной поляризации,  $I_{\min}$  — интенсивность света с колебаниями в перпендикулярной плоскости. Максимум поляризации лунного света наступает при фазовых углах  $100-110^\circ$  и достигает примерно поляризации  $P = 6-8\%$  (для наблюдений всего освещенного диска Луны). Детальные исследования выявляют и в этом случае некоторые различия отдельных регионов. Например, максимум  $P$  для материковых областей лежит в интервале  $6,5-7,5\%$ , в то время как участки морской поверхности поляризуют свет при максимальных значениях  $P$  в интервале  $12-16\%$ . Эти особенности отраженного излучения Луны также предполагают возможность использования картографических методов для анализа и интерпретации получаемой информации.

В коротковолновой части спектра (менее  $0,01$  мкм) наблюдается рентгеновское флуоресцентное излучение грунта, возбуждаемое рентгеновским солнечным излучением. В спектре флуоресцентного излучения можно выделить линии магния, алюминия и кремния [114]. При использовании специальных радиоактивных источников для возбуждения флуоресцентного излучения в рентгеновской области спектра можно выделить линии и других химических элементов. Однако в этом случае измерения проводятся непосредственно у поверхности [115].

Лунная поверхность испускает также гамма-излучение, часть которого, вероятно, вызвана воздействием космических лучей, а другая часть возникает в результате распада в лунных породах естественных радиоактивных элементов (калия-40, изотопов урана и тория).

Не все из перечисленных выше видов собственного и отраженного излучения Луны одинаковы по условиям наблюдения. Например, сравнительно слабое коротковолновое излучение (в рентгеновской и гамма-областях спектра) регистрируется с удовлетворительным разрешением

только в непосредственной близости от лунной поверхности. Существенные ограничения имеют наземные наблюдения. Земная атмосфера, как известно, имеет ограниченные «окна прозрачности» для электромагнитного излучения с определенными интервалами длин волн. В оптическом диапазоне атмосфера пропускает излучение от 0,3 мкм до 5,2 мкм.

В инфракрасной области спектра атмосфера имеет отдельные окна прозрачности в узких интервалах длин волн от 8 до 14 мкм и от 17 до 22 мкм. В радиодиапазоне до земной поверхности беспрепятственно проходит излучение с длиной волны от 1 мм до 30 м.

Ультрафиолетовое, рентгеновское и гамма-излучение полностью поглощается земной атмосферой на различных высотах над поверхностью Земли.

Кроме того, небесно-механические особенности системы Земля — Луна, рассматривавшиеся выше, позволяют с Земли регистрировать излучение только лишь от одного лунного полушария — видимого. Такая «односторонняя» физическая информация не дает возможности составить полное представление о природе лунной поверхности.

С Земли не наблюдается истинное полнолуние. Наименьшая фаза для наземного наблюдателя соответствует селеноцентрическому фазовому углу около  $1^\circ$  или несколько меньше. При дальнейшем уменьшении фазового угла начинается лунное затмение. Поэтому ряд фундаментальных величин лунной фотометрии (ход изменения яркости вблизи истинного полнолуния, звездная величина Луны в полной фазе, фазовый интеграл и сферическое альbedo, истинные значения геометрического и нормального альbedo и др.) определен с заведомой погрешностью, связанной с экстраполированием к истинному полнолунью.

Перечисленные ограничения практически полностью снимаются применением космических средств исследования Луны. Благодаря возможности выхода за пределы земной атмосферы, наблюдения с КА становятся принципиально всеволновыми. Сокращая расстояние между приемником и исследуемым объектом, можно целенаправленно сочетать интенсивность потока в произвольно удаленной точке наблюдения с необходимым разрешением на лунной поверхности.

Возможность выполнить наблюдения из произвольной точки пространства снимает территориальные ограничения, т. е. доступной становится вся поверхность лунного шара. При этих же условиях принципиально доступными становятся уникальные наблюдения Луны в фазе истинного полнолуния.

Вместе с тем наземные наблюдения в обозримом будущем сохраняют за собой такие преимущества, как использование стационарной измерительной аппаратуры, дающей, как правило, более высокую точность (эту характеристику можно отнести и к проведению эксперимента в целом), оперативное изменение условий проведения наблюдений, состава измерительного комплекса и проч., проведение длительных однородных рядов наблюдений и другие особенности, присущие только земным условиям.

Поэтому стратегия исследований Луны в ближайшем будущем, безусловно, должна предусматривать целесообразное сочетание космических методов с наземными наблюдениями.

Из упомянутых дистанционных методов изучения Луны к настоящему времени наиболее разработаны и охватывают наиболее обширную информацию, пригодную для картографического представления и анализа, оптические и, в частности, фотометрические исследования. В этом направлении выполнены фундаментальные работы по установлению основных закономерностей и получен разнообразный материал, описывающий характеристики отдельных районов и деталей поверхности. Наряду с наземными наблюдениями, современная методика которых отработывалась на протяжении многих десятилетий, к настоящему времени проведен ряд исследований с космических аппаратов с использованием специфической аппаратуры и собственных приемов измерений.

### 3. Фотометрические свойства лунной поверхности

Фотометрические свойства лунной поверхности определяются видом выражения (4.11), в которое входят альbedo  $\rho_0$  и фотометрическая функция  $f(H, i, \epsilon, A)$ . Рассмотрим более подробно угловые фотометрические параметры.

На рис. 47 показана система угловых параметров, отнесенных к наблюдаемой площадке поверхности, т. е. то-



поцентрическая система фотометрических углов. Основные плоскости обозначены: 1 — плоскость фазового угла, 2 — плоскость угла падения, 3 — плоскость угла отражения, 4 — нормаль к поверхности 5 (местная вертикаль). Угловые параметры имеют следующие обозначения:  $g$  — топо-

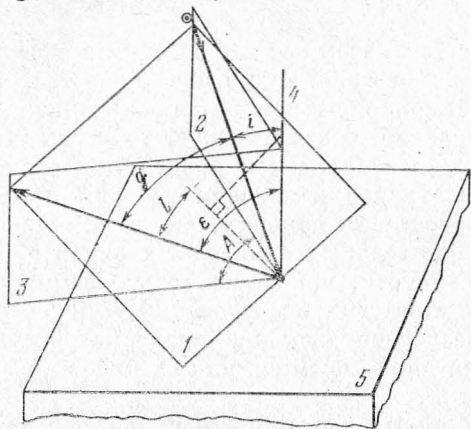


Рис. 47. Топоцентрическая система фотометрических углов.

центрический фазовый угол,  $l$  — фотометрическая долгота,  $i$  — угол падения,  $\epsilon$  — угол отражения,  $A$  — азимутальный угол между плоскостями падающего и отраженного лучей (часто называемый просто азимутом).

Соотношение топоцентрических и селеноцентрических угловых элементов показано на рис. 48, где  $g$ ,  $\epsilon$ ,  $i$ ,  $A$ ,  $l$  —

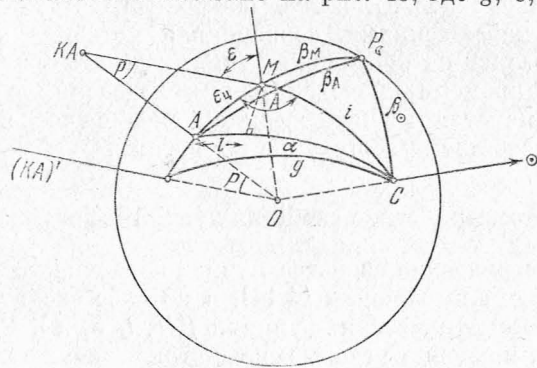


Рис. 48. Соотношение селеноцентрической и топоцентрической систем угловых параметров.

перечисленные выше параметры,  $\epsilon_{II}$  — селеноцентрическое значение угла отражения,  $P$  — параллактический угол,  $\alpha$  — селеноцентрический фазовый угол,  $KA$  — положение космического аппарата,  $M$  — текущая точка поверхности,  $O$  — центр селеноцентрической сферы,  $OC$  — направление на Солнце, направление  $O(KA) \parallel M(KA)$ ,  $A$  — подаппаратная точка,  $C$  — подсолнечная точка,  $P_C$  — лунный полюс,  $\beta_M$ ,  $\beta_A$ ,  $\beta_O$  — селенографические широты текущей точки, подаппаратной и подсолнечной точки соответственно,

$$\angle MP_C A = \lambda_M - \lambda_A, \quad \angle MP_C C = \lambda_M - \lambda_O,$$

где  $\lambda_M$ ,  $\lambda_A$ ,  $\lambda_O$  — селенографические долготы тех же точек. Решение соответствующих сферических треугольников дает формулы связи между названными угловыми параметрами:

$$\cos i = \sin \beta_M \sin \beta_O + \cos \beta_M \cos \beta_O \cos (\lambda_M - \lambda_O), \quad (4.13)$$

$$\cos \epsilon_{II} = \sin \beta_A \sin \beta_M + \cos \beta_A \cos \beta_M \cos (\lambda_M - \lambda_A), \quad (4.14)$$

$$\epsilon = \epsilon_{II} + P, \quad (4.15)$$

$$\cos \alpha = \sin \beta_A \sin \beta_O + \cos \beta_A \cos \beta_O \cos (\lambda_A - \lambda_O), \quad (4.16)$$

$$\cos A = \frac{\cos \alpha - \cos \epsilon_{II} \cos i}{\sin \epsilon_{II} \sin i}, \quad (4.17)$$

$$\cos g = \cos i \cos \epsilon + \sin i \sin \epsilon \cos A. \quad (4.18)$$

В случае, когда фотометрические измерения ведутся не по отдельным точкам, а по площади, для видимого диска можно построить систему изолиний угловых параметров.

Линии равных значений углов отражения  $\epsilon$  в общем случае съемки из произвольной точки пространства, когда изображение соответствует внешней перспективной позитивной проекции, представляют собой окружности, описанные из центра видимого диска. Величина радиусов изолиний селеноцентрических значений угла отражения  $\epsilon_{II}$  определяется формулой (3.8) для радиуса-вектора полярной системы координат внешней перспективной позитивной проекции, записанной в виде

$$r_{II} = \frac{f_r \sin \epsilon_{II}}{k - \cos \epsilon_{II}}, \quad (4.19)$$

где  $f_r$  — масштабный коэффициент, или величина фокус-

ного расстояния проектирующей системы,  $k$  — расстояние от центра Луны до центра съемки в лунных радиусах. При малых  $k$  селеноцентрические и топоцентрические значения угла отражения имеют существенное различие. Эта разница определяется величиной параллактического угла  $P$ , которая находится из простого соотношения:

$$\operatorname{tg} P = \frac{r}{f_r}$$

Поскольку  $\varepsilon = \varepsilon_{\text{ц}} + P$ , на практике наиболее простым способом получения  $r$  является определение этой величины по совмещенным на одном чертеже графикам  $r = \psi(\varepsilon_{\text{ц}})$  и  $P = \varphi(r)$ .

Система изолиний углов падения  $i$  строится с помощью полярной системы координат, центр которой совпадает с центром видимого диска, радиус-вектор соответствует значениям  $\varepsilon_{\text{ц}}$ , а азимутальный угол  $\delta$  отсчитывается от радиуса, проходящего через подсолнечную точку, против часовой стрелки. По формуле (4.20) можно получить ряд точек с координатами  $\delta$ ,  $\varepsilon_{\text{ц}}$  при заданном постоянном значении  $i$  и известной величине селеноцентрического фазового угла  $\alpha$ :

$$\cos \delta = \frac{\cos i - \cos \varepsilon_{\text{ц}} \cos \alpha}{\sin \varepsilon_{\text{ц}} \sin \alpha}. \quad (4.20)$$

Линии равных значений  $i$  являются альмукантаратами в косой внешней перспективной позитивной проекции, для которой центральный вертикал совпадает с экватором интенсивности, а полюс находится в подсолнечной точке.

Линии равных азимутов  $A$  являются локсодромиями в проекции снимка. Точки равных  $A$  определяются комбинацией координат  $\delta$ ,  $i$ . Для расчетов можно использовать формулу (4.21):

$$\sin i = \frac{\sin \alpha \sin \delta}{\sin A}. \quad (4.21)$$

В случае одновременного определения топоцентрических значений фазового угла  $g$  (для космических съемок) по аналогичной методике можно построить систему изолиний, используя в качестве линейной координаты значения параллактического угла  $P$ :

$$\cos \delta = \frac{\cos \alpha \cos P - \cos g}{\sin \alpha \sin P}. \quad (4.22)$$

Если геометрия изображения не описывается внешней перспективной позитивной проекцией, в каждом конкретном случае можно использовать общие формулы (4.13) — (4.18) для определения значений угловых параметров или построения системы их изолиний.

На рис. 49 приведена схема изолиний угловых параметров, рассчитанных и построенных для случая съемки с расстояния нескольких лунных радиусов ( $k = 6,356$ ) при

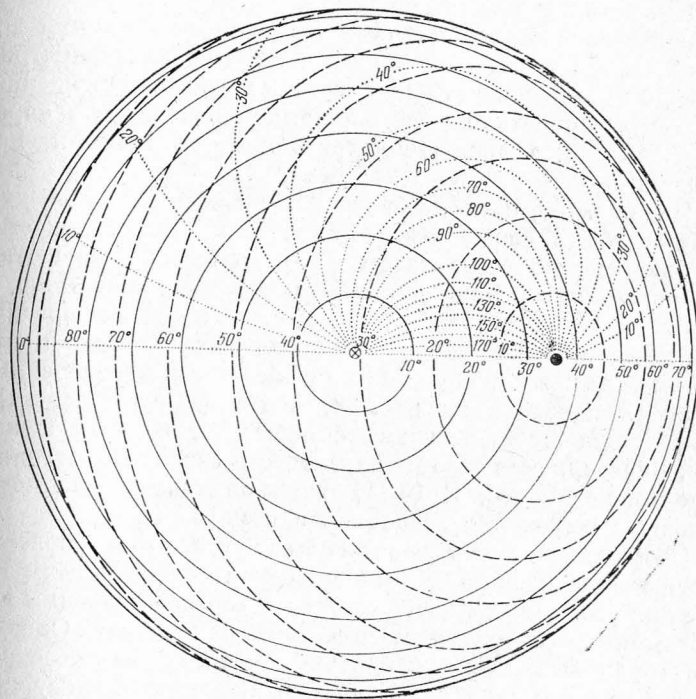


Рис. 49. Изолинии угловых параметров:  $\varepsilon$  (сплошные линии);  $i$  (штрихи),  $A$  (точки),  $\otimes$  — центр видимого диска,  $\bullet$  — подсолнечная точка.

селеноцентрическом фазовом угле  $\alpha = 30^\circ, 8$ . Примером послужили условия получения снимка № 12 из серии изображений видимого диска Луны, переданных на Землю автоматической станцией «Зонд-3» [116]. Все три

системы изолиний ( $i, \varepsilon, A$ ), показанные на схеме, симметричны относительно экватора интенсивности. Экватор интенсивности на сфере изображается большим кругом, проведенным через точки, соответствующие проекциям положения наблюдателя (космического аппарата или Земли) и Солнца. На видимом диске экватор интенсивности изображается прямой линией, проходящей через указанные точки, т. е. диаметром, на котором расположена подсолнечная точка.

Сопоставление эмпирически полученных изолиний яркости (изофот) с системой изолиний угловых параметров наглядно подтверждает постулированное ранее положение, что фотометрические свойства лунной поверхности определяются не только геометрическими условиями наблюдений.

На рис. 50, *a* представлены реальные изофоты для снимка № 12 серии «Зонд-3», т. е. изолинии яркости, построенные по результатам фотометрической обработки изображения. После редукции за различия в альбедо и сглаживания случайных «шумов», были получены идеальные изофоты, описывающие среднее распределение яркости по видимому диску. Система идеальных изофот снимка № 12 показана на рис. 50, *б*. На форму идеальных изофот существенное влияние оказывает теневая функция, определяемая общим характером изрытости отражающей поверхности. В (4.11) влияние теневой функции условно учитывается введением параметра  $H$ .

Обобщенные фотометрические свойства лунной поверхности можно представить набором систем идеальных изофот для различных фазовых углов и соответствующим им системами изолиний геометрических параметров. Однако более удобным и наглядным выражением закона отражения света лунной поверхностью является индикатриса рассеяния. Геометрически пространственную индикатрису рассеяния для фиксированного угла падения в прямоугольных координатах ( $x, y, z$ ) можно изобразить поверхностью, описываемой вектором яркости в области положительных значений при изменении угловых параметров ( $i, \varepsilon, A$ ). Тогда плоскость  $xOy$  (рис. 51) совпадает с отражающей поверхностью, ось  $z$  является нормалью к ней в наблюдаемой точке, а плоскость  $zOy$  есть плоскость падающего луча. Выражение для текущего вектора

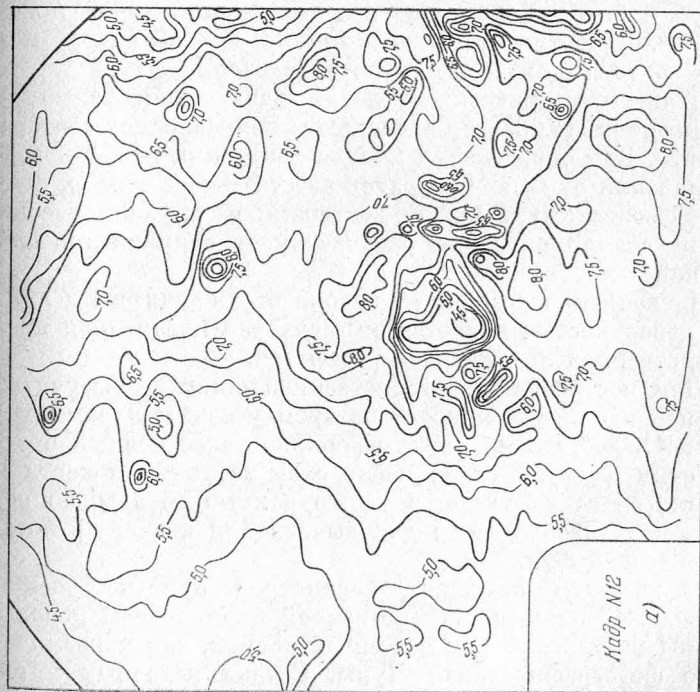
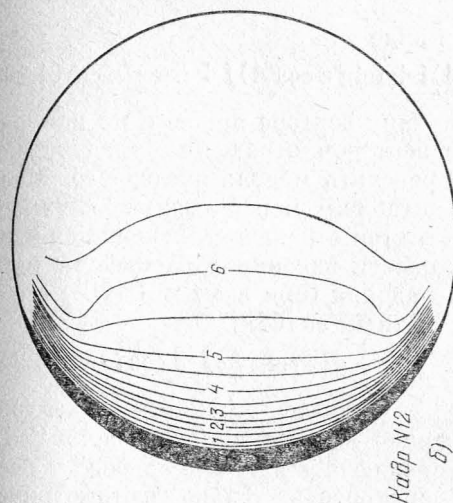


Рис. 50. Реальные (*a*) и идеальные (*б*) изофоты на видимом диске Луны (снимок № 12 из серии, полученной АМС «Зонд-3»). Значения яркости даны в процентах отражательной способности.



отражения запишется в виде

$$\rho = (\sin \varepsilon \sin A)i + (\sin \varepsilon \cos A)j + \cos \varepsilon k. \quad (4.23)$$

Чтобы получить величину вектора яркости, по направлению совпадающего с вектором отражения, следует определить модуль последнего. Масштабной мерой может служить вектор отражения, лежащий в плоскости падения и равный вектору падения (при  $\varepsilon = i$  и  $A = 0^\circ$ ) с обратным знаком:

$$\rho_0 = \sin i \cdot j + \cos i \cdot k. \quad (4.24)$$

Физически (4.24) есть векторное выражение альbedo. Если исключить влияние альbedo и рассматривать только фотометрическую функцию, как показатель яркости, то искомой мерой яркости является относительная величина. В этом случае модуль вектора  $\rho_0$  известен и по определению равен 1.

Итак, геометрические условия наблюдения задаются выражением (4.23) и определяют направление вектора яркости. Для определения модуля вектора  $\rho$ , пробегающего значения от 0 до 1, следует ввести некий тензор, ставящий соответствие между векторами  $\rho_0$  и  $\rho$ . Физически эта последняя операция означает учет влияния теневой функции.

Численным выражением закона отражения света лунной поверхностью является эмпирически полученная пространственная индикатриса рассеяния.

Для построения пространственной индикатрисы, учитывающей изменения яркости по трем угловым параметрам ( $i$ ,  $\varepsilon$ ,  $A$ ), достаточно иметь возможно более полный в отношении фазовых углов набор схем изолиний яркости и фотометрических углов, а также данные об альbedo поверхности, необходимые для вычисления значений фотометрической функции.

В качестве исходных параметров при построении приводимой ниже пространственной индикатрисы использованы результаты как наземных съемок, так и космического фотографирования Луны. Сводка исходных мате-

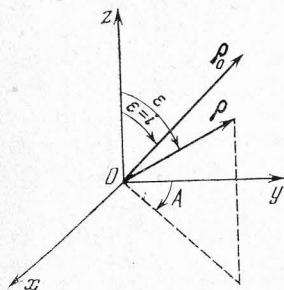


Рис. 51. Вектор отражения света поверхностью.

риалов дана в таблице 20. Из существующих наземных фотометрических съемок был выбран «Атлас изотерм и изофот Луны» [117], содержащий результаты сканирования видимого полушария в широком диапазоне селеноцентрических фазовых углов. Из космических снимков

Таблица 20

$\alpha^\circ$	$r^\circ$	$\Delta g^\circ$	Источник съемки	Номер снимка в оригинале
-2,3	0,28	-2,6 ÷ -2,0	Атлас изофот [117]	8H
4,0	14,1	-10,1 ÷ +18,1	КК «Аполлон-13»	61-8797
10,0	19,4	-9,4 ÷ +29,4	»	61-8765
+11,7	0,28	-12,0 ÷ -11,4	Атлас изофот [117]	37G
12,0	9,1	+2,9 ÷ +21,1	АМС «Зонд-6»	09
-15,0	0,28	-15,3 ÷ -14,7	Атлас изофот [117]	36G
-17,9	0,28	-18,2 ÷ -17,6	»	1H
20,7	9,0	+11,7 ÷ +29,7	АМС «Зонд-3»	6
-29,2	0,28	-29,5 ÷ -28,9	Атлас изофот [117]	33G
30,8	9,0	+21,8 ÷ +39,8	АМС «Зонд-3»	12
36,4	9,2	+27,2 ÷ +45,6	»	15
+39,8	0,27	+39,5 ÷ +40,1	Атлас изофот [117]	41G
-39,9	0,27	-40,2 ÷ -39,6	»	28E
42,7	9,3	+23,4 ÷ +52,0	АМС «Зонд-3»	18
-49,2	0,28	-49,5 ÷ -48,9	Атлас изофот [117]	17D
51,0	9,2	+41,8 ÷ +60,2	АМС «Зонд-3»	22
62,7	8,7	+54,0 ÷ +71,4	»	28
-65,5	0,26	-65,8 ÷ -65,2	Атлас изофот [117]	25E
+76,7	0,27	+76,4 ÷ +77,0	»	20D
-88,7	0,26	-89,0 ÷ -88,4	»	22E
+90,3	0,27	+90,0 ÷ +90,6	»	21D
-102,3	0,25	-102,6 ÷ -102,0	»	14C
+111,7	0,26	+111,4 ÷ +112,0	»	30F
-113,3	0,25	-113,6 ÷ -113,0	»	12C
+123,8	0,26	+123,5 ÷ +124,1	»	31F
-124,5	0,25	-124,8 ÷ -124,2	»	9C

фотометрической обработке были подвергнуты изображения, полученные автоматическими станциями «Зонд-3» и «Зонд-6» и в процессе полета космического корабля «Аполлон-13».

В таблице 20 содержатся сведения о величинах селеноцентрического фазового угла  $\alpha$ , углового радиуса видимого диска  $r$ , который определяется съемочным расстоянием, и общего интервала изменения топоцентрических

фазовых углов  $\Delta g$  в пределах видимого диска для каждого снимка. Знак селеноцентрического фазового угла для наземных снимков обозначает фазу до полнолуния (минус) и после полнолуния (плюс).

Данные наземных измерений перекрывают диапазон фазовых углов от 2 до 125°. Участок фазовой функции от 0° до 70° обеспечивается, кроме того, космическими снимками с многократным перекрытием по фазам.

Таблица 21

$g^\circ$	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$\phi$	1,000	0,954	0,913	0,881	0,867	0,851	0,535	0,820	0,805	0,789	0,775

Снимки из серий КК «Аполлон-13» и АМС «Зонд-6» позволяют детально исследовать изменения яркости при малых фазовых углах, включая  $g = 0^\circ$ . В табл. 21 приведены значения фотометрической функции  $\phi = f(H, i, \epsilon, A)$  для малых фазовых углов вблизи истинного полнолуния.

Ход фазовой функции в интервале фаз 120—180° близок к линейному и поэтому экстраполирование на этом участке к значению  $\phi = 0$  не вносит заметной неопределенности в полученный закон отражения.

Рабочими материалами для построения пространственной индикатрисы служили карты распределения значений фотометрической функции по видимому диску для каждой фазы и соответствующие им карты-схемы изолиний угловых параметров. Первоначально карты фотометрической функции были получены в цифровом виде, как результат сопоставления карт яркости (в изофотах) для каждой фазы с картами истинного нормального альбеда для тех же областей Луны. Возможность получить истинное нормальное альbedo поверхности появилась благодаря определению фазовой функции для малых  $g$ , включая истинное полнолуние. Общее число значений фотометрической функции на цифровых картах составляло около 3800 в пересчете на половину рабочей области каждой фазы, так как распределение яркости симметрично относительно экватора интенсивности. По этим равномерно распреде-

ленным точкам были проведены сглаженные идеальные изофоты. Точность проведения изофот, которая одновременно характеризует фотометрическую неоднородность поверхности, составляет  $\pm 0,015$  в единицах фотометрической функции по среднеквадратичным отклонениям.

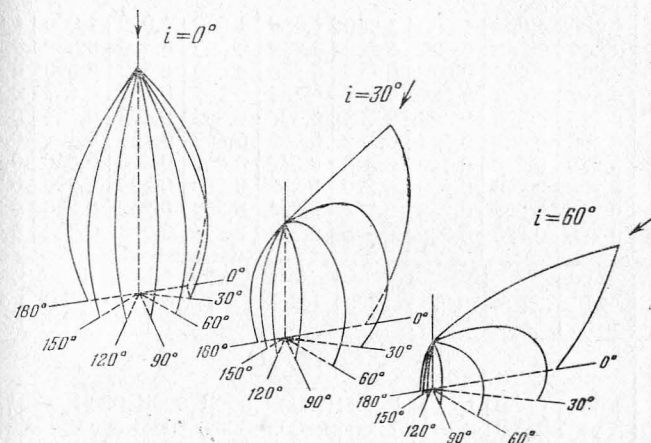


Рис. 52. Вид пространственной индикатрисы рассеяния для углов падения 0°, 30° и 60°.

В таблице 22 содержатся 1710 значений фотометрической функции для кратных 10° значений угловых параметров. Углы падения лежат в интервале 0°—80°, углы отражения — в интервале 0°—90° и азимуты изменяются от 0° до 180°. Пространственная индикатриса симметрична относительно плоскости, в которой лежит падающий луч, поэтому  $\phi_A = \phi_{360-A}$ . Для случая  $i = 0^\circ$  вид индикатрисы одинаков при всех значениях  $A$ . Случай  $\epsilon = 90^\circ$  является геометрической условностью и физически означает яркость лунного лимба для различных  $i$  и  $A$ . Среднеквадратичная ошибка определения значений  $\phi$ , приводимых в таблице 22, характеризующая внутреннюю сходимость данных, составляет  $\pm 0,0056$  в единицах фотометрической функции.

На рис. 52 для трех значений угла падения (0°, 30°, 60°) в плоскостях азимутов, также выбранных с дискретностью 30°, построены кривые, которые позволяют судить об общем виде пространственной индикатрисы рассеяния

Таблица 22

A°	0	10	20	30	40	50	60	70	80	
$\varepsilon^\circ$	$i=0^\circ$									
0	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	
10	0,800	0,800	0,800	0,800	0,800	0,800	0,800	0,800	0,800	
20	0,690	0,690	0,690	0,690	0,690	0,690	0,690	0,690	0,690	
30	0,587	0,587	0,587	0,587	0,587	0,587	0,587	0,587	0,587	
40	0,496	0,496	0,496	0,496	0,496	0,496	0,496	0,496	0,496	
50	0,409	0,409	0,409	0,409	0,409	0,409	0,409	0,409	0,409	
60	0,340	0,340	0,340	0,340	0,340	0,340	0,340	0,340	0,340	
70	0,290	0,290	0,290	0,290	0,290	0,290	0,290	0,290	0,290	
80	0,258	0,258	0,258	0,258	0,258	0,258	0,258	0,258	0,258	
(90)	0,225	0,225	0,225	0,225	0,225	0,225	0,225	0,225	0,225	
A°	90	100	110	120	130	140	150	160	170	180
$\varepsilon^\circ$	$i=0^\circ$									
0	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
10	0,800	0,800	0,800	0,800	0,800	0,800	0,800	0,800	0,800	0,800
20	0,690	0,690	0,690	0,690	0,690	0,690	0,690	0,690	0,690	0,690
30	0,587	0,587	0,587	0,587	0,587	0,587	0,587	0,587	0,587	0,587
40	0,496	0,496	0,496	0,496	0,496	0,496	0,496	0,496	0,496	0,496
50	0,409	0,409	0,409	0,409	0,409	0,409	0,409	0,409	0,409	0,409
60	0,340	0,340	0,340	0,340	0,340	0,340	0,340	0,340	0,340	0,340
70	0,290	0,290	0,290	0,290	0,290	0,290	0,290	0,290	0,290	0,290
80	0,258	0,258	0,258	0,258	0,258	0,258	0,258	0,258	0,258	0,258
(90)	0,225	0,225	0,225	0,225	0,225	0,225	0,225	0,225	0,225	0,225
A°	0	10	20	30	40	50	60	70	80	
$\varepsilon^\circ$	$i=10^\circ$									
0	0,775	0,775	0,775	0,775	0,775	0,775	0,775	0,775	0,775	
10	1,000	0,920	0,867	0,836	0,807	0,780	0,758	0,741	0,720	
20	0,818	0,800	0,786	0,765	0,737	0,714	0,696	0,680	0,663	
30	0,698	0,688	0,675	0,668	0,650	0,636	0,621	0,600	0,582	
40	0,597	0,592	0,588	0,581	0,564	0,550	0,525	0,512	0,500	
50	0,508	0,503	0,495	0,490	0,482	0,470	0,455	0,430	0,416	
60	0,426	0,420	0,413	0,408	0,403	0,393	0,378	0,363	0,348	
70	0,347	0,346	0,344	0,342	0,336	0,330	0,320	0,310	0,300	
80	0,308	0,303	0,298	0,293	0,290	0,288	0,285	0,277	0,268	
(90)	0,270	0,268	0,265	0,262	0,258	0,253	0,248	0,241	0,236	

Продолжение табл. 22

A°	90	100	110	120	130	140	150	160	170	180
$\varepsilon^\circ$	$i=10^\circ$									
0	0,775	0,775	0,775	0,775	0,775	0,775	0,775	0,775	0,775	0,775
10	0,703	0,697	0,692	0,687	0,682	0,677	0,671	0,667	0,663	0,660
20	0,650	0,645	0,622	0,613	0,604	0,600	0,596	0,592	0,584	0,580
30	0,572	0,558	0,540	0,527	0,518	0,508	0,498	0,490	0,485	0,479
40	0,480	0,463	0,447	0,430	0,418	0,410	0,405	0,400	0,396	0,392
50	0,397	0,380	0,366	0,343	0,338	0,333	0,329	0,325	0,322	0,319
60	0,334	0,323	0,313	0,301	0,288	0,286	0,284	0,282	0,280	0,278
70	0,290	0,278	0,270	0,259	0,254	0,251	0,246	0,242	0,239	0,236
80	0,256	0,250	0,241	0,232	0,226	0,222	0,218	0,215	0,213	0,211
(90)	0,225	0,218	0,209	0,200	0,194	0,190	0,186	0,184	0,182	0,181
A°	0	10	20	30	40	50	60	70	80	
$\varepsilon^\circ$	$i=20^\circ$									
0	0,618	0,618	0,618	0,618	0,618	0,618	0,618	0,618	0,618	
10	0,768	0,744	0,725	0,707	0,676	0,662	0,644	0,626	0,611	
20	1,000	0,925	0,860	0,802	0,743	0,700	0,658	0,630	0,600	
30	0,825	0,792	0,767	0,730	0,700	0,653	0,620	0,590	0,555	
40	0,715	0,685	0,665	0,648	0,623	0,588	0,553	0,523	0,495	
50	0,612	0,598	0,585	0,574	0,543	0,513	0,478	0,441	0,411	
60	0,520	0,507	0,495	0,484	0,467	0,436	0,408	0,378	0,353	
70	0,430	0,421	0,415	0,405	0,386	0,370	0,346	0,326	0,305	
80	0,372	0,367	0,358	0,346	0,338	0,325	0,310	0,292	0,273	
(90)	0,317	0,311	0,306	0,301	0,290	0,280	0,269	0,255	0,244	
A°	90	100	110	120	130	140	150	160	170	180
$\varepsilon^\circ$	$i=20^\circ$									
0	0,618	0,618	0,618	0,618	0,618	0,618	0,618	0,618	0,618	0,618
10	0,597	0,591	0,584	0,578	0,572	0,568	0,562	0,557	0,550	0,545
20	0,576	0,548	0,525	0,508	0,495	0,487	0,470	0,476	0,473	0,470
30	0,530	0,490	0,457	0,440	0,430	0,418	0,407	0,398	0,393	0,385
40	0,452	0,417	0,387	0,368	0,353	0,330	0,322	0,316	0,313	0,310
50	0,368	0,348	0,321	0,286	0,278	0,270	0,262	0,259	0,256	0,253
60	0,326	0,304	0,286	0,264	0,256	0,248	0,240	0,235	0,230	0,226
70	0,288	0,264	0,247	0,230	0,220	0,210	0,203	0,198	0,193	0,188
80	0,254	0,247	0,249	0,204	0,193	0,186	0,178	0,175	0,172	0,169
(90)	0,225	0,210	0,194	0,176	0,165	0,157	0,150	0,147	0,144	0,142



Продолжение табл. 22

A°	0	10	20	30	40	50	60	70	80
$\varepsilon^\circ$	$i=30^\circ$								
0	0,505	0,505	0,505	0,505	0,505	0,505	0,505	0,505	0,505
10	0,598	0,588	0,578	0,564	0,557	0,544	0,535	0,527	0,510
20	0,735	0,702	0,675	0,640	0,613	0,587	0,567	0,543	0,508
30	1,000	0,862	0,781	0,706	0,654	0,602	0,560	0,528	0,478
40	0,845	0,780	0,731	0,677	0,630	0,580	0,532	0,487	0,453
50	0,712	0,685	0,656	0,630	0,571	0,530	0,485	0,436	0,396
60	0,610	0,590	0,570	0,550	0,511	0,470	0,420	0,382	0,348
70	0,520	0,508	0,493	0,470	0,438	0,405	0,365	0,336	0,306
80	0,447	0,435	0,421	0,400	0,384	0,360	0,330	0,304	0,273
(90)	0,370	0,360	0,350	0,342	0,325	0,308	0,290	0,268	0,250

A°	90	100	110	120	130	140	150	160	170	180
$\varepsilon^\circ$	$i=30^\circ$									
0	0,505	0,505	0,505	0,505	0,505	0,505	0,505	0,505	0,505	0,505
10	0,495	0,485	0,478	0,471	0,462	0,454	0,448	0,440	0,434	0,428
20	0,481	0,453	0,425	0,407	0,392	0,384	0,376	0,371	0,367	0,364
30	0,443	0,406	0,377	0,354	0,343	0,335	0,327	0,318	0,311	0,304
40	0,409	0,363	0,325	0,308	0,293	0,240	0,256	0,248	0,244	0,240
50	0,342	0,304	0,273	0,231	0,222	0,215	0,209	0,205	0,201	0,197
60	0,304	0,277	0,253	0,225	0,215	0,205	0,195	0,188	0,182	0,176
70	0,273	0,244	0,220	0,198	0,183	0,173	0,162	0,155	0,149	0,143
80	0,245	0,220	0,196	0,174	0,161	0,151	0,142	0,138	0,134	0,130
(90)	0,225	0,200	0,177	0,155	0,138	0,128	0,118	0,114	0,111	0,108

