КОСМІЧНА НАУКА
І ТЕХНОЛОГІЯ

Національне космічне агентство України
Національна академія наук України

КНіТ

Додаток до журналу

Ю. Г. Шкуратов, В. С. Кислюк,
Л. Н. Литвиненко, Я. С. Яцкив

# Модель Луны 2004 для проекта «Укрселена»

2004 Том 10 № 2

ОГЛАВЛЕНИЕ


1. ВВЕДЕНИЕ ..... 3

2. НЕБЕСНО-МЕХАНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ..... 5
   2.1. Орбитальное движение ..... 5
   2.2. Приливное замедление движения Луны ..... 7
   2.3. Вращение ..... 8
   2.4. Свободная либрация Луны ..... 9

3. ДИНАМИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ И ФИГУРА ..... 10
   3.1. Гравитационное поле ..... 10
   3.2. Динамические параметры ..... 12
   3.3. Ориентация эллипсоида инерции ..... 13
   3.4. Геометрическая фигура ..... 14

4. ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ..... 16
   4.1. Общее описание поверхности ..... 16
   4.2. Вертикальное строение коры ..... 18
   4.3. Литологическая характеристика реголита ..... 19

5. ХИМИКО-МИНЕРАЛОГИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ..... 21
   5.1. Химический состав ..... 21
   5.2. Естественные радиоактивные элементы ..... 25
   5.3. Минеральный состав ..... 25

6. ФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ..... 27
   6.1. Размер и форма частиц ..... 27
   6.2. Физико-механические свойства ..... 28
   6.3. Теплофизические свойства ..... 29
   6.4. Магнитные свойства ..... 29

7. ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ..... 29
   7.1. Адьбедо и фазовая зависимость яркости поверхности ..... 29
   7.2. Спектральная зависимость альбедо ..... 30
   7.3. Поляризационные характеристики излучения ..... 32
   7.4. Особенности излучения миллиметрового диапазона ..... 32

8. ЭФФЕКТЫ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ С ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДОЙ ..... 34
   8.1. Атмосфера Луны ..... 34
   8.2. Воздействие корпускулярного излучения на поверхность ..... 35
   8.3. Лунная поверхность как источник корпускул ..... 38
   8.4. Микрометеоритная бомбардировка ..... 39

9. ПЕРСПЕКТИВНЫЕ КОСМИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ..... 39
   9.1. Очерк космических исследований Луны автоматическими станциями ..... 39
   9.2. Украинский лунный полярный спутник (КА Укрселена) ..... 44
   9.3. Обоснование научных задач ..... 44
   9.4. Функционирование КА Укрселена, требования к параметрам его орбиты и основные технические характеристики ..... 47

10. ЗАКЛЮЧЕНИЕ ..... 48

УДК 523.3

# Модель Луны 2004 для проекта «Укрселена»

**Ю. Г. Шкуратов[1,2], В. С. Кислюк[3], Л. Н. Литвиненко[2], Я. С. Яцкив[3]**

[1]Радіоастрономічний інститут НАН України, Харків
[2]НДІ Астрономії Харківського національного університету ім. В. Н. Каразіна, Харків
[3]Головна астрономічна обсерваторія НАН України, Київ

Дається короткий огляд сучасного стану досліджень Місяця в області небесної механіки (орбітальний рух, припливне сповільнення, обертання та довільна лібрація), динаміки і фігури (гравітаційне поле і орієнтація еліпсоїда інерції), геології (вертикальна будова кори та літологічні характеристики реголіту), хімії і мінералогії (включаючи вміст природних радіоактивних елементів), фізики поверхні (розмір та форма частинок, фізико-механічні, теплофізичні та магнітні властивості), оптики (альбедо, фазова та спектральна залежності, поляризаційні характеристики, властивості відбиття в міліметровому діапазоні), взаємодії з довкіллям (атмосфера Місяця, корпускулярне випромінювання, мікрометеоритне бомбардування). Розглядається коротка історія і перспективні космічні дослідження, які включають, зокрема, Український полярний супутник Місяця "Укрселена". З допомогою цього супутника передбачається виконати зйомку з високим просторовим розділенням постійно затінених ділянок поверхні (поблизу полюсів) з використанням локатора бокового огляду, а також виконати поляриметричну зйомку деяких районів в УФ діапазоні при великих фазових кутах.

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Луна является единственным естественным спутником Земли. Она сформировалась примерно в тоже время, что и сама Земля. Существует несколько гипотез образования Луны. Согласно популярной сейчас гипотезе Камерона [21], Луна образовалась в результате столкновения Земли с космическим телом, размер которого близок к размеру Марса. После столкновения большая часть массы образовавшихся фрагментов возвратилась на Землю, некоторая часть была выброшена за пределы Солнечной системы, а остатки массы остались на орбите Земли, сформировав Луну. Современная орбита Луны отличается от первоначальной. В прошлом Луна была значительно ближе к Земле. Однако, из-за приливного взаимодействия с Землей размер ее орбиты увеличился. В табл. 1 приведены основные данные о Луне как о небесном теле в сравнении с Землей.

Таблица I. Небесно-механические и физические характеристики Луны и Земли

| Свойства | Луна | Земля |
|---|---|---|
| Масса | $7.353 \cdot 10^{22}$ кг | $5{,}976 \cdot 10^{24}$ кг |
| Радиус | 1738 км | 6371 км |
| Площадь поверхности | $37.9 \cdot 10^{6}$ км$^2$ | $510.1 \cdot 10^{6}$ км$^2$ |
| Сжатие | 0.0005 | 0.0034 |
| Средняя плотность | 3.34 г/см$^3$ | 5.517 г/см$^3$ |
| Ускорение на экваторе | 1.62 м/сек$^2$ | 9.81 м/сек$^2$ |
| Скорость убегания | 2.38 км/сек | 11.2 км/сек |
| Период вращения | 27.322 дня | 23.9345 час |
| Наклон экватора к плоскости эклиптики | 1°33′ | 23°28′ |
| Наклон экватора к плоскости орбиты | 6°41′ | 23°28′ |
| Средняя температура поверхности | -153°C ночь – +107°C день | 22°C |
| Перепады температуры | -233 – +123°C | -89 – +58°C |
| Атмосфера | ~$10^4$ мол/см$^3$, день, $2 \cdot 10^5$ мол/см$^3$, ночь | $2.5 \cdot 10^{19}$ мол/см$^3$ |
| Момент инерции | 0.395 | 0.332 |
| Средний тепловой поток | ~29 мватт/м$^2$ | 63 мватт/м$^2$ |
| Магнитное поле | ~0 | 24-56 А/м |

Луна сложена каменными породами, которые прошли многократные этапы плавления. Материал поверхности подвергался интенсивной метеоритной переработке. Луна обладает толстой корой (около 60 км), сравнительно однородной литосферой (60 – 1000 км), частично жидкой астеносферой (1000 – 1740 км) и возможно небольшим ядром. В настоящее время магнитного поля у Луны нет, хотя ее породы имеют заметную остаточную намагниченность.

Луна исследовалась и исследуется с помощью большого арсенала дистанционных методов и *in situ* измерений. Суть дистанционных исследований Луны состоит в измерении характеристик пространственных распределений статических полей, потоков частиц и электромагнитного излучения, порожденных либо самой Луной как небесным телом либо появившихся в результате взаимодействия ее поверхности с соответствующими внешними или внутренними источниками. Примером статических полей является гравитационное и магнитное поля, потоков частиц – электроны и $\alpha$-частицы, электромагнитного излучения – свет, радиоволны, рентгеновское и $\gamma$-излучения. До начала космических полетов дистанционное зондирование Луны практически сводилось к исследованию свойств рассеянного солнечного излучения в видимом и близком инфракрасном диапазонах длин волн. Однако даже такой довольно узкий спектр возможностей позволил в целом правильно предсказать физическое состояние поверхности и то, что эта поверхность сложена породами основного и ультраосновного состава. Современные методы дистанционного исследования Луны ориентированы на использование космических средств, с помощью которых уже получено огромное количество информации о лунной поверхности. Тем не менее, эти данные являются далеко не полными. Много важной дополнительной информации можно получить при сочетании космических исследований Луны с ее телескопическими наблюдениями [18].

Данная модель Луны 2004 создана на основе анализа большого объема опубликованных работ, а также полученных в ходе выполнения в НИИ Астрономии Харьковского национального университета им. В. Н. Каразина и Главной астрономической обсерватории НАН Украины исследований.

## 2. НЕБЕСНО-МЕХАНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

### 2.1. Орбитальное движение

Детальное описание орбитального движения Луны представляет одну из самых сложных проблем небесной механики. Луна, находясь под одновременным воздействием притяжения Земли и Солнца, движется вокруг Земли по сложной орбите. В отличие от планетных теорий, в которых преобладающим является учет влияния центральной массы, что дает возможность использовать метод вариации постоянных при их построении, в лунной теории приходится учитывать множество возмущающих факторов путем решения дифференциальных уравнений движения Луны относительно центра масс Земли с учетом притяжения Земли, Солнца и планет, особенностей фигур Земли и Луны, а также релятивистских эффектов в системе Земля-Луна.

Исторически первое наиболее полное решение уравнений движения Луны было получено Брауном, опубликовавшим в 1919 г. свои "Tables of the Moon". Эти таблицы в течение многих десятилетий использовались при составлении астрономических ежегодников. С появлением быстродействующих электронных вычислительных машин представилась возможность вычислять видимые положения Луны непосредственно по теории Брауна. Так появились "Улучшенные эфемериды Луны", которые с 1960 г. использовались в Астрономическом Ежегоднике СССР (АЕ) [1].

Повышение точности астрометрических наблюдений в 70-е годы XX ст. за счет внедрения новых методов и технических средств наблюдений позволило построить более точные теории движения планет и Луны путем совместного численного интегрирования уравнений орбитального и вращательного движения Луны, орбитального движения планет с учетом возмущений от малых тел Солнечной системы.

Численные теории движения Луны и планет начали интенсивно разрабатывать в США и СССР в 60-е годы прошлого столетия с целью обеспечения космических полетов. Наиболее совершенными являются американские численные теории и полученные на их основе эфемериды серии DE/LE (*Development Ephemeris*), создаваемые в Калифорнийском (Лаборатория реактивного движения) и Массачусетском технологических институтах. Они основаны на высокоточной динамической модели движения планет и барицентра системы Земля-Луна относительно барицентра Солнечной системы (DE) и движения Луны относительно геоцентра (LE). Ниже приведены некоторые характеристики этих эфемерид [13].

***DE118/LE62*** (1981). Для построения этих эфемерид использовано свыше 50000 меридианных и фотографических позиционных наблюдений, выполненных, в основном, в Морской обсерватории (Вашингтон, США) в 1911-1979 гг., радарные измерения относительных расстояний до планет и космических аппаратов, а также данные лазерных наблюдений расстояний до Луны. Учтены возмущения от трех астероидов (Церера, Паллада, Веста). Углы ориентации эфемеридной системы координат по отношению к фундаментальной (FK4) определены по наземным позиционным наблюдениям.

***DE200/LE200*** (1982). Получены в результате преобразования эфемерид DE118/LE62 путем поворота их к среднему экватору на эпоху J2000.0 и динамическому равноденствию, определенному осреднением мгновенных значений долготы узла и определением наклона орбиты барицентра Земля-Луна.

***DE403/LE403*** (1995). Отнесены к Международной небесной системе отсчета ICRF *(International Celestial Referemce Frame)*, определяемой направлениями на удаленные радиоисточники методом радиоинтерферометрии со сверхдлинными базами (РСДБ). Привязка к этой системе выполнена с использованием наблюдений космических аппаратов Фобос и Магеллан, направленных к Марсу и Венере соответственно, а также дифференциальных РСДБ-наблюдений и лазерных измерений

расстояний до Луны. При создании теории учтены возмущения 300 астероидов на движение Марса, Земли и Луны.

***DE405/LE405*** (1998). Наиболее совершенные эфемериды этой серии. От предыдущих они отличаются включением в обработку новых наблюдательных данных, в частности, фотоэлектрических и ПЗС-наблюдений внешних планет, обеспечивших существенное повышение точности определения их орбит. Точнее выполнена привязка к системе ICRF включением в обработку новых дифференциальных РСДБ-наблюдений космических аппаратов. Значительно улучшена процедура вычисления положений астероидов. Впервые учтено влияние сжатия Солнца, полученное из астрофизических данных.

Новые численные теории планет разрабатывались в СССР и в России в ряде институтов РАН: прикладной математики, радиотехники и электроники, теоретической астрономии (ИТА), а также в Центре управления полетами ЦНИИМАШ. Эта работа, начатая в ИТА еще в 1974 г., продолжается в Институте прикладной астрономии РАН, где и построена серия численных эфемерид планет и Луны EPM (*Ephemerides of Planets and the Moon*). Ниже даются краткие сведения об этих теориях [13].

***EPM87*** (1987). Наиболее совершенный вариант создаваемых в ИТА эфемерид. Основное отличие EPM87 от DE200/LE200 заключается в том, что для уточнения параметров движения планет использован обширный массив разнообразных наблюдений, выполненных на протяжении XVIII-XX ст.: меридианных, прохождений Меркурия и Венеры по диску Солнца (1715-1959), солнечных затмений (1778-1974), лунных покрытий Венеры (1832-1971) и Марса (1821-1971), а также радиолокационных измерений расстояний до внутренних планет, лазерных измерений расстояний до Луны. Вашингтонские меридианные наблюдения Солнца и внутренних планет (1911-1971), а также наблюдения покрытий звезд Венерой (1959 г.) и Марсом (1976 г.) использованы для привязки эфемерид к системе каталога FK4.

***EPM98*** (1998). Получены совместным численным интегрированием уравнений движения больших планет, Солнца, Луны и пяти самых массивных астероидов с учетом физической либрации Луны, а также возмущений еще от 295 астероидов по методике, аналогичной использованной при построении теорий DE403/LE403.