A°	0	10	20	30	40	50	60	70	80
$\varepsilon^\circ$	$i=40^\circ$								
0	0,394	0,394	0,394	0,394	0,394	0,394	0,394	0,394	0,394
10	0,473	0,464	0,457	0,446	0,438	0,428	0,420	0,412	0,403
20	0,550	0,536	0,524	0,509	0,492	0,476	0,450	0,430	0,398
30	0,742	0,667	0,613	0,580	0,548	0,511	0,470	0,429	0,388
40	1,000	0,865	0,763	0,664	0,592	0,530	0,475	0,413	0,373
50	0,824	0,777	0,705	0,640	0,568	0,518	0,457	0,395	0,353
60	0,700	0,660	0,633	0,590	0,534	0,486	0,411	0,367	0,328
70	0,609	0,583	0,560	0,526	0,486	0,437	0,373	0,340	0,304
80	0,530	0,512	0,488	0,458	0,429	0,390	0,346	0,307	0,270
(90)	0,428	0,413	0,400	0,387	0,360	0,335	0,305	0,276	0,254

Продолжение табл. 22

A°	90	100	110	120	130	140	150	160	170	180
$\varepsilon^\circ$	$i=40^\circ$									
0	0,394	0,394	0,394	0,394	0,394	0,394	0,394	0,394	0,394	0,394
10	0,387	0,380	0,371	0,364	0,357	0,350	0,342	0,340	0,337	0,332
20	0,373	0,348	0,330	0,316	0,300	0,293	0,286	0,282	0,279	0,276
30	0,358	0,329	0,300	0,282	0,270	0,259	0,250	0,245	0,241	0,237
40	0,335	0,298	0,270	0,246	0,228	0,213	0,193	0,185	0,178	0,172
50	0,297	0,248	0,217	0,183	0,174	0,165	0,157	0,153	0,149	0,146
60	0,275	0,241	0,212	0,176	0,166	0,156	0,147	0,141	0,136	0,131
70	0,250	0,217	0,190	0,163	0,150	0,138	0,125	0,120	0,115	0,110
80	0,226	0,190	0,163	0,144	0,131	0,120	0,110	0,106	0,103	0,100
(90)	0,212	0,182	0,150	0,127	0,110	0,100	0,090	0,086	0,082	0,078

A°	0	10	20	30	40	50	60	70	80
$\varepsilon^\circ$	$i=50^\circ$								
0	0,295	0,295	0,295	0,295	0,295	0,295	0,295	0,295	0,295
10	0,357	0,354	0,345	0,334	0,328	0,322	0,314	0,307	0,298
20	0,415	0,409	0,400	0,390	0,375	0,356	0,341	0,318	0,300
30	0,514	0,492	0,476	0,462	0,433	0,394	0,365	0,330	0,302
40	0,750	0,655	0,595	0,548	0,500	0,438	0,377	0,330	0,395
50	1,000	0,825	0,701	0,600	0,526	0,468	0,396	0,341	0,290
60	0,805	0,740	0,668	0,603	0,532	0,467	0,380	0,334	0,286
70	0,708	0,656	0,615	0,562	0,509	0,440	0,367	0,320	0,264
80	0,643	0,582	0,555	0,516	0,460	0,407	0,346	0,288	0,245
(90)	0,492	0,471	0,450	0,433	0,397	0,360	0,310	0,266	0,230

A°	90	100	110	120	130	140	150	160	170	180
$\varepsilon^\circ$	$i=50^\circ$									
0	0,295	0,295	0,295	0,295	0,295	0,295	0,295	0,295	0,295	0,295
10	0,288	0,282	0,276	0,268	0,265	0,259	0,256	0,253	0,247	0,243
20	0,280	0,262	0,244	0,228	0,222	0,217	0,211	0,207	0,204	0,201
30	0,275	0,250	0,231	0,218	0,203	0,200	0,194	0,189	0,184	0,179
40	0,263	0,238	0,206	0,182	0,165	0,147	0,132	0,126	0,121	0,116
50	0,243	0,200	0,166	0,140	0,132	0,125	0,118	0,115	0,112	0,109
60	0,225	0,190	0,160	0,133	0,123	0,113	0,104	0,100	0,096	0,092
70	0,212	0,179	0,154	0,129	0,115	0,104	0,093	0,087	0,082	0,077
80	0,190	0,155	0,128	0,113	0,101	0,092	0,082	0,079	0,076	0,074
(90)	0,180	0,145	0,116	0,097	0,081	0,073	0,062	0,059	0,056	0,054

Продолжение табл. 22

A°	0	10	20	30	40	50	60	70	80	
$\varepsilon^\circ$	$i=60^\circ$									
0	0,196	0,196	0,196	0,196	0,196	0,196	0,196	0,196	0,196	
10	0,250	0,246	0,240	0,236	0,231	0,225	0,214	0,208	0,200	
20	0,295	0,287	0,278	0,268	0,256	0,243	0,230	0,217	0,206	
30	0,356	0,350	0,342	0,334	0,315	0,287	0,257	0,237	0,218	
40	0,476	0,450	0,425	0,404	0,367	0,326	0,278	0,245	0,222	
50	0,665	0,555	0,493	0,460	0,420	0,370	0,308	0,261	0,220	
60	1,000	0,805	0,652	0,540	0,458	0,381	0,316	0,270	0,220	
70	0,816	0,718	0,634	0,550	0,470	0,395	0,326	0,255	0,203	
80	0,710	0,646	0,609	0,558	0,470	0,386	0,304	0,230	0,186	
(90)	0,568	0,534	0,503	0,471	0,422	0,355	0,277	0,218	0,170	
A°	90	100	110	120	130	140	150	160	170	180
$\varepsilon^\circ$	$i=60^\circ$									
0	0,196	0,196	0,196	0,196	0,196	0,196	0,196	0,196	0,196	0,196
10	0,194	0,190	0,187	0,183	0,180	0,178	0,176	0,173	0,170	0,167
20	0,194	0,181	0,170	0,160	0,153	0,148	0,145	0,143	0,141	0,140
30	0,193	0,180	0,163	0,150	0,140	0,132	0,126	0,122	0,119	0,116
40	0,193	0,169	0,144	0,125	0,106	0,092	0,079	0,076	0,073	0,070
50	0,178	0,141	0,115	0,094	0,088	0,082	0,077	0,073	0,070	0,067
60	0,170	0,135	0,110	0,090	0,083	0,076	0,070	0,066	0,062	0,058
70	0,158	0,134	0,113	0,093	0,081	0,070	0,062	0,057	0,052	0,048
80	0,142	0,117	0,096	0,082	0,071	0,062	0,056	0,054	0,053	0,052
(90)	0,133	0,103	0,088	0,069	0,057	0,048	0,042	0,039	0,036	0,034
A°	0	10	20	30	40	50	60	70	80	
$\varepsilon^\circ$	$i=70^\circ$									
0	0,116	0,116	0,116	0,116	0,116	0,116	0,116	0,116	0,116	
10	0,142	0,139	0,136	0,133	0,130	0,127	0,124	0,121	0,118	
20	0,181	0,173	0,166	0,159	0,153	0,146	0,139	0,131	0,125	
30	0,232	0,223	0,212	0,204	0,195	0,187	0,166	0,150	0,134	
40	0,290	0,280	0,270	0,260	0,237	0,214	0,182	0,160	0,146	
50	0,380	0,350	0,325	0,300	0,273	0,240	0,200	0,170	0,147	
60	0,530	0,460	0,403	0,350	0,296	0,252	0,220	0,185	0,150	
70	1,000	0,745	0,537	0,460	0,360	0,290	0,230	0,174	0,138	
80	0,818	0,713	0,593	0,487	0,393	0,286	0,215	0,158	0,122	
(90)	0,665	0,594	0,510	0,440	0,362	0,280	0,200	0,141	0,107	

Окончание табл. 22

A°	90	100	110	120	130	140	150	160	170	180
$\varepsilon^\circ$	$i=70^\circ$									
0	0,116	0,116	0,116	0,116	0,116	0,116	0,116	0,116	0,116	0,116
10	0,116	0,114	0,111	0,109	0,108	0,107	0,106	0,104	0,102	0,100
20	0,116	0,112	0,106	0,100	0,096	0,092	0,090	0,088	0,086	0,085
30	0,116	0,109	0,103	0,097	0,092	0,087	0,082	0,078	0,074	0,070
40	0,115	0,100	0,085	0,071	0,058	0,049	0,043	0,040	0,038	0,036
50	0,113	0,093	0,075	0,060	0,054	0,048	0,042	0,039	0,037	0,035
60	0,112	0,086	0,068	0,056	0,051	0,046	0,042	0,038	0,035	0,032
70	0,104	0,087	0,075	0,057	0,048	0,043	0,035	0,032	0,030	0,028
80	0,091	0,076	0,063	0,052	0,045	0,041	0,036	0,034	0,032	0,031
(90)	0,087	0,065	0,056	0,045	0,036	0,030	0,026	0,024	0,022	0,021
A°	0	10	20	30	40	50	60	70	80	
$\varepsilon^\circ$	$i=80^\circ$									
0	0,054	0,054	0,054	0,054	0,054	0,054	0,054	0,054	0,054	
10	0,062	0,061	0,060	0,059	0,058	0,057	0,056	0,055	0,054	
20	0,083	0,081	0,078	0,075	0,072	0,069	0,065	0,062	0,058	
30	0,113	0,109	0,105	0,100	0,093	0,086	0,078	0,070	0,062	
40	0,130	0,124	0,117	0,116	0,106	0,090	0,085	0,075	0,061	
50	0,176	0,164	0,152	0,140	0,120	0,100	0,092	0,082	0,070	
60	0,242	0,220	0,190	0,165	0,148	0,127	0,110	0,094	0,075	
70	0,515	0,380	0,300	0,240	0,196	0,156	0,118	0,088	0,069	
80	1,000	0,583	0,392	0,280	0,193	0,146	0,109	0,077	0,063	
(90)	0,787	0,513	0,356	0,268	0,202	0,142	0,100	0,077	0,050	
A°	90	100	110	120	130	140	150	160	170	180
$\varepsilon^\circ$	$i=80^\circ$									
0	0,054	0,054	0,054	0,054	0,054	0,054	0,054	0,054	0,054	0,054
10	0,054	0,053	0,052	0,051	0,050	0,049	0,048	0,047	0,046	0,045
20	0,054	0,052	0,050	0,048	0,046	0,044	0,043	0,042	0,041	0,040
30	0,054	0,051	0,048	0,045	0,042	0,039	0,036	0,034	0,032	0,030
40	0,053	0,042	0,035	0,030	0,027	0,025	0,023	0,022	0,021	0,020
50	0,053	0,042	0,034	0,026	0,024	0,022	0,020	0,018	0,016	0,014
60	0,053	0,042	0,033	0,025	0,023	0,021	0,020	0,017	0,014	0,012
70	0,050	0,042	0,032	0,025	0,022	0,018	0,026	0,014	0,012	0,011
80	0,045	0,037	0,029	0,025	0,022	0,018	0,016	0,014	0,012	0,010
(90)	0,040	0,033	0,027	0,023	0,019	0,015	0,012	0,011	0,010	0,009

Луны. Кривые в плоскости  $A = 0^\circ$  практически совпадают с «плоскими» индикатрисами, полученными ранее Орловой, Миннартом, Барабашевым и др.

При сопоставлении с данными фотометрических каталогов отклонения отдельных измерений от фазовой кривой, построенной по средней фотометрической функции, показывают степень несоответствия среднего закона отражения данному конкретному случаю. Подобная оценка служит характеристикой фотометрической неоднородности деталей лунной поверхности.

Сравнение полученной средней фотометрической функции с результатами измерений фазового хода яркости отдельных объектов было проведено по морфологически различным точкам из трех разных каталогов: Федорец [118], Шортхилла, Саари и др. [119] и Барабашева и др. [120].

Для отдельно взятых объектов фотометрическая неоднородность проявляется в виде систематического отклонения фазового хода яркости от средней фазовой кривой. Если же взятые для сравнения объекты рассматривать в совокупности, то отклонения носят случайный характер. Значения отклонений  $\Delta\phi$  для морских (1) и материковых (2) объектов показаны на рис. 53 по величинам фазовых углов. С учетом несколько большей неоднородности фотометрических свойств объектов в морских областях можно сделать вывод о ландшафтной общности средней фотометрической функции. Фотометрические свойства морских и материковых объектов моделируются средним законом отражения практически с одинаковой точностью при среднем уровне фотометрической неоднородности около 5%.

Важной задачей в лунной фотометрии является вывод аналитического выражения закона рассеяния света поверхностью Луны.

Из существующих в настоящее время подобных выражений наилучшее согласие с результатами наблюдений имеет «улучшенная формула» Хапке [121]. Эта формула полностью соответствует виду (4.11). Фотометрический рельеф в формуле Хапке описывается несколькими параметрами, учитывающими как микроструктуру поверхности, так и неровности большего размера.

Формула Хапке имеет следующий вид:

$$\rho = \rho_0 \Sigma(g) B(g) L(l, g). \quad (4.25)$$

Модель, на основании которой была выведена формула, предполагала, что лунный грунт состоит из мелких рассеивающих зерен, случайным образом собранных в открытую решетку. Зерна велики по сравнению с длиной волны. Пучок лучей, входящий внутрь такого пористого

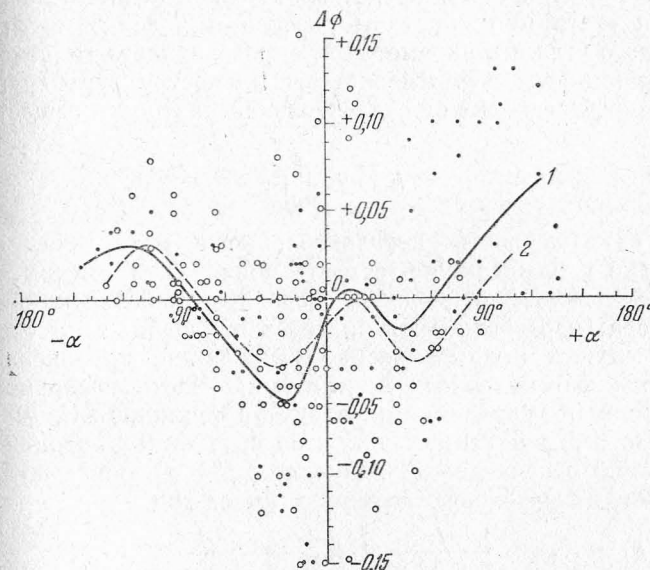


Рис. 53. Отклонение фазового хода яркости от средней фазовой кривой морских (•) и материковых (○) участков.

слоя, ослабляется из-за поглощения и рассеяния зернами. При этом многократное рассеяние не учитывается. Преимущественным направлением является путь падающего луча. Если такой луч, проникнув в решетку, освещает внутри нее рассеивающую свет частицу, то луч, отраженный в сторону источника света, беспрепятственно выйдет из пористой структуры. Этим построением моделируется наблюдаемый на Луне эффект резкого увеличения яркости с приближением к нулевой фазе («эффект оппозиции»). В формуле (4.25) приведенные особенности общей фотометрической модели описываются функциями  $\Sigma(g)$  и  $B(g)$ :

$$\Sigma(g) = \frac{\sin g + (\pi - g) \cos g}{\pi} + 0,1 (1 - \cos g)^2, \quad (4.26)$$



$$B(g) = 2 - \frac{\operatorname{tg} g}{2h} \left(1 - e^{-\frac{h}{\operatorname{tg} g}}\right) \left(3 - e^{-\frac{h}{\operatorname{tg} g}}\right). \quad (4.27)$$

Выражение (4.26) соответствует функции рассеяния света одиночной частицей в зависимости от фазового угла  $g$ . Формула (4.27) представляет собой функцию ослабления света при обратном рассеянии в зависимости от фазового угла  $g$  и параметра  $h$ , определяющего «плотность упаковки» частиц или пористость микроструктуры грунта. Параметр  $h$  зависит от относительной плотности вещества:

$$h = 2 \left(\frac{d}{d_0}\right)^{\frac{2}{3}},$$

где  $d_0$  — плотность нераздробленного материала,  $d$  — реально наблюдаемая плотность пористой структуры.

Геометрической моделью неровностей более крупного размера (неразрешаемых кратеров и подобных им структур) служат цилиндрические углубления, параллельные линиям фотометрической долготы  $l$ . Часть поверхности, занимаемая углублениями, входит в функцию  $L(l, g)$  как параметр  $f$ , а максимальный угол внутренних склонов углублений обозначается  $\gamma$ . Функция  $L(l, g)$ , описывающая мезо- и макротеневую функцию, имеет вид

$$L(l, g) = K_1 \frac{1-f}{1 + \frac{\cos l}{\cos(l+g)}} + K_2 \frac{f}{2 \cos \frac{1}{2} g \cos l \sin \gamma} \times \left[ \cos(l+jg) \sin(\gamma+kg) - \frac{1}{2} \sin^2 \frac{1}{2} g \ln \frac{\cos(l+jg) + \sin(\gamma+kg)}{\cos(l+jg) - \sin(\gamma+kg)} \right]. \quad (4.28)$$

Кроме названных выше параметров, в формулу (4.28) входят коэффициенты  $K_1, K_2, j, k$ , величины которых подобраны в зависимости от значений  $g, l, \gamma$  (таблица 23).

Фотометрическая долгота  $l$  является функцией угловых параметров и вычисляется по формуле

$$\operatorname{tg} l = \frac{\frac{\cos \varepsilon}{\cos i} \cos g - 1}{\sin g}.$$

При соответствующем подборе параметров можно получить достаточно близкое совпадение вычисленных зна-

Таблица 23

Область значений $g, l, \gamma$	$K_1$	$K_2$	$j$	$k$
$-1/2\pi \leq l \leq 1/2\pi, (1/2\pi - l) \leq g \leq \pi$	0	0	—	—
$(-1/2\pi + \gamma) \leq l \leq 1/2\pi, (1/2\pi - \gamma - l) \leq g \leq (1/2\pi - l)$	1	1	1	1/2
$(-1/2\pi + \gamma) \leq l \leq (1/2\pi - \gamma), 0 \leq g \leq (1/2\pi - \gamma - l)$	1	1	1/2	0
$-1/2\pi \leq l \leq (-1/2\pi + \gamma), 0 \leq g \leq (1/2\pi - \gamma - l)$	1	1	0	1/2
$-1/2\pi \leq l \leq (-1/2\pi + \gamma), (1/2\pi - \gamma - l) \leq g \leq (\pi - \gamma)$	1	1	1/2	1
$-1/2\pi \leq l \leq (-1/2\pi + \gamma), (\pi - \gamma) \leq g \leq (1/2\pi - l)$	1	0	—	—

чений яркости с задаваемыми пространственной индикатрисой для средней фотометрической функции Луны [122].

Подбор параметров позволяет также воспроизводить фазовые изменения яркости отдельных объектов. На рис. 54 в качестве примера приводятся фазовые кривые

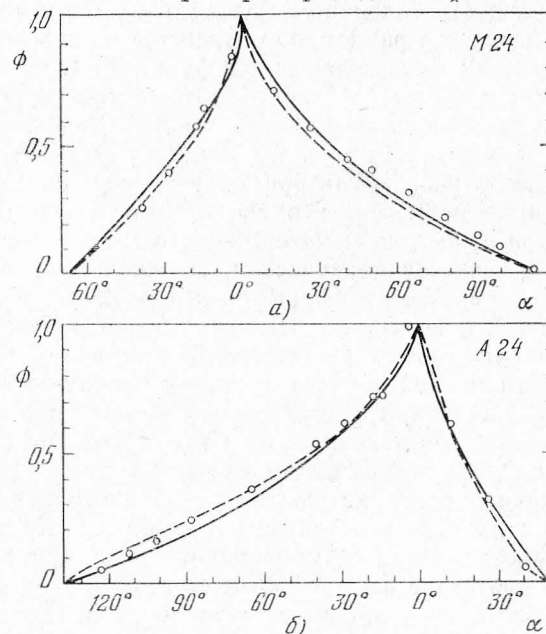


Рис. 54. Сравнение фазового хода яркости, вычисленного по средней индикатрисе рассеяния (сплошная кривая) и формуле Хапке (пунктирная кривая) с результатами измерений [119] (отдельные точки) для морского (а) и материкового (б) участков поверхности.

для двух различных по природе участков Луны. Измерения фазовой яркости взяты из каталога [119]. Принципиальными недостатками формулы Хашке является неточное воспроизведение хода яркости вблизи истинного полнолуния, что особенно заметно на кривых рис. 54, а также использование модели «фотометрических меридианов» для представления распределения яркости по видимому диску Луны.

#### 4. Природа оптических свойств лунной поверхности

Существенное влияние на отражательные свойства лунной поверхности оказывает рельеф площадки, интегральная яркость которой измеряется. При нарушении статистической однородности распределения деталей рельефа внутри исследуемой площадки обнаруживаются систематические отклонения фазового хода яркости. Как правило, площадка равномерно отражает по закону, близкому к средней фотометрической функции. При наличии аномальных особенностей рельефа наблюдается отклонение хода вычисленной фазовой кривой от измеренных значений яркости. На рис. 55 показаны оба случая на примере двух разнохарактерных участков поверхности, фазовые яркости которых приводятся в каталоге [119]. Оба участка относятся к материковому типу поверхности. Рис. 55, а представляет участок, достаточно однородный по рельефу и соответствующий среднему характеру изрытости лунной поверхности. Эти структурные особенности участка, по-видимому, и определяют в основном близость его фотометрических свойств среднему закону отражения. Измеренные значения относительной яркости с точностью до ошибок измерений совпадают с вычисленными по средней фотометрической функции значениями.

Аномальное строение участка, показанного на рис. 55, б, приводит к тому, что вычисленная фазовая кривая систематически отличается от измеренного хода яркости. Подобное соответствие выявляется и во всех других случаях сопоставления структуры участка и измеренного хода яркости.

Зависимость вида фотометрической функции от рельефа отражающей поверхности предполагает, что весьма важную роль в формировании интегральной фазовой яр-

кости элементарной площадки играет теневая функция, т. е. фотометрический рельеф. Принципиальной особенностью влияния фотометрического рельефа является немасштабность в широких пределах. Оказывается, что фа-

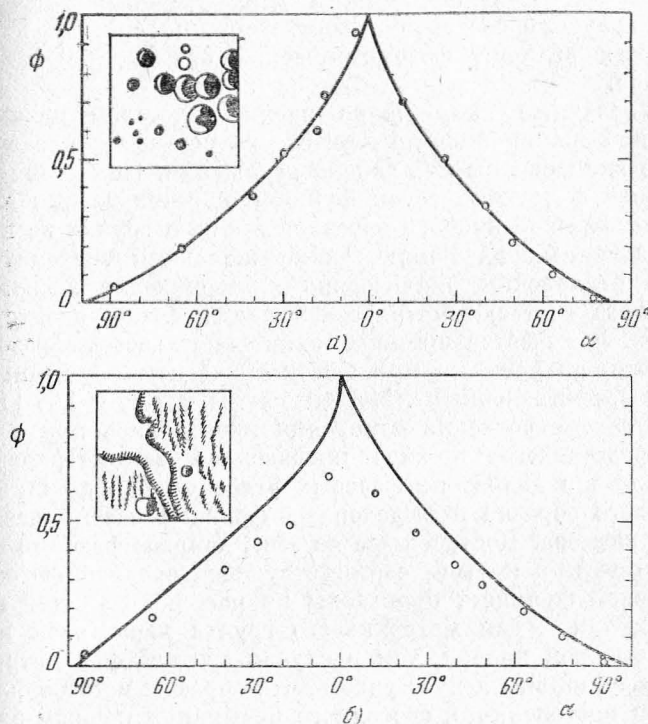


Рис. 55. Сравнение средней фазовой кривой с результатами измерений яркости двух различных по структуре участков.

зовая функция, соответствующая целому полушарию Луны (в случае определения интегральной фазовой яркости видимого диска Луны), повторяет закон отражения для элементарных площадок гораздо меньшего размера (в случае детальной фотометрии при наблюдениях с Земли). Более того, сравнение с результатами фотометрических измерений, проведенных непосредственно на поверхности Луны (съемки с борта «Лунохода-2») [123], показало хорошее согласие средней фотометрической функции

с реальным характером отражения света при разрешении на поверхности деталей сантиметрового и миллиметрового размеров. Среднеквадратичные отклонения при этом оказались равными для морских участков  $\pm 0,019$  в единицах фотометрической функции, а для материковых  $\pm 0,004$ . Эти значения составляют соответственно 4,6% и 1% от средних величин фотометрической функции в каждом случае.

Указанные наименьшие размеры деталей являются нижней границей фотометрического рельефа, определяющего немасштабность закона отражения. При сравнении средней фотометрической функции с результатами измерений фазовой яркости образцов лунного грунта из проб, доставленных на Землю, обнаруживаются систематические отклонения, значительно превышающие несоответствия за счет фотометрической ландшафтной неоднородности. В качестве примера можно использовать фазовые кривые, полученные при фотометрическом изучении образцов, доставленных АМС «Луна-16» и «Луна-20» [124]. Индикатометрические измерения проводились при  $\epsilon = 0^\circ$  и представлены в виде производной фотометрической функции в диапазоне фазовых углов от  $2^\circ,5$  до  $60^\circ$  для валового образца и выделенных фракций частиц различного размера. Построенные по этим данным фазовые кривые вместе с кривой, соответствующей средней фотометрической функции, приведены на рис. 56. Как для морского, так и для материкового грунта характерен иной ход фазовой кривой, чем в случае средней фотометрической функции. Следует учесть, что образцы изготовлялись путем постепенного, свободного насыпания ровным слоем просеянного грунта, т. е. какой-либо рельеф был искусственно устранен и главную роль в формировании яркости образца играли эффекты рассеяния на частицах грунта. Поскольку общий характер фазовой кривой сохраняется, можно предположить, что эффекты рассеяния на частицах вносят свой вклад в общую яркость измеряемых площадок и при других размерах отражающей поверхности. Однако во всех иных случаях, как уже указывалось, основное влияние на фазовые изменения яркости оказывает теневая функция, определяемая фотометрическим рельефом поверхности. Решающий вклад теневой функции в фазовые изменения яркости подчеркивает и такое извест-

ное явление, как отсутствие потемнения к освещенному краю видимого диска Луны. В таблице 22 этот эффект отражен равенством (в пределах ошибок построения индикатрисы) между яркостью лимба на экваторе интенсивности и яркостью в подсолнечной точке ( $\rho_{\epsilon=90^\circ} = \rho_{i=0^\circ}$ ) для одного и того же фазового угла.

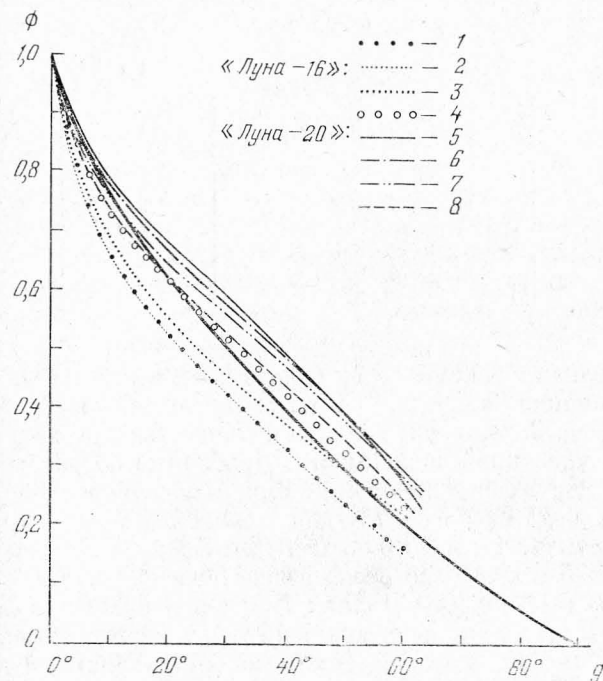


Рис. 56. Фазовые кривые для образцов мелкодисперсной составляющей грунта. Морской грунт («Луна-16»): 1 — валовой образец, 2 — фракция частиц крупности  $< 0,083$  мм, 3 —  $> 0,083$  мм, материковый грунт («Луна-20»): 4 — валовой образец, 5 — фракция частиц  $> 0,200$  мм, 6 —  $> 0,127$  мм, 7 —  $> 0,083$  мм, 8 —  $< 0,083$  мм.

В отдельных случаях структурные особенности лунного покрова могут влиять также на величину альбедо поверхностного вещества. Нарушение естественной структуры верхнего слоя, уплотнение грунта, приводит к осветлению поверхности. Это явление наглядно проявля-



лось при искусственном механическом воздействии на грунт в процессе работы автоматических станций и экспедиций на Луне. Однако, трудно назвать естественные процессы в лунной среде, которые могли бы приводить к подобному результату. Более вероятной причиной влияния на альbedo могут быть структурные изменения грунта, вызывающие уменьшения размера частиц. Лабораторные исследования аналогов лунного грунта показывают,

Таблица 24

Размер частиц (мм)	$\rho_0$
Валовый образец	9,0
>0,149	8,9
0,149—0,074	8,1
0,074—0,037	8,0
<0,037	7,9

что мелкая фракция пород одного и того же состава имеет повышенное альbedo. Опыты, проведенные Миннартом [125], позволили установить количественные характеристики указанной зависимости. Дробленые образцы базальтовой породы в этих опытах имели практически постоянное альbedo около 6—7% для различных фракций частиц размером от 1 мм до 0,05 мм. Для фракции частиц меньших 0,05 мм альbedo резко возрастало до 19,4%.

В естественных условиях Луны подобный эффект, вероятно, имеет лишь ограниченное распространение. Анализ образцов и исследования на поверхности показали высокую степень однородности гранулометрического состава лунного грунта. Мелкодисперсное вещество состоит из перемешанных частиц разной крупности при значительной доле более крупных обломков. Показательные результаты, полученные Хапке и др. в процессе исследования доставленных на Землю образцов лунного грунта [126]. Данные измерений альbedo различных гранулометрических фракций, выделенных путем просеивания, представлены в таблице 24.

В этом случае конкретного образца лунного вещества, альbedo практически остается постоянным с некоторым потемнением для более мелкой фракции.

Основным процессом изменения структуры отражающего слоя является метеоритная переработка, которая определяет степень зрелости реголита. Подобный процесс при длительных сроках экспозиции поверхностного вещества на Луне должен привести к полной структурной однородности по крайней мере первых миллиметров реголита, которые и определяют оптические свойства. В действительности наблюдаются значительные различия в альbedo материков и морей, а также отдельных образований внутри этих ландшафтных категорий. Следовательно, степень зрелости грунта не оказывает существенного влияния на альbedo обширных областей Луны, хотя можно допустить, что локальные проявления подобной связи для небольших участков поверхности имеют место.

В частности, не исключено, что причиной повышенной яркости светлых лучевых систем являются структурные или гранулометрические особенности поверхностного слоя.

Наиболее вероятной природой различия альbedo следует считать химический состав пород, что подтверждается некоторыми корреляционными зависимостями. В качестве характеристики различий химического состава можно использовать содержание отдельных элементов или окислов.

Орбитальная рентгеновская съемка с борта РК «Аполлон-15» и «Аполлон-16» позволила исследовать содержание алюминия по отношению к кремнию в поверхностном слое лунных пород для территорий, составляющей около 10% площади лунного шара [114]. Съемка выполнялась при разрешении на местности около 150 км. Для отдельных небольших районов авторы эксперимента провели подробное сопоставление величин Al/Si и альbedo в визуальной области спектра для одних и тех же площадок поверхности. Например, для района Болота Сна по 246 измерениям в отдельных точках поверхности была обнаружена зависимость вида [127]

$$\rho_0 = 6,9\bar{X} + 4,0 \quad (4.29)$$

где  $\rho_0$  — альbedo в процентах отражательной способности,  $\bar{X} = \text{Al/Si}$  — отношение интенсивностей излучения в характеристических линиях измеренного рентгеновского спектра для данных элементов. Зависимость (4.29) полу-

чена с коэффициентом корреляции 0,78 при уровне значимости 0,01.

Используя фотометрические измерения по наземным и космическим снимкам, описанные выше, можно получить величины истинного альbedo (приведенного к нуле-

Таблица 25

$\Delta\rho_0$	$n$	$(Al/Si)_{cp}$	$\sigma$	$\Delta\rho_0$	$n$	$(Al/Si)_{cp}$	$\sigma$
6—7	29	0,32	$\pm 0,049$	13—14	9	0,56	$\pm 0,040$
7—8	29	0,37	$\pm 0,039$	14—15	15	0,57	$\pm 0,058$
8—9	12	0,40	$\pm 0,040$	15—16	10	0,60	$\pm 0,037$
9—10	6	0,44	$\pm 0,022$	16—17	9	0,67	$\pm 0,059$
10—11	3	0,49	$\pm 0,030$	17—18	2	0,67	—
11—12	6	0,49	$\pm 0,030$	18—19	1	0,71	—
12—13	5	0,54	$\pm 0,037$				

вой фазе) для площадок с измеренными величинами Al/Si в пределах всей зоны рентгеновской съемки.

В таблице 25 приводятся количество отдельных измерений, средние значения Al/Si и их среднеквадратичные отклонения для соответствующих интервалов альbedo. Величины Al/Si даны в отношениях процентного содержания алюминия и кремния в породах [128].

По этим данным были найдены два уравнения линейной регрессии, определяющие зависимость между Al/Si и  $\lg \rho_0$  в двух разных диапазонах альbedo. При  $\rho_0 < 15,51$  указанная зависимость выражается видом

$$X = (0,74 \pm 0,23) \lg \rho_0 - 0,28, \quad (4.30)$$

где  $X = Al/Si$  — отношение процентного содержания (в массовых процентах) алюминия и кремния,  $\lg \rho_0$  — логарифм альbedo. Уравнение линейной регрессии (4.30) получено с коэффициентом корреляции 0,999 при уровне значимости 0,0001.

Для  $\rho_0 > 15,51$  зависимость относительного содержания алюминия и альbedo имеет такой вид:

$$X = (1,39 \pm 0,56) \lg \rho_0 - 1,06. \quad (4.31)$$

Уравнению (4.31) соответствует коэффициент корреляции 0,990, имеющий уровень значимости 0,009.

Таким образом, в исследованном интервале значений альbedo зависимость  $\lg \rho_0$  от Al/Si является линейной, но имеет излом при  $\rho_0 = 15,51$ . На рис. 57 приводится график, построенный по уравнениям (4.30) и (4.31). Значками показаны средние значения Al/Si для единичных интервалов  $\Delta\rho_0$  (см. таблицу 25) и соответствующие пределы среднеквадратичных отклонений. На рис. 57 показаны также данные сопоставления средних значений Al/Si и  $\lg \rho_0$  для различных районов работы автоматических аппаратов «Луноход-1» и «Луноход-2», мест посадок КА «Сервейор-5, -6, -7», «Луна-20», КК «Аполлон-14, -15, -16».

Положение этих точек на графике подтверждает, что несмотря на некоторые особенности, общий вид зависимости Al/Si и  $\lg \rho_0$  сохраняется и для сравнительно небольших по площади участков измерений относительного содержания алюминия в породах и альbedo поверхности.

Другим видом корреляционной зависимости альbedo от химического состава является эмпирическая зависимость  $\lg \rho_0$  от суммы процентного содержания (по массе) окислов  $Al_2O_3$  и  $SiO_2$ , найденная Липским и Новиковым [129] для материкового грунта Луны:

$$\lg \rho_0 = 0,02 \Sigma_1 - 0,41, \quad (4.32)$$

где  $\Sigma_1 = (K_{Al_2O_3} + K_{SiO_2})$  — сумма концентрации окислов алюминия и кремния (в процентах по массе),  $\lg \rho_0$  — логарифм альbedo в процентах отражательной способности.