***EPM2000*** (2000). Построены на интервале 125 лет численным интегрированием уравнений движения 311 тел Солнечной системы и физической либрации Луны. Для 16 основных тел (9 больших планет, Солнце, Луна и 5 избранных астероидов) в уравнения включены их взаимные возмущения, а также релятивистские эффекты, влияние сжатия Солнца и возмущения от 295 астероидов. Для уточнения теории привлечены свыше 80000 радарных наблюдений планет (1961-1995), доплеровских измерений и наблюдений запаздывания КА Викинг и Пасфайндер, различных измерений КА, движущихся около Юпитера (1973-1997). Эфемериды Луны уточнены по 13500 лазерным измерениям расстояний (1970-2000).

***EPM2003*** (2003). Эта теория отличается от предыдущей тем, что в ней учтены возмущения от большинства тел пояса астероидов. Теории построены на базе наблюдательных данных, включающих свыше 220000 радиолокационных наблюдений планет и космических аппаратов (1961-2002), а также около 50000 астрометрических ПЗС-наблюдений внешних планет и их спутников, меридианных и фотографических наблюдений XX века. Наряду с планетными эфемеридами уточнены параметры орбитального и вращательного движения Луны на основании лазерных измерений Луны (1971-2001). Использована методика DE405/LE405 при определении углов ориентации систем координат EPM2003 и ICRF.

Общим для всех эфемерид серий DE/LE и EPM является совместное численное интегрирование уравнений движения 9 больших планет, Солнца, Луны и лунной физической либрации. Различные версии этих эфемерид несколько различаются между собой моделированием физической либрации

Луны и возмущений от астероидов, принятыми системами отсчета, а также составом использованных наблюдений.

До 1986 г. эфемериды Солнца и внутренних планет, публикуемые в АЕ, основывались на аналитических теориях Ньюкома, эфемериды внешних планет – на численной теории Эккерта и др., а Луны – на уточненной теории движения Луны Брауна-Эккерта. С 1986 г. в соответствии с решениями XVIII Генеральной Ассамблеи МАС при вычислении эфемерид Солнца, Луны и больших планет используются численные теории DE200/LE200. Причем, начиная с 2001 г. в АЕ используется вариант эфемерид DE200/LE200, в котором координаты и скорости небесных объектов представлены с помощью полиномов Чебышева.

В связи с возросшими требованиями, согласно рекомендации XXIV Генеральной Ассамблеи МАС, в национальных ежегодниках, в том числе в АЕ, начиная с 2004 г. планетные и лунные эфемериды базируются на теориях DE405/LE405. Кроме того, в "Дополнении к Астрономическому Ежегоднику" даются прямоугольные координаты Солнца, Луны и больших планет для интервала 2001-2010 гг., вычисленные на основании численной теории EPM2000.

Несмотря на большую практическую ценность численных теорий движения небесных тел, аналитические теории не потеряли своей значимости. Основным недостатком численных теорий является то, что для их построения необходимо знать точные значения масс тел Солнечной системы, а также иметь совершенные данные о величине и характере их притяжения. Аналитические теории позволяют независимо определять некоторые из этих параметров. Поэтому в настоящее время пытаются использовать преимущества этих теорий и строят так называемые численно-аналитические теории.

С начала 1980-х гг. в Институте небесной механики и вичисления эфемерид (бывшее Бюро долгот) Франции создаются планетные теории VSOP (*Variations Seculaires des Orbites Planetaires*), в которых учтены эффекты третьего порядка относительно возмущающих масс, влияние Луны и релятивистские эффекты. Постоянные для этих теорий определены не из наблюдений, а из сравнения с численной теорией DE200/LE200. Параллельно в этом институте была создана аналитическая теория движения Луны ELP2000 (*Ephemerides Lunaries Parisiens*), а также уточненная полуаналитическая теория ELP2000-85, при построении которой для определения постоянных использована теория DE405/LE405. В настоящее время эти планетные и лунные теории сравниваются с реальными наблюдениями с целью их верификации. Упомянутые аналитические теории используются при вычислении эфемерид для французского астрономического ежегодника.

### 2.2. Приливное замедление движения Луны

Аналитические теории движения Луны позволяют детально изучать отдельные неравенства в этом движении. Среди них наиболее интересным является параметр, характеризующий вековое изменение углового момента движения Луны. Диссипация приливной энергии в теле Земли приводит к уменьшению ее углового момента вращения, что вызывает увеличение углового момента движения Луны по орбите. Приливное трение в системе Земля-Луна вызывает ускорение средней долготы Луны, из-за чего Луна удаляется от Земли, так, что влияние, которое Земля оказывает на вращающуюся Луну, постепенно ослабевает, а движение Луны по орбите замедляется. Таким образом, применяющиеся в литературе два словосочетания - «вековое ускорение Луны» и «вековое замедление Луны» - правомочны. В первом из них речь идет о вековом увеличении угловой скорости обращения Луны вокруг Земли, а во втором – о вековом уменьшении линейной скорости движения Луны по орбите.

Кроме диссипации приливной энергии в теле Земли, которая является доминирующим фактором, вызывающим вековое орбитальное замедление Луны, следует учитывать и диссипацию приливной энергии в лунном теле, эффекты которой проявляются во вращении Луны. Наиболее вероятным

механизмом такой диссипации является взаимодействие мантии Луны с вязким ядром. Прогресс в изучении векового замедления Луны достигнут благодаря использованию современных высокоточных наблюдений Луны, выполняемых с помощью лазерных измерений расстояний до уголковых отражателей на лунной поверхности. На основании лазерных измерений найдено значение приливного замедления Луны равное $\dot{n}_M = (-25.88 \pm 0.5)'' / столетие^{-2}$ [23], что соответствует увеличению большой полуоси лунной орбиты на 3,82 ± 0,07 см/год. Вековое замедление Луны находится также на основании длительных рядов классических наблюдений, начиная от самых древних. Так, из анализа солнечных затмений, а также покрытий звезд и планет Луной за XVIII-XX вв. получено значение $\dot{n}_M = (-22.9 \pm 0.8)'' / столетие^{-2}$ [32].

### 2.3. Вращение

Изучение геометрической и динамической фигуры Луны невозможно без развития теории ее осевого вращения. Наблюдение тонких эффектов этого вращения, главным образом с помощью лазерной локации, дает возможность получать информацию относительно внутреннего строения Луны, поскольку вращение происходит под влиянием, как приливообразующих сил, так и взаимодействий на границе "ядро–мантия". Например, по данным лазерной локации Луны диссипация приливной энергии в ее теле вызывает смещение (~0,26") лунной оси вращения [23].

Изучение вращения Луны основано на следующих трех законах, опубликованных в 1693 г. французским астрономом Д. Кассини:

1. Луна вращается с постоянной угловой скоростью в прямом направлении вокруг оси, которая прецессирует в обратном направлении относительно перпендикуляра к плоскости эклиптики. Время полного оборота равно среднему периоду обращения центра масс Луны по орбите.

2. Плоскость лунного экватора наклонена под постоянным углом $I$ к плоскости эклиптики (современное значение $I = 1°33'$).

3. Плоскости эклиптики, лунного экватора и средней орбиты Луны пересекаются по одной прямой, называемой линией узлов, причем плоскость эклиптики расположена между двумя другими плоскостями. Другими словами, долгота восходящего узла лунной орбиты равна долготе нисходящего узла лунного экватора на эклиптике.

Следовательно, движение оси вращения Луны в пространстве, согласно законов Кассини, аналогично прецессии оси вращения Земли. С периодом около одного месяца Луна совершает небольшие колебания (оптические либрации в долготе и широте) относительно среднего направления "центр масс Луны – центр масс Земли".

Динамически Луна представляет собой трехосный эллипсоид, причем его большая ось, вследствие особенностей обращения Луны вокруг Земли (оптической либрации) не всегда ориентирована строго на Землю. Притяжение Земли создает дополнительное покачивание тела Луны (так называемую вынужденную физическую либрацию) относительно некоторого среднего положения, которое не описывается законами Кассини. Ньютон первым предположил наличие у Луны физической либрации. С того времени вращение Луны относительно центра масс описывается для случая однородной абсолютно твердой Луны с помощью уравнений Эйлера. В последнее время, в связи с повышением точности наблюдений при построении теорий вращения Луны, учитывается также ее упругость и вязкость.

Работы по совершенствованию теорий физической либрации Луны (ФЛЛ) активизировались начиная с 70-х гг. прошлого столетия в связи с проведением лазерной локации уголковых отражателей, установленных на ее поверхности, точность которой постоянно возрастает. В настоящее время точность лазерных измерений расстояний до Луны составляет 2-3 см (в начале 1970-х гг. –

около 25 см). Это позволило построить новые теории вращения Луны, обеспечивающие точность учета ФЛЛ порядка 0.01" [12,25,34,35].

В докосмическую эру изучение вращения Луны сводилось к определению параметров физической либрации $I_0$ (средний наклон экватора Луны к эклиптике) и $f = B(C-B)/A(C-A)$ (функция главных моментов инерции Луны $A$, $B$, $C$), как правило, в рамках линейных теорий вращения Луны. Первый этап космических исследований Луны (1959-1976) внес существенные изменения в решение проблемы вращения Луны. Данные, полученные с помощью КА, в сочетании с результатами лазерной локации, позволили, в частности, снять проблему неоднозначности определения параметра $f$, решением которой астрономы занимались в течение более 150 лет. Оказалось, что значение $f = 0.6392 \pm 0.0005$, найденное из этих определений, близко к критическому значению ($f = 0.662$), при котором в рамках линейной теории ФЛЛ один из членов в разложении для либрации в долготе неограниченно возрастает, что указывает на наличие резонансных колебаний Луны.

Улучшению теорий ФЛЛ способствовало детальное изучение гравитационного поля на основании траекторных измерений спутников Луны. Оказалось, что в формирование физической либрации Луны существенный вклад вносят гармонические члены выше второго порядка в разложении селенопотенциала по сферическим функциям, что в классических теориях не учитывалось. Развитие новых теорий ФЛЛ стало возможным также благодаря использованию высокоточных теорий движения Луны.

Решение системы нелинейных уравнений вращения Луны на основе современных теорий ее орбитального движения с учетом возмущений от гармонических многочленов высшего порядка селенопотенциала, тонких эффектов, вызванных возмущениями от Солнца, планет, сжатия Земли, вращения плоскости эклиптики, упругости Луны составляют современную суть главной проблемы построения теории ФЛЛ.

В свете этих требований и новых возможностей в настоящее время создано несколько новых теорий ФЛЛ, по которым построены соответствующие таблицы ФЛЛ [12,25,34,35]. Наиболее обстоятельные таблицы созданы Экхардтом [25]. В них приводятся значения составляющих ФЛЛ с учетом гармоник третьего порядка селенопотенциала (по Экхардту - решение 500) и их ошибок (506-512), вклада гармоник четвертого порядка (501), ошибок динамических параметров Луны (502-505), а также вязкости Луны (513, 514).

Взаимное сравнение различных аналитических и полуаналитических теорий ФЛЛ дает удовлетворительное согласие: расхождения в значениях коэффициентов для большинства гармоник не превосходит 0.005". Различия, бо́льшие 0.01", но меньшие 0.2", имеются, в основном, в критических (резонансных и с малыми знаменателями) членах и обусловлены, по-видимому, различиями используемых эфемерид Луны.

В настоящее время широко применяется также численный подход к решению дифференциальных уравнений вращения Луны. Не уступая в точности аналитическим теориям, численные теории позволяют получить, например, динамически согласованные координаты центра масс Луны и компонент ФЛЛ. При сравнении численных теорий с аналитическими выявляются заметные расхождения в компонентах ФЛЛ, вызванные, по-видимому, неточным выбором начальных условий интегрирования, а также несовершенством процедуры численного интегрирования.

### 2.4. Свободная либрация Луны

Кроме колебаний Луны, обусловленных влиянием Земли, Солнца и планет (вынужденная либрация) существуют также ее свободная либрация, наличие которой предполагалось даже в рамках классических линейных теорий вращения Луны. Лазерные измерения расстояний до уголковых отражателей на лунной поверхности позволили обнаружить три моды свободной либрации. Первая из

них аналогична свободному колебанию Чандлера для Земли, но с периодом около 74 лет, вторая – колебание полярной оси в пространстве (дополнительная прецессия) с периодом 27.3 года и третья – колебания в скорости вращения (в долготе) с периодом 2.9 года [23]. По предварительным данным амплитуды этих либраций составляют соответственно 1.7", 8.7" и 0.5".

Причина свободных колебаний Луны может быть связана с перераспределением энергии в системе Земля-Луна, а также взаимодействием твердой мантии Луны с вязким ядром, радиус которого оценивается в несколько сотен км. Не исключено также и то, что свободные колебания Луны вызваны падением на ее поверхность в недалеком прошлом крупного небесного тела. По-видимому, параметры свободной либрации Луны будут определены из длительных лазерных измерений, а также из наблюдений с поверхности Луны.

Дальнейшее развитие теорий физической либрации Луны будет проводиться с учетом дифференциального вращения мантии и ядра, как источника конвективной диссипации энергии в теле Луны, приводящей в конечном итоге к наличию ее свободной либрации.

## 3. ДИНАМИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ И ФИГУРА

### 3.1. Гравитационное поле

Изучение гравитационного поля Луны играет важную роль в установлении ее физических свойств, происхождения и эволюции. Информацию о гравитационном поле Луны (селенопотенциале) получают, главным образом, на основании данных слежения за движением ее искусственных спутников. Известно около 30 моделей селенопотенциала, построенных на основании измерений, которые выполнялись в течение первой фазы космических исследований Луны (1959-1976). Они включают: допплеровские измерения ИСЛ серий Луна, Лунар Орбитер, Эксплорер, субспутников КК Аполлон; результаты лазерной локации уголковых отражателей и РСДБ радиопередатчиков, установленных на лунной поверхности; измерения лучевых ускорений командно-служебных модулей КК Аполлон. Все эти модели позволили составить качественно новое представление о Луне, хотя между собой они существенно различаются, что обусловило необходимость создания в свое время обобщенной системы динамических параметров Луны [6].

Принципиально новая информация о гравитационном поле Луны была получена с помощью американских полярных спутников Клементина и Лунар Проспектор.

По результатам измерений КА Клементина в сочетании с данными Лунар Орбитер и субспутников КК Аполлон 15, 16 были построены улучшенные модели гравитационного поля Луны GLGM-1, а несколько позже GLGM-2 (*Goddard Lunar Gravity Model*) степени и порядка (70x70) [33]. Однако наиболее совершенными в настоящее время являются модели, построенные по данным КА Лунар Проспектор (ЛП), поскольку этот аппарат выполнил первые измерения гравитационного поля Луны с низкой полярной орбиты, обеспечивая полное покрытие с высоким разрешением всей видимой стороны Луны [30,31]. Кроме того, ЛП имел стабилизированное вращение, т.е. являлся идеальным для изучения длинноволновой составляющей гравитационного поля. Первая модель LP75G, построенная по этим результатам с учетом данных, использованных в моделях GLGM, содержит сферические гармоники разложения селенопотенцала порядка (75x75). Эта модель является наиболее полной, наилучшим образом самосогласованной и, в отличие от других моделей, отнесенной к главным осям инерции Луны ($C_{21}=S_{21}=S_{22}=0$). Модель LP75G выделяет несколько новых масконов (*mass concentrations* – большие площади материала высокой плотности в/или ниже лунной коры, которые обычно ассоциируются с ударными бассейнами) на видимой стороне Луны. Она частично разрешает масконы обратной стороны и дает улучшенные значения динамических параметров Луны.

Низковысотные данные миссии ЛП допускают выявление особенностей гравитационного поля видимой стороны Луны до более высоких порядков. Так, разные модификации модели LP100 (степени и порядка 100) содержат информацию, извлеченную из данных, полученных на номинально 100-км высоте, а модель LP165 (порядка близко 180) – с более низкой высоты (иногда меньше 10 км). Однако, из-за синхронизации осевого и орбитального вращения Луны, прямые измерения гравитационного поля отсутствуют на большей части ее обратной стороны (КА находится вне видимости с Земли), т.е. возможности выявления гравитационных особенностей здесь в значительной мере ограничены. Поэтому прибегают к тем или иным предположениям и условиям. Основная информация извлекается из наблюдений за изменениями орбиты КА, вызванных его ускорениями под влиянием особенностей гравитационного поля обратной стороны Луны, после выхода КА из зоны затмения. В связи с этим, высокостепенные модели типа LP165 могут показывать много ложных деталей. Фактически подобные модели реалистичны только примерно до 110-го порядка для видимой стороны Луны и до 60-го порядка для обратного полушария.

Измерения, выполненные с помощью ЛП, обнаруживают 7 новых масконов. Три из них находятся на видимой стороне Луны, а четыре – на обратной. До недавних пор считалось, что повышенная плотность материала в этих бассейнах вызвана тяжелым базальтовым заполнением их оснований плотным материалом мантии. Однако некоторые из вновь открытых бассейнов не относятся к разряду заполненных базальтом, а являются "выступами" мантии. Масконы обнаружены не только на морях, но и в континентальной части обратной стороны Луны. Таковым является, например, бассейн кратера Королев (205°E, 5°N), расположенный в наивысшем (около 8 км над средним уровнем) материковом регионе.

Сравнение данных о топографии и гравитационном поле Луны, полученных КА Клементина и Лунар Проспектор, соответственно, обнаруживает различную глобальную корреляцию их для длинноволновой (корреляция больше) и коротковолновой (корреляция меньше) части. У Земли наблюдается обратная картина. По-видимому, лунная топография поддерживается сложным многократным механизмом компенсации.

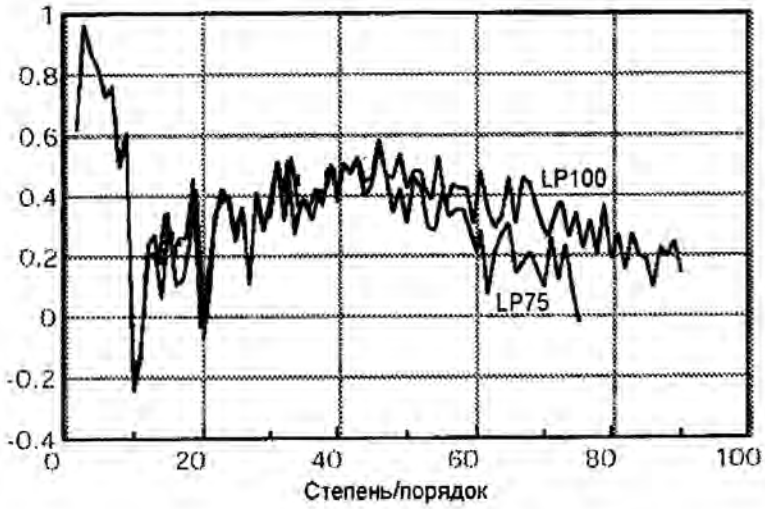


Рис. 1. Корреляция гравитационного поля и топографии Луны по данным двух моделей селенопотенциала.

На рис. 1 показана корреляция гравитационного поля с топографией (по измерениям КА Клементина) Луны по данным двух моделей: LP75G и LP100i [31]. Из рис. 1 следует, что при более высоком порядке разложения гравитационного поля увеличивается корреляция с топографией для более высоких порядков. Можно говорить о корреляции с топографией примерно до 40-го порядка, после которого она уменьшается, хотя по данным более высокостепенных моделей корреляция несколько увеличивается.

### 3.2. Динамические параметры

Значения гармоник селенопотенциала, моментов инерции Луны и их разностей, лунного числа Лява (характеризует приливные изменения в моментах инерции и гравитационном поле), а также параметры физической либрации определяются внутренним строением, распределением масс и внутренней динамикой Луны. Все эти характеристики взаимосвязаны.

Одной из основных задач селенодезии и лунной динамики является изучение динамической фигуры Луны. Динамическая фигура задается в виде трехосного эллипсоида инерции, равновеликого по объему Луне. Такой эллипсоид характеризуется главными ($A<B<C$) и центробежными ($D$, $E$, $F$) моментами инерции. Последние характеризуют ориентацию эллипсоида инерции относительно принятой селенографической системы координат.

Непосредственно из наблюдений главные моменты инерции не определяются, а находятся лишь их комбинации: гармоники второго порядка $J_2 = -C_{20}$ и $C_{22}$ селенопотенциала – из анализа данных об эволюции траекторий ИСЛ, а также динамические сжатия $\beta$ и $\gamma$ – из измерений расстояний до уголковых отражателей на Луне с помощью лазерной локации. Для абсолютно твердой Луны эти величины связаны между собой следующим образом:

$$J_2 = [C - (A+B)/2]/MR^2, \quad C_{22} = (B-A)/4MR^2,$$
$$\beta = (C-A)/B, \quad \gamma = (B-A)/C.$$

В табл. 2 приведены значения динамических сжатий и полярного момента инерции Луны, а также ненормированных сферических коэффициентов второго и третьего порядков для моделей, полученных по данным лазерной локации Луны (ЛЛЛ) (1969-1994) и измерений с помощью КА Лунар Проспектор (модель LP75G). В последнем столбце приведены эти же характеристики по данным обобщенной модели (1959-1976).

Важнейшим динамическим параметром является полярный момент инерции Луны ($C/MR^2$ где $M$, $R$ – соответственно масса и радиус Луны), который служит мерой радиального распределения плотности Луны (для однородного тела равен 0.4). Значение $C/MR^2 < 0.4$ свидетельствует об увеличении плотности с глубиной. В настоящее время наиболее точные оценки лунного момента инерции получены из комбинации определений динамических сжатий $\beta$ и $\gamma$ из ЛЛЛ и коэффициентов гравитационного поля Луны $J_2$ и $C_{22}$, найденных из анализа как допплеровских измерений ИСЛ, так и данных ЛЛЛ. Такая комбинация дает значение полярного момента инерции Луны $C/MR^2 = (0.3935\pm0.0011)$. Из комбинации пяти лучших определений гармоники $J_2$ было получено значение $C/MR^2 = (0.3929\pm0.0009)$ [46].

Расхождение определений динамических сжатий и главных моментов инерции Луны объясняется наличием не твердотельного вращения Луны, которое происходит или в форме упругого тороидального тела или с жидким ядром, частично связанного с твердой мантией. Приливное "искажение" низших гармоник селенопотенциала и моментов инерции Луны определяется значением числа Лява $k_2$, зависящего от упругих свойств недр Луны. Влияние числа Лява ощущается через вариации трехмерного вращения Луны и надежно определяется с помощью лазерных измерений. Из 28-летнего периода лазерной локации Луны найдено значение $k_2 = 0.0266\pm0.0027$ [46].

Таблица 2. Динамические параметры Луны по данным моделей: ЛЛЛ, LP75G и обобщенной

| Параметр | Модели | | |
|---|---|---|---|
| | ЛЛЛ, [23] | LP75G, [30] | Обобщенная, [6] |
| $\beta$, $10^{-6}$ | 631.72 ± 0.15 | 631.486 ± 0.09 | 631.325 ± 0.112 |
| $\gamma$, $10^{-6}$ | 227.88 ± 0.02 | 227.871 ± 0.03 | 227.735 ± 0.080 |
| $C/MR^2$ | 0.3940 ± 0.0019 | 0.3932 ± 0.0002 | 0.3910 ± 0.0010 |
| $J_2$, $10^{-6}$ | 204.0 ± 1.0 | 203.428 ± 0.09 | 202.23 ± 0.26 |
| $C_{22}$, $10^{-6}$ | 22.50 ± 0.11 | 22.395 ± 0.015 | 22.27 ± 0.04 |
| $C_{30}$, $10^{-6}$ | 8.66 ± 0.16 | 8.423 ± 0.107 | 12.17 ± 1.09 |
| $C_{31}$, $10^{-6}$ | 32.4 ± 2.4 | 28.521 ± 0.042 | 26.84 ± 1.40 |
| $C_{32}$, $10^{-6}$ | 4.869 ± 0.025 | 4.869 ± 0,014 | 4.853 ± 0.023 |
| $C_{33}$, $10^{-6}$ | 1.73 ± 0.05 | 1.718 ± 0.004 | 1.92 ± 0.14 |
| $S_{31}$, $10^{-6}$ | 4.67 ± 0.73 | 5.869 ± 0,039 | 7.97 ± 0.94 |
| $S_{32}$, $10^{-6}$ | 1.696 ± 0.009 | 1.664 ± 0.014 | 1.661 ± 0.018 |
| $S_{33}$, $10^{-6}$ | -0.28 ± 0.02 | -0.246 ± 0,0 04 | -0.474 ± 0.120 |

Интерпретация значения полярного момента инерции Луны приводит к такому представлению о внутреннем строении Луны: примерно 60-км глубины - кора с плотностью 2.75 г/см$^3$ (толщина коры сильно меняется по горизонтали); до глубины 800 км – постоянной плотности верхняя мантия; ниже, со скачком плотности относительно верхней мантии, находится нижняя мантия и ядро (плотность около 7 г/см$^3$).

Проблема изучения ядра Луны занимает особое место в селенодинамике. В современных представлениях о внутреннем строении Луны предполагается наличие жидкого ядра, хотя имеющиеся данные не исключают и возможность существования твердого ядра. Экстремальными представлениями о лунном ядре являются следующие: (1) полностью жидкое ядро и (2) тонкая жидкая оболочка над плотным твердым внутренним ядром. В любом случае, многие динамические особенности Луны вызваны процессами, происходящими на границе "ядро–мантия".

Считается, что масса лунного ядра составляет от 1% до 4% всей массы Луны. Исходя из значения $C/MR^2$ = (0.3932±0.0002), полученного по данным измерений КА Лунар Проспектор (табл.2), радиус лунного ядра может составлять от 220 км (если ядро железное) до 450 км в случае эвтетики системы Fe-FeS [30]. Данные ЛЛЛ (табл.2) дают несколько иные границы для размеров жидкого лунного ядра, а именно 352 км (ядро железное), 374 км (ядро железо-сульфидное).

### 3.3. Ориентация эллипсоида инерции

При учете влияния гармоник выше второго порядка в разложении селенопотенциала при построении теории физической либрации Луны оказалось, что кроме периодических членов имеются также значительные постоянные члены, наличие которых существенно изменило представления об ориентировке эллипсоида инерции Луны. В рамках классических теорий ФЛЛ, базирующихся на использовании разложения селенопотенциала лишь с гармониками второго порядка и степени считалось, что лунный эллипсоид инерции ориентирован так, что направление наибольшей оси инерции совпадает со средним направлением на Землю.

Появление в компонентах ФЛЛ постоянных членов в долготе и широте объясняется асимметричностью грушевидной эквипотенциальной поверхности Луны, обусловленной влиянием третьих гармоник селенопотенциала (гармоники более высокого порядка дают незначительный эффект).

Постоянные члены ФЛЛ в долготе ( $\Delta\tilde{\tau}$ ) и широте ( $\Delta\tilde{p}_1$ ) зависят, главным образом, от гармоник селенопотенциала $S_{31}$, $S_{33}$ и $C_{30}$, $C_{33}$ соответственно. В табл. 3 дана краткая сводка определений постоянных членов ФЛЛ, полученных на первом (до Клементины) и втором (после Клементины) этапах космических исследований Луны [7], соответственно первые три и последние три строки.