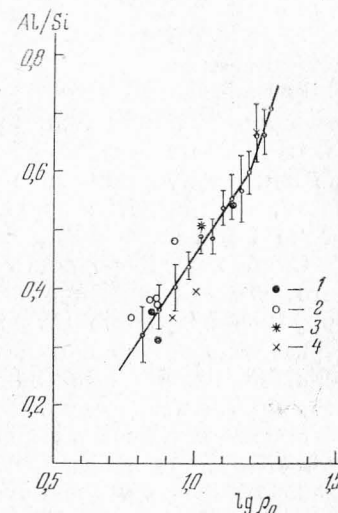


Рис. 57. Средняя зависимость альbedo (в логарифмической шкале) от относительного содержания алюминия. Данные по отдельным районам в местах посадок КА обозначены: 1 — «Сервейор-5, -6, -7», 2 — «Луноход-1, -2», 3 — «Луна-20», 4 — «Аполлон-14, -15, -16».

С использованием линейных эмпирических зависимостей химических составляющих минералов, приводимых в [129], по формуле (4.32) можно, зная альбедо и Al/Si для исследуемой области, вычислять концентрации основных окислов с точностью до десятых долей процентного содержания. Авторы полагают, что зависимость (4.32) справедлива и для большинства морских участков лунной поверхности.

С формальной точки зрения полученные зависимости относятся только к тонкому верхнему слою лунного грунта. Отраженное излучение в видимой области спектра, так же как и флуоресцентное излучение в рентгеновской области, определяется верхним слоем вещества толщиной менее 1 мм.

Однако неоднородность поверхностной структуры лунного реголита практически приводит к тому, что регистрируемое излучение (отраженное и флуоресцентное) содержит информацию о материале более глубоких слоев, обнаженном или вынесенном на поверхность кратерообразующими процессами.

Магнитохимический анализ районов посадки экспедиций «Аполлон» показал, что во всех случаях данные по альбедо хорошо коррелируют с петрологией, химическим составом, в частности, с отношением Al/Si и с магнитными свойствами вещества [130]. Из диаграмм парамагнитной восприимчивости и намагниченности насыщения, которые используются для классификации лунных образцов, следует, что в основном реголит формируется процессами перемешивания. Поэтому наблюдаемые зависимости закономерно относить по крайней мере к толщине всего слоя реголита.

Но можно показать также, что вариации альбедо значительных по площади областей отражают особенности глубинного (до нескольких десятков километров) строения лунной оболочки. Известно, что в глобальном масштабе области распространения лунного вещества более высокой плотности приходится на крупные понижения поверхности. В [58] было установлено, что уровень областей масконов в среднем на 4 км ниже уровня материков (см. гл. II). Если между отражательной способностью вещества и абсолютными высотами соответствующих структур существует корреляция, связь поверхностных

характеристик с глубинным строением может оказаться реальной. На основании яркостных измерений в западной части Океана Бурь по снимкам АМС «Зонд-8» выявилось, что вдоль нескольких профилей, протяженностью 500—600 км каждый, существует корреляционная зависимость альбедо и абсолютных высот при коэффициенте корреляции 0,79 [131]. Аналогичный результат получен при исследовании изменений альбедо вдоль профиля съемки рельефа лазерным альтиметром в области от 140° в. д. до 160° з. д. (включая видимое полушарие). Вычисление коэффициента корреляции по отсчетам, равномерно распределенным вдоль профиля, дало значение  $0,798 \pm 0,051$  [132]. Очевидно, что небольшие образования, такие как отдельные яркие кратеры, ореолы, лучевые системы и другие подобные объекты с несомненно поверхностной природой изменения альбедо, являются исключением из общей закономерности.

Многочисленные исследования последних лет подтвердили, что спектральное альбедо лунной поверхности также тесно связано с химическим составом пород. Крупный комплекс работ в этом направлении выполнен Маккордом и др. [133]. Было обнаружено, что наклоны спектральных кривых в синюю область и глубина полосы поглощения на длине волны 0,95 мкм непосредственно коррелируют с данными о составе пород. Сопоставление спектральных измерений с результатами химического анализа образцов лунного вещества позволило отработать методику определения содержания титана в породах по величине концентрации  $TiO_2$  с точностью до 1%, используя наклон спектральной кривой в области от 0,4 до 0,56 мкм.

Глубину полосы поглощения, оцениваемую как  $I(0,95 \text{ мкм})/I(0,56 \text{ мкм})$ , связывают с содержанием пироксенов в грунте.

Поскольку в области наклона спектральной кривой 0,40—0,56 мкм зависимость интенсивности излучения от длины волны линейна, соответствующую характеристику можно представить отношением:

$$B = \frac{I(0,40 \text{ мкм})}{I(0,56 \text{ мкм})}, \quad (4.33)$$

которое служит обоснованием для выбора параметров спектральной съемки. Линский и Новиков [129] при-



водят несколько эмпирических зависимостей, позволяющих интерпретировать колориметрические измерения. Кроме отношения (4.33), довольно часто колориметрической характеристикой служит колор-индекс

$$B_1 = \frac{I(0,65 \text{ мкм})}{I(0,38 \text{ мкм})}. \quad (4.34)$$

Зависимость между  $B$  и  $B_1$  линейна:

$$B_1 = -1,6 B + 2,31. \quad (4.35)$$

Если обозначить

$$\Sigma_2 = K_{\text{MgO}} - K_{\text{TiO}_2},$$

то эмпирическая зависимость колор-индекса от разности концентраций окислов магния и титана (по массовым процентам) имеет вид

$$\lg B_1 = -0,076 \Sigma_2 + 0,35. \quad (4.36)$$

Таким образом, выражения (4.33)—(4.36) устанавливают зависимость спектральных характеристик лунного вещества от химического состава пород по содержанию окислов  $\text{TiO}_2$  и  $\text{MgO}$ .

С химическим составом лунного вещества можно связать и некоторые поляризационные свойства поверхности. Как известно, максимальная степень поляризации в коротковолновой области спектра тесно связана с величиной альbedo лунной поверхности. В [129] по данным Дольфуса приводится эмпирическая зависимость

$$\lg \rho_0 = -0,724 \lg P_m + 0,19, \quad (4.37)$$

где  $P_m$  — максимальная степень поляризации.

Совместное использование формул (4.32) и (4.37) позволяет рассматривать зависимость максимальной степени поляризации от суммы окислов  $\Sigma_1$ . Кроме того, эмпирически найденное соотношение

$$K_{\text{FeO}} = -0,725 \Sigma_1 + 56,5$$

непосредственно связывает степень поляризации с наличием полупрозрачных окислов  $\text{FeO}$ , если его использовать вместе с выражениями (4.32) и (4.37).

## 5. Карты оптических характеристик поверхности Луны

Результаты фотометрических, колориметрических и поляриметрических исследований лунной поверхности в последнее время часто представляются в виде карт. Несомненным преимуществом картографической интерпретации оптических свойств Луны является сочетание детальности с широким территориальным охватом.

Наиболее проста методика преобразования информации о физических свойствах поверхности в картографические образы в случае использования интенсивности излучения как основного параметра. Как правило, содержанием карт являются изолинии, соответствующие распределению интенсивности излучения, которые изображаются в сочетании с координатной селенографической сеткой, либо на селенографических картах общего назначения, как на основе. Если представляются результаты фотометрических измерений, конечным продуктом являются карты яркости или карты альbedo. При сопоставлении интенсивности излучения в различных участках спектра результатом картографического представления будут спектрально-зональные карты, а измерение интенсивности поляризованного света позволяет построить карты степени поляризации. Очевидно, что в основе подобных карт должны лежать измерения площадей, получаемые путем анализа всей площади снимка, сканирования видимого диска Луны или изучаемых участков с применением фотоэлектрических устройств и т. п.

Наиболее полного охвата территории лунного шара измерениями альbedo поверхности удалось достигнуть при построении общей карты альbedo Луны [132]. Исходными материалами общей карты альbedo послужили наземные наблюдения и космические снимки лунной поверхности. Западное полушарие Луны отражено при малых фазовых углах на снимках, доставленных на Землю автоматической станцией «Зонд-6». Для альбедных измерений из этой серии были отобраны два снимка с близкими моментами экспозиции, содержащие изображения полного диска Луны при селеноцентрическом фазовом угле  $\alpha = 12^\circ, 0$ . Съемка велась с расстояния 6,10 лунных радиусов. Область восточного полушария исследовалась по снимку № 61-8795 из серии, доставленной на Землю эки-

пажем КК «Аполлон-13» с контролем измерений по снимку 61-8765 из той же серии. Оба снимка также содержат изображение полного диска Луны при  $\alpha = 4^{\circ},0$  и  $\alpha = 10^{\circ},0$  соответственно. Расстояние съемки в первом случае составляло 4,11 лунных радиуса, во втором — 3,01 лунных радиуса. Поскольку космические снимки не покрывают центральную часть видимого полушария, возникла необходимость использовать материалы наземных съемок. Из атласа изофот [117] была выбрана карта, построенная по изображению диска Луны при фазе  $\alpha = 2^{\circ},3$ . Снимки западного и восточного полушарий были прокалиброваны с помощью объектов из фотометрического каталога [119]. Средняя квадратичная ошибка фотометрической калибровки составила для области западного полушария  $\pm 0,46$ , для восточного полушария  $\pm 0,44$  в единицах яркостного фактора (процентах отражательной способности). Таким образом, все три вида исходных материалов были сведены в одну фотометрическую систему. Снимки АМС «Зонд-6» и КК «Аполлон-13» были обработаны эквиденситометрическим фотографическим методом. Полученные изолинии на основании фотометрической калибровки преобразованы в изофоты, а затем с использованием данных об эффекте опозиции (см. выше) редуцированы к истинному полнолунию. Аналогичным образом к истинному полнолунию была приведена система изофот на карте из атласа [117]. Окончательно изолинии истинного альbedo проведены с интервалом  $\Delta\rho_0 = 1,0$ . Затем все изолинии альbedo были перенесены на общую картографическую основу, в качестве которой использована равновеликая псевдоцилиндрическая проекция Мольвейде, отображающая всю поверхность шара. В зонах перекрытий центральной области (видимое полушарие) с изображениями западного и восточного полушарий, которые достигали  $\sim 40\%$  в каждом случае, одноименные изолинии совпали с точностью до ошибок фотометрической калибровки. Это обстоятельство указывает на высокую внутреннюю точность построения карты. Оригинал карты имеет масштаб 1:10 000 000 (по экватору). На рис. 58 карта показана в уменьшенном масштабе. Общий диапазон значений альbedo, приводимых на карте, заключается в пределах от  $< 6$  до  $> 18\%$ . Площадь, охваченная измерениями, составляет  $80\%$  всей поверхности лунного

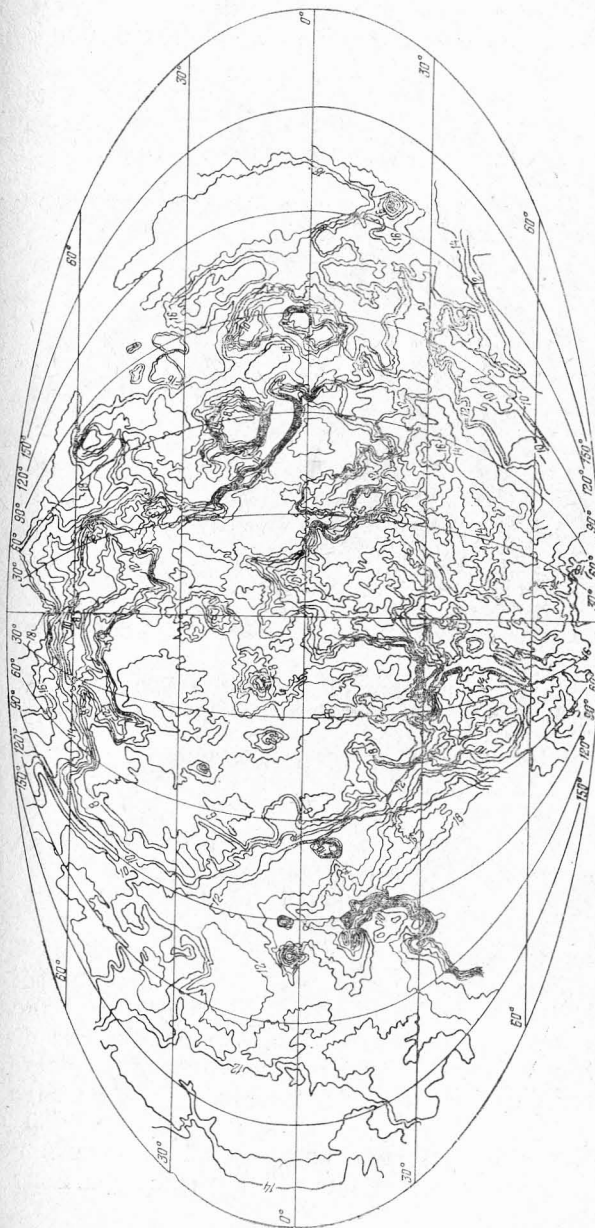


Рис. 58. Общая карта альbedo поверхности лунного шара.



шара. Впервые вместе с видимым полушарием здесь переданы подробности альbedo лунной поверхности на обратном полушарии.

Карты, отображающие только видимое полушарие Луны, построены в более крупных масштабах и передают вариации альbedo с большими подробностями.

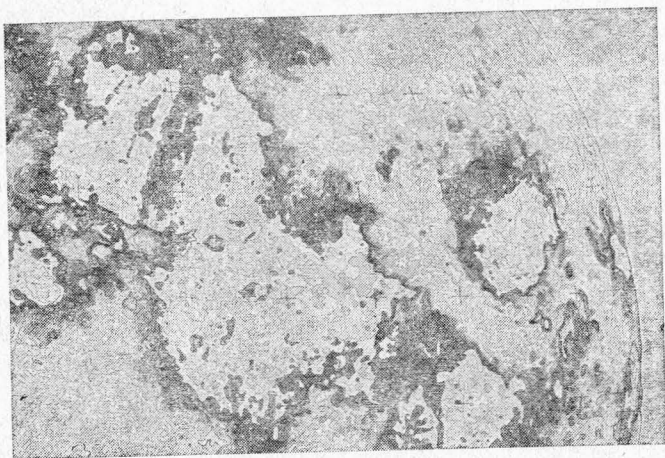


Рис. 59. Фрагмент карты альbedo Пона и Вилдея [134]. (Море Ясности, Море Спокойствия, Море Кризисов).

Пон и Вилдей по снимку, полученному при фазовом угле  $\alpha = 1^{\circ},5$  в фотометрической системе, близкой к визуальной, построили карту нормального альbedo видимого полушария в масштабе 1:5 000 000 (фотоэлектрическая — фотографическая карта нормального альbedo Луны) [134]. Одновременно с фотографированием проводилось фотоэлектрическое сканирование диска Луны, послужившее впоследствии основанием для калибровки снимка. Абсолютная привязка яркости была проведена по фотоэлектрическим наблюдениям звезд. Редукция к полнолунию осуществлена в предположении, что на участке фазовых углов от  $1^{\circ},5$  до  $0^{\circ}$  увеличение яркости достигает 5%. Общий диапазон альbedo, составлявший от 7 до 24%, разделен на 20 интервалов при неравномерной шкале альbedo. Карта построена во внешней перспективной проекции. На рис. 59 показан фрагмент фото-

электрической — фотографической карты нормального альbedo.

В том же масштабе в ортографической проекции Евсюковым построена карта альbedo видимого полушария Луны [135]. Фотометрической обработке методом фотогра-

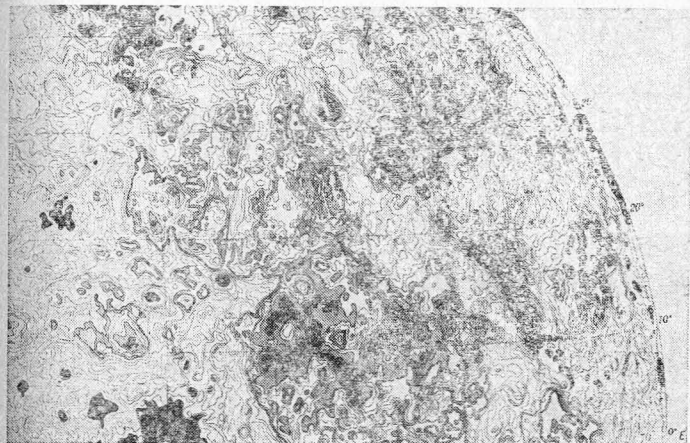


Рис. 60. Фрагмент карты альbedo, составленной Евсюковым [135]. (Область видимого полушария Луны та же, что на рис. 59.)

фической эквидистантной проекции был подвергнут снимок, полученный в области спектра  $0,62 \text{ мкм}$  при фазовом угле  $2^{\circ},0$ . Общий диапазон альbedo карты, составляющий от 7,1% до 23,2%, разбит на 25 переменных интервалов. В области морей изолинии альbedo проведены с большей частотой, чем в материковых областях. Редукция к истинному полнолунию не проводилась. На рис. 60 приведен фрагмент карты альbedo видимого полушария Луны.

Описанные карты альbedo отличаются характером исходных материалов, методикой построения и фотометрическими системами. Только общая карта альbedo поверхности Луны приведена к истинному полнолунию на основе достоверных измерений эффекта опозиции. Редукция к истинному полнолунию карты Пона и Вилдея основана на произвольном предположении, а в случае карты Евсюкова не производилась вовсе. Несколько различных спек-



тральные области, в которых получены изображения, послужившие исходными для составления карт. Все эти особенности, очевидно, приводят к различиям в значениях альbedo, относящихся к одному и тому же участку поверхности, на разных картах. Езерский и др. предпри-

Т а б л и ц а 26

Карты	$k$	$\Delta\rho_0$
(КАВПЛ)—(ФФКНАЛ)	$1,21\pm 0,04$	$-2,2\pm 0,2$
(ФКИ)—(ФФКНАЛ)	$1,21\pm 0,04$	$-4,4\pm 0,05$
(ОКАЛ)—(ФФКНАЛ)	$1,19\pm 0,01$	$-3,5\pm 0,05$
(ФКИ)—(КАВПЛ)	$1,03\pm 0,03$	$-2,2\pm 0,05$

няли попытку сравнить описанные выше карты альbedo и найти уравнения регрессии, позволяющие переходить от одной системы величин альbedo к другой [136]. Карты сравнивались по сопоставлению значений альbedo в 320 точках, равномерно распределенных в области видимого полушария Луны. Уравнения линейной регрессии имеют вид

$$\rho_0^{(1)} = k\rho_0^{(2)} + \Delta\rho_0,$$

где  $\rho_0^{(1)}$  — значение альbedo для одной из сравниваемых карт,  $\rho_0^{(2)}$  — соответствующее ему значение альbedo на другой карте,  $k$  и  $\Delta\rho_0$  — параметры линейного уравнения регрессии. В случае полного соответствия систем величин альbedo  $k = 1,0$ ,  $\Delta\rho_0 = 0$ . В таблице 26 приводятся значения параметров уравнения регрессии для случая попарного сравнения четырех карт: общей карты альbedo Луны (ОКАЛ), карты альbedo видимого полушария Луны (КАВПЛ), фотоэлектрической-фотографической карты нормального альbedo Луны (ФФКНАЛ) и фотометрической карты изофот (ФКИ) из атласа [117], послужившей основой для построения общей карты альbedo Луны на область видимого полушария.

Общая карта альbedo Луны и фотометрическая карта изофот при сравнении оказались полностью совпадающими, что вполне естественно, поскольку они имеют общую фотометрическую основу. Шкала альbedo этих карт

смещена в сторону меньших значений по сравнению с картами Пона и Виддея и Евсюкова, что, вероятно, можно объяснить различием степени приведения яркостных систем к истинному полнолунью. В то же время, как показывают измерения отражательной способности лунных пород в естественных условиях по сравнению с магнийвым экраном как стандартом яркости [123], шкала альbedo общей карты и карты изофот значительно ближе к реальным значениям альbedo на Луне.

Примером крупномасштабных карт альbedo, составляемых на районы Луны, представляющие особый интерес, может служить карта альbedo Моря Восточного [137]. Карта построена по снимку, полученному АМС «Зонд-6», прошедшему обработку по методу фотографической эквиденситометрии. Фотометрическая система карты, калибровка, стандартизация и редукция к истинному полнолунью аналогичны использованным при построении общей карты альbedo Луны. Изолинии альbedo проведены через 0,5% отражательной способности при общем диапазоне от  $< 6$  до  $> 11,5\%$ . Оригинал карты составлен в масштабе около 1:1 500 000. На рис. 61 в уменьшенном масштабе показаны изолинии альbedo (без координатной сетки). Исследованная территория ограничена внешним кольцом Гор Рук, имеющим в диаметре около 600 км. Внутри этого кольца располагается центральная морская равнина и отдельные участки морей между грядками Гор Рук: Море Весны и Море Мирное. Поскольку основной интерес при составлении карты представляла фотометрическая структура образований морского типа, подробности альbedo материковой поверхности при  $\rho_0 > 11,5$  не показаны.

Спектрозональные карты, составляемые, как правило, по двум изображениям, получаемым в разных участках спектра, показывают изменение цвета поверхности с помощью системы изолиний колор-индексов, т. е. отношений интенсивности излучения в выбранных длинах волн. На топографической основе одного из листов Полной карты Луны масштаба 1:5 000 000 была построена спектрозональная карта по снимкам Луны в участках спектра 0,38 мкм и 0,64 мкм [138]. В момент экспозиции селеноцентрический фазовый угол составлял  $0^\circ,95$ . Фотометрическая обработка пары негативов проведена методом

фотографической эквиденситометрии. Спектрональная карта построена для значений

$$C = \frac{\rho(0,64 \text{ мкм})}{\rho(0,38 \text{ мкм})}$$

с проведением изолиний через 0,1. Уменьшенный вариант карты приведен на рис. 62.

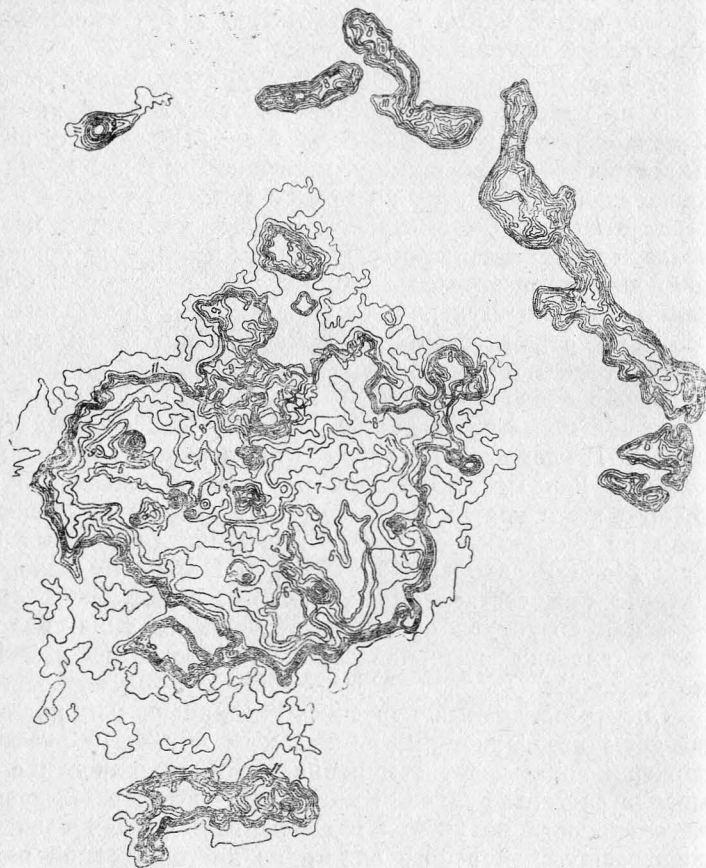


Рис. 61. Карта альbedo Моря Восточного.

Вся территория обращенной к Земле стороны Луны изображена на карте цвета видимого полушария Луны, составленной Евсюковым [139]. При построении карты

использованы снимки Луны в участках спектра 0,62 мкм и 0,38 мкм, полученные при фазовом угле  $2^\circ,0$ . Цветоделительное изображение было получено путем сложения позитива снимка в красной области с негативом снимка в синей области, причем равенство контрастов контролировалось по одинаковому наклону характеристических кривых. Таким образом, плотность цветоделительного



Рис. 62. Спектрональная карта Моря Дождей. Области равных значений  $C$  обозначены: 1 — 1,2; 2 — 1,1; 3 — 1,0; 4 — 0,9; 5 — 0,7; 6 — 0,6.



изображения пропорциональна величине колор-индекса, равного

$$C = \frac{\rho(0,62 \text{ мкм})}{\rho(0,38 \text{ мкм})}.$$

Изолинии колор-индекса были получены методом фотографической эквиденситометрии. Карта построена в



Рис. 63. Фрагмент карты цвета, составленной Евсюковым [139].

ортографической проекции. Масштаб карты 1:5 000 000. На рис. 63 показан фрагмент карты цвета видимого полушария Луны.

Значительная часть видимого полушария Луны отображена на спектральных фотокартах, получаемых с помощью видиконной системы Маккордом и др. [133]. Плотность изображения спектральных фотокарт передает вариации колор-индексов двух видов:

$$C_1 = \frac{\rho(0,35 \text{ мкм})}{\rho(0,56 \text{ мкм})}, \quad C_2 = \frac{\rho(0,95 \text{ мкм})}{\rho(0,56 \text{ мкм})}.$$

Разрешение на поверхности спектральных карт достигает 1—2 км. Карты позволяют передать разницу в цвете, меньшую, чем в 1%.

Многочисленные наблюдения лунной поверхности с помощью поляровизора-дискриминатора, проводившиеся

Джапашвили и др. [140], позволили составить серию карт максимальной поляризации участков лунной поверхности. Сканирующее устройство в системе поляровизора развертывает изображение с разрешением около 300 строк на диск Луны. Затем световой поток поступает в анали-

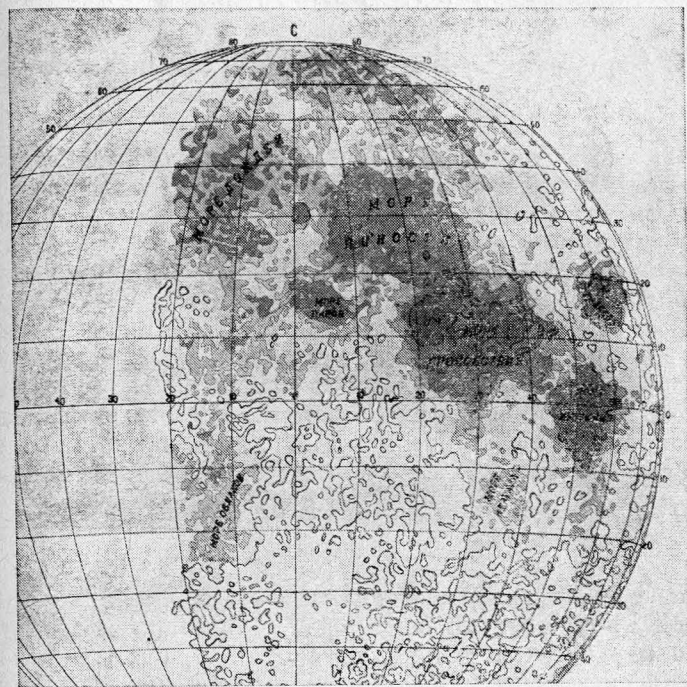


Рис. 64. Карта поляризации, составленная Джапашвили [141].

зирующее устройство, с выхода которого снимается сигнал, пропорциональный исследуемой характеристике потока: степени поляризации, углу плоскости поляризации или яркости. Снимаемый с выхода анализирующего устройства сигнал модулирует яркость луча электронно-лучевой трубки и таким образом на экране трубки формируется поляризационное изображение Луны.

На рис. 64 представлена часть поляриметрической карты Луны [141], показывающей распределение степени



поляризации света лунной поверхностью при фазовом угле около  $70^\circ$ . Карта построена в масштабе 1:20 000 000 в ортографической проекции. Изолинии соответствуют степени поляризации в процентах и проведены с интервалом 1,4%. Общий диапазон значений степени поляризации составляет от 2,0% до 9,0%.

### 6. Картографическое моделирование особенностей строения лунной поверхности

Картографическое математическое моделирование широко применяется в географии, геофизике и климатологии. Основой этого метода является построение пространственных математических моделей процессов или явлений по данным, почерпнутым из содержания различных карт и на базе карт [100]. Один или несколько параметров, которые можно рассматривать как функции пространства или времени, изображаются аппроксимирующей поверхностью. Уравнением подобной поверхности часто служит разложение функции в ряд. Например, пространственные вариации некоторого параметра  $M$  можно представить в виде степенного ряда:

$$M = f(x, y) = A + Bx + Cy + Dx^2 + Exy + \\ + Fy^2 + Gx^3 + \dots + Tx^ny^n, \quad (4.38)$$

где  $x, y$  — координаты точек на карте в любой координатной прямоугольной системе,  $M$  — значения моделируемого параметра в данных точках,  $A, B, C, \dots$  — неизвестные коэффициенты разложения, определяемые обычно из решения системы уравнений с использованием способа наименьших квадратов.

Степень многочлена (4.38) определяет точность аппроксимации пространственных вариаций параметра моделирующей поверхностью.

В лунных исследованиях картографическое моделирование еще не получило столь широкого распространения, однако, отдельные примеры его использования подтверждают перспективность метода.

При однопараметрическом моделировании результатом обычно является карта изолиний, которыми передается в плоском изображении аппроксимирующая поверхность.

Моделирование физической поверхности Луны с помощью разложения по сферическим функциям описано в главе II. Этот же прием можно использовать и в случае моделирования некоторых физических свойств лунного покрова. В работе Грина [142] рассмотрены разложения по сферическим функциям альbedo видимого полушария Луны и плотности распределения тепловых аномалий.

По данным Саари и Шортхилла [117] на лунном диске Грин выбрал 1600 точек, равномерно распределенных по поверхности. Для каждой из точек было составлено уравнение разложения, по виду аналогичное (2.1):

$$\rho_0(\lambda, \beta) = \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{m=0}^{m=n} (C_{nm} \cos m\lambda + S_{nm} \sin m\lambda) P_{nm}(\sin \beta). \quad (4.39)$$

Величины и выражения, входящие в правую часть уравнения (4.39), те же, что и в (2.1) и описаны в главе II. Коэффициенты разложения были определены с применением способа наименьших квадратов, что позволило рассчитать и построить системы изолиний различных порядков. Анализ аппроксимирующей поверхности второго порядка (в разложении сохранены гармоники при  $n=2$ ) подтверждает отсутствие потемнения к краю видимого диска в полнолуние. Изолинии не обнаруживают радиальной деформации аппроксимирующей поверхности от центра диска к краю, тогда как общее распределение альbedo по квадрантам в форме изолиний проявляется довольно четко. На рис. 65 приводится более подробная карта изолиний, при расчете которых в разложении сохранено девять гармоник.

Распределение на видимом полушарии тепловых аномалий получено также по данным Саари и Шортхилла. Вычисления проведены по 1011 отдельным точкам, в которых замечены отклонения от средней тепловой инерции лунной поверхности. Аппроксимирующая поверхность второго порядка, моделирующая распределение тепловых аномалий, описывается уравнением вида (4.39):

$$N_r(\lambda, \beta) = \alpha_{00} + \alpha_{10} \sin \beta + \alpha_{11} (\cos \lambda \cos \beta) + \\ + \alpha_{20} (3/2 \sin^2 \beta - 1/2) + \alpha_{21} (3 \sin \lambda \cos \beta \sin \beta) + \\ + \alpha_{22} (3 \cos 2\lambda \cos \beta), \quad (4.40)$$

где

$$\begin{aligned} \alpha_{00} &= 4,2, & \alpha_{20} &= -2,82, \\ \alpha_{10} &= 0,401, & \alpha_{21} &= 0,231, \\ \alpha_{11} &= -0,042, & \alpha_{22} &= 5,63. \end{aligned}$$

Вся поверхность видимого диска Луны была разделена на 380 равных по площади участков и поверхностная плот-

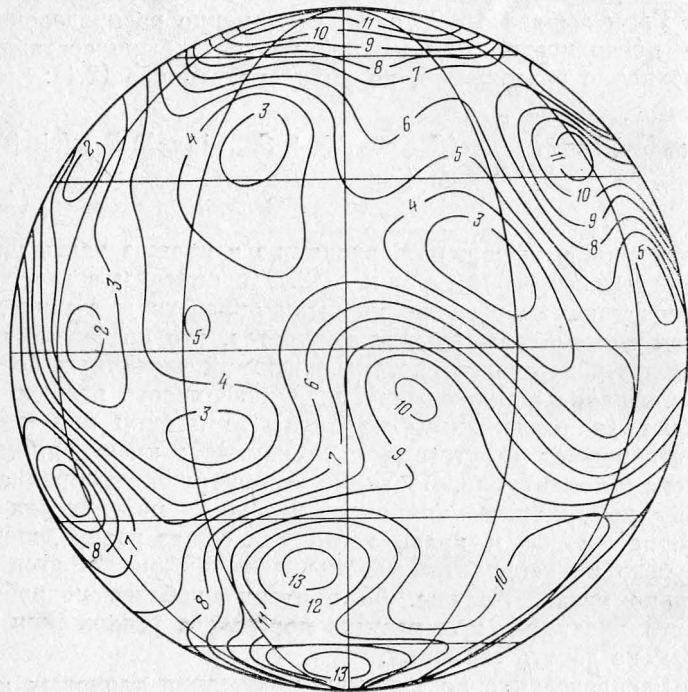


Рис. 65. Карта альbedo видимого полушария, построенная с помощью разложения функции альbedo по сферическим функциям при сохранении девяти гармоник.

ность тепловых аномалий  $N$ , определена как число точек внутри соответствующего участка.

Характер поверхности второго порядка показывает радиальное изменение температуры поверхности от центра к краю диска. Температуры у лимба отличаются примерно в 0,7 раз. Поскольку тепловые аномалии выделя-

лись по температурам точек поверхности в момент полной фазы лунного затмения, можно предположить, что поверхность второго порядка моделирует распределение температуры по видимому диску перед затмением. В то же время, вся система концентрически расположенных

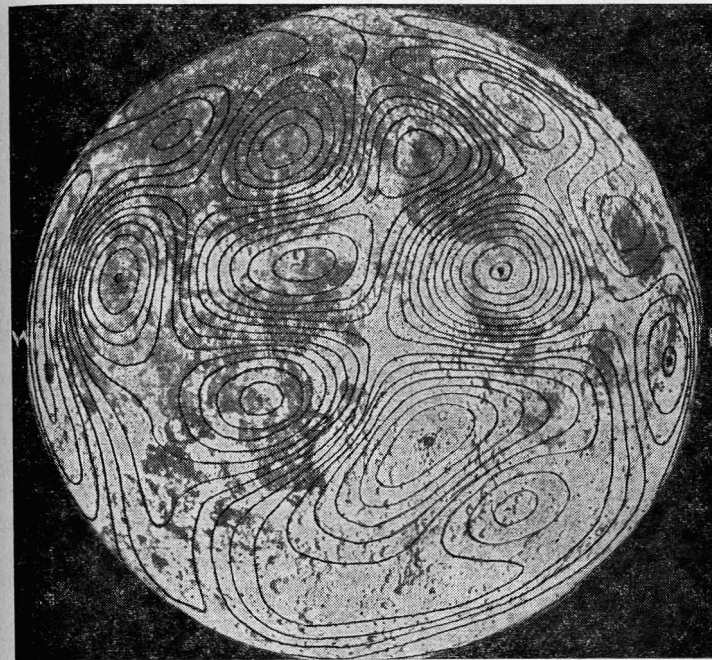


Рис. 66. Изолинии плотности тепловых аномалий на видимом полушарии Луны.

изолиний в рассматриваемом случае сдвинута к северу, что, вероятно, отражает динамику прохождения земной тени по лунному диску.