Таблица 3. Постоянные члены ФЛЛ по различным данным (согласно[7])

| Источник | $\Delta\tilde{\tau}$ | $\Delta\tilde{p}_1$ |
|---|---|---|
| Таблицы ФЛЛ (Екхардт, 1981) | 214.2" | -80.7" |
| Разные модели селенопотенциала | (-43... +1100) | (+5.. -231) |
| Обобщенная система | 114 ± 23 | -83.7 ± 1.7 |
| Модель GLGM-2 | 69.6 ± 1.3 | 80.9 ± 0.8 |
| Лазерная локация Луны | 66.6 ± 6.7 | -78.8 ± 0.6 |
| Модель LP75G | 67.6 ± 0.8 | -78.7 ± 0.2 |

Как следует из табл. 3, значения постоянных членов ФЛЛ по данным разных моделей селенопотенциала существенно различаются. Наиболее неуверенно определяется член $\Delta\tilde{\tau}$, точность которого лимитирована, главным образом, неточностью знания гармоники $S_{33}$ в разложении селенопотенциала. Привлечение данных измерений, выполненных с помощью КА Клементина, лазерной локации Луны и особенно КА Лунар Проспектор привело к существенному уточнению параметров ориентировки лунного эллипсоида инерции.

Согласно модели LP75G средний наклон экватора Кассини к эклиптике составляет величину $I$ = 1°32'32.9"±2.8" [7]. Это значение практически совпадает со значением, рекомендованным МАС ($I$ = 1°32'32.7"), полученным на основании лазерной локации Луны, что свидетельствует о хорошей согласованности моделей ЛЛЛ и LP75G.

Следует отметить, что современные таблицы ФЛЛ основаны на предположении об абсолютно твердой Луне. На самом деле, тело Луны обладает упругостью, что может обусловить изменения положения главных осей инерции Луны, т.е. в разложениях ФЛЛ могут появиться дополнительные члены (постоянные и периодические). Например, принимая число Лява для Луны $k_2$ = 0.0206 (по данным ЛЛЛ) можно ожидать изменение наклона лунного экватора к эклиптике на величину ~ 2".

### 3.4. Геометрическая фигура

Под геометрической фигурой Луны следует понимать фигуру ее физической поверхности со всеми неровностями лунного рельефа. Практически геометрическую фигуру Луны удобно представлять в виде разложения высот точек ее поверхности в ряд по сферическим (или другим специальным) функциям, или в виде определенной математической поверхности (сфера, сфероид, трехосный эллипсоид или более сложная поверхность).

Исследование геометрической фигуры Луны, так или иначе, связано с определением ее гипсометрических характеристик. Используются следующие группы таких характеристик: параметры

геометрической фигуры (референц-эллипсоида), определяемые гармониками второго порядка в разложении лунного рельефа в ряд по сферическим функциям; мегарельеф (разложение до порядка $n = 3...6$); макрорельеф (разложение до порядка $n = 7...18$); топорельеф (представляется разложением до более высоких порядков или с помощью специальных функций).

Основу для изучения геометрической фигуры Луны составляют селенодезические опорные сети (СОС). На протяжении второй половины XX ст. по наземным позиционным наблюдениям создано свыше 20 селенодезических каталогов различного назначения, объема содержащейся в них информации и точности. Привлечение данных, полученных с помощью космических аппаратов серии Зонд, Луна, Лунар Орбитер, Рейнджер, Аполлон, позволило значительно улучшить селенодезическую систему видимой стороны Луны, распространить ее на обратную сторону Луны, что способствовало изучению особенностей геометрической фигуры Луны [6].

Принципиально новая информация о лунной топографии была получена с помощью лазерного альтиметра (LIDAR) во время космической миссии Клементина [47]. Точность дальномерных измерений составляла около 40 м, а точность привязки данных измерений к центру масс Луны – около 100 м. В течение двух месяцев получены селеноцентрические высоты 64800 точек лунной поверхности в зоне от –75° до +75° по широте. За первый месяц (периселений на широте –30°) получены профили в полосе от –75° до +15°, за второй месяц (периселений на широте +30°) – в полосе от –15° до +75°. К настоящему времени на основании этих данных построены две модели топографии Луны GLTM (*Goddard Lunar Topography Model*): GLTM-1 и GLTM-2 [44, 46]. В первой из них выполнено разложение данных измерений (сгруппированных в трапециях размером 2°x2°) в ряд по сферическим функциям до 70-го порядка и степени (с полуволновым разрешением ~80 км) с привлечением данных Лунар Орбитер 1-5 и Аполлон 15. В модели GLTM-2 использованы также данные КК Аполлон 16. На построенных картах топографии высоты отнесены к сфероиду с радиусом 1738 км и сжатием 1/3234.93, соответствующему значению гармоники $C_{20}$ гравитационного поля согласно модели LP75G. Сообщается также о построении модели NLT360, в которой лунная топография представлена в виде разложения в ряд по сферическим функциям до 360-го порядка и степени из анализа альтиметрических измерений (Клементина) в площадках 0.25°x0.25° (*http://www.lpi.usra.edu/meetings/lpsc2003/pdf/1301.pdf*). Модель практически не отличается от других моделей топографии Луны, построенных по данным измерений Клементина.

Полученные топографические модели в основном подтверждают характеристики геометрической фигуры, мега- и макрорельефа видимой стороны Луны, полученные на основании предыдущих исследований. Существенно подробнее они описывают топорельеф Луны, особенно в высоких широтах видимого полушария и на ее обратной стороне. По данным этих карт диапазон высотных вариаций лунной топографии составляет около 16 км, что примерно на 30% больше, чем по предыдущим данным. Главным образом этот диапазон обусловлен наличием бассейна Южный полюс – Эйткен ($H_{min}$= -7.7 км) и соседним с ним континентом ($H_{max}$= +8.4 км), расположенным к северо-востоку.

По данным новых моделей топографии Луны получены параметры трехосного эллипсоида, наилучшим образом представляющего форму Луны [47]. Размеры эллипсоида приведены в табл. 4. Для сравнения даются те же характеристики по данным обобщенной модели [6], в которой использованы все доступные селенодезические измерения (наземные и космические), полученные на протяжении первого этапа космических исследований Луны (1959-1976).

На основании данных КА Клементина и обобщенной модели геометрическая фигура Луны хорошо аппроксимируется трехосным эллипсоидом. Однако в случае данных КА Клементина эллипсоид имеет большее полярное сжатие. В обоих случаях оси эллипсоидов ориентированы практически одинаковым образом: наибольшая – вдоль линии, соединяющей юго-западный горный район (горы Алтай) видимой стороны Луны и наивысший горный массив (район кратера Королев) обратной стороны Луны. Наименьшая ось пересекает видимую сторону Луны в центральной части

Моря Холода. Значение смещения центра геометрической фигуры относительно центра масс по данным КА Клементина и обобщенной модели практически совпадают и составляют соответственно –1.74 км и –1.88 км.

Геометрическая фигура Луны обладает значительной асимметрией. Центр масс Луны находится ближе к Земле по отношению к центру как фигуры всей Луны, так по отношению к центрам ее отдельных полушарий. Геометрические центры симметричных полушарий (видимого и обратного, северного и южного) существенно (до 3 км) смещены один относительно другого. Наибольший радиус кривизны имеет южное полушарие, а наименьший – видимое полушарие Луны.

Таблица 4. Параметры топографии Луны по данным КА Клементина [47] и обобщенной модели [6]

| Параметр | | Размер, км | | Разность, км |
|---|---|---|---|---|
| | | КА Клементина | Обобщенная модель | |
| Средний радиус | | 1737.103 ± 0.015 | 1737.54 ± 0.11 | -0.44 |
| Оси эллипсоида: | $a$ | 1739.020 ± 0.015 | 1738.61 ± 0.19 | +0.41 |
| | $b$ | 1737.567 ± 0.015 | 1737.56 ± 0.07 | 0 |
| | $c$ | 1734.840 ± 0.065 | 1736.32 ± 0.29 | -1.48 |
| $\Delta\xi$ | | -0.75 | -0.44 | -0.31 |
| $\Delta\eta$ | | 0.27 | -0.84 | 1.11 |
| $\Delta\zeta$ | | -1.74 | -1.88 | 0.14 |

Примечание: $\Delta\xi$, $\Delta\eta$, $\Delta\zeta$ - смещения центра фигуры относительно центра масс Луны (оси ξ и ζ лежат в экваториальной плоскости и направлены на восток и к Земле, соответственно, ось η – вдоль оси вращения Луны).

При сравнении характеристик динамической и геометрической фигур Луны обращает на себя внимание существенное различие ориентаций соответствующих эллипсоидов. Как было показано выше, наибольшая ось инерции Луны незначительно отличается от среднего направления на Землю (на величины $\Delta\tilde{\tau}$ и $\Delta\tilde{p}_1$), в то время как оси трехосного эллипсоида, аппроксимирующего геометрическую фигуру Луны, не совпадают с осями динамической системы на десятки градусов. Судя по параметрам геометрической фигуры Луны можно заключить, что она существенно отклоняется от равновесной [5].

## 4. ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

### 4.1. Общее описание поверхности

В первом приближении поверхность Луны подразделяется на две геологических разновидности: материковую и морскую. Материки занимают большую часть поверхности (около 83%); эта поверхность сложена лейкократовыми породами анортозит-норит-троктолитового состава. Морской тип поверхности, занимающий примерно 17% площади, представлен темноцветными породами базальтового состава. Предполагается, что периодов образования морей на Луне было несколько. В

частности, был период образования так называемых крипто-морей, следы которых находят, например, в районе кратера Шикард.

Рис. 2 представляет изображение (карту вариаций отражательной способности) почти всей лунной поверхности (исключая области полюсов) в цилиндрической проекции. Это изображение построено по данным оптической съемки Луны, которая была выполнена КА Клементина на длине волны 750 нм. На изображении даны названия крупнейших образований, морей и кратеров.

Рис. 2. Распределение отражательной способности (альбедо) лунной поверхности, построенное по данным КА Клементина для длины волны 750 нм.

Возраст Луны составляет примерно 4.5 млрд. лет. Луна – это химически дифференцированное небесное тело. Ее материковая поверхность (возраст около 4 млрд. лет) древнее морской. Она сформировалась в ходе многократного плавления вещества ранней коры, которое сопутствовало крупномасштабным ударным событиям. Лунные материковые породы принято относить к плутоническим (интрузивным) породам. Последние мощные удары крупных метеоритных тел привели к образованию бассейнов, больших структур круговой формы; крупнейшим бассейном (не только на Луне, но и в Солнечной системе) является бассейн Южный полюс – кратер Эйткен. Диаметр этой ударной структуры составляет примерно 2.5 тыс. км, а глубина около 10 км. В поверхностных породах этого бассейна, возможно, присутствует вещество мантии, извлеченное на поверхность гигантским ударом. По этой причине район бассейна Южный полюс – кратер Эйткен является одним из наиболее перспективных мест для отбора и доставки грунта на Землю.

Моря сформировались на (и за счет) материковой поверхности, в депрессиях, созданных бассейно-образующими ударами. Морские породы принято относить к эффузивным породам (базальтам). В среднем возраст морей составляет примерно 3.5 млрд. лет. Морской материал выходил

из глубоких горизонтов на поверхность по трещинам в лунной коре, которые образовались в результате удара, сформировавшего бассейн. Это вещество (лава) заполняло бассейн (иногда в несколько этапов), формируя современные моря. Толщина морских затоплений составляет в среднем несколько километров. Состав глубинных лав значительно более богат железом (и титаном), чем состав материкового вещества. Железо и титан являются хромофорами, поэтому цвет лунных базальтов темный.

Наиболее распространенной формой рельефа лунной поверхности являются кратеры. Практически все лунные кратеры имеют ударное происхождение. Часть крупных кратеров частично или полностью заполнены лавами (подобно бассейнам). На рис.3 представлено изображение типичного ударного кратера Рейнер (справа), полученное с помощью телескопа. Это сравнительно молодой кратер диаметром около 30 км.

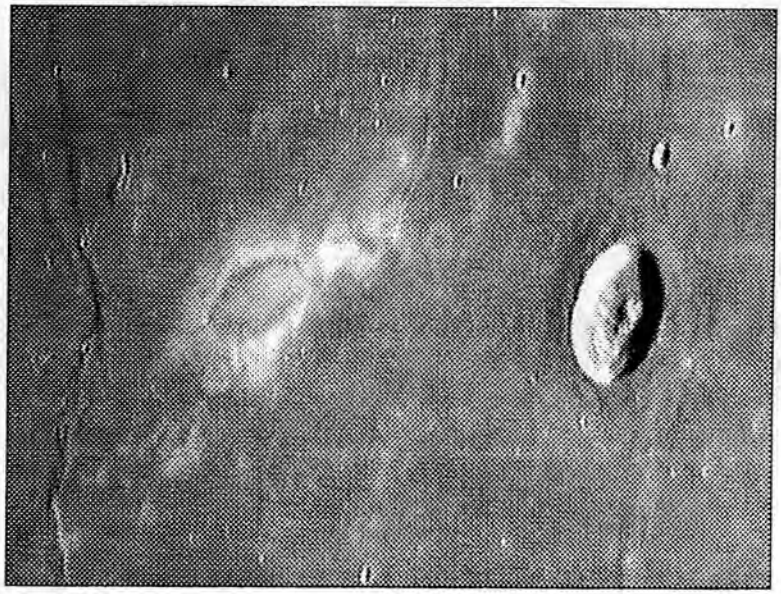

Рис. 3. Участок центральной части Океана Бурь. Справа виден ударный кратер Рейнер, слева свирл Рейнер-$\gamma$.

Загадочными структурами на Луне являются свирлы. Наиболее типичным представителем таких образований является свирл Рейнер-$\gamma$ (на рис.3, яркостная деталь левее кратера Рейнер). Свирлы не выражены в рельефе; от окружающих областей они отличаются только по альбедо. Наиболее вероятной причиной возникновения свирлов являются удары роев частиц и камней – кометных остатков [45].