Более подробная система изолиний поверхностной плотности тепловых аномалий показана на рис. 66. При вычислениях изолиний сохранены гармоники до девятого порядка. Анализ этой аппроксимирующей поверхности приводит к следующим выводам: наиболее высокая плот-



ность тепловых аномалий приходится на области лунных морей, а низкая плотность аномалий соответствует лунным материкам.

Многопараметрическое моделирование, как правило, приводит к районированию поверхности, т. е. выделению замкнутых ареалов, внутри которых распространена определенная совокупность признаков.

Одним из примеров многопараметрического моделирования может служить районирование поверхности по фотометрическим параметрам [416]. Если в качестве аналитического выражения закона рассеяния света лунной поверхностью принять формулу Ханке, то параметры этой формулы могут послужить количественной характеристикой фотометрических признаков поверхности. Согласно формулам (4.25) — (4.28) такими параметрами являются:  $\rho_0$  — альbedo,  $h$  — «фактор упаковки»,  $f$  — часть поверхности, занимаемая углублениями,  $\gamma$  — максимальный угол внутренних склонов углублений. При совместной обработке нескольких фаз возникает возможность составления системы нелинейных уравнений, в которых неизвестными являются упомянутые параметры формулы Ханке, а измеренные значения яркости и угловых параметров фотометрической функции входят в качестве коэффициентов при неизвестных. Решение подобных систем для точек, равномерно распределенных внутри исследуемой области, дает возможность получить распределение значений каждого параметра, а затем выделить районы с комплексными характеристиками.

Число неизвестных параметров при использовании формулы Ханке можно сократить. Анализ функции  $L(l, g)$ , заданной выражением (4.28), показывает, что при малых значениях  $f$  вариации угла  $\gamma$  не сказываются на величине самой функции, т. е. характеристика рельефа становится неопределенной. Поэтому более целесообразно величину  $f$  считать наперед заданной и выбирать ее значение близким к единице. Физически это будет означать выявление форм рельефа, имеющих повышенную концентрацию на единицу площади для исследуемой поверхности. Тогда неизвестными в уравнениях, образованных из формулы Ханке, останутся  $\rho_0$ ,  $h$ ,  $\gamma$  и для их определения нужно иметь по крайней мере измерения на трех различных фазах.

В рассматриваемом примере для решения систем уравнений были использованы результаты фотометрической обработки трех снимков восточного сектора обратной стороны Луны из серии, переданной на Землю АМС «Зонд-3». Исследуемая область была разделена на 403 участка равной площади с поперечником каждого около 90 км. Измеренные величины относились к центру участка. В результате для каждой точки (центра участка) были образованы три группы величин  $\rho$ ,  $i$ ,  $\varepsilon$ ,  $A$ . После вычисления  $l$  и  $g$  и определения коэффициентов  $K_1$ ,  $K_2$ ,  $j$ ,  $h$  можно составить систему уравнений вида (4.25):

$$\left. \begin{aligned} \rho_0 \Sigma_1(g) B_1(h) L_1(\gamma) - \rho_1 &= 0, \\ \rho_0 \Sigma_2(g) B_2(h) L_2(\gamma) - \rho_2 &= 0, \\ \rho_0 \Sigma_3(g) B_3(h) L_3(\gamma) - \rho_3 &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (4.41)$$

Решение системы нелинейных уравнений (4.41) проводилось путем последовательных приближений по методу скорейшего спуска (метод градиента). В качестве первого приближения принимались значения параметров фотометрической функции, принятые для среднего закона отражения:  $\rho_0 = 12,4\%$ ,  $h = 1,0$ ,  $\gamma = 75^\circ$ . Значение  $f$  было принято постоянным и равным 0,75. Как правило, для получения значений неизвестных требовалось не более 2—3 приближений. Ошибки определения неизвестных, заданные предельными расхождениями двух последних приближений, оказались равными:  $\Delta\rho_0 = \pm 0,05$ ,  $\Delta h = \pm 0,05$ ,  $\Delta\gamma = \pm 3^\circ$ . Однако найденные значения альbedo  $\rho_0$  в данном случае следует рассматривать лишь как приближенные, поскольку диапазон фазовых углов для использованных снимков не содержал величин  $g$ , близких к  $0^\circ$ , при которых определение  $\rho_0$  было бы более уверенным.

Результаты определения фотометрических параметров из решения системы уравнений (4.41) были нанесены на плановую основу листов 1 и 4 «Полной карты Луны». Интервал значений устанавливался равным двойной ошибке определения соответствующих величин. Сопоставление распределения фотометрических характеристик выделило шесть типов поверхности, краткое описание которых помещено в таблице 27, а расположение показано на рис. 67.



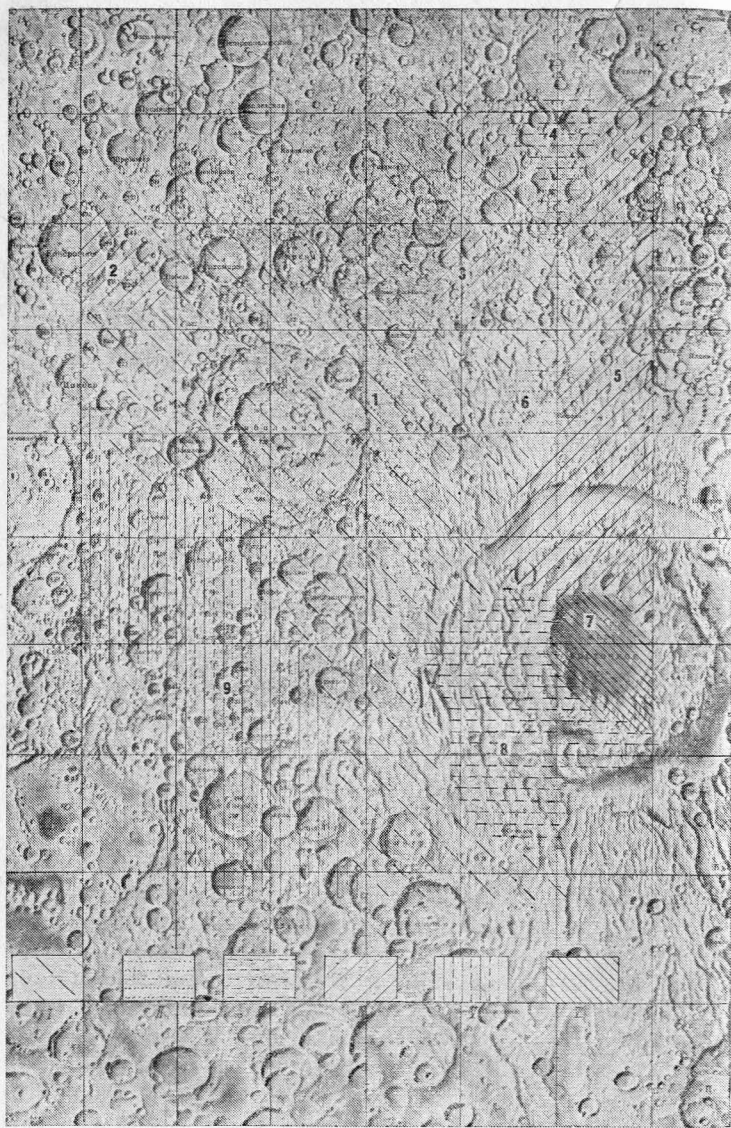


Рис. 67. Районирование области западного полушария Луны (обратная сторона) по фотометрическим параметрам.

Выделение областей с различными фотометрическими признаками в данном случае является типологическим районированием поверхности.

I тип характерен для средней лунной поверхности по параметрам фотометрической функции и для средней материковой поверхности по альбедо.

Т а б л и ц а 27

Тип поверхности	Альбедо $\rho_0$			Фотометрическая функция							
	ниже среднего	среднее	выше среднего	$h$			$\gamma$				
				ниже среднего	среднее	выше среднего на 15%	более 15%	ниже среднего	среднее	выше среднего на 15%	более 15%
I		+			+				+		
II		++				+			++		
III		+++				+					
IV		+++				+				++	
V			+					+			
VI	+			+					+		+

Согласно приводившейся ранее зависимости параметра  $h$  от плотности покровного вещества для I типа поверхности характерна пористость, составляющая около 70%. Эта величина близка к значениям пористости, соответствующей плотности верхнего слоя грунта в районах исследованных непосредственно на Луне. Угол  $\gamma = 75^\circ$  для I типа поверхности, вероятно, характеризует микрорельеф поверхности, поскольку максимальным значением угла внутреннего склона малых кратеров, имеющих форму квазисферического сегмента, является величина  $35-40^\circ$  (см. главу II). Не исключено, что указанное значение  $\gamma$  может относиться также к поверхности, иссеченной трещинами и бороздами, имеющими форму, близкую к усеченному цилиндру с отношением глубины к ширине около 0,4. Во всех случаях углубления должны занимать 0,75 сечения поверхности вдоль направления падающих лучей Солнца.

II тип отличается несколько замедленным относительно среднего ростом яркости в области малых фазовых углов. Эту особенность можно интерпретировать как при-

знак небольшого уменьшения пористости поверхностного вещества, что сочетается с более высоким альбедо района.

III тип имеет несколько большую по сравнению со средней крутизну фазовой кривой в области фазовых углов, близких к  $90^\circ$ , что можно связать с повышенной изрытостью местности в области мезорельефа. Крупномасштабные снимки района подтверждают это предположение, поскольку показывают ландшафт, сильно иссеченный линейными формами рельефа, похожими на борозды и трещины.

IV тип обладает обеими описанными особенностями и соответствующая ему фотометрическая функция отличается по крутизне от средней при всех значениях фазовых углов исследованного диапазона  $0-70^\circ$ .

V тип выделяется резким возрастанием крутизны фотометрической функции в области больших значений фазовых углов.

IV и V — фотометрические типы поверхности — указывают как на уменьшение пористости вещества верхнего слоя, так и на увеличение изрытости для более крупных деталей рельефа. Особенного внимания заслуживает увеличение параметра  $\gamma$  до значений, больших  $90^\circ$  (V тип поверхности). Согласно исходной геометрической модели угол  $\gamma$  не может превышать  $90^\circ$  (полуцилиндры). Однако математическая структура выражения (4.28) не содержит подобного ограничения. Можно задаваться произвольно большими значениями  $\gamma$ , что приведет лишь к увеличению крутизны фотометрической функции в определенном диапазоне фазовых углов. В то же время исходная модель ограничивает наибольшее влияние теневой функции, выражением которой, по существу, является  $L$ , значением  $\gamma = 90^\circ$ , поскольку  $L$  выводится в результате интегрирования по освещенной и видимой внутренней поверхности цилиндрического углубления [121]. Поэтому можно предположить, что полученные при решении уравнений значения  $\gamma > 90^\circ$  указывают на более значительное влияние теневой функции, чем допускает принятая геометрическая модель. В соответствие с этим более правильным было бы в данном случае рассматривать поверхность с положительными формами рельефа — возвышенностями, длина тени которых не ограничивается величиной поперечника детали рельефа, как в случае углублений. Сказанное при-

водит к выводу, что величина параметра  $\gamma$  в пределах района с V типом поверхности является признаком существенно большей концентрации камней как основного фактора, определяющего фотометрические свойства поверхности. С подобным предположением согласуются и другие признаки — повышенное альбедо и повышенная

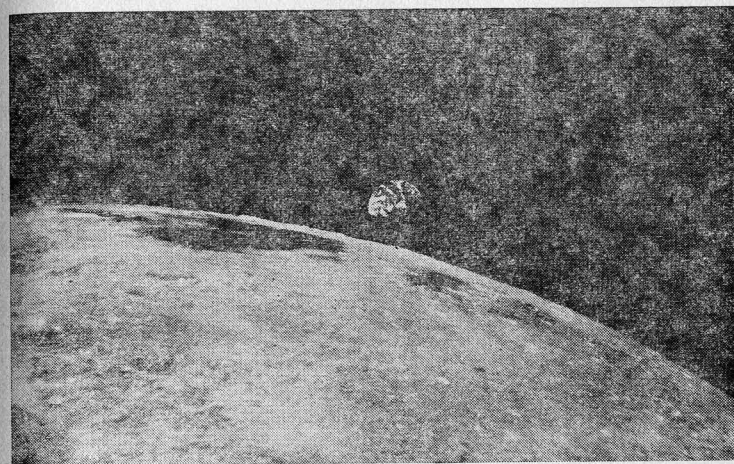


Рис. 68. Снимок, полученный АМС «Зонд-8». Область, представленная на карте рис. 67.

средняя плотность покровного вещества, вычисленная по значениям параметра  $h$ . Не противоречат предложенной структуре и морфологические особенности местности. Высокая концентрация кратеров и наличие большого числа молодых кратеров также предполагает существование интенсивного поля выбросов, т. е. значительного количества камней. Крупномасштабное изображение участка поверхности, отнесенной к V фотометрическому типу, приведено на рис. 68.

VI тип поверхности служит указанием на несколько большую пористость покровного вещества, что характерно для морских областей вообще.

Приведенный пример многопараметрического моделирования показывает, в частности, что материковые обла-



сти Луны также достаточно неоднородны и распадаются на отдельные природные комплексы.

Примером неоднородности морских областей может служить районирование, проведенное путем многопараметрического моделирования. Питерсом и Маккордом

Таблица 28

Колор-индекс B/V		Альбедро (~0,62 мкм)		Полоса 1 мкм		Полоса 2 мкм	
обозн.	характеристика	обозн.	характеристика	обозн.	характеристика	обозн.	характеристика
H	высокий	B	высокое	S	четкая	P	есть
h	выше	D	низкое	W	слабая	A	нет
m	среднего	I	среднее	G	средняя	—	неизвестно
L	малый						

[143]. Авторы попытались обобщить сведения о районах лунных морей, полученные в визуальной и инфракрасной областях спектра. Для районирования были выбраны четыре группы признаков с разделением на несколько ступеней по каждому параметру. В таблице 28 приведены группы признаков и их условные обозначения.

По сочетанию четырех признаков (по одному из каждой группы) выделяются типы поверхности. В морских областях видимого полушария Питерс и Маккорд выделили 16 типов. На рис. 69 показан фрагмент схемы многопараметрического районирования морских областей видимого полушария Луны. Фрагмент охватывает моря в восточной части видимой стороны, в которых выделены районы распространения 10 типов поверхности:

1 — HDWA (типичным районом является место посадки КК «Аполлон-11»),

2 — hDW (район посадки КА «Луна-16»),

3 — mISP (Море Ясности),

4 — mIG (район посадки КК «Аполлон-12»),

5 — mBG (Море Нектара),

6 — LBS (Море Холода),

7 — LBG (Залив Радуги),

8 — LIS (Море Кризисов),

9 — LIG (место посадки КК «Аполлон-15»),

10 — сложная, неоднородная поверхность.

Главным результатом проведенного районирования по спектральным характеристикам, вероятно, следует считать вывод о многофазности процесса образования мор-

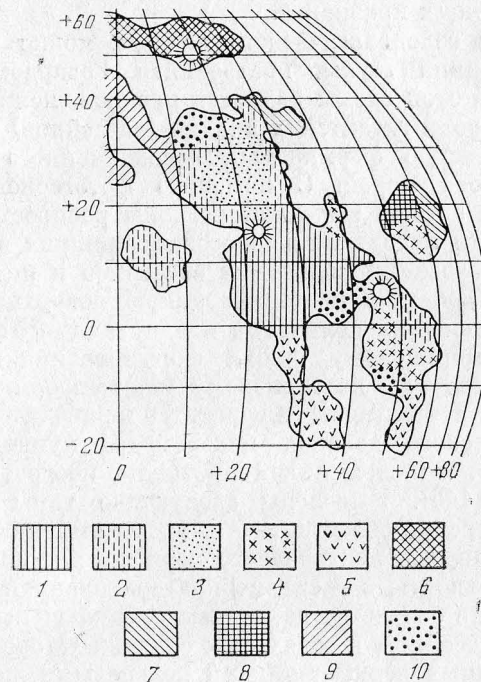


Рис. 69. Типы морских базальтов (восточное полушарие, видимая сторона). Обозначения приведены в тексте.

ских базальтов даже внутри морфологически единых структур, таких, например, как круговые моря (Море Дождей, Море Ясности, Море Кризисов и др.).

## 7. Физиографическое деление поверхности лунного шара

В современной литературе, рассматривающей различные аспекты селенографии, понятие физиографического деления подразумевает разграничение лунного шара в це-



лом или его отдельных частей на провинции (крупные регионы) по признаку однородности морфологических и физических свойств поверхности. В последние годы предложено несколько схем физиографического деления лунной поверхности, основанных на различных принципах отбора определяющих признаков.

Примером селенологического подхода может служить схема провинций Луны, построенная Говардом и др. [144]. Основой этой схемы является предположение об определяющей роли гигантских впадин (бассейнов) в эпоху, предшествовавшую формированию современного базальтового покрова морей. С помощью фотогеологических исследований авторы выделили регионы распространения на поверхности материала выбросов, возникших в момент ударного образования кольцевых бассейнов и перекрывающих более древнюю кратерированную поверхность. По времени образования кольцевые впадины относят к двум периодам: имбрийскому (эпоха формирования впадины Моря Дождей) и нектариевому (эпоха формирования впадины Моря Нектара). На рис. 70 приводится схема физиографического деления поверхности лунного шара Говарда и др. в равновеликой проекции, построенная по данным из [145]. Выделены следующие типы поверхности: 1 — морские области, 2 — выбросы имбрийского периода, 3 — выбросы нектариевого периода, 4 — кратерированная поверхность, 5 — сильно кратерированная поверхность. Морские базальты, как правило, заключены внутри кольцевых бассейнов, в отдельных случаях (Море Восточное) окруженных периферийными кольцевыми желобами, также заполненными темным морским веществом. Материковые области разделяются по распространению материала выбросов и степени переработки ударными процессами.

Другим вариантом физиографического деления поверхности является схема распространенности основных типов лунных пород. Как было показано выше, альbedo лунной поверхности в первом приближении может служить признаком различия в химическом составе покровного вещества. Общее распределение альbedo на 80% поверхности лунного шара графически можно представить как сумму четырех частных распределений [146]. Принимая это разделение в качестве первого приближения, можно предста-

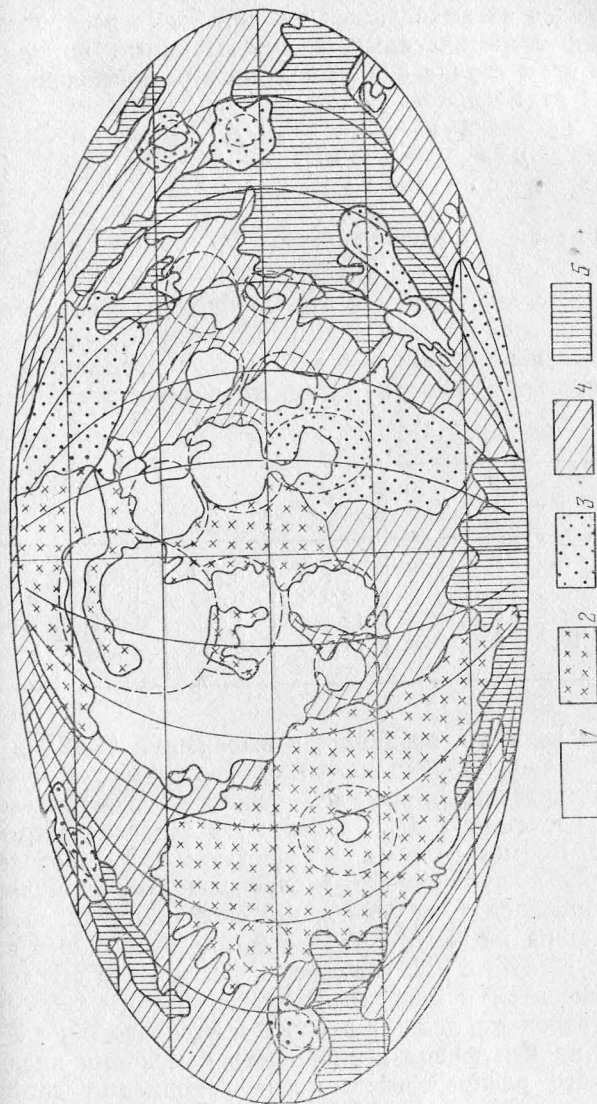


Рис. 70. Схема физиографического деления поверхности лунного шара (по Говарду). Обозначения приведены в тексте.

вить каждое из выделенных эмпирических распределений близкими теоретическими распределениями нормального вида. В этом случае общая функция распределения имеет такой вид:

$$p = \sum_{k=1}^{k=4} \frac{\Delta_k}{\sigma_k \sqrt{2\pi}} \exp \left\{ -\frac{(\rho_0 - \bar{\rho}_{0k})^2}{2\sigma_k^2} \right\}, \quad (4.42)$$

где  $p$  — плотность распределения,  $k$  — номер частного распределения,  $\Delta_k$  — доля  $k$ -распределения в общей выборке,  $\sigma_k$  — среднее квадратичное отклонение,  $\bar{\rho}_{0k}$  — среднее значение альbedo  $\rho_0$  для  $k$ -распределения.

Полученные параметры частных распределений, наиболее близких к эмпирическим, приведены в таблице 29.

Таблица 29

$k$	$n$	$\Delta$	$\bar{\rho}_0$	$\sigma$	$A$	$E$
1	966	0,1713	7,100	0,713	+0,214	-2,590
2	499	0,0949	9,324	0,863	+1,741	+1,292
3	3113	0,5452	12,836	1,795	+0,009	-0,842
4	1064	0,1885	17,424	0,919	-0,650	-0,022

Кроме величин, входящих в выражение (4.42), в таблицу 29 включены значения:  $n$  — объем выборок по каждому распределению,  $A$  — асимметрия и  $E$  — эксцесс.

Распределения 1 и 2 совпадают с теоретическими по критерию Колмогорова с вероятностью 0,8. Распределения 3 и 4 хуже представляются распределениями нормального вида. Однако, следует учесть, что около 20% территории лунного шара не было охвачено фотометрическими измерениями. Вместе с тем заведомо известно, что эта территория относится к поверхности материкового типа и по альbedo, вероятно, должна входить в распределения 3 и 4. Поэтому не исключена возможность изменения вида эмпирического распределения после дополнения данными по центральной области обратного полушария.

Дисперсионный анализ показывает, что по критерию Фишера выделенные распределения представляют разные совокупности с достоверностью более, чем 0,999. Следо-

вательно, можно предположить различную природу отражающих поверхностей и принять альbedo в качестве одного из независимых признаков типа лунного ландшафта.

Эмпирическое и теоретические распределения альbedo показаны на рис. 71.

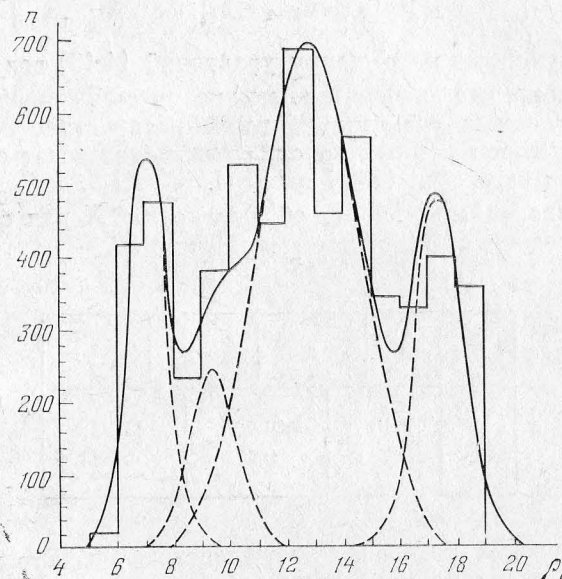


Рис. 71. Эмпирическое (гистограмма) и теоретическое (кривые) распределение альbedo поверхности лунного шара.

Сопоставляя частные функции распределения, можно получить вероятностные значения граничных величин альbedo, которые определяют принадлежность поверхностного материала к одному из выделенных типов. Если принять, что покровное вещество относится по альbedo к распределению  $k$ , когда

$$p_k(\rho_0) > p_{k+1}(\rho_0),$$

и к распределению  $(k+1)$ , когда

$$p_k(\rho_0) < p_{k+1}(\rho_0),$$

для получения граничных значений  $\hat{\rho}_0$  необходимо решить



уравнения:

$$p_k(\hat{\rho}_0) = p_{k+1}(\hat{\rho}_0),$$

или в развернутом виде:

$$\frac{1}{\sigma_k} \exp \left\{ -\frac{(\hat{\rho}_0 - \bar{\rho}_{0k})^2}{2\sigma_k^2} \right\} = \frac{1}{\sigma_{k+1}} \exp \left\{ -\frac{(\hat{\rho}_0 - \bar{\rho}_{0k+1})^2}{2\sigma_{k+1}^2} \right\}. \quad (4.43)$$

Полученные из решения уравнений (4.43) вероятностные граничные значения  $\hat{\rho}_0$  можно интерпретировать как приближенные границы областей распространения различных типов лунных пород, если воспользоваться уравнениями регрессии (4.30) и (4.31).

Вычисленные таким образом  $\hat{\rho}_0$  и  $\hat{X}$  для соседних  $k$ -распределений приводятся в таблице 30.

Таблица 30

$k$	1	2	4
$\hat{\rho}_0$	8,16	10,76	15,23
$\hat{X}$	0,393	0,472	0,593

На рис. 72 показана схема физиографического деления лунного шара по признаку альbedo на четыре типа поверхности, соответствующие полученным  $k$ -распределениям.

Параметр  $\hat{X}$  позволяет связать выделенные типы лунной поверхности с основными типами лунных пород. Согласно обобщенным данным по химическому составу пород и классификации, приводимым в [114, 147—149], граничные значения  $\hat{X}$ , определенные по альbedo, близки к аналогичным значениям  $X$  в селенохимической классификации пород. По Вуду [147] морские базальты характеризуются отношением  $X = Al/Si$  в пределах от 0,21 до 0,35. Базальты из образца, доставленного КА «Луна-16», имеют  $X = 0,4$ , а базальты из Моря Кризисов, содержащиеся в образце, доставленном КА «Луна-24», характеризуются  $X = 0,28—0,38$ . Для норитов лабораторные анализы образцов, доставленных на Землю, дают величины  $X$ ,

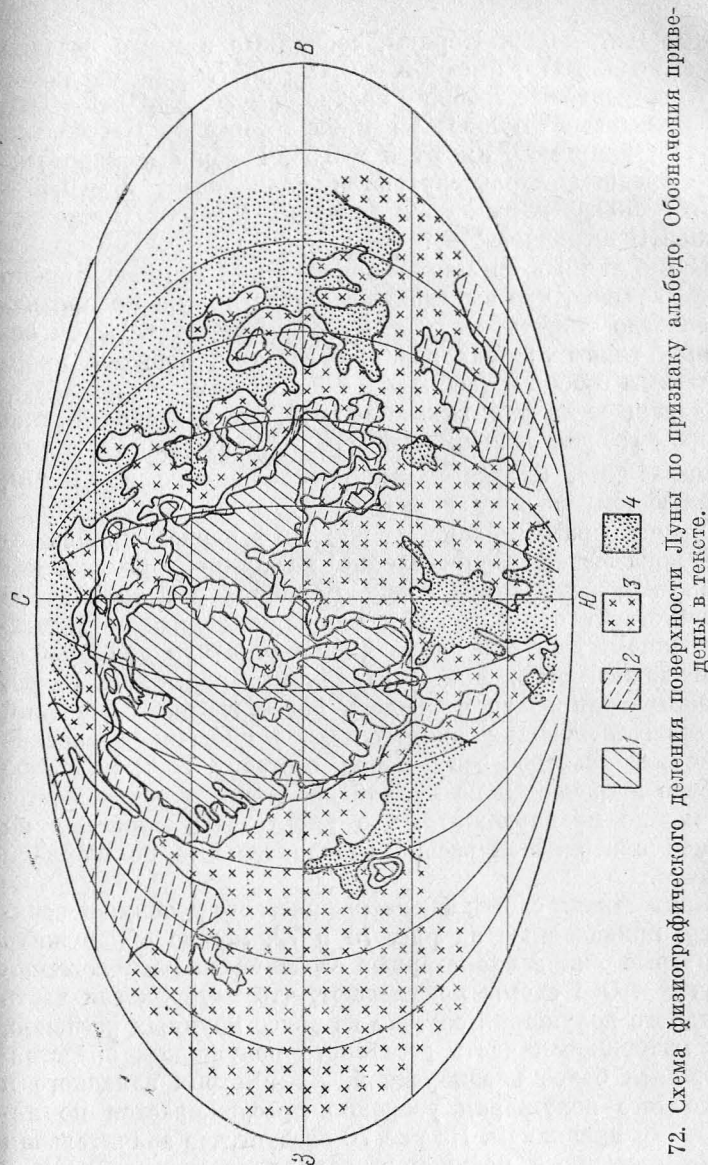


Рис. 72. Схема физиографического деления поверхности Луны по признаку альbedo. Обозначения приведены в тексте.



равные 0,37 — 0,39. Нориты, собранные в месте посадки КК «Аполлон-17», имеют  $X = 0,42 - 0,47$ .

Анортозитовые габбро в среднем имеют  $X = 0,52 - 0,61$ . Анортозитовые габбро из набора образцов КК «Аполлон-17», например, имеют  $X = 0,54$ . Габбровые анортозиты в среднем характеризуются значениями  $X = 0,66 - 0,78$ . Иногда встречаются значения  $X = 0,82$  (место посадки КК «Аполлон-17»).

Принимая во внимание приведенные данные, можно сделать вывод, что выделенные статистически по признаку альbedo типы поверхности соответствуют четырем основным типам лунных пород: базальтам, норитам, анортозитовым габбро и габбровым анортозитам.

Обращает на себя внимание и то, что значение  $\rho_0$ , при котором график зависимости  $\lg \rho_0$  от  $X$  на рис. 57 терпит излом (15,51), близко граничному значению  $\hat{\rho}_0$  (15,23), отделяющему распределения 3 и 4.

Таким образом, схема на рис. 72 в первом приближении показывает распределение на лунной поверхности названных выше типов пород. Величина  $\Delta$  в таблице 29 соответствует относительной площади, занимаемой каждым типом. Вне описанной схемы остались анортозиты. Если зависимость, представленную выражением (4.31), проэкстраполировать в область более высоких значений  $X$ , соответствующих анортозитам, вычисленное среднее значение альbedo этих пород составит 25,6. Подобное альbedo встречается на лунной поверхности редко, поэтому можно предположить, что анортозиты занимают на лунной поверхности весьма незначительные по площади области.

Сопоставляя схемы физиографического деления поверхности, приведенные на рис. 70 и 72, можно обнаружить некоторые общие планетарные особенности расположения структур. Обе схемы показывают, что материковая часть западного полушария состоит из более крупных регионов, чем материковая часть восточного полушария, представляющаяся более неоднородной. Асимметрия западного и восточного полушария уверенно прослеживается по нескольким признакам. Из рис. 70 следует, что значительная часть восточного полушария занята кратерированной и сильно кратерированной поверхностью. В западном полушарии доля этих типов поверхности относительно мень-

ше. Согласно рис. 72 покровное вещество западного полушария образовано более светлыми породами, по химическому составу имеющими более высокие значения  $X = Al/Si$ , в отличие от пород поверхностного слоя восточного полушария.

Орбитальные измерения радиоактивности поверхностных пород [114] показывают, что общей закономерностью является более высокий уровень для морского вещества и пониженный уровень радиоактивности материкового покрова. Однако материковые области восточного полушария имеют систематически более высокий уровень радиоактивности, чем материковые области западного полушария.

Вероятно, обнаруживаемая западно-восточная асимметрия лунного шара является не менее важной планетарной особенностью Луны, чем широко известная асимметрия видимого и обратного полушарий.

Многие проблемы физиографического деления лунной поверхности еще ждут своего решения. Выполненные к настоящему времени работы являются лишь первыми шагами к построению модели физической структуры и природы лунной поверхности на основании комплексного анализа существующих данных.

## ГЛАВА V ПАЛЕОСЕЛЕНОГРАФИЯ

### 1. Возраст лунных образований и общая история эволюции поверхности

Вопросы образования и ранней истории Луны продолжают дискутироваться [28, 150]. Нет полной ясности относительно того, где сформировалась Луна как самостоятельное небесное тело. Некоторые особенности химического состава лунных пород позволяют предположить, что Луна и Земля образовались в одной и той же зоне Солнечной системы, но не были в прошлом единым целым.

Исследования лунных образцов показали, что недра Луны на ранних стадиях эволюции земного спутника подверглись магматической дифференциации. В расплавленной оболочке Луны происходило разделение фаз, в результате чего сформировалась кора и верхняя мантия. Этот процесс сопровождался обогащением пород лунной коры кальцием и алюминием, входящими в состав апортитовых плагиоклазов, и обогащением пород верхней мантии окислами железа и магния, входящими в состав пироксенов и оливинов. Одновременно в коре концентрировались радиоактивные элементы: калий, рубидий, уран и торий. По соотношению содержания этих элементов в современных лунных породах и продуктов их радиоактивного распада — свинца, аргона, стронция, — рассчитывается время кристаллизации расплава. Классификация образцов материковых пород, доставленных АМС «Луна-20» и КК «Аполлон-16», по Rb—Sr-возрасту показали, что процесс дифференциации должен был происходить на самой ранней стадии существования Луны, т. е. 4,3—4,6 млрд. лет назад [151]. Период кристаллизации древних материковых пород в селенологической истории обычно относят к самым нижним породам так называемой Доимбрийской системы, которая охватывает эпоху, предшествующую появлению темных морских лав на поверхности Луны.

Формирование лунной коры и отверждение внешних горизонтов Луны происходило, вероятно, при чрезвычай-

но интенсивной метеоритной бомбардировке. Материковые брекчии содержат древний метеоритный компонент. Анализ метеоритных включений в брекчиях из образцов, собранных в районе посадки КК «Аполлон-17», подтверждает, что падавшие на Луну тела были недифференцированы, имели хондритовый состав при содержании железа от 15 до 40% [152]. Лунные бассейны, часть из которых впоследствии заполнилась породами морских лав, образована, по-видимому в результате падения тел с поперечником не более 200 км при скорости соударения с Лунной порядка 8 км/с. После образования коры на лунную поверхность упало от 40 до 160 подобных тел с общей массой примерно  $2 \cdot 10^{-3}$  массы Луны. Согласно другим расчетам, объем первоначальной впадины Моря Восточного, например, составлял  $(0,4-1,2) \cdot 10^6$  км<sup>3</sup> [153]. Если форму бассейна аппроксимировать сферическим сегментом, доударная глубина залегания выбросов из бассейна Моря Восточного составляла от 6 до 20 км, а выбросов из бассейна Моря Дождей — от 8 до 27 км. Эпоха формирования лунных бассейнов относится к концу Доимбрийского периода — началу Имбрийского периода (таблица 31). По определению абсолютного возраста лунных брекчий можно установить время возникновения впадин круговых морей видимого полушария, которое оказалось заключенным в промежутке от 4,25 до 3,85 млрд. лет назад [154, 155].

Заключительная стадия образования гигантских впадин, вероятно, совпала с выплавлением и последующей кристаллизацией на поверхности пород норитового состава. Образцы норитов, собранные в местах посадок КК «Аполлон-14» и «Аполлон-16», имеют возраст в интервале от 3,85 до 3,95 млрд. лет. Этот отрезок времени совпадает с образованием наиболее молодых бассейнов Моря Восточного и Моря Дождей и относится к самому началу Имбрийского периода.

К началу Имбрийского периода относится также ранняя стадия эпохи наиболее активных проявлений внутренних процессов на Луне. Нижними породами в Имбрийской системе являются древние базальтовые лавы. Примером могут служить базальты в районе Тавр—Литтров, возраст которых согласно анализу образцов, доставленных КК «Аполлон-17», достигает 3,82 млрд. лет [155].



Система (период)	Район	Событие	Возраст (10 <sup>9</sup> лет)
Коперниковская система	Места посадки «А-14, -16, -17» Море Изобилия («Л-16») Коперник	Образование небольших кратеров Ударный метаморфизм Образование кратера	0,002—0,050 [145] 0,50 [161] 0,85 [160]
	Эратосфеновская система	Океан Бурь («А-12») Море Ясности («А-15») Море Кризисов («Л-24») Море Изобилия («Л-16») Море Спокойствия («А-11») Тавр-Литтров («А-17») Море Восточное Море Дождей Море Кризисов Море Ясности Море Влажности Море Нектара	Образование ударных кратеров на материках и морях
Имбрийская система		Кристаллизация базальтов	
		Кристаллизация норитов	
		Образование впадины	
Домбрийская система	Материковая кора («Л-20»), «А-16») Материковая кора («Л-20»), «А-16»)	Кристаллизация древних материковых пород	4,3—4,6 [151]

Несколько моложе базальты из района посадки РК «Аполлон-11» (Море Спокойствия) и АМС «Луна-16» (Море Изобилия). По косвенным признакам к этому же времени можно отнести кристаллизацию базальтов Моря Дождей, давших название всей Имбрийской системе.

Наиболее поздние базальтовые лавы датируются временем кристаллизации 3,16—3,33 млрд. лет назад [155—157] и включают базальты из Моря Кризисов (место посадки АМС «Луна-24»), Моря Ясности (место посадки РК «Аполлон-15») и Океана Бурь (место посадки РК «Аполлон-12»). В общей стратиграфической схеме выплавление наиболее молодых морских базальтов приходится на начало Эратосфеновского периода, охватывающего эпоху образования крупных послеморских кратеров, типичным представителем которых может служить кратер Эратосфен. Базальты с возрастом менее 3 млрд. лет на Луне пока не обнаружены.

Процесс вулканизма, породившего базальтовое покрытие лунных морей, по-видимому, включал два периода активности недр. Первый из них привел к появлению базальтов имбрийской системы, средний возраст которых около 3,7 млрд. лет, а второй связан с выплавлением базальтов Эратосфеновской системы со средним возрастом 3,2 млрд. лет.

Последующие два миллиарда лет Эратосфеновского периода характеризуются полным затуханием вулканизма, что, по-видимому, находилось в прямой связи с процессом отвердения горизонтов верхней и средней мантий Луны на глубину в несколько сотен километров. Одновременно продолжалась метеоритная бомбардировка поверхности, которая превратилась в главный фактор формирования современного ландшафта Луны.

Современный период селенологической истории Луны, включающий последний миллиард лет, носит название коперниковского по одному из самых молодых крупных кратеров на лунной поверхности, окруженного к тому же весьма протяженной системой светлых лучей.

Расчеты с применением одномерной теории удара [158] показали, что при скоростях соударения 12—16 км/с происходит испарение вещества. При большей скорости падающего тела (около 20 км/с) образующийся газ расши-



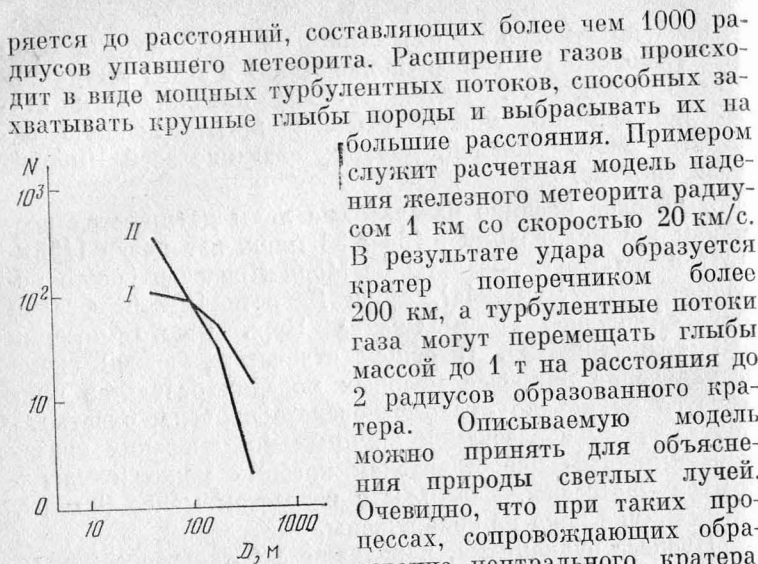


Рис. 73. Распределение кратеров на участке светлого луча (I) и в Море Познанном (II) для площади  $65 \text{ км}^2$ .

раздробленного вещества основных и вторичных выбросов, покрывающего участки межкратерной поверхности.

Согласно снимкам КА «Рейнджер-7» подобной структурой обладает область светлого луча кратера Тихо, расположенная в Море Познанном [159]. По снимкам лунной поверхности с постепенной изменяющейся разрешающей способностью, от нескольких километров до долей метра было обнаружено, что около 30 участков повышенной яркости в этой области оказываются скоплениями отдельных кратеров — лунок. Преобладающий размер кратеров — лунок составляет сотни метров.

Распределение кратеров по размерам, полученное в [159] для одного из участков светлого луча, показано на рис. 73 (I). Площадь участка составляет  $65 \text{ км}^2$ . На рис. 73 приводится накопленное число кратеров  $N$  диаметром больше  $D$  (м). Случай (II) представляет данные

о среднем распределении кратеров в Море Познанном, в пересчете на ту же площадь. Сопоставление распределений I и II показывает, что для участка светлого луча характерно преобладание кратеров размером  $400\text{—}800$  м. Вместе с тем в распределении I резко падает число мелких кратеров, диаметром  $80\text{—}100$  м, по-видимому, за счет того, что они были разрушены при образовании крупных вторичных кратеров.

Липский и Шевченко [159] провели фотометрический анализ участков лучевых систем и соседних с ними участков лунной поверхности и показали, что мезотеневая функция, соответствующая повышенной концентрации кратеров-лунок, присутствует в фазовых кривых всех исследованных лучевых систем видимого и обратного полушарий. Эта особенность подтверждает типичность описанной структурной модели светлых лучей.

В одном из участков светлого луча кратера Коперник находится место посадки КК «Аполлон-12». Поритовые стекла, обнаруженные в тонкозернистой фракции образцов реголита, доставленных из этого района, были предположительно причислены к веществу выбросов из кратера Коперник. Возраст названных частиц составляет около 850 миллионов лет, и, следовательно, образование самого кратера можно также отнести к данному времени [160].

В местах посадок лунных экспедиций и автоматических аппаратов был определен экспозиционный возраст поверхностного материала, по которому удалось установить время образования ряда небольших (и самых молодых) лунных кратеров. Радиационный возраст реголита в месте посадки АМС «Луна-16» составил около 500 млн. лет [161], что можно считать временем последнего ударного события в этом районе. Кратер Коун в районе посадки КК «Аполлон-14» образовался около 25 млн. лет назад, а кратер Шорти в районе посадки КК «Аполлон-17» — примерно  $20\text{—}30$  млн. лет назад [145]. В материковом районе, исследованном экспедицией «Аполлон-16», кратер с лучевой системой на севере участка, по-видимому, возник 50 млн. лет назад, а радиационный возраст выбросов подобного кратера в южной части исследованной территории составил всего лишь 2 млн. лет. Как указывалось выше (см. главу II), можно предположить, что первона-

начально каждый первичный кратер ударного происхождения окружен системой светлых лучей. Впоследствии под воздействием микрометеоритной бомбардировки разрушаются или погребаются в грунт крупные светлые фрагменты выбросов, деградируют вторичные кратеры и перемешивается тонкая фракция выбросов с материалом подложки. Все эти процессы ведут к потемнению лучей, постепенно исчезающих на фоне окружающей местности. Примером крупной исчезающей системы светлых лучей может служить система кратера Лангрена на восточной окраине Моря Изобилия.

Таким образом, результаты определения абсолютного возраста лунных пород, которые практически полностью согласуются с данными фотогеологического анализа по стратиграфической классификации поверхностного материала, выделяют три основные эпохи формирования рельефа Луны. Планетарная дифференциация, сопровождающаяся интенсивной метеоритной бомбардировкой, и образование гигантских до-морских впадин составляют раннюю стадию развития современного ландшафта Луны. Затем наступила эпоха лунного вулканизма, основным проявлением которого явилось заполнение больших бассейнов и отдельных кратеров базальтовыми лавами. Из других характерных форм рельефа к этому времени, по видимому, относятся многочисленные борозды и трещины, «извилистые русла» и подобные им образования, связанные с перемещением вязкой лавы и последующим остыванием разновременных потоков. Как упоминалось выше (см. главу II), наиболее протяженные линейные структуры встречаются в периферийных областях морей и зонах контакта с материками. Несомненным проявлением внутренней активности, вероятно, относящейся к поздней стадии планетарного вулканизма, являются куполообразные формы, встречающиеся в отдельных районах лунных морей и внутри некоторых крупных кратеров. Третья эпоха включает послеморскую метеоритную бомбардировку, завершившую формирование современного вида лунной поверхности, и продолжающуюся в настоящее время.

Особый интерес представляет проблема гипотетического современного вулканизма на Луне. Несмотря на то, что лунные недра на глубину в сотни километров находят-

ся в твердом состоянии, часто высказывают предположения о проявлении современной внутренней активности в виде так называемых нестационарных явлений на лунной поверхности. Каталоги быстротечных событий, отмеченных наблюдателями в различных районах видимого полушария Луны, к настоящему времени содержат уже сотни случаев, достоверность которых весьма вероятна или вовсе не вызывает сомнений. Анализ распределения нестационарных явлений по данным, собранным П. Флоренским и Черновым в СССР и Миддлхерст в США, был проведен Шингаревой [162]. По числу повторяемости явлений в одном и том же районе выделяются особо «активные» объекты, вблизи которых отмечены многие десятки кратковременных событий разного характера. Такими объектами являются относительно молодые крупные кратеры Аристарх, Тихо, Кеплер. Явной закономерностью в распространении мест кратковременных событий является их расположения по периферии круговых морей или вдоль внутренних колец, намеченных системой складок и валов на морской поверхности. Примером последнего может служить распределение нестационарных явлений в Море Дождей, отмеченных у кратеров Геликон, Карлини, Ламберт, Тимохарис, Архимед, Аристилл, вблизи Пика Пико и Пика Питон. Большое число случаев относится к кратеру Альфонс, некоторые структурные особенности которого, возможно, связаны с эндогенными процессами.

По характеру проявления нестационарные события можно разделить на четыре группы. К первой группе относятся изменения внешнего вида объекта — его очертаний, контуров тени, вида центральной горки и т. д., а также локальные изменения четкости изображения. Вторую группу составляют случаи изменения яркости объекта или появления различного вида светлых пятен и точек. Третья группа включает случаи изменения цвета участков лунной поверхности, а четвертая — случаи появления темных пятен. На рис. 74 приведена карта-схема распределения нестационарных явлений на лунной поверхности, составленная Шингаревой.

Связь нестационарных явлений с эндогенными процессами косвенно подтверждается некоторыми совпадениями обстоятельств проявления поверхностных событий и сейсмичности лунных недр. Достаточно близка перио-



дичность максимумов числа появления поверхностных изменений и лунотрясений, в основе своей имеющая периодичность приливных возмущений в теле Луны. Кроме того, распределение положения эпицентров зафиксированных тектонических лунотрясений в целом повторя-

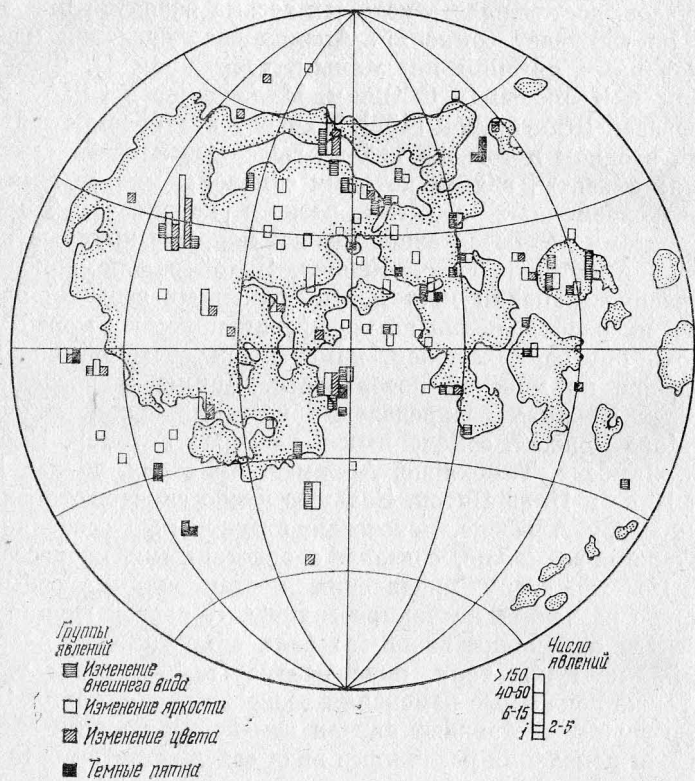


Рис. 74. Карта-схема распределения нестационарных явлений на видимом полушарии Луны.

ет тенденцию распространения на лунной поверхности нестационарных явлений [21]. Все это приводит к выводу, что в недрах Луны, вероятно, существует система сверхглубоких разломов, на контактах которых происхо-

дят процессы, порождающие сейсмические явления и поверхностные кратковременные события. «Спусковым механизмом» этой эндогенной деятельности служат приливные возмущения [163].

## 2. Кратерированность поверхности как показатель относительного возраста

На протяжении всей истории Луны метеоритная бомбардировка была постоянно действующим фактором формирования рельефа поверхности. Очевидно, что возникающая в результате метеоритных ударов кратерированность местности может служить индексом возраста, так как плотность кратеров на единицу площади зависит от времени экспозиции поверхности. Особенно наглядно подобная тенденция прослеживается на участках разновременных потоков лав морского базальтового покрова.

Для практического использования характеристик кратерной популяции с целью определения относительного возраста участков лунной поверхности применяются различные приемы статистического анализа распределения плотности кратеров.

Наиболее простым показателем относительного возраста поверхности может служить общее число кратеров различных размеров на единице площади исследуемой территории.

Как было показано выше (см. главу II), общее распределение числа кратеров по размерам можно представить степенной функцией. Там же отмечалось, что значения постоянных этой функции изменяются в зависимости от локальных особенностей распределения кратеров. Ньюкум и др. [164] получили выражение для первичной, немодифицированной популяции ударных кратеров. Отклонения экспериментальных распределений от расчетного показывают степень влияния возрастных процессов в каждом конкретном случае. В выражении для калибровочного распределения, имеющего обычный вид степенной функции, показатель степени также представлен как функция диаметра кратеров. В логарифмическом виде распределение кратеров в первичной популяции представляется полиномом седьмого



порядка:

$$\lg N = a_0 + a_1 \lg D + a_2 (\lg D)^2 + \dots + a_7 (\lg D)^7, \quad (5.1)$$

где  $N$  — количество кратеров, диаметром более чем  $D$  (км) на площади в  $1 \text{ км}^2$ .

Для кратеров, размеры которых составляют от 0,3 км до 20 км, значения коэффициентов в (5.1) равны:

$$a_0 = -2,405, \quad a_3 = +4,579, \quad a_6 = +7,004,$$

$$a_1 = -4,333, \quad a_4 = -3,782, \quad a_7 = -2,245.$$

$$a_2 = +0,950, \quad a_5 = -4,871,$$

Другой возможностью установить относительный возраст поверхности является анализ характеристик кривой распределения кратеров в каждом конкретном случае. Типичная кривая распределения кратеров по размерам состоит из двух частей, разделяемых значением диаметра  $D_{кр}$ . Как правило, наклон участков кривой в области  $D > D_{кр}$  и  $D < D_{кр}$  различен. Поскольку плотность мелких кратеров достаточно велика, каждый случай появления нового ударного кратера неизбежно влечет за собой разрушение уже существовавшего, так что статистическое распределение мелких кратеров на зрелой в морфологическом отношении поверхности остается со временем постоянным. Поэтому соответствующую часть кривой распределения ( $D < D_{кр}$ ) называют равновесной. В качестве показателей возраста по общему распределению кратеров могут служить три характеристики кривой распределения: наклон равновесного участка, величина  $D_{кр}$ , соответствующая точке перегиба кривой, и плотность кратеров размером, большим чем  $D_{кр}$ .

Исследования распределения кратеров в различных участках морской поверхности, проведенные Янгом по снимкам с КК «Аполлон-15, -16, -17», показали, что главную роль в формировании реголита играют кратеры диаметром менее  $D_{кр} = 300 \text{ м}$  [165].

На основании этих подсчетов было установлено, что с возрастом поверхности уменьшается плотность малых кратеров и увеличивается плотность крупных кратеров.

На рис. 75 приведены распределения кратеров для четырех участков различных морей. Разрывы кривых соответствуют области, близкой к  $D_{кр}$ . По оси ординат отложены значения частоты встречаемости кратеров  $F$ , рав-

ные числу объектов в интервале величин  $D$ . В зависимости от масштаба изучавшихся снимков интервал  $\Delta D$  составлял от 17 до 19 м. Все подсчеты нормированы к площади  $350 \text{ км}^2$ . По оси абсцисс отложены значения диаметров кратеров в метрах.

Из представленных участков наиболее молодым является район в Море Ясности. Соответствующая ему кривая распределения характерна резким различием наклонов

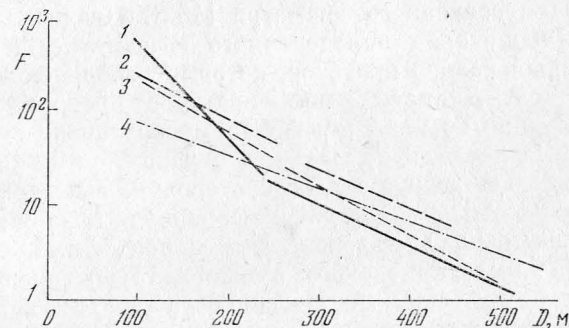


Рис. 75. Распределение кратеров по размерам для различных районов: 1 — Море Ясности, 2 — Море Дождей; 3 — Океан Бурь, 4 — Море Спокойствия.

левой и правой частей. Наиболее старый участок — район в Море Спокойствия, — описывается распределением, для которого наклон обеих частей кривой одинаков. Сравнение двух распределений показывает, что для молодого района плотность мелких кратеров ( $D < 250 \text{ м}$ ) выше, тогда как плотность кратеров более крупных ( $D > 250 \text{ м}$ ) ниже, чем для старой поверхности. Участки в Море Дождей и Океане Бурь, по-видимому, занимают промежуточное положение, если учитывать разницу в наклоне левой и правой частей кривых и плотность кратеров размером  $D < D_{кр}$ . Однако на значение плотности более крупных кратеров в случае Моря Дождей оказывает влияние какой-то дополнительный фактор, возможно, мощность реголита или другие характеристики покровного материала. Проявления индивидуальных особенностей распределений кратеров в отдельных районах закономерны и их следует учитывать, но в целом этот метод дает удовлетвори-

тельные результаты при выделении стратиграфических единиц в процессе фотогеологического анализа лунной поверхности.

Ряд методов датирования возраста поверхности использует не только общую статистику кратеров, но и морфологические особенности этих образований. На основе морфологического анализа кратеров размером от 50 до 3000 м Траск разработал метод определения относительного возраста поверхности морского типа по степени деградации кратеров определенного диаметра [166]. Предполагается, что для территории определенного возраста существует характерный размер кратеров, которые успели полностью разрушиться. Диаметр таких кратеров пропорционален суммарному во времени метеоритному потоку на единицу площади. Измерения показали, что характерным диаметром полностью разрушенных кратеров для поверхности, сформировавшейся в имбрийский период, является диаметр, равный 700 м. На поверхности поздне-имбрийского или ранне-эратосфеновского возраста характерный диаметр составляет 500 м. Поверхность эратосфеновского возраста характеризуется полностью деградировавшими кратерами диаметром 300 м.

Модель эволюции кратера под воздействием метеоритной эрозии была положена также в основу метода определения относительного возраста участков лунной поверхности по крупномасштабным снимкам, предложенного Зодербломом и Лебофским [167]. Параметром, описывающим степень разрушенности кратера, был выбран максимальный угол склона внутреннего вала кратера. Авторами принята следующая зависимость максимального внутреннего склона разрушенного кратера от суммарного потока падающих кратерообразующих тел:

$$S = S_i \exp(-\alpha^2 F^2 / D^2), \quad (5.2)$$

где  $S$  — максимальный склон внутреннего вала кратера, эрозированного под воздействием суммарного потока  $F$  (выражается через величину тангенса угла склона);  $S_i$  — первоначальная величина тангенса максимального склона внутреннего вала кратера;  $D$  — диаметр кратера;  $\alpha^2$  — постоянный множитель, составляющий  $2 \cdot 10^3$ .

Переменный множитель  $F$  эквивалентен коэффициенту в функции распределения кратеров по размерам (см.

главу II) и, как было указано, изменяется от места к месту. Из (5.2) можно получить выражение для  $F$ :

$$F = \frac{D}{\alpha} \left[ \ln \left( \frac{S_i}{S} \right) \right]^{1/2}. \quad (5.3)$$

Начальное значение склона для кратеров диаметром в сотни метров можно принять равным

$$S_i \approx \text{tg } 30^\circ.$$

Величина  $S_i$  в (5.3) равна измеренному значению склона и соответствует степени разрушенности кратера диаметром  $D$ .

Оценка экспозиционного возраста поверхности по фотоснимкам упрощается, если принять  $S_i = S_s$  — тангенсу высоты Солнца над горизонтом места. В случае крупномасштабной орбитальной съемки величину  $S_s$  можно считать в пределах снимка постоянной. Тогда выражение (5.3) запишется в виде

$$F = \frac{D_s}{\alpha} \left[ \ln \left( \frac{S_i}{S_s} \right) \right]^{1/2}, \quad (5.4)$$

где  $D_s$  — диаметр кратера, разрушенного метеоритной эрозией до степени, при которой максимальный склон внутреннего вала характеризуется величиной  $S_s$ .

На практике оказалось, что наиболее точный прием определения величины  $D_s$  по конкретным снимкам заключается в вычислении отношения количества кратеров без внутренней тени к количеству кратеров с наблюдаемой тенью, как функции диаметра. Указанное отношение равно нулю при  $D > D_s$ , затем с уменьшением диаметра кратеров оно постепенно возрастает и при некотором значении  $D_c$  перестает расти, оставаясь постоянным для всех  $D < D_c$ . Величина  $D_c$  соответствует диаметру кратера, который при данном суммарном потоке кратерообразующих тел мог разрушиться в большей степени, чем кратеры заданного размера  $D_s$ .

Экспозиционный возраст поверхности можно характеризовать величиной, имеющей конкретный морфологический смысл. Если взять отношение двух выражений для  $F$ , в котором делимое имеет вид (5.4), а в делителе  $D_s = D_L$ , где  $D_L$  — диаметр кратера, который был разрушен за время существования так, что его мак-



симальный угол внутреннего склона уменьшился до  $1^\circ$ , то получим формулу:

$$D_L = \left[ \frac{\ln\left(\frac{S_i}{S_s}\right)}{\ln\left(\frac{S_i}{\text{tg } 1^\circ}\right)} \right]^{1/2} D_s. \quad (5.5)$$

Величина  $D_L$  пропорциональна суммарному потоку кратерообразующих тел  $F$  и, следовательно, пропорциональна

Т а б л и ц а 32

Район	$D_L$ , метры
Кратер Тихо	20
Кратер Дионисий	$35 \pm 5$
Кратер Аристарх	$50 \pm 10$
Кратер Дауэс	$85 \pm 30$
Кратер Коперник	$100 \pm 30$
Кратер Мёстинг	$165 \pm 15$
Океан Бурь	$186(135 \div 255)$
Залив Центральный	$246(200 \div 280)$
Кратер Эратосфен	$260 \pm 70$
Море Влажности	$275 \pm 65$
Море Ясности	$280(265 \div 300)$
Море Дождей	$313(300 \div 320)$
Море Спокойствия	$401(335 \div 450)$
Кратер Гишпарх	$430 \pm 70$
Светлые материковые равнины	$475(460 \div 490)$
Кратер Ал-Баттани	$480 \pm 100$
Апеннины	$540 \pm 100$

экспозиционному возрасту изучаемой поверхности. Зодерблом и Лебофский провели измерения по снимкам серии «Лунар орбитер» и определили значения  $D_L$  для ряда лунных кратеров и участков морской поверхности. Результаты определений сведены в таблице 32. Значения  $D_L$  для морских районов указаны в двух вариантах: средние величины и общий диапазон для исследованного района.

Сравнение возрастной последовательности объектов в таблице 32 с данными определения абсолютного возраста, приведенными для некоторых образований в таблице 31, показывает хорошее общее согласие. Вместе с

тем широкий диапазон  $D_L$ , определенных в разных местах одного и того же морского образования, указывает на многофазность формирования лавовой поверхности лунных морей.

Существенный практический интерес может представлять соответствие между условным экспозиционным возрастом, определяемым по степени эволюции кратеров, и абсолютным возрастом формирования рассматриваемой поверхности.

Обобщая данные о морфологической зрелости малых кратеров [76] и результаты прямых определений экспозиционного возраста кратерных выбросов, Базиловский установил шкалу времени существования кратеров по пяти степеням сохранности формы [168]. Для наиболее разрушенных кратеров, внутренние склоны которых имеют угол не более  $3-5^\circ$ , зависимость между возрастом и диаметром кратера оказывается линейной. При размерах кратера менее 160 м эта зависимость имеет вид

$$T = 2,5 D,$$

где  $T$  измеряется в  $10^6$  лет,  $D$  — в метрах. Возраст кратеров диаметром более 160 м равен

$$T = 8 \cdot D - 900$$

при тех же единицах измерения  $T$  и  $D$ .

Сопоставляя величины  $D_L$  с абсолютным возрастом кристаллизации пород в ряде районов морской и материковой поверхности, Зодерблом и Лебофский нашли, что эта зависимость имеет экспоненциальный характер. Используя найденную зависимость и многочисленные определения значений  $D_L$  для различных районов морей и материков, авторы метода построили карту, охватывающую большую часть морских образований видимого полушария [169]. На рис. 76 приведена карта-схема возрастных различий в равновеликой проекции на центральную область видимого полушария Луны. Самой выделяющейся особенностью приведенной карты является возрастная «пестрота» морских регионов. Наиболее неоднородным в этом отношении представляется Океан Бурь, в пределах которого можно обнаружить участки, относимые к первым четырем интервалам возраста с общим диапазоном от  $< 3,0$  млрд. лет до 3,75 млрд. лет. Из показан-



ных областей морских образований трудно выделить морфологически единые структуры, которые были бы однородны по возрасту. Практически во всех регионах встречаются существенно разновозрастные поверхности. По

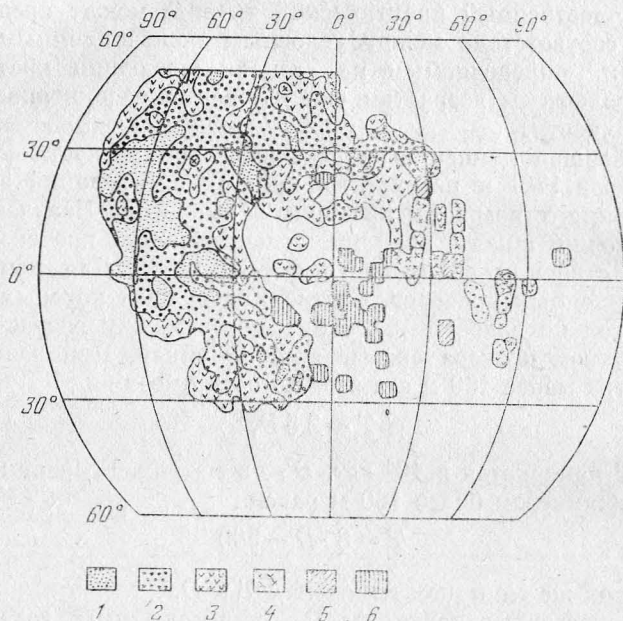


Рис. 76. Возраст морских и материковых областей лунной поверхности, определенный по степени разрушенности кратеров. В абсолютной шкале обозначения соответствуют возрасту (в миллиардах лет): 1 —  $< 3,0$ ; 2 —  $3,0 \div 3,3$ ; 3 —  $3,3 \div 3,6$ ; 4 —  $3,6 \div 3,75$ ; 5 —  $3,75 \div 3,85$ ; 6 —  $> 3,85$ .

соотношению площадей наиболее молодые лавовые покровы преобладают в Океане Бурь и Море Дождей. В морях восточного полушария подобные поверхности встречаются гораздо реже. Хотя моря восточного полушария меньше охвачены измерениями, можно предположить, что такие образования, как Море Спокойствия или Море Изобилия в целом относятся к более ранним морским структурам. Возможно, в этой особенности также сказывается подчеркнутая выше западно-восточная асимметрия лунного шара,

### 3. Многофазность формирования лунных ландшафтов

Факт многофазного заполнения морских бассейнов лавовыми потоками одновременного выплавления подтвержден неоднократно. В пользу подобного вывода свидетельствуют определения абсолютного возраста образцов морских базальтов из различных районов Луны, а также косвенные данные об относительном возрасте, стратиграфии и наблюдаемых астрофизических характеристиках отдельных регионов поверхности морского типа. Достаточно наглядно многофазность формирования «фоновой», первичной поверхности лавового покрова внутри одного и того же моря показывают схемы, представленные на рис. 69 и 76 (см. главу IV).

Некоторые закономерности распространения типов пород в масштабах всего лунного шара, объясняемые, по-видимому, многофазностью формирования, можно обнаружить на схеме физиографического деления поверхности (см. рис. 72). Существенной особенностью схемы является то, что ареалы, заключающие в себе области распространения более темных пород, последовательно заключены внутри ареалов пород с постепенно увеличивающейся светлотой. Как было показано выше, это соответствует постепенному возрастанию относительного содержания алюминия в породах, т. е. последовательности типов пород «базальты—нориты—анортозиты». Указанная селенографическая последовательность расположения ареалов совпадает также с временной последовательностью кристаллизации соответствующих пород, т. е. появлением первоначальных расплавов на поверхности. Можно предположить, что, например, норитовые расплавы в свое время заполняли глобальные депрессии внутри областей, занятых анортозитовыми габбро, а затем морские базальты подобным же образом заполнили депрессии норитового ложа спустя несколько сотен миллионов лет. Следует обратить внимание, что морские базальты нигде не имеют прямого контакта с породами анортозитового ряда. Морские регионы окружены ореолом пород норитового типа, который имеет различную протяженность в зависимости от топографии местности, однако в любом случае служит промежуточной областью между морской поверхностью и более светлым (чем нориты) материковым поверхностным ма-

териалом. Эту особенность в данном случае нельзя считать чисто техническим следствием генерализации изображения при мелкомасштабном картировании. Плавный и строго последовательный переход от темных к более светлым породам можно проследить и на крупномасштабных

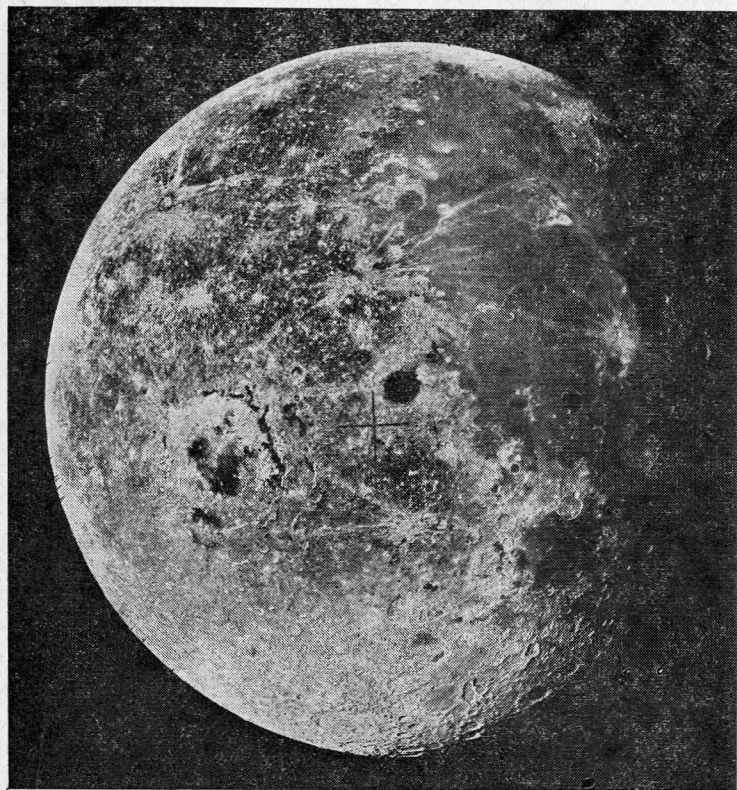


Рис. 77. Снимок Луны, полученный с расстояния 6,11  $\rho R$  АМС «Зонд-8».

картах альbedo, упоминавшихся в главе IV. Особый интерес представляет более подробное рассмотрение характера контакта морских и материковых областей и возникающей при этом переходной зоны между морем и материком.

Фотометрические оценки протяженности переходной зоны для западного полушария были проведены в [170]. Для этой цели использованы снимки видимого диска Луны, полученные с расстояния 6,11 лунного радиуса при селеноцентрическом фазовом угле  $39^\circ$  АМС «Зонд-8».

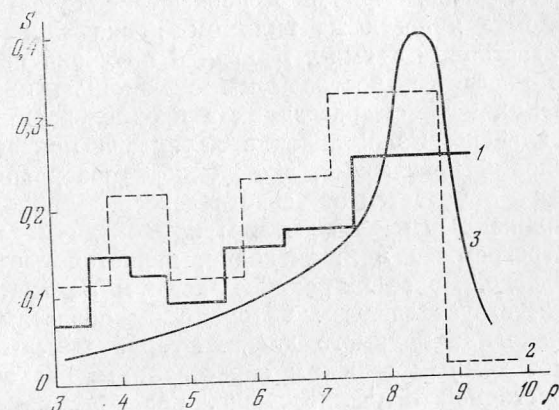


Рис. 78. Распределение яркости на видимом диске Луны (снимки, полученные АМС «Зонд-8»): 1 — измеренные яркости (снимок № 5), 2 — измеренные яркости (снимок № 37), 3 — теоретическое распределение яркости для тех же условий освещения и наблюдения в предположении однородного альbedo поверхности шара.

Расположение точки съемки в пространстве было таким, что граница материкового массива, простирающегося на обратное полушарие, и морских образований (Океана Бурь и Моря Влажности) проходит примерно по средней части изображения видимого диска (рис. 77).

С помощью автоматической фотометрической установки общий диапазон плотности исходного изображения был разделен на восемь равных интервалов плотности, образующих отдельные фотометрические разрезы. Фотометрическая стандартизация полученных изображений выполнялась по способу опорного каталога с использованием фотометрических измерений Шортхилла и Саари [119], что позволило перейти от величин плотности к значениям фактора яркости. На рис. 78 приведены гистограммы измеренного распределения яркости по видимому диску для снимков № 5 (1) и № 37 (2) из серии, получен-



ной АМС «Зонд-8». Яркость выражена через фактор яркости  $\rho$  (в процентах отражательной способности). Интервалы яркости соответствуют отдельным фотометрическим разрезам. Значения  $S$  соответствуют относительной площади, занимаемой каждым фотометрическим разрезом на видимом диске. Кривая 3 показывает теоретическое распределение яркости на видимом диске для данной фазы и расстояния съемки. Кривая 3 получена по теоретическим изофотам, построенным с помощью пространственной индикатрисы рассеяния в предположении однородного альbedo. Сопоставление характера приведенных распределений показывает, что наблюдаемое распределение яркости отличается от теоретического наличием двух четко выраженных максимумов. Причиной двуmodalного вида гистограмм 1 и 2, очевидно, является неоднородность альbedo. Более широкий максимум на гистограммах соответствует светлым материковым областям в западной половине видимого диска. Второй максимум соответствует темным морским образованиям, расположенным в восточной половине диска. Градиент изменения фотометрической функции в области контакта моря и материка в данном случае невелик, поэтому можно считать, что местные вариации значения фотометрической функции не оказывают существенного влияния на измеренное распределение яркости. Следовательно, возникает возможность выделить на гистограммах 1 и 2 (см. рис. 78) интервал яркости, соответствующий переходной зоне между морем и материком. На обоих снимках переходная зона проявляется как четко выраженный минимум, совпадающий примерно с одним и тем же интервалом яркости (фотометрическим разрезом). Исходя из описанной техники выделения на изображении переходной зоны, основным признаком этой области является наличие материала, по отражающей способности относящегося к обоим распределениям. Таким образом, переходную зону можно определить как зону смешения морских и материковых пород.