### 4.2. Вертикальное строение коры

Вертикальная структура лунной поверхности является слоистой [15]. В настоящее время наиболее надежной представляется трехслойная модель коры. Наиболее глубокий слой представлен комплексом скальных коренных изверженных и метаморфических пород преимущественно основного состава. В морях первые несколько километров сложены базальтами и габбро; на материках, а также под базальтами и габбро морей, – в различной степени брекчированные породы

анортозит-норит-троктолитового ряда. Выше расположен слой раздробленных пород (мегареголит). Этот слой был сформирован в ходе интенсивной ударно-взрывной переработки материала поверхности. Мощность (толщина) этого слоя изменчива. На морских участках, удаленных от крупных кратеров, она составляет десятки и сотни метров. На материках и в близи крупных кратеров на морях толщина слоя может достигать 10 км. Крупные каменные блоки этого слоя могут быть частично прикрыты брекчиями – литифицированными обломочными породами. Данных об этих двух геологических горизонтах очень мало.

Самый верхний слой представлен реголитом (грунтом) – сильно раздробленным обломочным материалом в основном местного происхождения, возникшего за счет метеоритного и микрометеоритного разрушения подстилающих пород. Реголит содержит небольшое количество материала из далеких источников. Реголитовый чехол покрывает практически всю лунную поверхность, варьируясь по мощности (толщине). Он может отсутствовать (или терять сплошность) на склонах скал и камней при наклоне поверхности более 40°. Мощность реголита зависит от экспозиционного возраста поверхности: чем старше поверхность, тем более мощный слой реголита может развиться на ней. На морях средняя толщина реголита составляет около 4 м; на материке – примерно 8 м. Мощность реголита может доходить до нескольких десятков метров в зонах подсклоновых шлейфов. Карта толщины реголитового слоя, построенная по данным наземной радиолокационной (на длине волны 70 см) и оптической спектрозональной съемки поверхности приведена на рис.4 [3]. Как видно, наименьшая толщина реголитового слоя наблюдается в районах крупных молодых кратеров, менее 1 м.

Следует отметить, что границы между перечисленными слоями, вероятно, нечеткие; в отдельных местах вертикальное строение может иметь более сложную структуру. В частности, возможно появление дополнительных горизонтов брекчий, раздробленных и скальных пород. Сложного вертикального строения следует ожидать в зонах крупных молодых ударных структур, таких как кратер Тихо или кратер Коперник, а также в зонах крипто-морей.

Для задач практического освоения Луны наибольший интерес представляет реголитовый слой, поскольку он обычно служит объектом изучения в большинстве контактных и дистанционных исследований Луны; он принимает нагрузки посадочных устройств и средств передвижения, а в будущем и лунных баз.

### 4.3. Литологическая характеристика реголита

Лунный реголит – обломочный материал, представленный частицами разной формы. Он также включает в себя камни разных размеров. Реголитовый слой образовался под действием импактных (ударных) процессов с участием гравитационного перемещения вещества по склонам лунного рельефа. Состав реголита определяется составом местного подстилающего скального материала и в меньшей степени примесями из удаленных мест [15]. Важным фактором является также физико-химическое преобразование материала реголита при метеоритной переработке и воздействии частиц солнечного ветра. В состав реголита входят обломки пород и минералов скального основания (первичные частицы), а также продукты их ударной переработки – стекла, шлаки, агглютинаты, реголитовые брекчии (вторичные частицы), а также внелунное вещество. Соотношение количеств первичных и вторичных частиц определяется возрастом поверхности или зрелостью реголита. В зрелом лунном грунте содержится до 70-80% вторичных частиц. Внелунное вещество (например, метеоритное железо) не превышает 1-2% [27]. В холодных ловушках в полярных зонах Луны возможно присутствие водяного льда. Об этом свидетельствуют измерения, выполненные с помощью нейтронного спектрометра КА Лунар Проспектор [26]. Следует, однако, отметит, что данные нейтронной спектрометрии могут иметь и иную интерпретацию, не связанную с водяным льдом.

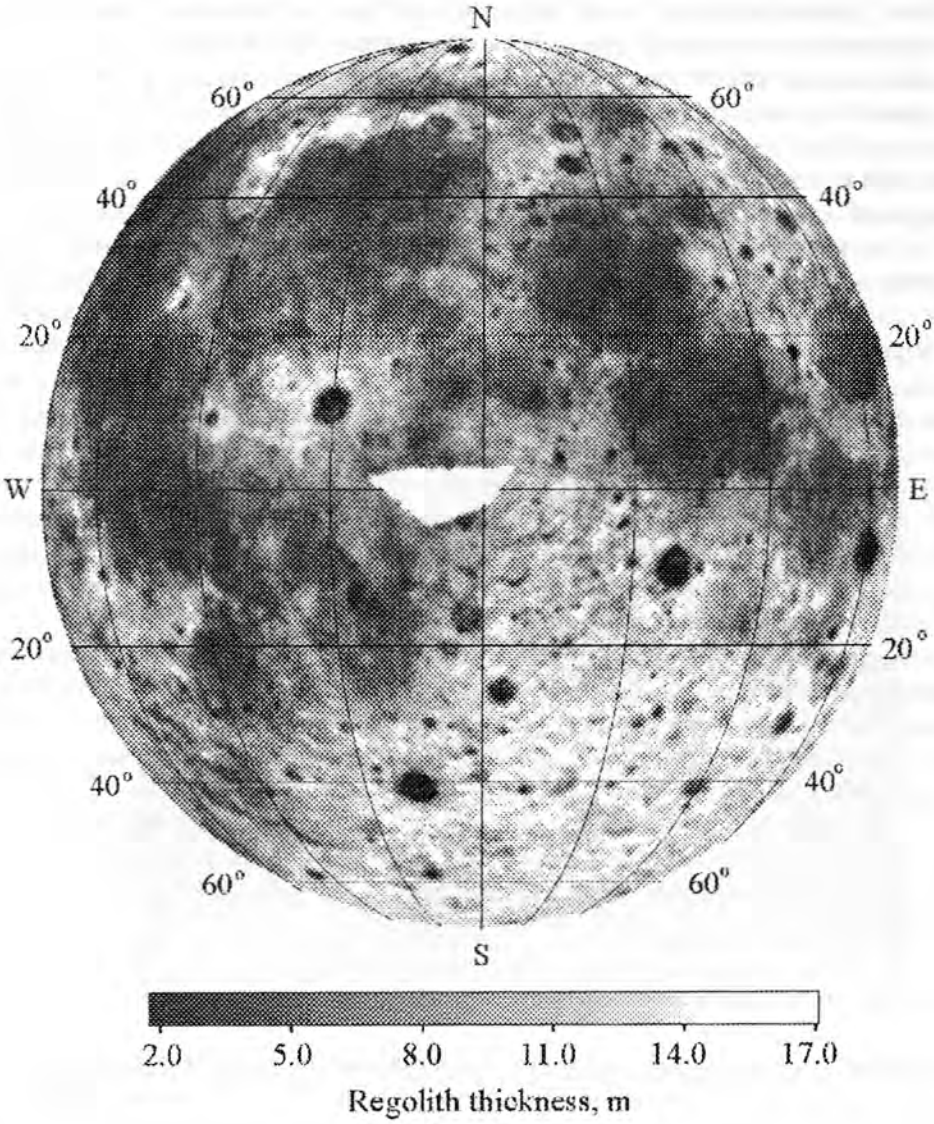


Рис. 4. Карта толщины реголитового слоя построенная по данным радиолокации и оптической съемки видимого полушария Луны.

Первичные частицы представлены базальтами, габбро, габбро-норитами, троктолитами, габбро-анортозитами и анортозитами, в которых варьируются содержание основных породообразующих минералов [15]. Моря и материки это не только две крупнейших геологических разновидности на Луне; это одновременно и разные петрографические провинции с различающимися ассоциациями горных пород. В морях компонент первичного материала представлен базальтами и габбро, а материках – габбро-норитами, троктолитами, габбро-анортозитами и анортозитами [15]. Первичные частицы в лунном грунте присутствуют в реголите в виде фрагментов или в составе реголитовых или

материковых брекчий. Материковые брекчии образовались в результате мощных ударных событий, тогда как реголитовые брекчии – результат длительной эволюции лунного грунта. Материковые первичные частицы подвергались значительно более сильному ударному метаморфизму (дробление, шоковые деформации, образование диаплектового стекла), чем морские. Это различие связано с тем, что материковые породы, будучи древнее морских, застали стадию очень интенсивной метеоритной бомбардировки Луны.

Вторичные частицы представлены реголитовыми брекчиями, спеками и обломками стекла. Реголитовые брекчии – литифицированные породы, образовавшиеся в результате уплотнения мелкораздробленного материала. Спеки – это агрегаты спекшихся зерен (зерна скреплены друг с другом прослойками стекла). Спеки имеют сложную ветвистую форму. Частицы вторичного стекла образуются при плавлении лунного реголита, которое вызвано метеоритными ударами. В зависимости от условий генезиса вторичные стекла варьируются от оплавленных слоев разной глубины на поверхностях частиц до фрагментов почти сферической формы, которые образовались при застывании расплавленного материала в полете, вследствие импактного события. В зрелом реголите содержится около 1 % сферул; из них примерно 1 % прозрачных сферул. Практически все сферулы дефектны.

Иногда в литературе все типы вторичных частиц объединяются термином агглютинаты, что возможно только очень условно. Распределение агглютинатов тесно коррелирует со степенью зрелости реголита, которая описывается параметром, представляющим собой отношение количества восстановленного железа (измеренное с помощью метода ферромагнитного резонанса) к его общему содержанию.

Используя корреляционные зависимости между содержанием агглютинатов и параметрами, характеризующими оптические спектры лунного материала, была построена карта прогноза содержания агглютинатов в реголите; она представлена на рис. 5 [29]. Как видно, низкое содержание аглютинатов наблюдается в молодых кратерах и в зонах их выбросов (лучевых системах). Деление море/материк практически отсутствует. Наблюдаются слабые вариации содержания агглютинатов в морях. Например, агглютинатов несколько больше в Море Ясности. Высоким содержанием агглютинатов выделяется также Плато Аристарх (пятно Вуда), которое предположительно сложено пирокластическим материалом. Очень мало агглютинатов в кратере Джордано Бруно и его окрестностях, поскольку это один из самых молодых крупных кратеров на лунной поверхности.

## 5. ХИМИКО-МИНЕРАЛОГИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

### 5.1. Химический состав

Материковое и морское вещество лунной поверхности имеет, соответственно, основной и ультраосновной состав. Морской реголит по химическому составу близок к среднему составу морского базальта и габбро, а материковый реголит – к осредненной смеси материковых пород анортозит-норит-троктолитовой серии. За счет горизонтального переноса вещества в процессе кратерообразования на границе море-материк существует зона смешивания материкового и морского материалов шириной несколько десятков километров. Здесь наблюдаются промежуточные составы (смеси). Найдены признаки переноса вещества на поверхности Луны в глобальном масштабе: практически все моря слегка контаминированы материковым веществом и наоборот. Это проявляется в небольшом, но хорошо заметном систематическом отличии составов первичных частиц и агглютинатов по содержанию железа и алюминия.

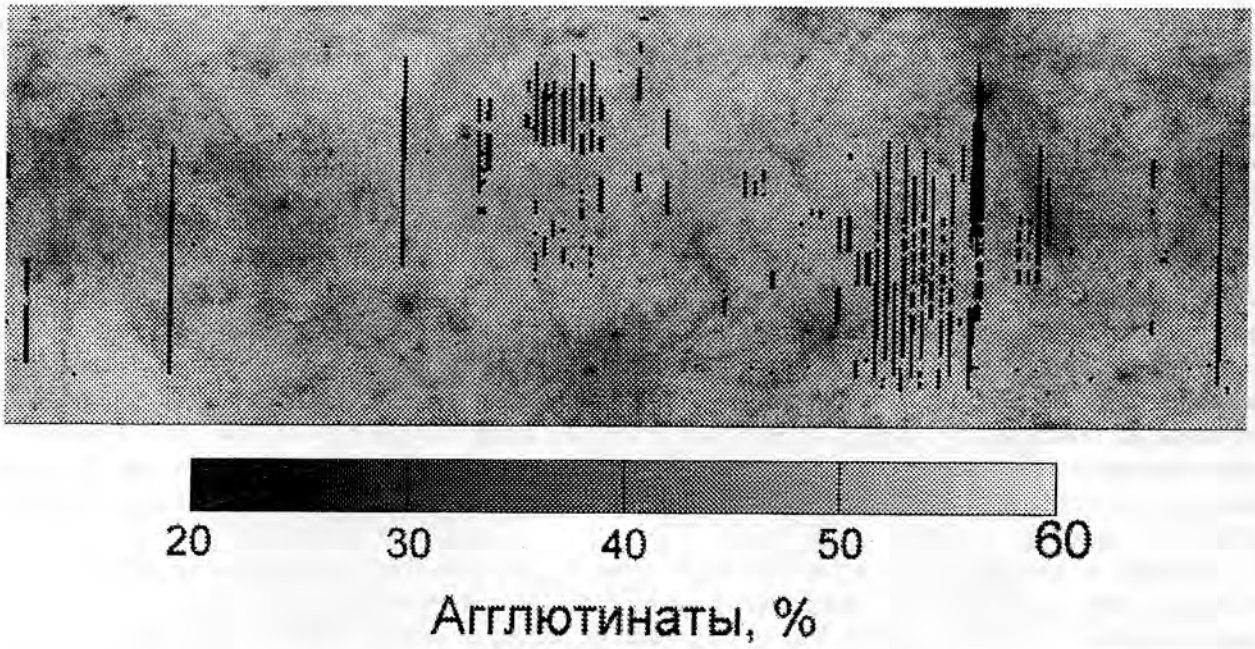


Рис. 5. Карта содержания агглютинатов в лунном грунте, построенная по снимкам КА Клементина и данным спектральных и химико-минералогических измерений образцов лунного грунта.

В табл.5 приведены средние данные о составе реголита в местах посадки некоторых космических аппаратов [27].