На рисунке 79 представлен фотометрический разрез снимка № 5, соответствующий по интервалу яркости переходной зоне «море — материк» в области Залива Росы, Океана Бурь и Моря Влажности. В зависимости от топографических особенностей протяженность переходной зоны различна. В западной части Моря Влажности про-

межуточная область имеет ширину от 5 до 20 км. Отдельные участки на границе Океана Бурь отличаются относительно резким переходом и промежуточная область суживается здесь до 1—3 км. Наиболее узкие участки пе-

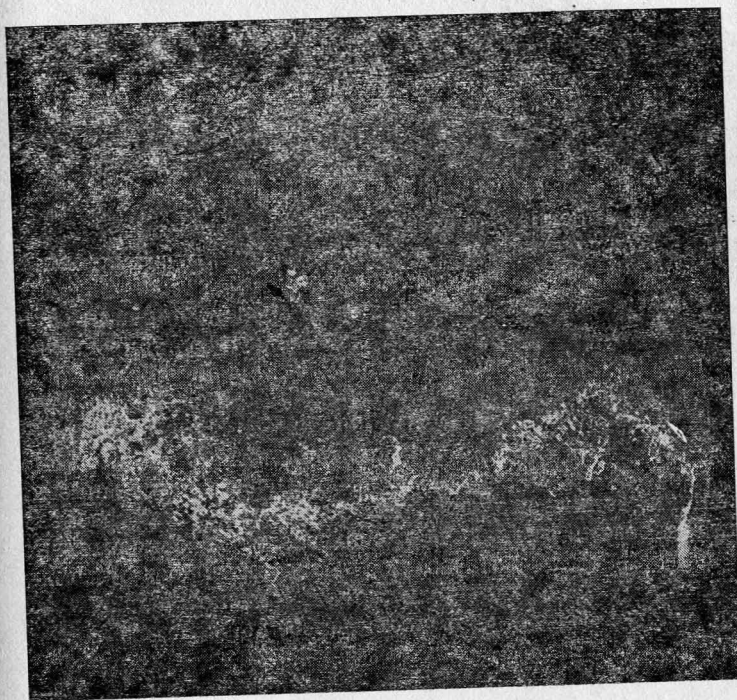


Рис. 79. Фотометрический разрез снимка № 5, соответствующий интервалу яркости переходной зоны.

редной зоны приходится на районы кратеров Дамуазо, Ханстен и Бийи. В среднем переход от поверхности морского типа к материковому занимает довольно широкую полосу — около 30—40 км. В районе кратеров Васко да Гама и Крафт переходная зона расширяется до 60 км, поскольку здесь область контакта моря и материка перекрывается светлыми лучами и сопутствующими им выбросами. Подобный же характер имеет переходная зона в северо-западной части Залива Росы. В области затопленных



кратеров Эддингтон, Струве и Рессел наблюдается наиболее резкая граница между темным покрытием дна и светлым валом. В отдельных местах переходная зона не превышает, по-видимому, 1—2 км.

К случаю сравнительно узкой переходной зоны относится область контакта моря и материка в южной части кратера Лемонье, подробно исследованная в процессе работы самоходного аппарата «Луноход-2».

Фотометрические измерения, проведенные с помощью телефотометров лунохода, позволили получить распределение материала с различной отражательной способностью в поверхностном слое различных участков переходной зоны. Сопоставление результатов яркостных измерений с данными о химическом составе пород, определенном в тех же точках маршрута лунохода, обеспечило возможность комплексного анализа [123].

Для выполнения фотометрических измерений в поле зрения панорамных телефотометров лунохода были установлены эталонные таблицы с полями различной отражательной способности. Общее число полей, представляющих 39 градаций от черного до белого, обеспечило измерение путем прямого сравнения яркости деталей лунного реголита в широком диапазоне углов падения и отражения света. В процессе предварительных исследований яркость полей эталонной таблицы была определена относительно яркости белого экрана, покрытого окисью магния. Это позволило измерить отражательную способность лунного вещества в системе стандарта яркости, наиболее часто применяемого при исследовании природных субстанций. Измеренные яркости с помощью описанной выше (см. главу IV) пространственной индикатрисы рассеяния были затем пересчитаны в значения альбедо.

На рисунке 80 показан в качестве примера фрагмент панорамы с изображением фотометрической эталонной таблицы и границами участков, внутри которых проводились измерения. На каждой панораме область измерений располагалась под изображением эталонной таблицы. Общая площадь каждого исследованного участка (для одной панорамы) составляет около 1 кв. м. Размер каждой элементарной площадки, суммарная яркость которой измерялась, достигал несколько сантиметров в поперечнике. Площадки распределены равномерно внутри участков,

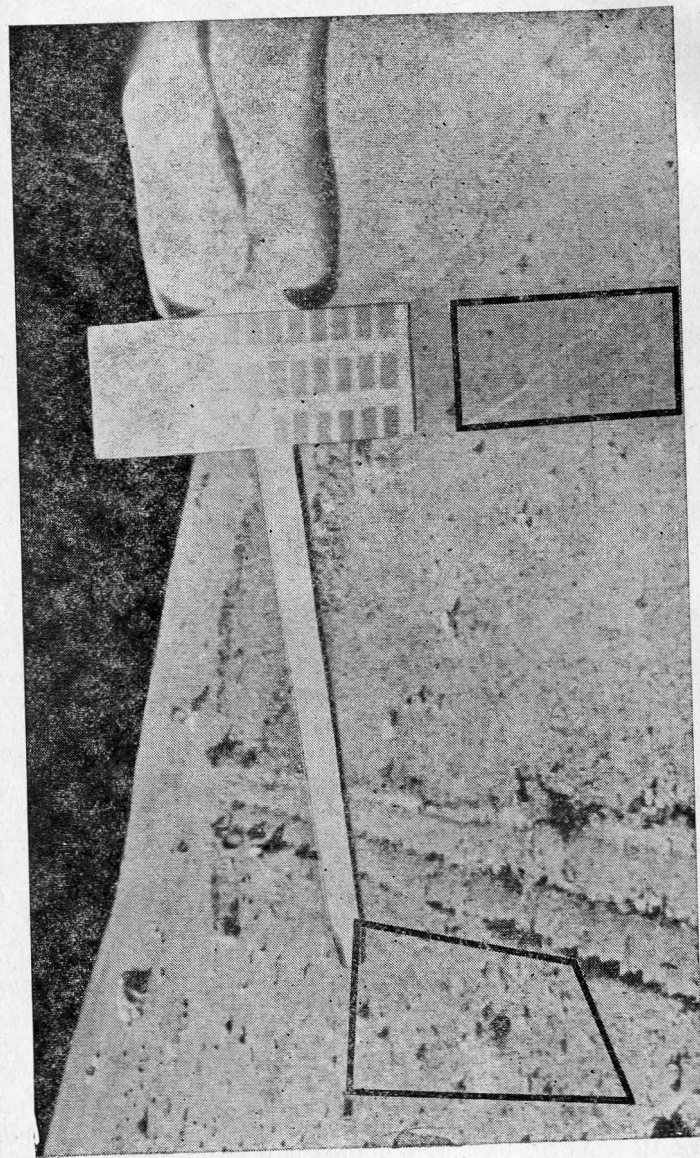


Рис. 80. Фрагмент панорамы с фотометрической эталонной таблицей. Очерчены границы участков, внутри которых проводились измерения яркости.

Таким образом, результаты измерений по отдельным панорамам можно рассматривать как отдельные статистические выборки, характеризующие районы измерений. Для совместного анализа использованы результаты измерений на панорамах, полученных во второй и третий

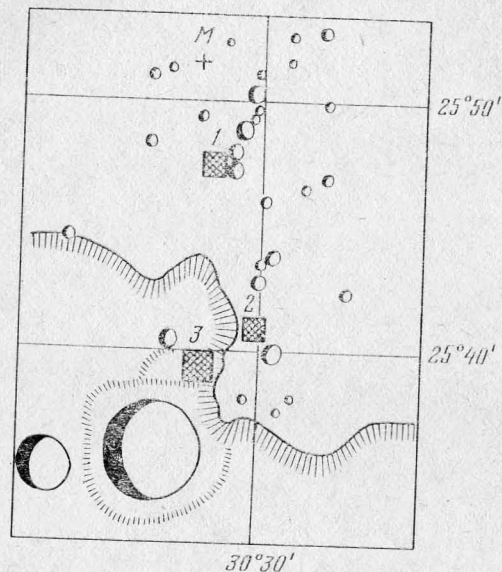


Рис. 81. Схема расположения участков фотометрических измерений: 1 — панорамы 13 и 16, 2 — панорама 9, 3 — панорамы 27, 29 и 31, М — место посадки автоматической станции «Луна-24».

лунные дни работы «Лунохода-2». Панорамы 13 и 16 (второй день) отображают поверхность морского типа в районе, расположенном к югу от места посадки на расстоянии около 4 км (рис. 81). Панорама 9 (третий день) отображает поверхность морского типа непосредственно на границе с материковой возвышенностью. Панорамы 27, 29 и 31 (второй день) отображают поверхность материкового типа на валу кратера диаметром около 2 км.

С учетом близости расположения и общей однородности местности, выборки яркостных измерений по панорамам 13 и 16 объединены в одну, так же как и выборки, относящиеся к панорамам 27, 29 и 31. Все полученные

распределения имеют одну примечательную особенность — бимодальный вид с вторичным максимумом, смещенным от центра распределения в область более высокого альbedo вещества. Подобный характер распределений позволяет каждое из них разделить на два, близких к нормальному. На рис. 82 сопоставляются результаты сравнения

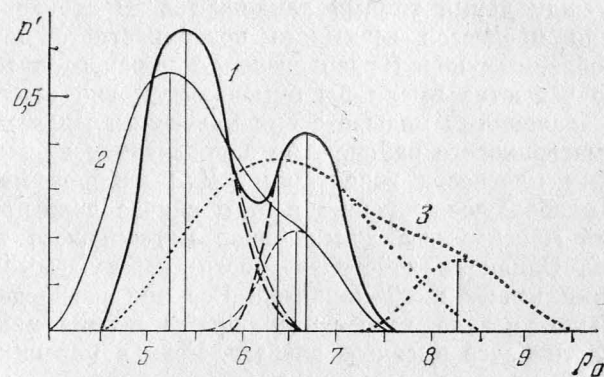


Рис. 82. Кривые распределения вещества с различным альбедо в морских (1, 2) и материковых (3) районах по измерениям на панорамах, полученных «Луноходом-2». По оси ординат отложены значения относительной плотности распределения. Значения альбедо приведены в шкале измерений по магниевому экрану.

распределений вещества с различным альбедо для указанных выше двух районов морского типа (1 и 2) и одного района материковой поверхности (3). Дисперсионный анализ по критерию Фишера показывает, что различия выделенных распределений значимы для случая 1 и 2 с доверительной вероятностью более, чем 0,95, а для случая 3 — с доверительной вероятностью более, чем 0,99. Следовательно, реальность выделенных частных распределений позволяет заключить, что в составе каждой из выборок представлены два различных вида покровного вещества. Положение частных центров распределений на всех трех кривых четко показывает, что главный максимум в распределениях для морских районов соответствует веществу морского типа, а вторичный — привнесенному веществу материкового типа. Центры распределений, соответствующих вторичным максимумам на кри-



вых 1 и 2, практически совпадают с центром распределения, соответствующего главному максимуму на кривой 3 (район материкового типа).

Сопоставляя вид распределений для морских и материковых районов, можно сделать определенные выводы о природе наиболее вероятных процессов обмена веществом между двумя типами ландшафтов. В случае преобладания процессов взаимного поверхностного переноса раздробленных пород распределения морского и материкового вещества имели бы бимодальный вид с одинаковыми значениями моды в обоих максимумах для морского и материкового районов, но с противоположными значениями плотности вероятности. Для районов морского типа наибольшее значение в этом случае должен иметь первый максимум, а для районов материкового типа — второй. Однако в действительности наблюдаемые соотношения имеют иной характер. Все три распределения, как было указано, имеют вторичный «малый» максимум в области более высокого альбеда. Если в морских районах присутствует вещество с соседнего материка, то в материковых районах морское вещество в поверхностном слое практически отсутствует. Подобный вывод согласуется с результатами других исследований. Анализ химического состава реголита в местах посадки КК «Аполлон» показал, что незначительная примесь морского материала в поверхностном слое материков и материковых «побережий» является определенно существующей закономерностью, так же как и значительное содержание материкового вещества в составе реголита морских районов [171].

Теоретическое распределение вещества с различным альбеда в переходной зоне также имеет бимодальный вид. Для получения теоретического распределения можно воспользоваться общей функцией распределения альбеда, представленной формулой (4.42) (см. главу IV). Диапазон альбеда, соответствующий переходной зоне, можно принять согласно фотометрическим измерениям в кратере Лемонье от 4,5 до 7,0 в шкале яркостных измерений на «Луноходе-2». Величины отражательной способности лунного вещества в этой системе измерений отличаются от значений яркости, задаваемых системой каталога [119]. Различие систем учитывалось с помощью переходного коэффициента. Кривая на рис. 83 показывает результаты

расчетов по формуле общего теоретического распределения (4.42) для названного выше диапазона альбеда при условии, что  $f(4,0) = 0$  и  $f(7,5) = 0$ . Гистограмма на рис. 83 представляет эмпирическое распределение альбеда для переходной зоны по данным измерений в районе работы «Лунохода-2». Область измерений соответствует

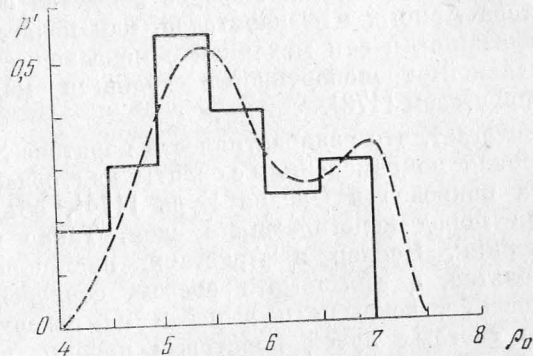


Рис. 83. Теоретическая кривая распределения альбеда поверхностного вещества в переходной зоне. Гистограмма показывает измеренное распределение альбеда в переходной зоне кратера Лемонье.

полосе шириной несколько километров. В гистограмме обобщены результаты определений альбеда по трем панорамам, изображающим поверхность морского типа на разном удалении от материка. По критерию Колмогорова эмпирическое распределение альбеда вещества в переходной зоне совпадает с теоретическим с вероятностью 0,986, что подтверждает типичность бимодального распределения с вторичным максимумом, смещенным в область более высокого альбеда, для переходной зоны «море — материк».

Наблюдаемые факторы получают наиболее вероятное объяснение в предположении преимущественного влияния на формирование покровного слоя реголита вертикального перемешивания при послойном залегании пород, образовавшегося в процессе многофазового выплавления. Доминирующее значение вертикального перемешивания подтверждается многими данными. Исследование вещества в колонках лунного грунта, полученных глубоким бурением, показало, что практически весь материал



лунного грунта имеет признаки пребывания на поверхности [172]. Изучение инородных включений в пробах грунта приводит к выводу об их местном происхождении. Так, например, исследование фрагментов КРЕЕР-базальтов в образцах с места посадки КК «Аполлон-15» подтверждает вынос этого материала на поверхность при вертикальном перемешивании. Перенос вещества с расстояния кратера Аристилл незначителен, как полагают авторы исследования, и сам механизм обмена веществом при горизонтальной транспортировке является малоэффективным процессом [173].

Вуд полагает, что радиоактивность норитового уровня, обнаруженная по измерениям с орбиты над областью базальтовых покровов в Океане Бурь [174], объясняется выбросами пород подстилающего слоя. Такие кратеры, как Коперник, Кеплер и Аристарх, проникли сквозь слой базальтов, а взрывные процессы, сопровождавшие их образование, вскрыли и вынесли на поверхность в материале светлых лучей норитовые породы, имеющие более высокое альbedo и более высокий уровень радиоактивности.

Андре и др. [175] также отмечают, что химические аномалии по данным орбитальной рентгеновской съемки ассоциируются с ударными кратерами и их выбросами. В морских областях послеморские кратеры, как правило, окружены веществом, по химическому составу отличающимся от пород окружающей местности. Например, изменения относительного содержания магния и алюминия ( $Mg/Al$ ) в Море Кризисов, вероятно, показывают, что при образовании ударного кратера Пикар на поверхность были вынесены обогащенные магнием базальты, слой которых залегает на глубине около 1,8 км. Если выбросы, окружающие послеморские кратеры, характеризуются необычно высоким значением  $Al/Si$  и низким отношением  $Mg/Al$ , можно предположить, что подобные образования проникли сквозь базальтовый покров и достигли материкового основания морей. Вынос на поверхность подстилающих пород, принадлежащих к более ранним фазам формирования поверхности Луны, отмечается также и для материковых районов. Таким примером материкового кратера, связанного с химической аномалией выбросов, может служить Прокл. Величины отношений  $Al/Si$  и

$Mg/Al$  для Прокла ниже, чем у пород окружающего материкового ландшафта. Наоборот, кратер Капелла, расположенный на материке между Морем Изобилия и Морем Нектара, отличается от окружающей поверхности более высоким значением  $Al/Si$ .

Возвращаясь к результатам подробного исследования переходной зоны в кратере Лемонье, также можно проследить связь между распределением вещества в поверхностном слое и наличием кратеров.

Распределения вещества по альbedo, полученные в разных участках переходной зоны и соседнего материкового массива, позволяют оценить содержание более светлой составляющей по объему материала. «Глубину» проникновения метода фотометрического дистанционного анализа состава вещества можно принять постоянной. Поэтому измеренная площадь распространения выделенного по альbedo материала пропорциональна объему, и, следовательно, отношение площадей равно относительному содержанию данной составляющей поверхностного слоя по объему. Поскольку граничные значения альbedo, отделяющие различные породы, были определены выше на основании анализа общего распределения альbedo, в выборках, представленных на рис. 82, можно выделить материковые породы в составе распределений для участков морской поверхности и более светлые породы в составе распределения для материкового участка. Оказалось, что относительное содержание материковой подложки (в данном случае, вероятно, норитового состава) по объему составляет 35% для участка 1 и 25% для участка 2 (см. рис. 81). Однако участок 1 удален от материкового массива примерно на 2 км, тогда как участок 2 находится в непосредственной близости от материка. Последнее обстоятельство явно противоречит предположению о горизонтальном переносе как основном процессе обмена веществом в переходной зоне между морем и материком. В то же время при доминировании вертикального перемешивания подобное соотношение материкового вещества в поверхностном слое участков 1 и 2 получает свое объяснение. Участок 1 расположен непосредственно вблизи двух кратеров, один из которых имеет диаметр около 350 м и глубину около 50 м, а другой — диаметр 250 м и глубину около 30 м. Очевидно, что глубина проникновения

взрыва в момент образования лунки была больше, так как современная форма дна кратеров определяется слоем насыпного материала и процессами склонового оползания реголита. Поэтому слой базальтового покрова в рассматриваемом районе, по-видимому, не менее 50 м, а светлая составляющая в веществе грунта принадлежит материковой подложке, вынесенной на поверхность взрывом при образовании кратера. Участок 2 удален от ближайшего кратера подобных размеров на расстояние в несколько сотен метров. Поэтому относительное содержание материковой составляющей в грунте ниже, несмотря на близость участка измерений к материку и, вероятно, более тонкий слой морских базальтов.

Близкую по величине оценку мощности верхнего слоя морских базальтов дает Спудис для района места посадки КК «Аполлон-15» в предгорьях Апеннин [173]. По глубине наиболее крупных кратеров в этом районе и содержанию КРЕЕР-составляющей в поверхностном слое грунта можно предположить, что граница между слоем морских базальтов и залегающим ниже слоем пород, обогащенном редкоземельными элементами, располагается в 40—80 метрах под поверхность.

Слоистое строение верхних горизонтов лунной коры было отмечено в месте посадки КК «Аполлон-17», расположенном в узкой долине с темным покрытием между двумя горными массивами (район Тавр — Литтров). Наличие слоев было обнаружено по результатам сейсмического зондирования с помощью четырех сейсмометров, установленных в окрестностях места посадки. Регистрировались скорости прохождения сейсмических волн, вызванных взрывами восьми специальных зарядов, взлетом лунного модуля и падением взлетной ступени. Анализ сигналов, поступивших от сейсмометров, выявил существование трех слоев в интервале глубин от нескольких десятков метров до нескольких километров. Верхний слой имеет мощность 248 м, следующий по глубине слой имеет мощность 925 м, ниже этого уровня расположен слой подстилающих пород, мощность которого превышает диапазон исследованных глубин. По величинам скорости прохождения сейсмических волн можно предположить, что два верхних слоя принадлежат морским базальтам, а подстилающие породы относятся к материковому типу [176].

Мощность слоев в масштабах крупных морских образований определена по данным орбитального радиолокационного зондирования на длине волны 60 м с борта КК «Аполлон-17» [177]. В Море Ясности обнаружены две отражающие области, являющиеся границами слоев. Средние глубины отражающих областей равны соответственно 0,9 км и 1,6 км. Интересно отметить, что в месте пологих валов, наблюдаемых на поверхности Моря Ясности, глубина слоев уменьшается, а их границы поднимаются к самой поверхности, так же как и в периферийной зоне. Возможно, эта особенность подтверждает вывод о связи пологих валов с первоначальной многокольцевой структурой бассейна Моря Ясности. В Море Кризисов внутренний отражающий слой был обнаружен на глубине 1,4 км по среднему уровню.

Признаки многофазного заполнения морских бассейнов базальтовыми лавами можно обнаружить при анализе характера распространения на поверхности материала с различным альбедо. Тонкая фотометрическая структура лавовых покрытий, как уже отмечалось выше (см. главу IV), отражает характер процессов и последовательность формирования подобных образований. Наиболее четко подобные особенности проявляются при изучении сравнительно небольших обособленных морей и внутрикратерных темных покрытий. В указанных случаях проще проследить тенденцию пространственного изменения альбедо поверхности и связь с топографией рассматриваемого района.

Примером может служить фотометрическое изображение кратера Гримальди, полученное в результате фотометрии одного из снимков западного полушария Луны, доставленных на Землю АМС «Зонд-8» [131]. Области равной яркости на этом изображении имеют четко выраженную асимметричную структуру (рис. 84). Центр наибольшего потемнения поверхности лавового покрытия внутри кратера наблюдается в его южной части. Характер изменения отражательной способности покровного вещества имеет вполне определенную связь с геометрией рельефа вала и прилегающей части дна кратера. К северу, где вал частично разрушен и рельеф имеет пологие формы, посветление поверхности происходит постепенно, на протяжении нескольких десятков километ-



ров, составляющих ширину переходной зоны. В южной части кратера вал сохранился полностью при значительном и довольно резком перепаде высот между гребнем вала и дном. Этому соответствует резкая граница между наиболее темной областью поверхности внутрикратерного

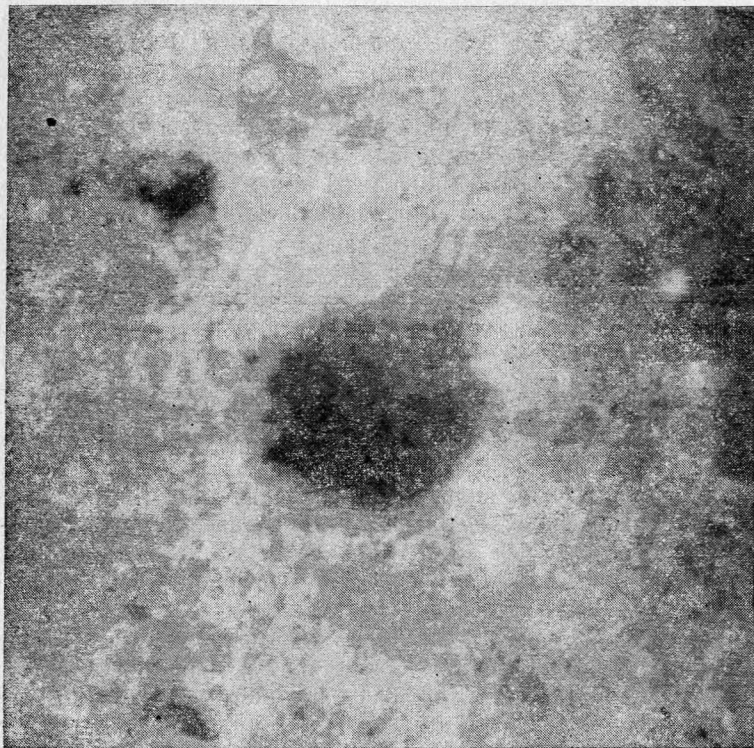


Рис. 84. Исофотометрическое изображение кратера Гримальди (по снимку из серии, полученной АМС «Зонд-8»).

заполнения и светлым материковым окружением Гримальди. По-видимому, можно считать достаточно обоснованной интерпретацию общей формы выделенных областей различной яркости как следствие динамики лавовых потоков (возможно, разновременных), имевшей место при

заполнении кратера Гримальди веществом морского типа. Несмотря на близость данного образования к западной границе Океана Бурь фотометрический анализ структуры кратера и его окрестностей свидетельствует против поверхностного заполнения Гримальди лавой из соседних морских районов. Источник темного материала, несомненно, находится внутри кратера и, вероятно, в его южной части.

Положение в плане границ областей различной яркости на рис. 84 зависит в основном от выбора выделяемых интервалов плотности исходного изображения. Поэтому не следует отождествлять полученные контуры с очертаниями реальных лавовых потоков. Однако наблюдаемая тенденция изменения альbedo полностью подтверждает допустимость приведенного толкования фотометрической структуры кратера.

Описанное явление — асимметричное распространение осветления поверхности морского типа от отдельных «центров» или «очагов» наиболее темного покровного вещества — прослеживается и при изучении других подобных образований.

В главе IV приводилась крупномасштабная карта альbedo Моря Восточного, позволяющая проследить особенности фотометрической структуры этого образования (см. рис. 61). На рис. 85 представлена кривая распределения вещества с различным альbedo в Море Восточном (1). Результаты подсчетов отнесены к площади территории, внутри которой поверхностный материал имеет альbedo меньше 12%. Для сравнения на том же графике показана часть кривой общего распределения альbedo вещества для всей лунной поверхности в целом (2). Кривая общего распределения построена в том же интервале альbedo, что и кривая (1), и нормализована по значению относительной плотности вероятности  $p'$  для центра частного распределения морского материала, т. е. при  $\rho_0 = 7,36\%$ . Из обоих распределений выделены частные, соответствующие основным типам лунных пород. Для района Моря Восточного частное распределение, представляющее морские базальты, практически совпадает с таким же распределением для всей Луны. Следовательно, можно сделать вывод, что по своей природе равнина Моря Восточного не отличается существенно от других лунных морей. Несколько



необычен переход от морских базальтов к материковым породам. Из глобального распределения лунных пород на поверхности Луны и физиографической схемы лунного шара (см. рис. 72) следует, что лунные моря окружены поясом норитовых пород. В распределении вещества по альбедо эта особенность отражается появлением обособ-

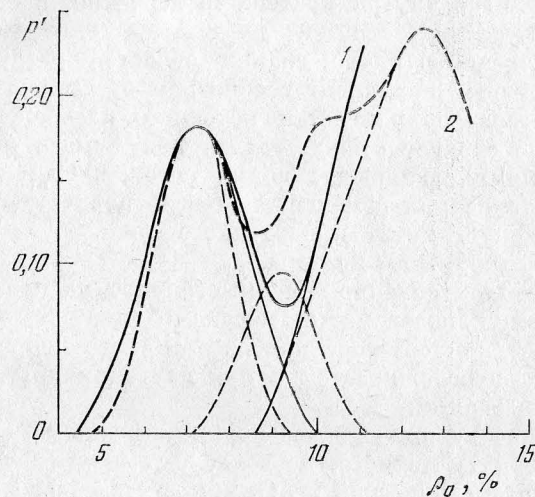


Рис. 85. Распределение альбедо в Море Восточном (1) и часть кривой общего распределения альбедо на Луне для того же интервала значений (2).

ленного максимума, соответствующего норитам. В случае Моря Восточного норитовый пояс в несколько раз меньше по протяженности, чем для других морей. Поэтому в распределении вещества по альбедо для Моря Восточного выделяется лишь два частных распределения: морские базальты и анортозитовые габбро. Норитовые породы из-за малости занимаемой ими площади не выделяются в обособленное частное распределение.

Следует обратить внимание, что при общем совпадении вида кривых дисперсия распределений морского и материкового вещества в случае Моря Восточного больше. Возможно, что в отдельных, наиболее узких участках переходной зоны норитовые породы полностью были перекрыты морскими базальтами. Тогда промежуточный по

отражательной способности пояс вокруг морской равнины можно интерпретировать как зону механического смешения темных морских пород и более светлой материковой подложки при кратерообразующих процессах. Оценивая результаты статистического анализа распределения вещества с различным альбедо в районе Моря Восточно-

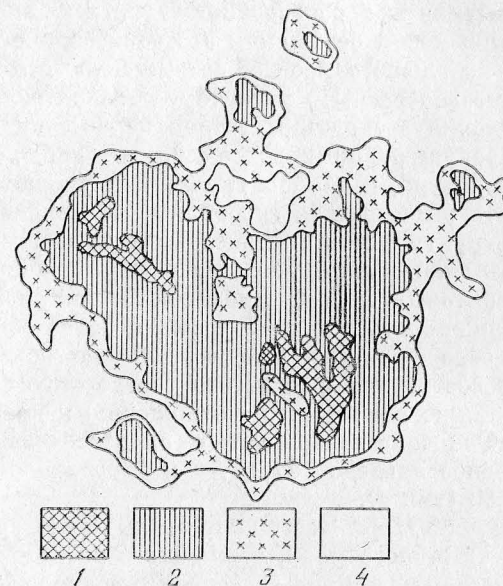


Рис. 86. Типы пород в Море Восточном по признаку альбедо: 1 — темные морские базальты, 2 — светлые морские базальты; 3 — нориты, 4 — анортозитовые габбро.

го, можно заключить, что выведенные для всей Луны зависимости альбедо от типа пород применимы и в данном случае. На основании этих общих для лунной поверхности закономерностей и статистического анализа распределения альбедо в рассматриваемом районе (см. рис. 85) выделены структурные единицы, распространенность которых в области Моря Восточного показана на физиографической схеме (рис. 86). Центральная часть равнины внутри многокольцевого образования заполнена морскими базальтами, среднее альбедо которых около 7%, а среднее значение Al/Si предположительно 0,35 (тип 2).

Внутри этой области располагаются отдельные очаги более темного вещества со средним альбедо 5,75% и относительным содержанием алюминия 0,28 (тип 1). Один из таких центров темных пород расположен в северо-западной части морской равнины. В южной части моря выделяются два центра вещества с низким альбедо, разделенные вытянутым образованием светлой окраски. На снимках при косом освещении это образование имеет вид вала или небольшого хребта, возвышающегося над окружающей местностью. По характеру деталей рельефа можно предположить сходство светлой перемычки с окружающей морскую равнину всхолмленным ландшафтом материка. Вероятно, в данном случае над уровнем морской поверхности возвышается гребень, принадлежавший к доморской структуре многокольцевого бассейна.

Центральная область морских базальтов окружена полосой норитовых пород, имеющей очень незначительную протяженность в южной части, и более обширной на севере и северо-востоке. Среднее альбедо поверхности в этой зоне составляет 9,25%, что соответствует вероятному содержанию алюминия по отношению к кремнию 0,44 (тип 3). «Фоновая» поверхность — аортозитовые габбро — имеет среднее альбедо 11,25% и вероятное значение  $Al/Si = 0,50$  (тип 4).

На примере Моря Восточного можно проследить этапы эволюции типичного моря, возникшего внутри многокольцевого бассейна, приняв за основу предположение о последовательном многофазовом формировании современного лунного ландшафта.

Первый этап формирования поверхностных пород завершился образованием «фоновой» поверхности бассейна, сложенной аортозитовыми габбро. Затем около 65% рассматриваемой территории было перекрыто более темным веществом, предположительно норитового состава. Поскольку границы распространения этого типа пород коррелируют с рельефом центральной впадины бассейна, можно допустить, что к этому времени многокольцевая структура уже существовала. Дополнительным подтверждением служит наличие пород с подобной отражательной способностью на окраинах Моря Весны и Моря Мирного, соседних с Морем Восточным, вкраплениях темных пород в окружающем материке. При этом следует обратить внима-

ние на расположение упомянутых образований, составляющих внешнее кольцо малых морей вокруг центральной равнины Моря Восточного, и, очевидно, генетически связанных с ним.

Можно также предположить, что появление на поверхности норитовых пород отделено по времени от самого образования многокольцевого бассейна некоторым периодом. Кратер Маундер, расположенный к северу от Моря Восточного, к моменту появления на поверхности этих пород уже существовал, поскольку на его юго-западном и северо-восточном склонах видны более свежие выходы материала с подобной отражательной способностью. Эти наслоения перекрывают мелкие формы рельефа, образованные продуктами выбросов из кратера при его возникновении. Однако упомянутые вторичные формы рельефа и сами продукты выбросов перекрывают светлый материал «фоновой» поверхности и формы рельефа, относящиеся к многокольцевой структуре бассейна. Относительно свежие, не подвергшиеся разрушению очертания кратера Маундер также говорят о том, что кратер возник уже после формирования кольцевых образований бассейна. Те же особенности имеет кратер Копф, расположенный к северо-востоку от равнины Моря Восточного. Таким образом, время появления многокольцевой структуры бассейна и время перекрытия центральной части породами предположительно норитового типа отделены периодом возникновения кратеров Маундер, Копф и, возможно, Гоманн.

Следующий, третий, этап развития формации связан с появлением морских базальтов. Около 45% территории внутри внешнего кольца Гор Рук в этот период было заполнено базальтовыми породами. Заполнение шло, как о том свидетельствует характер изофот на рис. 61, вокруг трех очагов — одного в северо-западной части и двух в юго-восточной части моря. Вкрапления вещества с подобным составом появились на валу кратера Маундер и внутри кратера Копф (см. рис. 86). Расположение этих вкраплений внутри границ более ранних выходов норитов может предполагать наличие глубинных каналов, по которым в периоды эндогенной активности происходит движение лавовых излияний к поверхности. Морские базальты заполнили на этом этапе впадины внешнего кольца, образовав Море Весны и Море Мирное. Последний этап эволюции



поверхности, связанный с эндогенными процессами в районе Моря Восточного, проявился, по-видимому, в формировании участков темных базальтов. Выделение этого типа пород произошло вокруг уже определившихся ранее очагов. Однако процесс охватил лишь небольшую часть (около 6%) территории и не затронул внешние области кольцевой структуры — Море Весны и Море Мирное.

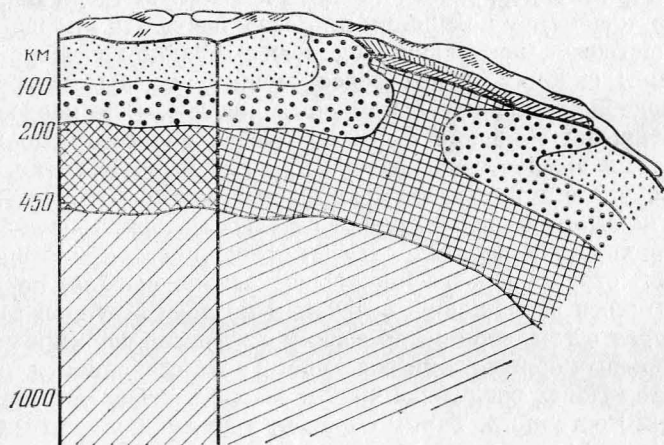


Рис. 87. Схема эволюции лунных недр и формирования поверхности.

Таким образом, комплексный анализ Моря Восточного показывает, что формирование бассейна и последующая эволюция всей структуры являются многофазовым процессом, что, по-видимому, типично для лунных образований такого характера.

Приведенный пример стратиграфической схемы Моря Восточного показывает также, что для грубой оценки абсолютного возраста пород можно использовать альbedo участков поверхности.

Связь многофазового формирования поверхности с эволюцией недр Луны в целом представляет схема, показанная на рис. 87, исходными данными для которой послужила схема термической эволюции лунных недр Токсоца и Джонстона [178] и схема химической дифференциации Луны Мак-Коннелла и Гаста (приводится в [28]). Указанные схе-

мы предполагают, что к завершению периода первичной дифференциации лунного вещества возникла структура лунных недр, показанная на вертикальном разрезе рис. 87. Верхние 200 км заняли анортозитовые породы и нориты. Слой, образовавшийся ниже, состоял из глубинных аналогов современных морских базальтов. На глубине более 450 км оказались породы с незначительным содержанием окислов алюминия и кальция. В последующий период зона плавления охватывала глубины от 100 до 200 км. Выше и ниже этого интервала глубин располагались породы, находившиеся уже в твердом состоянии. Выходы на поверхность расплавов из этой зоны образовали те области лунных материков, которые состоят теперь из пород норитового типа. Затем имел место относительно «спокойный» период, а спустя 1 млрд. лет от условного начала лунной истории внутренние процессы вновь активизировались. В расплавленном состоянии оказались породы слоя на глубине 200—450 км. Выходы на поверхность жидких лав из этого слоя заполнили углубления и впадины, образовав поверхность современных морей. Период формирования морей длился более 500 млн. лет (см. таблицу 31).

Подобное последовательное наложение слоев, вытекающих из недр, является как бы зеркальным отражением слоистого строения современной литосферы Луны. Оно полностью согласуется с внешними, обнаруженными по исследованиям строения лунной поверхности, признаками многофазовых процессов формирования морских и материковых ландшафтов Луны.

#### 4. Древний рельеф Луны

Выше было отмечено (см. главу II), что первоосновой планетарного рельефа Луны являются кольцевые структуры, время образования которых относят к периоду 3,85—4,25 миллиарда лет назад (см. таблицу 31). Однако, как показывает модель многофазового формирования современных ландшафтов Луны, наиболее древние кольцевые структуры к настоящему времени оказались погребенными под пластами расплавов более поздних излияний.

Мощность верхних слоев базальтовых пород можно оценить с помощью системы изопохит (линий равных значений мощности слоев), получаемых по измерениям высот



над окружающей местностью вала частично затопленных кратеров. Схема измеряемых и вычисляемых элементов показана на рис. 88. На снимках морских районов измеряют диаметр кратера  $D$  и остаточную высоту внешнего вала  $R_e$ . Если известна величина первоначальной высоты

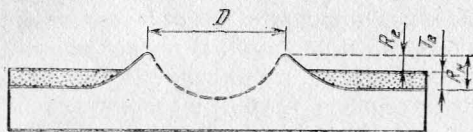


Рис. 88. Схема определения мощности базальтовых пород по высоте вала затопленного кратера.

вала  $R_H$ , то мощность базальтового напластования определится разностью:

$$T_B = R_H - R_e.$$

Статистический анализ позволил установить, что зависимость высоты внешнего вала от диаметра кратера носит степенной вид. Техника построения системы изопакит для морей видимого полушария и полученные результаты обобщены в работе Хёрца [179]. Согласно данным Пике, приводимым в [179], указанная зависимость имеет вид (5.6):

$$R_H = K \cdot D^\alpha, \quad (5.6)$$

причем для свежих кратеров, вал которых практически сохранился полностью, постоянные имеют следующие значения:

$$K = 0,158, \quad \alpha = 0,488.$$

Величины  $R_H$  и  $D$  измеряются в километрах.

За время послеморского периода общий процесс разрушения кратеров крупных размеров проходил медленно. На морской поверхности наиболее древнего возраста (около 3,8 млрд. лет) полностью разрушились кратеры диаметром 350—400 м (см. таблицу 32). Этот вывод подтвержден результатами специальных исследований, приводимыми в [179]. Таким образом, наибольшая степень разрушения вала ограничивается величиной  $< 50$  м.

Вместе с тем возможная индивидуальная степень деградации кратеров требует учета, поскольку полупогребен-

ные формы древнего материкового рельефа могут иметь различный возраст и носить следы более интенсивного доморского разрушения. Используя собственные измерения материковых кратеров диаметром от 5 до 130 км и результаты других авторов, Хёрц получил эмпирические кривые зависимости  $R_H$  от  $D$  для различной степени общей деградации кратеров. Наиболее близко полученным кривым соответствуют выражения вида (5.6) при  $\alpha = 0,488$  и  $K_1 = 0,122$  для кратеров с общим разрушением 25% и  $K_2 = 0,077$  для кратеров с общим разрушением 50%. Использование этих данных и результатов измерения высоты остаточных валов погребенных кратеров в морских районах, позволили построить карты изопакит для большей части территории морей видимого полушария. Хёрц в основном использовал более ранние работы Де Хона, в которых системы изопакит даны для морей восточного и западного полушарий. Однако подробный учет особенностей геометрии погребенных образований показал, что абсолютные значения мощности базальтовых слоев, полученные Де Хоном, завышены примерно в два раза. По данным Хёрца основная площадь современных морей покрыта слоем базальтовых лав мощностью  $< 500$  м. На рис. 89 показаны системы изопакит для восточных морей: Моря Спокойствия, Моря Нектара и Моря Изобилия. Планиметрический анализ изопакит приводит к выводу, что средняя мощность пластов базальтовых пород не превышает 200 м, хотя в отдельных местах может достигать существенно больших величин (центральная часть Моря Нектара). Характер изопакит и абсолютные значения мощности покровных пород выявляют различия между глубинным строением округлых морей (Море Нектара) и морских образований неправильной формы (Море Спокойствия). Более «глубокими» оказываются моря западного полушария (рис. 90). Средняя мощность базальтов в Море Дождей по накопленной кривой распределения составляет около 450 м, а для Океана Бурь — около 350 м. В соответствие с приведенными данными оценку общей массы морских базальтов, сделанную в главе II, следует, по-видимому, уменьшить в два-три раза.

Изопакиты морей западного полушария выявляют несколько обособленных круговых впадин. Область наибольшей мощности базальтового покрова соответствует хорошо сохранившейся кольцевой структуре Моря Дождей. Южнее

располагаются впадины погребенной кольцевой структуры Моря Познанного и Моря Облаков. Подобная же депрессия соответствует Морию Влажности. В западной и северо-западной части Океана Бурь вырисовываются депрессии, которые практически не выделяются по иным признакам в современном рельефе этого района.

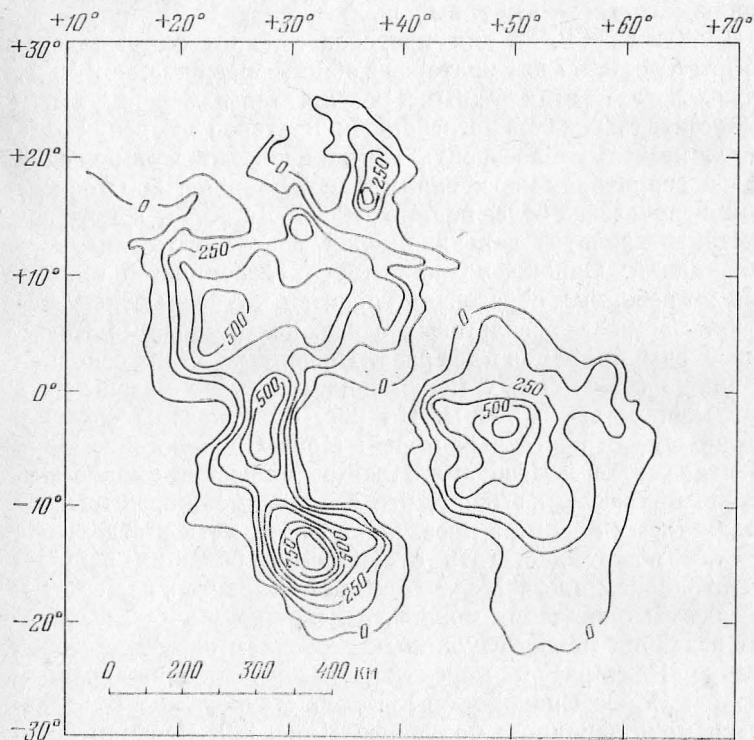


Рис. 89. Схема изопохит для морей восточного полушария. Изопохиты проведены через 125 м.

Вместе с тем, за исключением Моря дождей, очертания впадин довольно размыты, что может предполагать слой промежуточного перекрытия изначальных кольцевых структур. К такому предположению приводит и оценка абсолютной мощности базальтового слоя. Выше на при-

мере планетарных кольцевых структур обратного полушария было показано, что максимальная глубина подобных впадин может достигать 5—6 км относительно гребня внешнего вала. На схеме изопохит западных морей к такой первоначальной глубине приближается лишь оценка

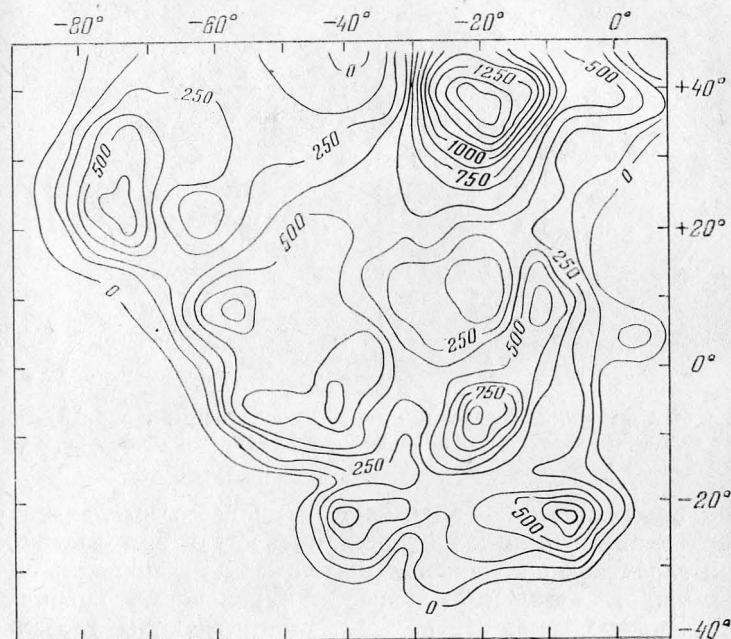


Рис. 90. Схема изопохит для морей западного полушария.

впадины Моря дождей. Во всех остальных случаях максимальная мощность слоя базальтовых пород существенно меньше возможной первоначальной глубины кольцевых образований. Это несоответствие становится объяснимым, если частично погребенные кратеры, по соотношениям размеров которых сделана оценка толщины базальтов, составляют рельеф промежуточного слоя пород, перекрывшего древние кольцевые структуры. Обратившись к временной последовательности событий лунной истории (таблица 31), можно сделать вывод, что промежуточными наслоениями являются норитовые породы. Время кристал-



лизации норитов относится к эпохе, когда основные планетарные кольцевые структуры уже существовали. То, что нориты являются в морских областях подстилающим слоем пород, на ряде примеров было показано выше, при рассмотрении модели многофазового формирования лун-

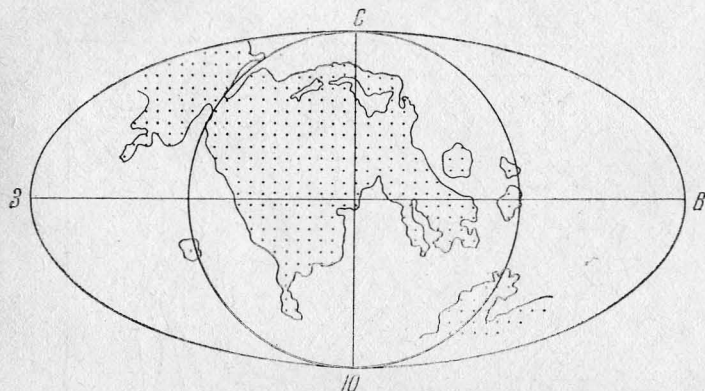


Рис. 91. Схема общего строения лунной поверхности около 3,9 млрд. лет назад. Показаны области глобального распространения норитов.

ной поверхности. По-видимому, в процессе выплавления норитов ими были заполнены полностью или частично как глобальные понижения физической поверхности Луны, так и отдельные депрессии — кольцевые впадины.

Вероятно, рис. 91, показывающий границы глобального распространения норитов в соответствии с географической схемой лунного шара (см. рис. 72), передает в общих чертах строение поверхности Луны на рубеже Доимбрийского и Имбрийского периодов (около 3,9 млрд. лет назад), перед началом эпохи образования морей. Более поздняя датировка образования первоначальной кольцевой структуры бассейна Моря Дождей подтверждается рядом особенностей этого района. К их числу прежде всего относятся упоминавшиеся уже правильная округлая форма изопакит и значительная толщина базальта, близкая к первоначальной глубине впадины. По мнению многих исследователей формация Фра-Мауро, где нориты были обнаружены в большом количестве, имеет насыпную природу и образована выбросами из первоначаль-

ной впадины бассейна Моря Дождей. Следовательно, к моменту появления впадины нориты уже покрывали значительные территории поверхности в этом районе Луны.

Детальное представление о предполагаемом рельефе обращенного к Земле полушария Луны в эту эпоху дает

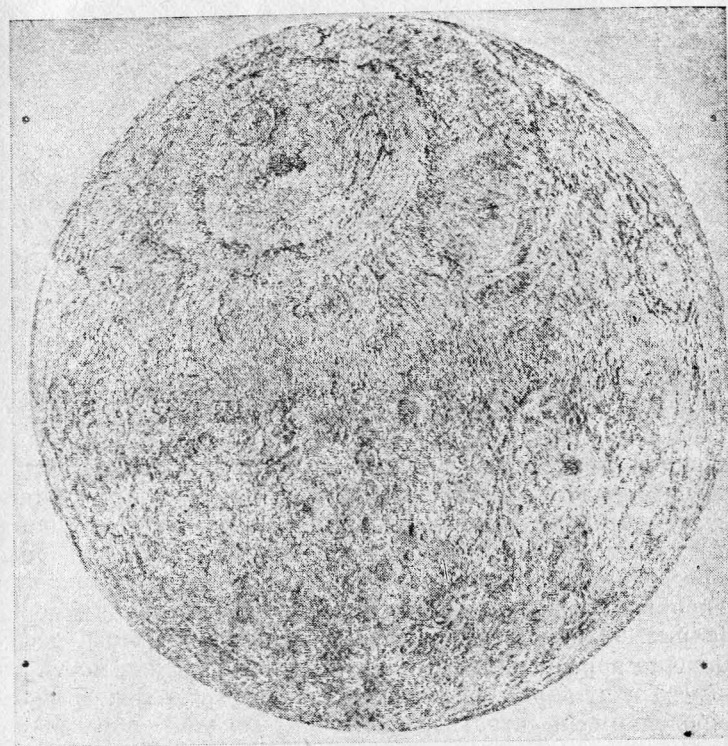


Рис. 92. Реконструированное изображение предполагаемого рельефа обращенного к Земле полушария Луны (около 3,9 млрд. лет назад).

реконструкция поверхности, проведенная Вилхелмсом и Девисом [181]. На рис. 92 представлено полукруговое изображение, соответствующее данной реконструкции. В указанную эпоху полностью сохранилась многокольцевая структура бассейна будущего Моря Дождей. По отдель-



ным современным деталям восстановлены очертания пяти колец, из которых внешнее проходит по современной границе Моря Познанного и Моря Спокойствия, причем впадина Моря Ясности остается внутри кольца. Очевидно, что частные детали строения колец и промежуточных

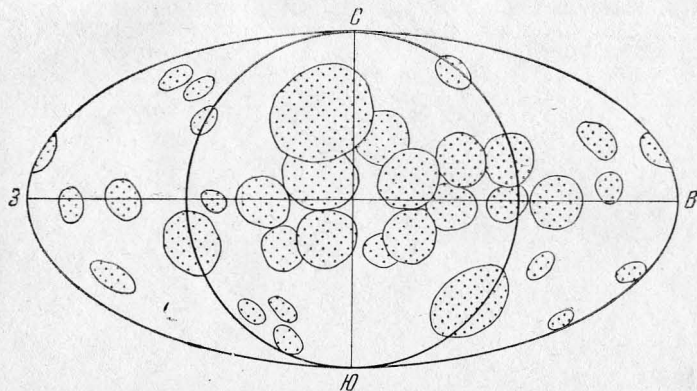


Рис. 93. Схема предполагаемого расположения древних кольцевых структур на поверхности лунного шара.

областей невосстановимы. На приводимом изображении эти подробности воспроизведены по аналогии с соответствующими сохранившимися формами многокольцевой структуры бассейна Моря Восточного и других подобных образований обратной стороны Луны, не подвергшихся интенсивным видоизменениям в эпоху формирования морей. На рис. 92 показаны также кольцевые структуры, послужившие первоначальными впадинами круговых морей видимого полушария. В соответствие с селенологическим датированием и стратиграфической шкалой образования форм лунного рельефа на рисунке изображены крупные кратеры Доимбрийского периода.

Обобщающая схема расположения древних кольцевых структур, построенная по результатам палеоселенографических исследований в [180—182], приведена на рис. 93. Большинство этих образований в пределах видимого полушария и на его границах с обратной стороной Луны к настоящему времени перекрыты норитовыми, а затем полностью или частично базальтовыми породами, и восстанавливаются лишь по отдельным сохранившимся деталям

кольцевых форм. Хотя все изображенные структуры относятся, по-видимому, к Доимбрийскому периоду, время их образования охватывает несколько сотен миллионов лет. Поэтому при попытках выявления возможных закономерностей в расположении древних форм следует учитывать не только топографические особенности и гипсометрию физической поверхности Луны (см. главу II, рис. 21), но и одновременность появления планетарных кольцевых структур.

Этот самый древний вид лунной поверхности в свое время был близкой аналогией вида поверхности земного шара, в геологической эволюции которого первые сотни миллионов лет относят к «лунной стадии» развития нашей планеты. Однако в дальнейшем, как известно, пути развития обоих небесных тел существенно разошлись. Эпоха наиболее бурных преобразований поверхности Луны завершилась в начале Эратосфеновского периода формированием поздних морей (около 3 млрд. лет назад). В геологической истории Земли это время соответствует начальной стадии Архейской эры и появлению первых органических соединений в земной среде. В противоположность богатым событиями последующим эпохам эволюции Земли, Луна как небесное тело практически остановилась в своем развитии на этой стадии. Одно из позднейших крупных событий лунной истории — образование кратера Коперник — произошло в поздний период Протерозойской эры на Земле, когда жизнь находилась на уровне простейших организмов и водорослей. Ударный метаморфизм в Море Изобилия (см. таблицу 31), отразившийся в образцах, доставленных на Землю автоматической станцией «Луна-16», происходил в Палеозойскую эру, на рубеже Кембрийского и Ордовикского периодов, что совпадает с появлением трилобитов в живой природе Земли.

Самые поздние события лунной истории, которые пока удалось точно датировать по радиационному возрасту реголита, относятся к времени Неогенового периода Кайнозойской эры Земли, т. е. они имели место еще до появления человека на нашей планете.

## ЛИТЕРАТУРА

1. *Yaplee B. S.* et al. The mean distance of the Moon as determined by radar: IAU Symposium No. 21.—Bull. Astr., 1965, No. 25.
2. *Куликов К. А.* Новая система астрономических постоянных.— М.: Наука, 1969, 92 с.
3. *Ковурин Ю. Л., Курбасов В. В., Лобанов В. Ф., Сухановский А. Н., Черных Н. С.* Лазерная локация светоотражателя, установленного на Луноходе-1.— Космич. исслед., 1971, т. 9, № 6, с. 912—919.
4. *Shelus P. M., Mulholland J. D., Silverberg E. C.* Laser observations of the Moon: normal points for 1972.— Astron. J., 1975, v. 80, No. 2, p. 154—161.
5. *Куликов К. А., Гуревич В. Б.* Основы лунной астрометрии.— М.: Наука, 1972, 392 с.
6. *Исакина И. В.* Фигура и гравитационное поле Луны.— В кн.: Исследование космического пространства.— Т. 5. Сер. «Итоги науки и техники».— М.: Изд-во ВИНТИ, 1973, с. 86—135.
7. *Cook A. H.* Geodetic constants and the motion of the Moon: IAU Symposium No. 21.—Bull. Astr., 1965, No. 25.
8. *Anderson J. D., Efron L., Wong S. K.* Martian mass and Earth—Moon mass ratio from coherent S-band tracking of Mariner 6 and 7.— Science, 1970, v. 190, No. 3916, p. 277—279.
9. *Melbourne W. G.* The determination of planetary masses from radio-tracking space probes and planetary radar.— In: 12th planetary meet. COSPAR.— Prague, 1969.
10. *Anderson J. D., Hilt D. E.* Improvement of astronomical constants and ephemerides from Pioneer radio-tracking data.— AIAAJ, 1969, v. 7, No. 6, p. 1048—1054.
11. *Аким Э. Л., Степаньянц В. А., Власова З. П.* Уточнение масс Земли и Луны по наблюдениям за движением удаляющихся от Земли автоматических межпланетных станций «Венера-4», «Венера-5», «Венера-6» и «Венера-7».— Докл. АН СССР, 1971, т. 201, № 6, с. 1303—1306.
12. *Аким Э. Л.* Определение поля тяготения Луны по движению искусственного спутника Луны «Луна-10».— Космич. исслед., 1966, т. 4, № 6, с. 823—826.
13. *Muller P., Sjogren W. L.* Mascons: Lunar mass concentrations.— Science, 1968, v. 161, No. 3848, p. 680—684.
14. *Wong L., Buechler G., Downs W., Sjogren W., Muller P., Gottlieb Y.* A surface-layer representation of the lunar gravitational field.— J. Geophys. Res., 1971, v. 76, No. 26, p. 6220—6236.
15. *Anderson M.* Farside lunar gravity from a mass point model.— In: Lunar Science VI.— Houston: The Lunar Science Institute, 1975, p. 9—11.
16. *Lichtenstein B. R., Coleman P. J., Russell C. T.* A comparison of contour maps derived from independent methods of measuring lunar magnetic fields.— In: Proc. Lunar Planet. Sci. conf. 9th (1978), p. 3079—3092.
17. *Долгинов Ш. Ш., Ерошенко Е. Г., Жузлов Л. И., Шарова В. А., Внучков Г. А., Окулевский Б. А., Базилевский А. Т., Ваньян Л. Л., Егоров И. В., Файнберг Э. Б.* Магнетизм и электропроводность Луны по данным «Лунохода-2».— В кн.: Космохимия Луны и планет.— М.: Наука, 1975, с. 314—322.
18. *Троицкий В. С., Тихонова Т. В.* Результаты исследования поверхностного слоя Луны по ее собственному излучению.— В кн.: Современные представления о Луне.— М.: Наука, 1972, с. 46—64.
19. *Майер К.* Тепловое радиоизлучение Луны и планет.— В кн.: Планеты и спутники.— М.: Мир, 1974, с. 207—266.
20. Apollo 15 Preliminary Science Report. NASA SP—289, 1972.
21. *Вуд Дж. А.* Обзор типов лунных пород и сравнение лунной и земной коры.— В кн.: Космохимия Луны и планет.— М.: Наука, 1975, с. 29—45.
22. *Виноградов А. П.* Дифференциация вещества Луны.— В кн.: Космохимия Луны и планет.— М.: Наука, 1975, с. 5—23.
23. *Taksöz M. N.* Lunar and planetary seismology.— Revs Geophys. and Space Phys., 1975, v. 13, No. 3, p. 306—311.
24. *Латем Г., Накамура И., Дорман Дж., Дьоньебье Ф., Юинг М., Ламлейн Д.* Результаты пассивного сейсмического эксперимента по программе «Аполлон».— В кн.: Космохимия Луны и планет.— М.: Наука, 1975, с. 299—310.
25. *Hodges R. R., Hoffman J. H., Johnson F. S.* The lunar atmosphere.— Icarus, 1974, v. 21, No. 4, p. 415—526.
26. *Hoffman J. H., Hodges R. R., Johnson F. S., Evans D. E.* Lunar atmospheric composition results from Apollo 17.— In: Proc 4th Lunar Sci. Conf., Houston, Tex., 1973, v. 3.— New-York, 1973, p. 2865—2875.
27. *Hoffman J. H., Hodges R. R., Johnson F. S., Evans D. E.* Composition and physics of the lunar atmosphere.— In: Space Res. 14. Proc. 16th Planetary Meet. COSPAR, Constance, 1973.— Berlin, 1974, p. 607—614.
28. *Рускол Е. Л.* Происхождение Луны.— М.: Наука, 1975, 188 с.
29. *Hodges R. R.* Formation of the lunar atmosphere.— Moon, 1975, v. 14, No. 1, p. 139—157.
30. *Whipple F. L.* The meteoritic environment of the Moon.— Proc. Roy. Soc., 1967, v. A296, No. 1446, p. 304—315.
31. *Chapman C. R.* Surface properties of asteroids.— Massach. Inst. of Technology, 1972.
32. *Hörz F., Hartung J. B., Gault D.* Micrometeorite crater on lunar rock surfaces.— J. Geophys. Res., 1971, v. 76, No. 25, p. 5770—5798.
33. *Duennebier T., Dorman J., Lammlein D., Latham G., Nakamura Y.* Meteoroid flux from long period lunar seismic data.— In: Lunar Science VI.— Houston: The Lunar Science Institute, 1975, p. 217—219.
34. *Berg O. E., Richardson F. F., Rhee J. W., Aner S.* Preliminary results of a cosmic dust experiment on the Moon.— Geophys. Res. Lett., 1974, v. 1, No. 7, p. 289—290.



35. *Rennilson S. T., Criswell D. R.* Surveyor observations of lunar horizon-glow.— *Moon*, 1974, v. 10, No. 2, p. 121—142.
36. *Зверева А. М., Северный А. Б., Терез Э. И.* Измерения яркости неба на Луноходе-2.— *Космич. исслед.*, 1974, т. 12, № 6, с. 910—916.
37. *Stone E. C., Lane A. L.* Voyager 1 encounter with Jovian sistem.— *Science*, 1979, v. 204, p. 945—948.
38. *Липский Ю. Н., Родионова Ж. Ф.* Картометрические исследования видимого и обратного полушарий Луны.— В кн.: *Атлас обратной стороны Луны. Часть III.*— М.: Наука, 1975, с. 110—122.
39. *Kopal Z.* The Moon.— Holland, Dordrecht: D. Riedel Publ. Co., 1969, 525 p.
40. *Wood J. A., Dickey J. S., Marvin U. B., Powell B. N.* Lunar anorthosites and a geophysical model of the Moon.— In: *Proceeding of the Apollo 11 Lunar Sci. Conf.*, 1970, v. 1, p. 965—988.
41. *El-Baz F.* Surface geology of the Moon.— *Annual review of astronomy and astrophysics*, 1974, v. 12, p. 135—165.
42. *Базилевский А. Т.* Геологическое строение и история развития поверхности Луны.— *Известия АН СССР. Серия геологическая*, 1977, № 5, с. 5—19.
43. *Trans. IAU, v. XVI B, Proceeding of the 16th General Assembly.*— Holland, Dordrecht: D. Reidel Publ. Co., 1977, p. 321—369.
44. *Hartmann W. K., Kuiper D. P.* Concentric structures surrounding lunar basins.— *Communications of the Lunar and Planetary Laboratory*, 1962, v. 1, No. 12, p. 51—66.
45. *Липский Ю. Н., Исковский Ю. П., Гурштейн А. А., Шевченко В. В., Пospelгалис М. М.* Текущие проблемы морфологии поверхности Луны.— *Космич. исслед.*, 1966, т. 4, № 6, с. 912—922.
46. *Гудас С. Л.* Геометрические и динамические свойства Луны.— В кн.: *Физика и астрономия Луны: Пер с англ.*— М.: Мир, 1973, с. 111—165.
47. *Гаврилов И. В.* Фигура и размеры Луны по астрономическим наблюдениям.— Киев: Наукова думка, 1969, 150 с.
48. *Липский Ю. Н., Никонов В. А., Скобелева Т. П.* Единая система селенодезических координат из девяти каталогов на видимом полушарии.— М.: Наука, 1973, 384 с.
49. *Mills G. A.* Absolute coordinates of lunar features.— *Icarus*, 1968, v. 8, No. 1, p. 90—116.
50. *Goudas C. L., Higgins T. P.* The Department of Defence selenodetic control system and the force function of the Moon.— *Astrophys. and Space Sci.*, 1969, v. 3, No. 4, p. 490—517.
51. *Хабидуллин Ш. Т., Чиканов Ю. А.* Лунный эллипсоид по измерениям абсолютных высот.— *Тр. Казанск. городской астр. обсерв.*, 1970, № 37, с. 23—39.
52. *Bills B. G., Ferrari A. J.* Lunar topography: Evidence for global scale lateral density variations.— In: *Lunar Science VI.*— Houston: The Lunar Science Institute, 1975, p. 51—53.
53. *Bills B. G., Ferrari A. J.* Lunar topography.— In: *Proceedings of the Sixth Lunar Science Conference.*— *Geochimica et Cosmochimica Acta, Supplement 6.*— Pergamon Press, 1975.

54. *Гаврилов И. В.* Гипсографическая кривая Луны.— В кн.: *Физика Луны и планет.*— М.: Наука, 1972, с. 144—147.
55. *Родионова Ж. Ф., Волчкова Л. И.* Проблемы морфологических исследований лунной поверхности.— В кн.: *Физика Луны и планет.*— М.: Наука, 1972, с. 139—144.
56. *Ранкорн С., Хофманн С.* Фигура Луны.— В кн.: *Луна: Пер. с англ.*— М.: Мир, 1975, с. 21—29.
57. *Sjogren W. L., Wollenhaupt W. R.* Lunar global figure from mare surface elevations.— *Moon*, 1976, v. 15, No. 1—2, p. 143—154.
58. *Лейкин Г. А., Попова М. П., Родионова Ж. Ф.* Некоторые результаты морфометрического изучения видимого полушария Луны.— *Астрон. циркуляр*, 1973, № 755, с. 3—6.
59. *Wollenhaupt W. R., Sjogren W. L.* Comments on the figure of the Moon based on preliminary results from laser altimetry.— *Moon*, 1972, v. 4, No. 3—4, p. 337—347.
60. *Коваль И. К., Лисина Л. Р., Миронова М. Н.* Топографические особенности избранных объектов восточного сектора обратной стороны Луны, выявляемые фотометрическим методом.— В кн.: *Атлас обратной стороны Луны. Часть II.*— М.: Наука, 1967, с. 172—178.
61. *El-Baz F.* Al-Khwarizmi: A new-found basin on the lunar far side.— *Science*, 1973, v. 180, No. 4091, p. 1173—1176.
62. *Хабиков А. В.* Характерные особенности рельефа Луны.— В кн.: *Луна.*— М.: Физматгиз, 1960, с. 241—298.
63. *Липский Ю. Н., Родионова Ж. Ф.* Антиподы на Луне.— В кн.: *Космохимия Луны и планет.*— М.: Наука, 1975, с. 602—606.
64. *Ferrari A. J.* A comparison of near and farside lunar gravity.— In: *Lunar Science VI.*— Houston: The Lunar Science Institute, 1975, p. 260—262.
65. *Хабиков А. В.* Об основных вопросах истории развития поверхности Луны.— *Зап. Всесоюзн. геогр. об-ва, новая сер.*, 1949, т. 6.
66. *Козлов В. В., Кузнецов Ю. Я., Сулиди-Кондратьев Е. Д.* Основные черты тектоники планет земной группы.— В кн.: *Тектоника и структурная геология: Планетология.*— М.: Наука, 1976, с. 271—280.
67. *Трифонов В. Г.* Геология лунных морских впадин.— В кн.: *Вулканизм и тектоника Луны.*— М.: Наука, 1974, с. 174—244.
68. *Козлов В. В., Сулиди-Кондратьев Е. Д.* Тектоника Луны: Объяснительная записка к тектонической карте Луны масштаба 1:7 500 000.— М., 1969.
69. *Бондаренко Л. Н., Липский Ю. Н., Чикмачев В. И., Суханов А. Л., Шевченко В. В.* Гигантские цепочки лунных кратеров в районе Моря Восточного.— *Сообщения ГАИШ*, 1977, № 196, с. 3—22.
70. *Флоренский К. П., Базилевский А. Т., Бобина Н. Н., Бурба Г. А., Гребенник Н. Н., Кузьмин Р. О., Полосухин В. П., Попович В. Д., Пронин А. А.* Процессы преобразования поверхности Луны в районе Лемонье по результатам детального изучения на Луноходе-2.— В кн.: *Тектоника и структурная геология. Планетология.*— М.: Наука, 1976, с. 205—234.
71. *Lunar topographic photomap Rima Hadley, 1:25 000.*— NASA, 1972.