Таблица 5. Средний химический состав лунного грунта в местах посадок [вес. %]

| КА | $SiO_2$ | $Al_2O_3$ | $TiO_2$ | FeO | MgO | CaO |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Аполлон-11 | 40.46 | 10.08 | 10.41 | 19.22 | 7.01 | 11.54 |
| Аполлон-12 | 44.88 | 8.93 | 3.62 | 20.48 | 10.64 | 9.81 |
| Аполлон-14 | 48.09 | 16.72 | 1.51 | 9.53 | 10.18 | 10.67 |
| Аполлон-15 | 46.68 | 10.21 | 1.97 | 19.87 | 8.76 | 10.63 |
| Аполлон-16 | 44.89 | 27.23 | 0.53 | 4.98 | 6.00 | 14.56 |
| Аполлон-17 | 39.03 | 9.00 | 11.94 | 18.82 | 8.54 | 10.82 |
| Луна-16 | 44.00 | 13.83 | 4.77 | 18.7 | 6.40 | 11.82 |
| Луна-20 | 45.20 | 22.75 | 0.50 | 7.46 | 9.69 | 14.70 |
| Луна-24 | 46.00 | 12.20 | 1.02 | 21.58 | 7.40 | 12.20 |

Измерения лунной поверхности с помощью гамма и нейтронного спектрометров КА Лунар Проспектор, а также использование данных оптических измерений, проведенных КА Клементина, позволило построить карты прогноза элементного состава лунной поверхности, которые приведены на рис. 6 – 9 [42].

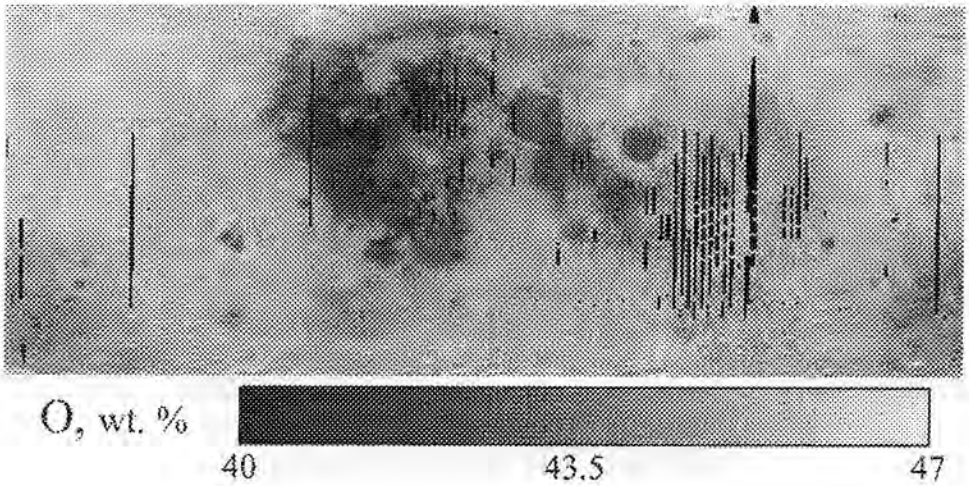


Рис. 6. Распределение кислорода по лунной поверхности по данным КА Лунар Проспектор

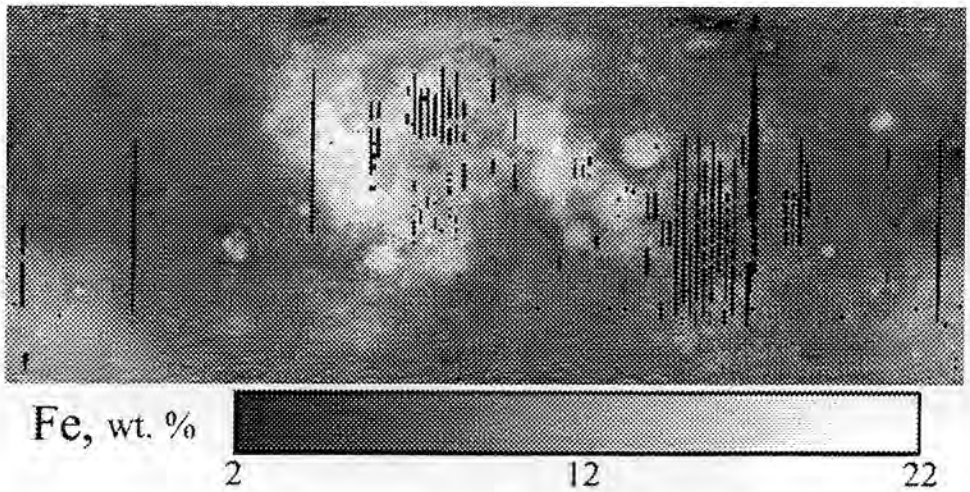


Рис. 7. Распределение железа по лунной поверхности по данным КА Лунар Проспектор

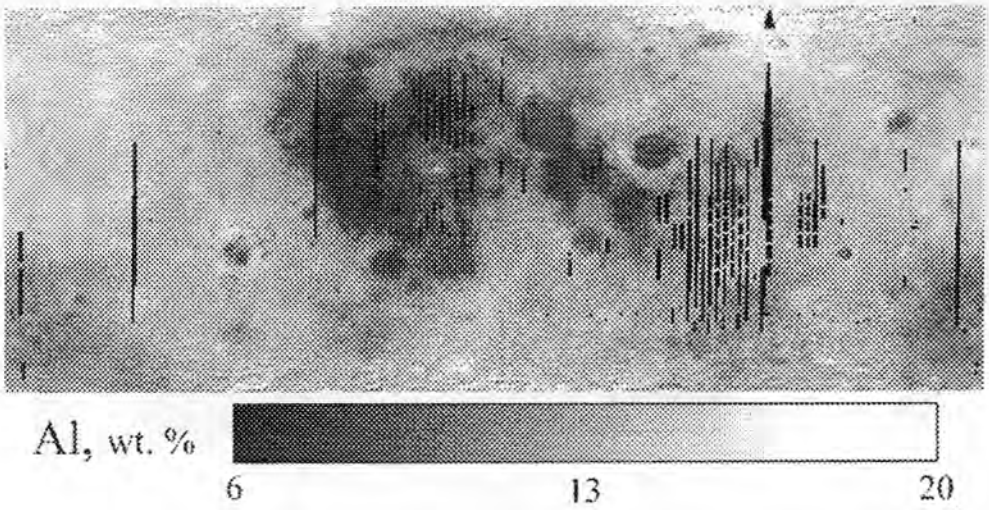


Рис. 8. Распределение алюминия по лунной поверхности по данным КА Лунар Проспектор

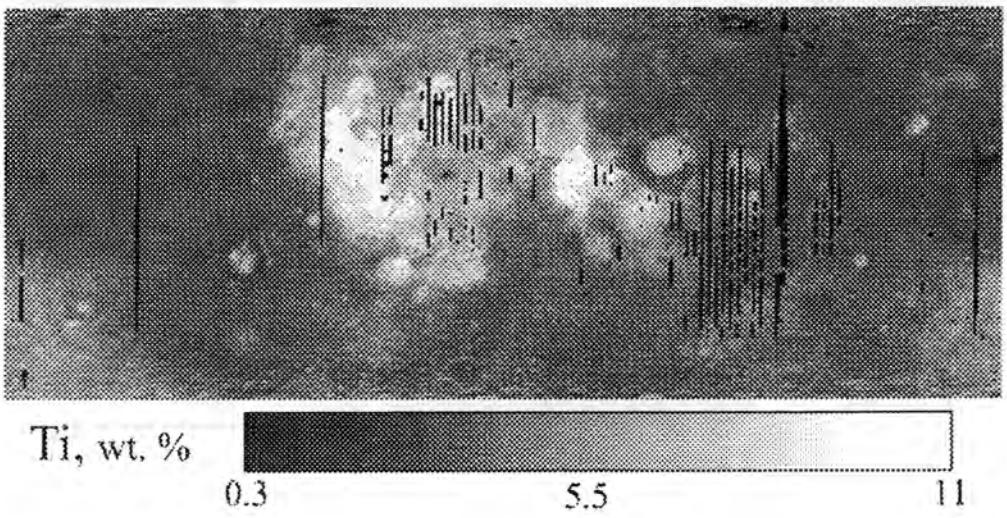


Рис. 9. Распределение титана по лунной поверхности по данным КА Лунар Проспектор

## 5.2. Естественные радиоактивные элементы

Особое место в элементном составе вещества лунной поверхности занимают естественные радионуклиды. Хотя в весовом отношении этих элементов сравнительно мало, однако, они представляют собой очень важный компонент, изучение которого позволяет многое понять о происхождении и эволюции лунного вещества. В частности, их присутствие в лунном веществе позволило провести γ-спектрометрометрию Луны с помощью АМС Луна-10 и надежно определить тип пород, слагающих лунную поверхность [14].

Естественные радиоактивные элементы образовались в период ядерного синтеза вещества, которое вошло в состав тел Солнечной системы и, в частности, Луны. В настоящее время радиоактивность планет (в том числе и Луны) определяется в основном содержанием урана, тория и калия. Радиоактивность вещества планет была значительно выше в далеком прошлом как из-за большего содержания элементов U, Th и K в веществе, так и из-за вклада короткоживущих элементов с периодом полураспада 1-100 миллионов лет.

С вероятностью примерно 0.11 радионуклид калия $^{40}K$ распадается за счет электронного захвата с испусканием γ-кванта и превращается в $^{40}Ar$. С вероятностью около 0.89 нуклид калия может в результате β-распада превратиться в $^{40}Ca$. Радионуклид $^{232}Th$ при распаде образует ряд промежуточных радионуклидов, заканчивающийся стабильным свинцом-208. Радионуклид $^{238}U$ также дает ряд промежуточных нуклидов и заканчивается стабильным изотопом свинца-206. Данные о γ-радиоактивности земного гранита и базальта, а также лунной коры приведены в табл. 6 [14]. Как видно из таблицы данные для лунной коры и базальта довольно близки.

Таблица 6. Данные о γ-радиоактивности земных пород и лунной коры

| Радионуклид | Удельная массовая γ-активность, квант/(г·сек) | | |
|---|---|---|---|
| | Граниты | Базальты | Лунная кора |
| $^{40}K$ | 0,111 | 0.026 | 0.037 |
| $^{232}Th$ | 0.074 | 0.012 | 0.012 |
| $^{238}U$ | 0.043 | 0.006 | 0.006 |

## 5.3. Минеральный состав

Морские и материковые породы состоят в основном из трех минералов: плагиоклаза, пироксена и оливина [16]. Важными акцессорными минералами являются ильменит и шпинель. Все названные минералы имеют переменный химический состав, образуя минеральные группы. Более подробная информация приведена в табл.7 [15].

Представление о распределении плагиоклаза и клинопироксена – наиболее распространенных минералов лунной поверхности дают карты, показанные на рис. 10 и 11. Эти карты построены по данным спектрозональной съемки Луны, выполненной КА Клементина и результатам исследований корреляционных зависимостей между содержанием минералов и спектральных характеристик образцов лунного грунта [37].

Как видно высокое содержание клинопироксенов наблюдается в молодых морских кратерах, что естественно, поскольку в этих местах велико содержание кристаллической компоненты (из-за

молодости поверхности она не успела переработаться в агглютинаты). Аналогичный эффект наблюдается и для молодых материковых кратеров в отношении плагиоклаза.

Особенностью лунного реголита является отсутствие таких летучих компонент как $H_2O$, $CO_2$ и радикалы $OH^-$. В минералах лунной поверхности почти нет трехвалентного железа, а отношение $Ti^{3+}/Ti^{4+}$ очень низкое, ~ $10^{-5}$. Это указывает на то, что образование первичных магматических пород на Луне и их последующая ударно-взрывная переработка в реголит происходила в резко восстановительной обстановке при дефиците летучих компонент.

Таблица 7. Минеральный состав лунной поверхности

| Минеральные группы | Моря | Материки |
|---|---|---|
| Плагиоклазы:<br>от $NaAlSi_3O_8$<br>до $CaAl_2Si_2O_8$ | Битовнит-анортит<br>До 90% | Анортит<br>до 100% |
| Пироксены | Клинопироксены<br>$Ca(Mg,Fe)Si_2O_6$ | Ортопироксены<br>$(Mg,Fe)_2Si_2O_6$ |
| Оливины:<br>от $Mg_2SiO_4$ до $Fe_2SiO_4$ | Железистые | высокомагнезиальные |
| Ильмениты: | Нормальные<br>$FeTiO_3$ | пикроильмениты<br>$(Fe,Mg)TiO_3$ |
| Шпинели: | Ульвошпинель $Fe_2TiO_4$<br>Алюмохромиты $(Fe,Mg)(Al,Cr)_2O_4$ | хромит $FeCr_2O_4$<br>пикотит $(Mg,Fe)(Al,Cr)_2O_4$ |

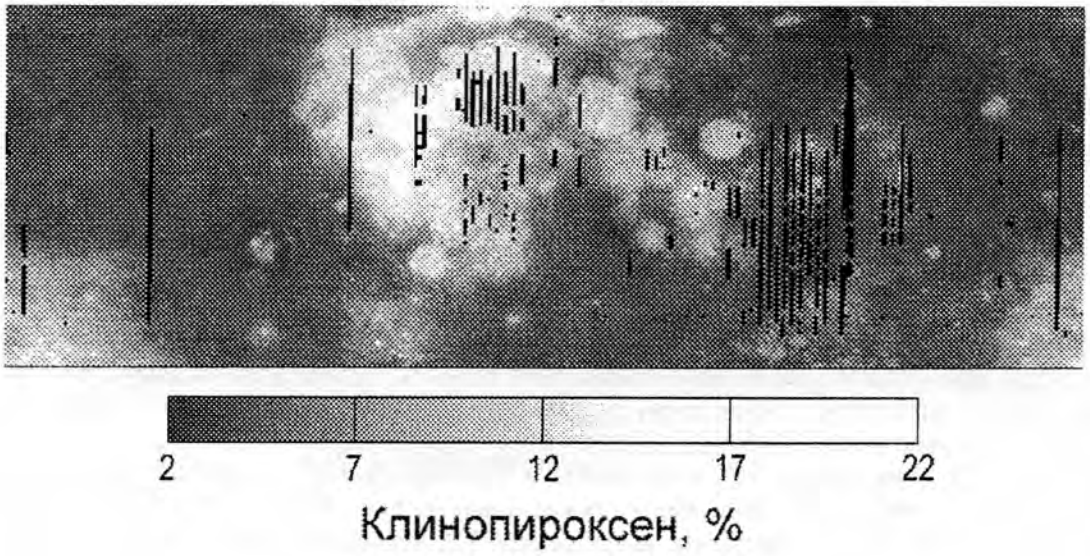


Рис. 10. Карта распределения клинопироксена, построенная по изображениям КА Клементина и данным спектрального и минералогического анализа образцов лунного грунта.