72. *Тюблин Ю. С.* Современные методы и результаты картографирования Луны и Марса.— Земля и Вселенная, 1975, № 5, с. 68—73.
73. *Cintala M. J., Wood C. A., Head J. W., Mutch T. A.* Interplanetary comparisons of fresh crater morphology: Preliminary results.— In: Lunar Science VIII.— Houston: The Lunar Science Institute, 1977, p. 181—183.
74. *Pike R. J.* Depth — diameter relations of fresh lunar craters: Revision from spacecraft data.— Geophys. Res. Lett., 1974, v. 1, No. 7, p. 291—294.
75. *Anselmo J. C., Rehfuss D. E., Kincheloe W. K., Michael D., Wolfe S. A.* A crater depth — diameter basis study.— In: Lunar Science VIII.— Houston: The Lunar Science Institute, 1977, p. 43—45.
76. *Флоренский К. П., Базилевский А. Т., Гуриштейн А. А., Зезин Р. Б., Пронин А. А., Полоухин В. П., Попова З. В., Таборко И. М.* К проблеме строения поверхности лунных морей.— В кн.: Современные представления о Луне.— М.: Наука: 1972, с. 21—45.
77. *Florensky K. P., Basilevsky A. T., Gurshtein A. A., Zasetsky V. V., Zezin R. B., Pronin A. A., Popova Z. V.* Geomorphological analysis of the area of Mare Imbrium explored by automatic roving vehicle Lunokhod-1.— Preprint of Institute for Space research, 1974, 32 p.
78. *Shoemaker E. M., Hachman R. I., Eggleston R. E.* Interplanetary correlation of geologic time.— Advances Astron. Sci., 1962, v. 8, p. 70—89.
79. *Липский Ю. Н., Родионова Ж. Ф., Скобелева Т. П., Дегтярева К. И., Казимиров Д. А., Ситников Б. Д., Порошкова Г. А., Бубнова Н. В., Шуваева В. А.* Каталог кратеров Марса и статистика кратеров Марса, Меркурия и Луны.— М., 1977, 70 с.
80. *Quaide W. L., Oberbeck V. R.* Geology of the Apollo landing sites.— Earth Sci. Revs, 1969, v. 5, No. 4, p. 255—278.
81. *Trask N. J., Rowan L. C.* Lunar orbiter photographs: Some fundamental observations.— Science, 1967, v. 158, No. 3808, p. 1529—1535.
82. *Флоренский К. П., Базилевский А. Т., Иванов В. А.* Роль экзогенных факторов в формировании лунной поверхности.— В кн.: Космохимия Луны и планет.— М.: Наука, 1975, с. 439—452.
83. *Базилевский А. Т.* Оценка мощности и степени переработки лунного реголита по распространности кратеров.— Космич. исслед., 1974, т. 12, № 4, с. 606—609.
84. Передвижная лаборатория на Луне «Луноход-1», Т. 2.— М.: Наука, 1978, с. 183.
85. *Черкасов И. И., Шварев В. В.* Грунт Луны.— М.: Наука, 1975, 142 с.
86. *Kopal Z., Carder R. W.* Mapping of the Moon.— D. Reidel Publishing Company, Dordrecht, 1974, 240 p.
87. *Гаврилов И. В., Кислюк В. С.* Сводный каталог селеноцентрических положений 2580 базисных точек на Луне.— Киев: Наукова думка, 1970, 122 с.
88. *Дегтярева К. И., Липский Ю. Н., Чикмачев В. И.* Селенодезическая плановая основа на обратное полушарие Луны.— В кн.:

- Атлас обратной стороны Луны. Часть III.— М.: Наука, 1975, с. 76—109.
89. *Arthur D. W. G.* Selenography and selenodesy with Apollo whole disk lunar photographs.— Icarus, 1971, v. 14, No. 3, p. 388—418.
  90. *Большаков В. Д., Краснопецева Б. В., Краснопецев Б. В., Константинова Н. И., Лаврова Н. П., Федорук Г. Д.* Фотографические эксперименты на автоматических межпланетных станциях «Зонд-6, 7, 8».— В кн.: Атлас обратной стороны Луны. Часть III.— М.: Наука, 1975, с. 20—51.
  91. *Зиман Я. Л., Красиков В. И., Родионов Б. Н.* Селеноцентрическая система координат на восточный сектор обратной стороны Луны.— В кн.: Атлас обратной стороны Луны. Часть III.— М.: Наука, с. 52—58.
  92. *Волков Н. М.* Внешние перспективные проекции с позитивным изображением.— Геодезия и картография, 1962, № 4, с. 70—74.
  93. *Соловьев М. Д.* Математическая картография.— М.: Недра, 1969, 288 с.
  94. *Липский Ю. Н., Соколов Н. И., Шевченко В. В.* Распространение единой системы селенографических координат на область восточного сектора обратной стороны Луны.— В кн.: Атлас обратной стороны Луны. Часть II.— М.: Наука, 1967, с. 20—27.
  95. *Спрэдли Л.* Фотография Луны на шаре.— В кн.: Фигура Луны и проблемы лунной топографии: Пер. с англ. и нем.— М.: Наука, 1968, с. 74—82.
  96. *Шевченко В. В.* Использование Земли для селенографической привязки лунных изображений, полученных из космоса.— Космические исследования, 1968, т. 6, № 6, с. 924—932.
  97. *Липский Ю. Н., Псковский Ю. П., Родионова Ж. Ф., Шевченко В. В., Чикмачев В. И., Волчкова Л. И.* Глобальное мелкомасштабное картирование Луны.— В кн.: Космическая иконика.— М.: Наука, 1973, с. 162—168.
  98. *Тюблин Ю. С.* Особенности фотограмметрических процессов при картографировании Луны и планет по космическим снимкам.— В кн.: Картографирование Луны и Марса.— М.: Недра, 1978, с. 47—51.
  99. *Флоренский К. П., Гуриштейн А. А., Кораблев В. И., Бугаевский Л. М., Шингарева К. Б.* Классификация, масштабный ряд и номенклатура карт Луны.— В кн.: Современные представления о Луне.— М.: Наука, 1972, с. 88—96.
  100. Совместные советско-американские основные положения по составлению карт Луны.— М.: ОНТИ ЦНИИГАиК, 1975, 16 с.
  101. *Шингарева К. Б.* Картографическая изученность лунной поверхности.— В кн.: Исследование космического пространства.— М.: Изд-во ВИНТИ, 1973, с. 170—230.
  102. *Липский Ю. Н., Родионова Ж. Ф.* Картографирование Луны.— В кн.: Успехи Советского Союза в исследовании космического пространства. 1967—1977.— М.: Наука, 1978, с. 406—434.
  103. Полная карта Луны, м-б 1:5 000 000. Научный рук. Липский Ю. Н. — М.: Наука, 1979.
  104. Lunar Earthside chart (LMP-1), Lunar Farside chart (LMP-2), Lunar Polar chart (LMP-3), 1:5 000 000.— ASIC, 1970.
  105. *Růkál A.* Mapy měsíčních polokouli.— Praha: Kartografic, 1972.

106. Lunar science information bulletin.— Houston: LSI, 1975, 5 p.
107. Глобус Луны, масштаб 1 : 1 000 000/Научный рук. [Липский Ю. Н.]— М.: Наука, 1979.
108. Шевченко В. В. Физическая селенография.— Вестник АН СССР, 1973, № 4, с. 10—19.
109. Липский Ю. Н., Шевченко В. В. Основы физического картирования лунной поверхности.— Астрон. журн., 1970, т. 47, № 3, с. 586—598.
110. Аллен К. У. Астрофизические величины: Пер. с англ.— М.: Мир, 1977, 446 с.
111. Физика космоса: Маленькая энциклопедия.— М.: Советская Энциклопедия, 1976, 655 с.
112. Гаррис Д. Л. Интегральная фотометрия и колориметрия планет и спутников.— В кн.: Планеты и спутники.— М.: ИЛ, 1963, с. 241—305.
113. Крупенин Н. Н. Радиофизические исследования планет.— М.: Наука, 1978, 183 с.
114. Тромбка Дж. И., Арнольд Дж. Р., Адлер И., Метцгер А. Е., Риди Р. С. Элементный состав лунной поверхности по данным измерений гамма- и рентгеновского излучения на космических кораблях «Аполлон-15 и -16».— В кн.: Космохимия Луны и планет. М.: Наука, 1975, с. 128—152.
115. Викторов С. В., Чесноков В. И. Химия лунного грунта.— М.: Знание, 1978, 64 с.
116. Шевченко В. В. Физическое картирование Луны по фотометрическим данным.— Астрон. журн., 1970, т. 47, № 3, с. 599—609.
117. Saari J. M., Shorthill R. W. Isothermal and isophotic atlas of the Moon countours through lunation.— NASA CR-855, 1967, 186 p.
118. Федорев В. А. Фотографическая фотометрия лунной поверхности.— Ученые записки ХГУ, 1952, т. 42, с. 49—172.
119. Shorthill R. W., Saari J. M., Baird F. E., Compte J. R. Photometric properties of selected lunar features.— NASA CR-1429, 1969, 405 p.
120. Барабашев Н. П., Белоброва О. И., Езерская В. А., Езерский В. И., Лацко В. И. Фотометрические характеристики избранных объектов восточного сектора обратной стороны Луны.— В кн.: Атлас обратной стороны Луны. Часть II.— М.: Наука, 1967, с. 179—214.
121. Harke B. W. An improved theoretical lunar photometric function.— The Astronomical Journal, 1966, v. 71, No. 5, p. 333—339.
122. Липский Ю. Н., Шевченко В. В. К вопросу о фотометрическом рельефе лунного материкового щита.— В кн.: Физика Луны и планет.— М.: Наука, 1972, с. 99—104.
123. Липский Ю. Н., Шевченко В. В. Измерения оптических свойств лунных пород в переходной зоне (по результатам наблюдений на «Луноходе-2»).— В кн.: Космохимия Луны и планет.— М.: Наука, 1975, с. 607—610.
124. Антипова-Карагаева И. И., Акимов Л. А., Езерский В. И., Псарев В. А. Сравнительное изучение фотометрической фазовой функции образцов реголита, доставленного АМС «Луна-16» и «Луна-20».— Вестник ХГУ, 1976, № 137, с. 3—8.
125. Minnaert M. G. J. The effect of pulverization on the albedo of lunar rocks.— Icarus, 1969, v. 11, No. 3, p. 332—337.

126. Harke B. W., Cohen A. J., Cassidy W. A., Wells E. W. Solar radiation effects in lunar samples.— Science, 1970, v. 167, No. 3918, p. 745—747.
127. Clark P. E., Andre C. G., Adler I., Poswysocki M., Weidner J., Palus Somni: Anomalies in the correlation of X-ray fluorescence intensity ratios and broad-spectrum visible albedos.— Geophys. res. lett., 1976, v. 3, No. 8, p. 421—424.
128. Шевченко В. В. Распространенность и стратиграфия лунных пород по данным об их альбедо.— В кн.: Космохимия Луны и планет.— М.: Наука, 1975, с. 122—127.
129. Липский Ю. Н., Носиков В. В., Попов А. П. Сравнительный анализ оптических, рентгеновских и химических параметров лунного материкового грунта.— Труды ГАИШ, 1978, т. 48, с. 136—146.
130. Wasilewski P. Y., Fuller M. D. Magnetochemistry of the Apollo landing sites.— Moon, 1975, v. 14, No. 1, p. 79—101.
131. Липский Ю. Н., Ландау С. В., Шабанов М. Ф., Шевченко В. В. Детальное фотометрическое исследование участков западной краевой зоны Луны.— Космические исследования, 1974, т. 12, № 5, с. 758—762.
132. Шевченко В. В. О природе альбедо поверхности лунного шара.— Астрон. журн., 1974, т. 51, № 5, с. 1064—1071.
133. Маккорд Т. Б., Адамс Дж. Б. Использование наземных телескопов для определения состава поверхности тел Солнечной системы.— В кн.: Космохимия Луны и планет.— М.: Наука, 1975, с. 547—573.
134. Pohn H. A., Wildey R. L. A photoelectric-photographic study of the normal albedo of the Moon.— Geological survey professional paper 599E, 1970, 20 p.
135. Карта альбедо видимого полушария Луны, масштаб 1 : 5 000 000/Составитель Евсюков Н. Н.— Киев: Наукова думка, 1973.
136. Езерский В. И., Кузьменков С. А., Мамницкий В. И., Олифер Н. С., Псарев В. А. Сравнение карт нормального альбедо видимого полушария Луны.— Вестник Харьковского университета, 1976, № 137, с. 8—13.
137. Shevchenko V. V. Photometric structure of Mare Orientale.— In: Proc. Ninth lunar and planetary sci. conf. Houston, 1978, p. 2851—2855.
138. Липский Ю. Н., Шевченко В. В. Опыт построения спектральной карты участка лунной поверхности.— Астрон. журн., 1972, т. 49, № 1, с. 170—174.
139. Карта цвета видимого полушария Луны, м-б 1 : 5 000 000/Составитель Евсюков Н. Н.— Киев: Наукова думка, 1973.
140. Джапашвили В. П., Король А. Н., Ксанфомалиги Л. В., Лохов В. К. Изучение лунной поверхности при помощи поляризатора-дискриминатора.— В кн.: Физика Луны и планет.— М.: Наука, 1972, с. 68—71.
141. Джапашвили В. П., Король А. Н. Поляриметрический атлас Луны.— Тбилиси, Мецниереба, 1978.
142. Green R. R. An application of trend-surface analysis in a study of the lunar surface.— Modern geology, 1970, v. 1, No. 2, p. 123—135.



143. *Pieters C., McCord T. B.* Distribution of basalt types on the front side of the Moon.— In: Lunar and planetary science IX.— Houston, part 2, 1978, p. 898—900.
144. *Howard K. A., Wilhelms D. E., Scott D. H.* Lunar basin formation and highland stratigraphy.— *Rev. geophys. space phys.*, 1974, v. 12, p. 309—327.
145. *El-Baz F.* The Moon after Apollo.— *Icarus*, 1975, v. 25, No. 4, p. 495—537.
146. *Shevchenko V. V.* About global distribution lunar rocks.— In: Lunar science VIII.— Houston, part 2, 1976, p. 797—799.
147. *Вуд Дж. А.* Обзор типов лунных пород и сравнение лунной и земной коры.— В кн.: *Космохимия Луны и планет.*— М.: Наука, 1975, с. 29—45.
148. *Ryder G., Mc Sween H., Marvin U.* Basalts from Mare Crisium.— Center for astrophysics. Preprint series, 1977, No. 775, 33 p.
149. *Wood J. A.* The nature and origin of Boulder 4, Station 2, Apollo 17.— Center for astrophysics. Preprint series, 1976, No. 361, 17 p.
150. *Левин Б. Ю., Маева С. В.* Загадки происхождения и термической истории Луны.— В кн.: *Космохимия Луны и планет.*— М.: Наука, 1975, с. 283—298.
151. *Papanastassiou D. A., Wasserburg G. J.* Rb-Sr systematics of Luna 20 and Apollo 16 samples.— *Earth and planet sci. lett.*, 1972, v. 17, No. 1, p. 52—63.
152. *Morgan J. W., Ganapathy R., Higuchi H., Krähenbühl U., Anders E.* Lunar basins: tentative characterization of projectiles, from meteoritic elements in Apollo 17 boulders.— In: *Proc. 5th lunar sci. conf.*— Houston, 1974, v. 2, p. 1703—1736.
153. *Head J. W., Settle M., Stein R. S.* Volume of material ejected from major lunar basins and implications for the depth of excavation of lunar samples.— In: *Proc. 6th lunar sci. conf.*— Houston, 1975, v. 3, p. 2805—2829.
154. *Schaeffer O. H., Husain L.* Chronology of lunar basin formation.— In: *Proc. 5th lunar sci. conf.*— Houston, 1974, v. 2, p. 1541—1585.
155. *Taylor S. R.* Lunar science: A post-Apollo view.— Pergamon Press Inc., 1975, 372 p.
156. *Shaeffer O. A., Bence A. E., Eichhorn G., Papike J. J., Vaniman D. T.*  $^{39}\text{Ar}$ — $^{40}\text{Ar}$  & petrologic study of Mare Crisium: Age and petrology of Luna 24 samples 24077.13 and 24077.63.— In: *Lunar and planetary science IX*, part 2.— Houston, 1978, p. 1007—1009.
157. *Muehlberger W. R.* Structural History of southeast Mare Serenitatis and adjacent highlands.— In: *Proc. 5th lunar sci. conf.*— Houston, 1974, v. 1, p. 101—110.
158. *Rehfsuss D. E.* Lunar winds.— *J. geophys. res.*, 1972, v. 77, No. 32, p. 6303—6315.
159. *Лунский Ю. Н., Шевченко В. В.* О природе светлых лучей на Луне.— *Астрон. журн.*, 1968, т. 45, № 2, с. 389—398.
160. *Stettler A., Eberhardt P., Eugster O., Geiss J., Grögler N., Weber L.* Das Alter des Kraters Kopernikus.— *Z. Angew. Math. und Phys.*, 1972, v. 23, No. 3, p. 506.
161. *Космические исследования, выполненные в СССР в 1972 г.*— М.: Наука, 1973.
162. *Shingareva K. B.* Compiling a serie of charts of physical properties of lunar surface on common mathematical basis.— *Allg. Vermess.-Nachr.*, 1977, v. 81, Nr. 10.
163. *Галакин Н. Н.* Геофизика Луны.— М.: Наука, 1978, 476 с.
164. *Neukum G., König B., Arkan-Hamed J.* A study of lunar impact crater size-distributions.— *Moon*, 1975, v. 12, No. 2, p. 201—229.
165. *Young R. A.* Mare crater size-frequency distributions: Implications for relative surface ages and regolith development.— In: *Proc. 6th lunar sci. conf.*—Houston, 1975, v. 3, p. 2645—2662.
166. *Trask N. J.* Geologic comparison of mare materials in the lunar equatorial belt, including Apollo 11 and Apollo 12 landing sites.— Geological survey professional paper 750D, 1971, p. 138—144.
167. *Soderblom L. A., Lebofsky L. A.* Technique for rapid determination of relation ages of lunar areas from orbital photography.— *J. geophys. res.*, 1972, v. 77, No. 2, p. 279—296.
168. *Basilevsky A. T.* On the evolution rate of small lunar craters.— In: *Proc. 7th lunar sci. conf.*— Houston, 1976, v. 1, p. 1005—1020.
169. *French B. M.* What's new on the Moon?— *Sky and Telescope*, 1977, v. 53, No. 4, p. 257—261.
170. *Ландау С. В., Лунский Ю. Н., Попов А. П., Шевченко В. В.* Фотометрические карты восточного сектора обратной стороны Луны.— В кн.: *Атлас обратной стороны Луны. Часть III.*— М.: Наука, 1975, с. 150—179.
171. *Rhodes J. M.* Some compositional aspects of lunar regolith evolution.— *Phil. trans. Roy. soc. London*, 1977, v. A285, No. 1327, p. 293—301.
172. *Burnett D. S.* Lunar science: The Apollo legacy.— *Revs geophys. and space phys.*, 1975, v. 13, No. 3, p. 13—34.
173. *Spudis P. D.* Origin and distribution of KREEP in Apollo 15 soils.— In: *Lunar and planetary science IX*, part 2.— Houston, 1978, p. 1089—1091.
174. *Wood J. A.* Bombardment as a cause of the lunar asymmetry.— *Moon*, 1973, v. 8, No. 1/2, p. 73—103.
175. *Andre C. G., Adler I., Wolfe R. W.* Orbital XRF observations of the lunar subsurface through impact craters.— In: *Lunar and planetary science IX*, part 1.— Houston, p. 20—21.
176. *Kovach R. L., Watkins J. S.* Apollo 17 seismic profiling: Probing the lunar crust.— *Science*, 1973, v. 180, No. 4090, p. 1063—1064.
177. *Phillips R. J., Maxwell T. A.* Lunar sounder revisited: Stratigraphic correlations and structural inferences.— In: *Lunar and planetary science IX*, part 1.— Houston, 1978, p. 890—891.
178. *Токсоц М. П., Джовстон Д. Х.* Эволюция Луны и планет земной группы.— В кн.: *Космохимия Луны и планет.*— М.: Наука, 1975, с. 210—240.
179. *Horz F.* How thick are lunar mare basalts?— In: *Proc. 9th lunar and planetary sci. conf.*— Houston, 1978, v. 3, p. 3311—3331.
180. *Interdisciplinary studies by the Imbrium consortium*, v. 2.— Paris: Dargaud Editeur, 1976, 126 p.
181. *Wilhelms D. E., Davis D. E.* Two former faces of the Moon.— *Icarus*, 1971, v. 15, No. 3, p. 368—372.
182. *Марцумото М., Нан П. Д., Уиру Д. М.* Ранняя история Луны.— В кн.: *Космохимия Луны и планет.*— М.: Наука, 1975, с. 372—385.



## ПРЕДМЕТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ

- Азимут 113, 114, 164  
 Активность  
 — сейсмическая 27, 233  
 — эндогенная 149, 227, 229, 232, 263  
 Альbedo 158, 163, 170, 196, 210, 221, 260  
 — геометрическое 152—155, 159, 162  
 — истинное 190, 196, 198  
 — нормальное 159, 162, 172, 198  
 — сферическое 158, 162  
 Альмукантатат 113, 115, 166  
 Аномалии  
 — гравитационные 21, 72  
 — тепловые 207, 208, 210  
 Асимметрия  
 — лунного шара 57, 69, 72, 224, 226, 242  
 — распределения альbedo 220, 257, 259  
 Астеносфера 29, 30  
 Атмосфера Луны 32, 40, 45, 147  
 Бассейны 51, 62—65, 227, 262, 271  
 — кольцевые 218, 262  
 Вертикал 114, 128  
 Вещество Луны  
 — материковое 26, 224, 251  
 — метеоритное 146  
 — морское 25, 26, 224, 251  
 Возраст  
 — абсолютный, пород 228, 232, 238, 241, 243, 264  
 — брекчий 227  
 — кристаллизации пород 241  
 — относительный 235, 243  
 — радиационный 231, 273  
 — экспозиционный 100, 231, 238, 241  
 Гармонический анализ  
 — альbedo поверхности 203  
 — высот рельефа 20, 51, 53—54  
 Глобус Луны 139, 145  
 Гравитационный потенциал Луны 19  
 Дегазация недр 40, 41  
 Деградация кратеров 232, 238, 266  
 Депрессии 66, 69, 73, 268  
 Дипольный магнитный момент 21, 22  
 Диссипация газов 39, 40, 45  
 Дифференциация недр 45, 226  
 —, магматическая 30, 226  
 —, первичная 265  
 —, планетарная 232  
 —, химическая 264  
 Доморская структура 262  
 Единая система  
 — обозначений деталей рельефа 50  
 — селенодизических координат 60, 103, 109  
 Законы  
 — отражения света 170, 172, 180, 184  
 — рассеяния света 180, 210  
 Затмение  
 — лунное 156, 162, 209  
 — солнечное 13  
 Звездная величина 153, 162  
 Зенитное расстояние 112, 113  
 Зона  
 — краевая 12, 13  
 — либрационная 12, 13, 108  
 — переходная 244, 246, 248, 252, 255, 260  
 — субэкваториальная 142  
 — терминатора 43  
 Измерения  
 — альбедные 195  
 — индикаторметрические 186  
 — колориметрические 160, 194  
 — поляриметрические 160  
 — радиолокационные 257  
 — рентгеновские 189, 254  
 — сейсмические 27, 256  
 — спектрофотометрические 160  
 — фотогеологические 218  
 — фотограмметрические 109, 132, 150  
 — фотометрические 157, 159, 165, 185, 190, 195, 220, 245, 248  
 — фотоэлектрические 198  
 Изолинии 151  
 — альbedo 199, 201  
 —, горизонтали 131, 140, 141, 145  
 —, изогипсы 57—60, 131  
 —, изопахиты 265, 268, 270  
 —, изотермы 24, 171  
 —, изотопы 168, 172, 196, 246, 263, 264

Изолинии истинного альbedo 196  
 — колор-индексов 201, 204  
 — углов падения 166  
 — фотометрических углов 165, 170  
 Изофотометрия 257  
 Индикатриса рассеяния 168  
 — пространственная 170, 172, 180, 182, 246, 248  
 Интегральный блеск 158

- Камни 85, 99, 215  
 Картографические проекции  
 — азимутальные 110, 117, 143  
 — конические, Ламберта 119  
 — Меркатора 119, 143  
 — ортографические 117, 199, 204, 206  
 — перспективные 110, 112, 124, 165  
 — позитивные 117, 124  
 — псевдоцилиндрические, Мольвейде 120, 196  
 — стереографические, конформные 118, 143  
 — цилиндрические 118, 143  
 — эквивалентные 120  
 Карты 142, 145  
 — альbedo 150, 172, 195, 198, 200, 244  
 — возрастных различий 241  
 — гравитационные 149  
 — изопахит 267  
 — изотермические 150, 156  
 — изотональные 149  
 — комплексные 150  
 — контурные 132  
 — кратковременных явлений 149  
 — ландшафтные 150  
 — максимальной поляризации 205  
 — поляриметрические 205  
 — радиолокационные 150  
 — распределения нестационарных явлений 233  
 — рисованные 130, 132, 271  
 — селенографические 139  
 — селенологические 149  
 — спектральные 150  
 — спектрональные 195, 201  
 — степени поляризации 195  
 — топографические 143, 147  
 — фазовых изменений яркости 150  
 — физические 147, 149—151  
 — цвета 202  
 — цифровые 172  
 — яркости 195  
 Каталог 54, 55  
 — лунных наименований 133, 142  
 — нестационарных явлений 233  
 — опорный 245  
 — селенографический 103  
 — селенодизический 107, 109, 131, 143  
 Классификация  
 — кратеров 84  
 — лунных карт 142, 145  
 — материковых пород 226  
 — морфологическая, лунных объектов 140  
 — селенохимическая, пород 222  
 — стратиграфическая 232  
 Колор-индекс 194, 201, 204  
 Компоновка карт 142, 143  
 Концентрация  
 — камней 99, 214  
 — кратеров 215  
 — кратеров-лунок 231  
 — пылевых частиц 43  
 — частиц атмосферы 33—35, 40  
 Кора лунная 29, 48, 226, 256  
 Корреляционная зависимость  
 — альbedo от абсолютных высот 192, 193  
 — — — степени поляризации 194  
 — — — химического состава вещества 190—192  
 — колор-индекса от химического состава вещества 194  
 — степени поляризации от химического состава 194  
 Кратеры  
 — вторичные 87, 230, 232  
 — крупные 80  
 — постморские 254  
 Кривая  
 — гипсографическая Земли 59, 60  
 — Луны 59, 60  
 — гипсографическая Земли 59, 60  
 — зависимости высоты вала от диаметра кратера 267  
 — распределения альbedo 221, 260  
 — вещества 251  
 — кратеров по размерам 236  
 — спектральная 193  
 — фазовая 158, 180, 182, 184, 186, 214  
 — характеристическая 203  
 Кристаллизация  
 — базальтов 228  
 — базальтовых лав 229  
 — древних материковых пород 228  
 — норитового состава 227, 270  
 — расплава 226, 241  
 Критерий  
 — Колмогорова 220, 253  
 — Фишера 220, 251  
 Лазерная альтиметрия 13, 56, 61, 64, 109, 193  
 Легенда карты 141, 143  
 Либрация оптическая 11, 12, 103, 105, 147, 122  
 — физическая 12, 103, 105  
 Лимб Луны 187  
 Линейные структуры  
 —, борозды 74, 76, 136, 232  
 —, гряды 73, 74  
 —, долины 73, 75  
 —, кратерные цепочки 74, 76, 136  
 —, разломы 74, 76  
 —, трещины 73, 76  
 —, уступы 79  
 Литосфера 29, 30, 146, 149, 265  
 Луноскодромия 166  
 Луноотрасения 27—30, 234  
 Мантия Луны 29, 49, 226  
 — верхняя 29, 30, 226  
 — нижняя 30  
 — средняя 30

- Масконы 21, 49, 62, 149, 192  
 Масса  
 — Земли 15, 16, 45  
 — Луны 13, 15, 16, 20, 30, 45, 227  
 — планет и спутников 44  
 — унавшего на Луну вещества 227  
 Масс-спектрометр 32, 33  
 Масштаб  
 — глобусов Луны 145  
 — изображения 113  
 — линейный 114, 116, 141  
 — обзорный 140  
 — площади 116  
 — по меридианам 121  
 — проекции, общий 115, 116, 119  
 — частный 115  
 Масштабный ряд карт 140  
 Мезорельеф 214  
 Месяц сидерический 10, 11  
 — синодический 8, 10, 12  
 Метаморфизм ударный 273  
 Метеоритная бомбардировка 189,  
 227, 229, 232, 235  
 Миграция частиц 38, 43  
 Микрорельеф 213  
 Микроструктура 180, 182  
 Многокольцевые структуры 62, 65,  
 80, 257, 261, 265, 271  
 Многофазность выплавления 253  
 — заполнения морских бассейнов  
 257  
 — формирования лавовой поверхно-  
 сти морей 241  
 — лунных ландшафтов 243, 262,  
 270  
 Моделирование картографическое  
 206  
 — многопараметрическое 210, 214  
 — однопараметрическое 206  
 — падения железного метеорита 229  
 — природы поверхности 225  
 — физических свойств лунной по-  
 верхности 207—210  
 — физической структуры поверхно-  
 сти 225  
 Мощность базальта 266—270  
 — реголита 98, 237  
 Мультиплекс унифицированный 125
- Нестационарные явления 233, 149  
 Новолуние 8  
 Номенклатура образований на по-  
 верхности планет 50, 51  
 — — Луны 133, 138  
 Нулевой меридиан 106, 127  
 Нутация 12
- Обломочный слой 96, 98  
 Обратное рассеяние 182  
 Объем Луны 13, 16  
 Орбита Луны 7, 11  
 Освещенность поверхности, солне-  
 чная 152, 158  
 Оси вращения 103  
 — инерции 55, 56, 61, 103  
 — оптические 124  
 Отверждение мантии Луны 229  
 Отождествление выходов монолит-  
 ных скальных пород 156

Отождествление объектов 143  
 Отражательная способность поверх-  
 ности 155, 160, 246, 252

- Палеоселенография 6, 226—273  
 Параллакс горизонтальный 117  
 — суточный 127  
 Параллактическое смещение планет  
 и Солнца (лунное неравенство)  
 14  
 Перемешивание лунного веще-  
 ства  
 — — вертикальное 253, 255  
 — — горизонтальное 254, 255  
 Переработка поверхностного веще-  
 ства 96, 97, 100  
 — — метеоритная 189, 227, 229,  
 232  
 — — ударными процессами 218  
 Перигей 8, 28  
 Петрология 192  
 Планеты и спутники, общие дан-  
 ные 31, 44, 45  
 Плоскость поляризации 205  
 Площадь поверхности Луны 13  
 Поверхность кратерированная 218,  
 224  
 — межкратерная 230  
 — относимости 53, 106, 145, 151  
 Позиционный угол 103, 105, 127  
 Поле выбросов 85, 215  
 — гравитационное 21, 71, 149  
 — магнитное 21, 23  
 Полная карта Луны 142  
 Полнолуние истинное 8, 162, 172,  
 184, 196, 199, 201  
 Полутоновой рисунок рельефа 130,  
 132, 140, 145, 271  
 Поляризация света 32, 160, 194  
 — — максимальная 204  
 Поляровизор-дискриминатор 204  
 Популяция кратеров 235  
 Пористость поверхностного слоя  
 102, 182, 213  
 Породы лунные, агглютинаты 100,  
 102  
 — —, анортитовые плагиоклазы 226  
 — —, анортитовые габбро 26, 224,  
 243, 260  
 — —, базальтовые лавы 227, 229  
 — —, базальты 25, 217, 227, 243, 260,  
 265  
 — —, брекчия 100, 102, 227  
 — —, габбровые анортиты 26, 224,  
 243  
 — —, КРЕЕР-базальты 26, 254, 256  
 — —, нориты 26, 222, 243, 260, 270  
 — —, оливин 226  
 — —, основные типы 25, 191, 218,  
 221, 224, 243, 265  
 — —, пироксен 226  
 — —, реголит 95, 99, 273  
 — —, стеклянные шарики 101  
 Поток метеоритный 41, 146, 189, 227,  
 229, 238  
 — турбулентный 230  
 Пояс депрессий 66, 69, 72, 73  
 — морей 66  
 Приливные возмущения 234

- Радиоактивность поверхностных по-  
 род 225, 254  
 Радиолокация Луны 157  
 — орбитальная 257  
 Радиус геоцентрический 9  
 — первый Луны 103  
 — селеноцентрический 9, 10, 106  
 — средний Луны 13, 20, 51, 54, 56,  
 57, 59, 112  
 — — планет и спутников 44, 117  
 Раздробленность поверхностного  
 слоя 156  
 Разрезы вертикальные недр 265  
 — фотометрические 245, 246  
 Районирование индивидуальное 149  
 — многопараметрическое 216  
 — по спектральным характери-  
 стикам 217  
 — фотометрическим параметрам  
 210  
 — типологическое 146, 150, 210,  
 213—215  
 Распад радиоактивный 226  
 Распределение альbedo 220, 221, 253  
 — вещества по альbedo 253, 255  
 — высотных уровней 59, 60, 62  
 — инфракрасной яркостной темпе-  
 ратуры поверхности 156  
 — кольцевых структур 66, 67  
 — масс в верхних слоях Луны 149  
 — морских образований 46, 61, 62,  
 69, 72  
 — нестационарных явлений 233  
 — обломков по вертикали 100  
 — основных типов пород 218, 25,  
 191, 224, 243  
 — плотности кратеров 235  
 — частное 251  
 — энергии по спектру 153  
 — яркости 168, 172, 184  
 Реконструкция лунной поверхности  
 269, 271
- Светлые лучи 88, 130, 143, 193, 229—  
 231, 247, 254  
 — ореолы 88, 193  
 Светлокация 10  
 Сейсмические волны 27, 256  
 — — объемные, поперечные 27, 30  
 — —, продольные 27, 28  
 — — поверхностные 27  
 Селенография 5, 217  
 — физическая 6, 146, 151  
 Селенодизическая основа 141, 143,  
 145  
 Скорость движения частиц газов в  
 атмосфере Луны 34, 35, 39, 43  
 — критическая 39, 44, 45  
 — круговая 36  
 — параболическая 34, 35  
 — сейсмических волн 27, 256  
 — соударений 36, 227, 229  
 Содержание карты 139, 145  
 Солнечная радиация 146, 158  
 Солнечный ветер 41  
 Спектрональная съемка 160, 193  
 Спектрометрия ультрафиолетовая 32  
 Степень деградации кратеров 238,  
 266  
 — поляризации 161, 194, 205

Стратиграфическая шкала 272  
 Сфера ландшафтная 146, 151  
 Схема древних кольцевых структур  
 272  
 — изопакит для морей 268, 269  
 — провинций Луны 218  
 — стратиграфическая 229, 264  
 — физиографическая 243, 260, 270  
 — эволюции лунных недр 264

Талассонды 51, 62, 63, 64  
 Тектонические разломы 74, 76, 78  
 Температура атмосферы 34, 37, 38  
 — поверхности 24, 25, 45, 150  
 — — при затмении 209  
 — цветовая 156  
 — яркостная 156  
 Теория Брауна 106  
 — удара 229  
 — Шмидта 26  
 Тепловая инерция 156, 207  
 Терминатор 43, 87, 127, 130  
 Топонимика лунная 133, 138

Угол наклона картинной плоскости  
 128  
 — — кривой распределения крате-  
 ров 237  
 — — лунного экватора к эклиптике  
 103, 104  
 — — лунной орбиты к эклиптике  
 8, 104  
 — — небесного экватора к эклипти-  
 ке 104  
 — — рельефа Луны 49, 65, 77, 80, 81,  
 157, 185  
 — — солнечных лучей 131  
 — — спектральной кривой 193  
 Узел восходящий лунного экватора  
 103, 104  
 — нисходящий лунной орбиты 103  
 Условные знаки 132, 141, 145

Фазовый интеграл 158, 162  
 — — угол 25, 33, 152, 159, 171, 214  
 — — селеноцентрический 162, 171,  
 195, 201, 245  
 — — Солнца 32  
 Фазы Луны 7, 8, 156, 162, 172  
 Фактор  
 — внешней среды 146  
 — упаковки 182, 210  
 — формирования рельефа 235  
 — яркости 159, 245  
 Фигура Луны геометрическая 53—56  
 Физиографическое деление лунной  
 поверхности 138, 217, 233, 243  
 Формула Планка 155  
 — Халке 180, 184, 210  
 Фотоионизация 40, 41, 45  
 Фотокарта 121, 125, 128, 130, 132,  
 140, 204  
 — спектрональная 204  
 Фотометрическая калибровка 196  
 — модель 181  
 — неоднородность 173, 180  
 Фотометрический рельеф 180, 185  
 — тип поверхности 214

- Фотометрия 157, 160, 180  
 — детальная 159, 185  
 Фотомозаика 128, 130  
 Функция макротеневая 182  
 — мезотеневая 182, 231  
 — ослабления света 182  
 — распределения альbedo 220, 252  
 — — кратеров по размерам 85, 97  
 — теневая 169, 170, 185, 214  
 — фазовая 152, 172, 185  
 — фотометрическая 159, 163, 170, 172, 184, 211, 214, 246
- Цвет покровного вещества 150, 201  
 — участков поверхности 233  
 Цветовая гамма карт 131, 145  
 Центр проектирования 111, 122, 125, 128  
 — распределения 251  
 — — масс Земли 14, 15  
 — — Луны 54, 56, 57, 59, 60, 61, 70, 103, 108  
 — — системы Земля — Луна 13, 15, 16  
 — фигуры Луны 54, 56, 57, 60, 70, 103  
 Центральная горка 81, 233  
 Цикл гелиоцентрического движения Луны 10, 31  
 — изменения фаз Луны 8
- Эволюция поверхности 226  
 Экватор интенсивности 166, 168, 172, 187  
 — лунный 103, 104
- Экватор небесный 103, 104  
 Эквипотенциальные поверхности 20  
 Экзосфера 34, 146  
 Эклиптика 103, 104  
 Экцессы 220  
 Элементы ориентирования изображений 123, 127  
 — радиоактивные 226  
 — редкоземельные 26, 256  
 — селенографических карт 139, 141  
 — угловые селеноцентрические 164  
 — — топоцентрические 164  
 Эллипсоид инерции 56, 61, 62  
 Эпохи формирования рельефа Луны 232  
 Эрозия лунной поверхности 41, 42  
 — метеоритная 238  
 — микрометеоритная 41, 43, 96  
 Эталонные таблицы 248  
 Эффект Доплера 15  
 — оппозиции 181, 196, 199  
 — рассеяния света на частицах грунта 186
- Ядро земное 31, 45  
 — лунное 29, 30  
 Яркостная радиотемпература 157  
 Яркость абсолютная 160  
 — избыточная 43  
 — интегральная 184  
 — лимба 173, 187  
 — образований 87, 131, 233  
 — относительная 160, 184  
 — поверхности 150, 159  
 — фазовая 183, 184, 186