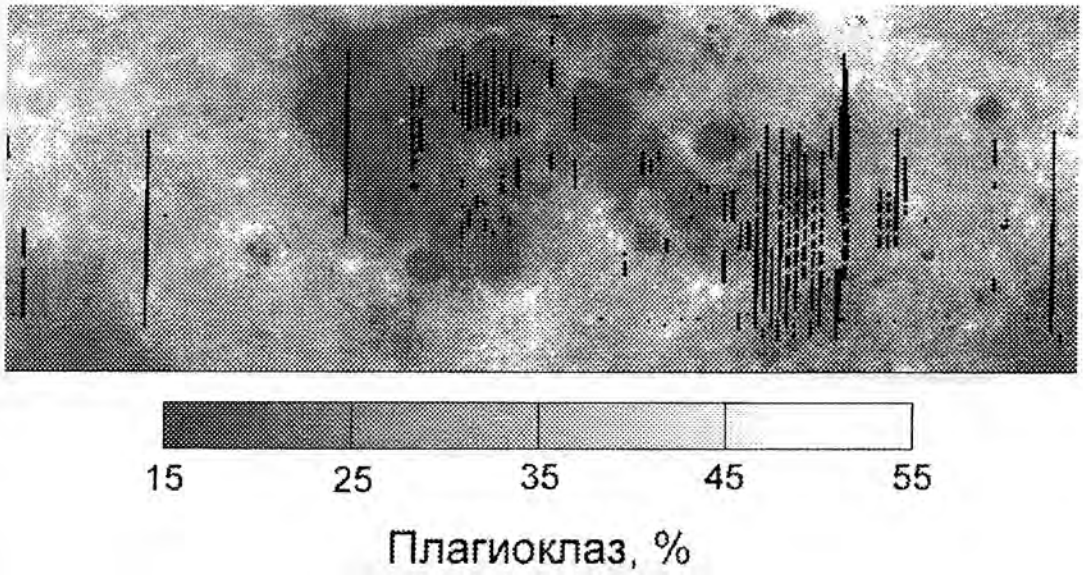


Рис. 11. Карта распределения плагиоклаза, построенная по изображениям КА Клементина и данным спектрального и минералогического анализа образцов лунного грунта.

## 6. ФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА

### 6.1. Размер и форма частиц

Реголит – это материал похожий на песок с примесью щебня и глыб. Средний размер частиц зрелого грунта составляет примерно 60 мкм, а незрелого около 120 мкм [27]. Характеристики мелкой (пылевой) фракции с размером частиц менее 10 мкм исследованы слабо. Имеются данные, которые говорят о том, что материковый грунт имеет повышенное содержание пыли (см. табл. 8) [19].

Таблица 8. Весовое содержание фракций с разным размером частиц для материкового (Аполлон-16) и морского (Луна-24) грунтов в %

| Образец | $d \leq 70$ мкм | $d \leq 10$ мкм | $d \leq 2$ мкм |
|---|---|---|---|
| Аполлон-16 (65501) | 59.5 | 30.7 | 3.8 |
| Луна-24 (24118, 24160, 24176, 24214) | 50 | 10 | 1-2 |

На рис.12 приведены микрофотографии реголитовых частиц, полученные на электронном микроскопе [39]. Справа показана большая агглютинатовая частица сложной формы. Слева дана микрофотография крупного масштаба, на которой видны округлые частицы, вероятно, прошедшие фазу частичного плавления.

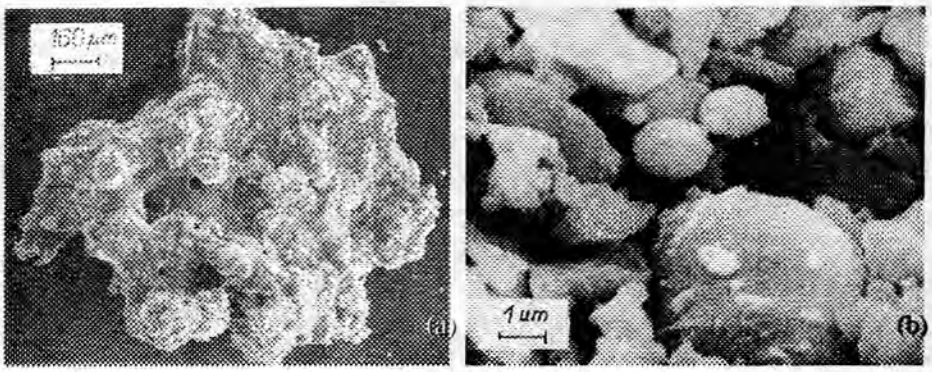


Рис.12. Микрофотографии частиц лунного грунта.

Морфология частиц реголита зависит от степени его зрелости. Частицы незрелого грунта имеют обломочную остроугольную форму; при этом эти частицы компактны и монолитны. Частицы зрелого грунта (агглютинаты) имеют сложную агрегатную структуру. Среди фрагментов, формирующих агрегаты, имеются зерна округлой формы (явно подвергавшиеся плавлению), но встречаются и обломки с острыми углами. Агглютинаты сравнительно легко разрушаются на отдельные зерна. В зрелом грунте присутствуют также сферические частицы. Крупнообломочный реголитовый материал (камни) также различаются по морфологии. В незрелом реголите (малый экспозиционный возраст поверхности) преобладают угловатые камни с четко выраженными гранями. В зрелом реголите камни имеют округлые формы.

### 6.2. Физико-механические свойства

Наиболее часто встречаемые в литературе значения величин объемного веса (плотности) образцов лунного реголита лежат в пределах 1.4 – 1.8 г/см$^3$. Эта характеристика слабо зависит от типа местности; по некоторым данным плотность материкового материала несколько ниже, чем морского. Она также немного ниже на валах кратеров, чем во внекратерном пространстве. Плотность материала реголитовых частиц (силикатов) равна примерно 3.2 г/см$^3$ [9]. Это означает, что пористость реголита составляет примерно 50%. Плотность реголита $\rho$ возрастает с увеличением глубины $z$ [см]: $\rho = \rho_o + k \ln(1+z)$, где $\rho_o = 1.27$ г/см$^3$ (плотность реголита на поверхности), а $k = 0.121$. Причем основные изменения происходят на глубинах первых десятков сантиметров [27].

Лунный грунт обладает очень высокой когезионной способностью. Грунт легко слипается, хорошо держит вертикальный откос (до нескольких сантиметров высотой) и имеет склонность образовывать комки. Величина когезии лунного грунта составляет примерно 0.5 кН/м$^2$, а угол внутреннего трения около 46°. Когезионная способность лунного грунта резко снижается в земной атмосфере и даже в атмосфере инертных газов.

Лунный грунт легко налипает на соприкасающиеся с ним предметы (адгезия). Это происходит независимо от материала предметов. Налипшая пыль мешала астронавтам экспедиций Аполлон, однако, было отмечено, что после герметизации кабины и создания в ней штатного давления 0.35 атм, спустя некоторое время пыль теряла свои адгезионные свойства. Высокая когезионная и адгезионная способность грунта связана с тем, что в вакууме под действием экзогенных факторов поверхность частиц сильно активируется [15].

### 6.3. Теплофизические свойства

Теплопроводность любого порошка, в частности, реголита, в большой степени зависит от его плотности, т.е. эффективности контактов частиц и зерен. Лунный грунт благодаря высокой рыхлости является очень хорошим теплоизолятором. Его коэффициент теплопроводности равен примерно $5 \cdot 10^{-6}$ кал/см.сек.град. Тепловой режим поверхностного слоя Луны характеризуется быстрым уменьшением амплитуды температурных колебаний с увеличением глубины. Если на самой поверхности колебания температур за лунные сутки достигает 280°, то на глубине 7 см, это уже около 30°, а на глубине 15 см – всего 3° [27].

Теплоемкость реголита определяется теплоемкостями входящих в него компонент. Поскольку практически все эти компоненты является силикатами, их теплоемкости близки друг к другу. В среднем величина теплоемкости составляет примерно 0.2 кал/г.град.

### 6.4. Магнитные свойства

Основным ферромагнитным материалом лунного грунта является металлическое железо, способное образовывать домены, а не магнетит, как у земных пород. Остаточная намагниченность определяется историей лунного грунта на данном участке поверхности. До сих пор не ясен механизм намагничивания лунных пород. Рассматривается возможность того, что в прошлом Луна имела собственное магнитное поле, которое намагнитило лунные породы. В настоящее время верхний предел дипольного момента составляет $4.4 \cdot 10^{18}$ Гс·см$^3$. Наиболее вероятным и естественным механизмом намагничивания представляется ударное намагничивание. При высокоэнергетических ударных событиях разных масштабов часть вещества ударника и поверхности превращается в облако неравновесной плазмы, которое, расширяясь, порождает токи, способные намагничивать породы участков вблизи точки удара. Множество перекрывающихся ударных событий образует хаотичных магнитный рельеф; варьируется и величина и направление магнитного поля. Величина остаточной намагниченности в среднем составляет несколько десятков гамм (1 гамм = $10^{-5}$ эрстед) [4]. Максимальные значения остаточной намагниченности (до 330 гамм) связаны с кратером Ван де Грааф. Одновременные измерения магнитного поля и плазмы обнаружили сжатие локальных полей в зависимости от давления солнечного ветра.

## 7. ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПОВЕРХНОСТИ

### 7.1. Альбедо и фазовая зависимость яркости

Отражательная способность (альбедо) лунной поверхности в видимой части спектра очень низкое. В фазе близкой к полнолунию оно составляет в среднем около 10%. Зависимость интегральной яркости Луны от фазового угла очень крутая. Так, от полнолуния к четверти эта яркость падет примерно на порядок. Более полное представление об интегральном фазовом ходе яркости Луны дает рис. 13 а [43].

Наклоны фазовой зависимости яркости лунной поверхности для разных участков поверхности несколько различны. Это дает возможность судить о вариациях степени шероховатости лунной поверхности. Вблизи полнолуния наблюдается наиболее сильная (нелинейная) зависимость яркости от фазового угла. Это проявление так называемого оппозиционного эффекта, который формируется затенениями в рыхлом поверхностном слое Луны, а также когерентным усилением обратного рассеяния, известным также как эффект слабой локализации фотонов.

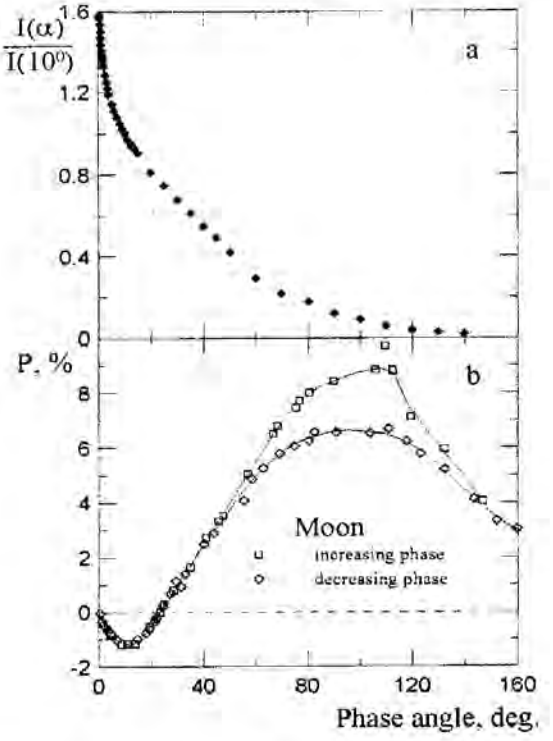


Рис. 13. Интегральные фазовые зависимости яркости и степени поляризации Луны.

### 7.2. Спектральная зависимость альбедо

Спектральные зависимости отражательной способности лунной поверхности формируются свойствами поглощения материалов, которые входят в состав поверхности. В первом приближении спектр отражения порошкообразных поверхностей, которые состоят из полупрозрачных частиц (как в случае лунного реголита), можно считать состоящим из внешней и внутренней составляющих. Внешний компонент связан в квази-Френелевским отражением границами частиц. Второй компонент, который обычно доминирует, представляет собой свет, прошедший сквозь зерна, и потому он несет информацию о поглощении света материалом поверхности.

На рис. 14 приведены усредненные данные спектрального хода альбедо в широком диапазоне длин волн, от вакуумного ультрафиолета до среднего инфракрасного диапазона. Зависимость построена по наблюдениям Луны и измерениям образцов лунного грунта. Поглощающая способность вещества частиц реголита обусловлена несколькими механизмами. В УФ диапазоне спектра имеется мощная полоса поглощения, связанная с электронными переходами типа кислород – металл, а также собственным поглощением силикатов. Слабые полосы поглощения в ИК диапазоне в области 1 и 2 мкм принадлежат ионам двухвалентного железа в минералах пироксенового ряда; это полосы кристаллического поля (полосы d-d типа) [20]. Альбедо Луны максимально в области 4 мкм. При дальнейшем росте длины волны альбедо резко снижается, что обусловлено включением колебательных механизмов поглощения.

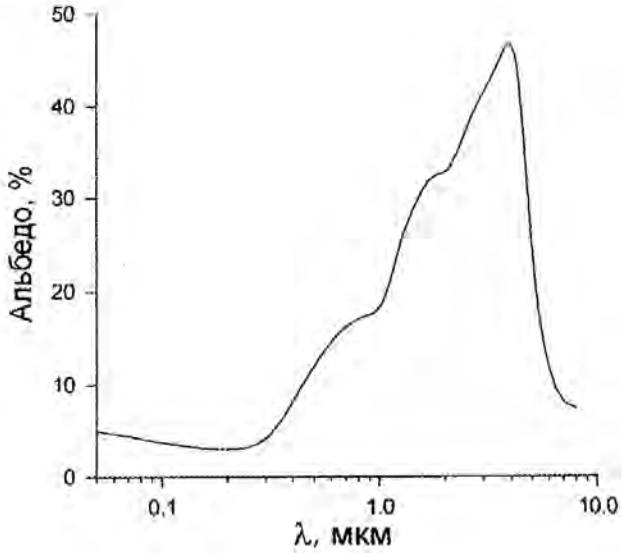


Рис. 14. Синтетический спектр отражения света лунной поверхностью.

На рис.15. показаны стандартизованные средние спектры отражения (нормальное альбедо) для лунных морей и материков. По форме спектры очень похожи друг на друга, хотя общий наклон спектра материков несколько ниже, чем у морей.

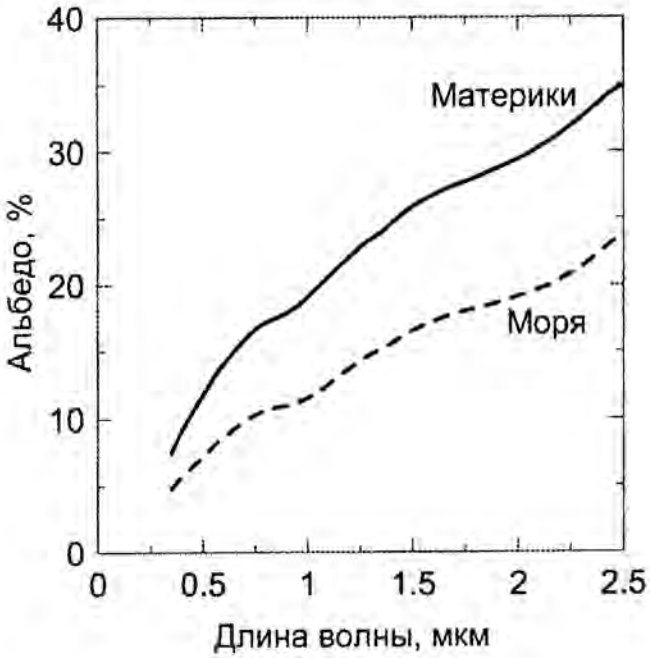


Рис. 15. Примеры спектров отражения для морского и материкового материалов в видимом и ближнем ИК диапазоне длин волн.

В табл. 9 дана информация о полосах поглощения света в видимом и близком ИК диапазонах спектра в лунном грунте.

Таблица 9. Полосы поглощения света в видимом и близком ИК диапазонах спектра

| λ, мкм | интенсивность | механизм | компонент грунта |
|---|---|---|---|
| 2.20 | слабая | $Fe^{+2}$, d-d переходы | пироксены |
| 1.25 | очень слабая | $Fe^{+2}$, d-d переходы | плагиоклазы |
| 1.00 | очень слабая | $Fe^{+2}$, d-d переходы | оливины |
| 0.95 | слабая | $Fe^{+2}$, d-d переходы | пироксены |
| 0.50 | очень слабая | $Ti^{+3}$, d-d переходы | пироксены, с примесью Ti |
| 0.40 | средняя | $Fe^{+2} - Ti^{+4}$ перенос заряда | стекла, содержащие $FeO + TiO_2$ |
| 0.34 | средняя | $Fe^{+2} - Ti^{+4}$ перенос заряда | стекла, содержащие $FeO + TiO_2$ |
| 0.26 | сильная | $Fe^{+2} - O^{-2}$ перенос заряда | силикаты, содержащие FeO |
| 0.26 | сильная | $Ti^{+4} - O^{-2}$ перенос заряда | силикаты, содержащие $TiO_2$ |
| ≤0.25 | очень сильная | собственное электронное поглощение силикатов | силикаты |

### 7.3. Поляризационные характеристики рассеянного излучения

Солнечный световой поток является неполяризованным по уровню чувствительности $10^{-5}$. Этот поток, рассеиваясь поверхностью, поляризуется линейно. Слабая круговая поляризация была найдена только вблизи полярных областей; она составляет $10^{-3}$ %. Плоскость линейной поляризации практически всегда лежит в плоскости рассеяния (плоскость, в которой лежит падающий и рассеянный лучи), поэтому для описания поляризации используется величина $P = (I_1 - I_2)/(I_1 + I_2)$, степень поляризации, где $I_1$ – составляющая светового потока пропущенная через поляроид с осью перпендикулярной плоскости рассеяния, а $I_2$ – составляющая параллельная этой плоскости. Величина линейной поляризации зависит от фазового угла сложным образом (см. рис. 13 в): при малых углах наблюдается отрицательная ветвь поляризации, а при больших – положительная [24]. Глубина отрицательной ветви составляет примерно 1 %. Она варьируется по лунной поверхности примерно от 0.5 % (молодые материковые кратеры) до 1.5 % (переходная зона между морем и материком). Фазовая зависимость степени поляризации изменяет знак при фазовом угле (угол инверсии) 23°. Этот угол варьируется по лунной поверхности в небольших пределах (примерно от 20° до 24°).

Величина максимума положительной ветви поляризации в видимой части спектра в среднем составляет примерно 7 % (см. рис. 13 в). Величина $P_{max}$ сильно зависит от альбедо поверхности: чем выше альбедо, тем меньше поляризация (эффект Умова). По лунной поверхности $P_{max}$ варьируется в пределах 3 – 20 % [40]. Величина $P_{max}$ зависит от длины световой волны. В УФ части спектра, где альбедо лунной поверхности очень низкое – около 3 %, степень поляризации при больших углах фазы может достигать 50 – 60 %. Эта оценка – результат экстраполяции, поскольку поляриметрия Луны в УФ диапазоне с борта космического аппарата никогда не проводилась.

### 7.4. Особенности излучения миллиметрового диапазона

Рассеивающие свойства лунной поверхности в миллиметровом диапазоне, как и в других участках спектра, определяются структурными и химико-минералогическими характеристиками реголита. Типичные значения действительной и мнимой частей коэффициента преломления лунного

грунта в миллиметровом диапазоне примерно такие же, как и в оптическом. Это означает, что глубина проникновения радиоволн в лунную поверхность составит примерно 10 длин волн, т.е. несколько сантиметров.

Рельеф и внутренняя структура лунной поверхности в мм-см масштабе весьма сложны и мало исследованы. Этот масштаб является переходным между случаем, когда поверхность описывается непрерывной однозначной функцией, и случаем, когда поверхность является дискретной (порошкообразной) средой со средним размером частиц около 100 мкм. Миллиметровый масштаб является определяющим для формирования теневой составляющей фотометрической функции лунной поверхности. Применительно к волнам миллиметровой длины, реголитовую среду можно рассматривать как квазинепрерывную и описывать некоторыми эффективными значениями диэлектрических постоянных. Многократное рассеяние в такой среде (оно в значительной степени влияет на величину отражаемого сигнала) развивается благодаря наличию объемных и поверхностных флуктуаций плотности среды, масштаб которых равен или превосходит длину зондирующей волны. Объемные флуктуации могут создаваться, прежде всего, мелкими камнями, которые захоронены в реголите. Количество таких камней должно тесно коррелировать с экспозиционным возрастом данного участка поверхности, а также с наличием в окрестности этого участка свежих ударных кратеров. Случайные поверхностные флуктуации (рельеф) возникают в ходе геологической истории поверхности, в основном за счет процесса рельефообразования, который сопутствует ударным событиям различных масштабов. Поверхностные флуктуации могут быть связаны с полями мелких камней или представлять собой крупномасштабные неровности границы порошкообразной реголитовой среды. Теория рассеяния электромагнитных волн в описанных средах сложна, однако многие вопросы здесь удается исследовать на простых моделях, что делает задачу перспективной с точки зрения оценки параметров поверхности по радарным измерениям.

Диэлектрические характеристики лунного грунта в миллиметровом диапазоне спектра формируются в основном двумя физическими механизмами поляризации диэлектриков. Первый из них относится к категории релаксационных, а второй – упругих взаимодействий [2].

Со стороны коротких волн (в среднем и дальнем ИК диапазоне спектра) расположены мощные ионные колебательные полосы поглощения. Их длинноволновые крылья могут простираться вплоть до миллиметрового диапазона. Интенсивность колебательных полос и их ширина зависит от параметров кристаллической решетки минералов, входящих в состав реголита, сохранности этой решетки и ее состава. В частности, ионы железа, (образующие ионный остов или входящие в виде примесей), обладая сравнительно большим атомным весом, должны заметно смещать полосы в сторону больших длин волн. Появление аморфных фаз (будь то вулканическое стекло, или диаплектовые фазы, или стекла, образованные в процессе ударного плавления) также будет способствовать расширению ионных полос поглощения.

Со стороны длинных волн в миллиметровом участке спектра в формирование диэлектрических постоянных включается релаксационный (прыжковый) механизм. Прыжковая поляризация диэлектрика обусловлена переходами зарядов между точками кристаллической решетки, которые являются положениями равновесия зарядов (ловушки заряда). Ими могут быть, например, вакансии или другие структурные дефекты кристаллической решетки, а также внутренние границы различных минеральных фаз. Для эффективного проявления прыжкового механизма необходимо наличие слабосвязанных зарядов, таких, чтобы характерная высота потенциального барьера, разделяющего ловушки превосходила бы kT (k – постоянная Больцмана, T – температура) не более, чем на порядок. В отсутствии внешнего поля тепловое движение приводит к хаотическому распределению зарядов между ловушками; электрическое поле, изменяя высоту потенциальных барьеров, приводит к преимущественному направлению тепловых скачков. Таким образом, вклад релаксационного механизма должен заметно зависеть от температуры поверхности. Интенсивность прыжкового механизма определяется количеством зарядовых ловушек, т.е. дефектностью кристаллической

структуры материала. В случае лунного грунта степень дефектности коррелирует со степенью зрелости. Кроме того, интенсивность механизма должна существенно зависеть от концентрации свободных зарядов. В свою очередь эта концентрация есть функция минерального состава, например, содержания ильменита, $FeTiO_3$, который является полупроводниковым материалом, существенно влияющим на альбедо лунного грунта в видимом диапазоне спектра. Количество свободных электронов в ильмените существенно выше, чем в других минералах, таких как пироксен, оливин и особенно плагиоклаз. Поэтому поглощение миллиметровых волн должно определяться содержанием ильменита и, следовательно, тесно коррелировать с концентрацией в реголите таких оптических хромофоров как железо и титан.

На основе проведенного анализа можно сделать прогноз того, как будет выглядеть изображения Луны в миллиметровом диапазоне. На радарных изображениях миллиметрового диапазона потемнение к краю будет заметно меньше, чем для изображений, полученных в длинноволновом участке спектра. Это связано с тем, что индикатриса обратного рассеяния коротких радиоволн должна быть близка к изотропной из-за высокой степени шероховатости лунной поверхности в миллиметровых масштабах. Изображение может оказаться в первом приближении похожим на то, что мы видим в оптическом диапазоне в полнолуние. Скорее всего, будут хорошо заметны различия морских и материковых участков. Моря, вероятно, окажутся темнее, чем материки из-за более высокого содержания в морском грунте железа и титана. Это предсказывают и ионный и релаксационный механизмы поглощения. Возможно, хорошо выделятся зоны выбросов молодых кратеров, которые содержат материал низкой зрелости, представленный большим количеством мм-см фрагментов пород и брекчий.

## 8. ЭФФЕКТЫ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ С ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДОЙ

### 8.1. Атмосфера Луны

Луна не имеет атмосферы, в том понимании, в каком говорят об этом применительно к Земле. Однако, пространство вокруг Луны не пусто. В окрестности Луны имеется плазма и пыль; они взаимодействуют с лунной поверхностью в присутствии полей. В табл. 10 приведены данные о составе газов лунной атмосферы; эти данные были получены орбитальными аппаратами на разных высотах от поверхности в разное время лунных суток [27].

Таблица 10. Состав газов лунной атмосферы

| | Содержание (mol/cm$^3$) | Содержание (mol/cm$^3$) | Высоты | Высоты |
|---|---|---|---|---|
| | Дневное время | Ночное время | Дневное время | Ночное время |
| $^{20}Ne$ | $\sim 4\cdot 10^3$ to $10^4$ | $10^5$ | 100 км | 25 км |
| He | $\sim 8\cdot 10^2$-$4.7\cdot 10^3$ | $4 - 7\cdot 10^4$ | 511 км | 128 км |
| $H_2$ | $\sim 2.5 - 9.9\cdot 10^3$ | $10^4 - 1..5\cdot 10^5$ | 1022 км | 256 км |
| $^{40}Ar$ | $\sim 2\cdot 10^3$ | $<10^2$ | 55 км | |
| $CH_4$ | $\sim 1.2\cdot 10^3$ | | | |
| $CO_2$ | $\sim 10^3$ | | | |
| $NH_3$ | $\sim 4\cdot 10^2$ | | | |
| $OH+H_2O$ | $\sim 0.5$ | | | |

## 8.2. Воздействие корпускулярного излучения на поверхность

Космогенные (внешние) факторы изменяют состав и структурные характеристики верхнего слоя лунного реголита. К факторам, влияющим на лунный грунт можно отнести солнечные и галактические космические лучи. Полный диапазон энергий космических лучей обычно разбивают на три области энергий: (1) высоких, $E \geq 100$ Мэв, (2) средних, $7 \leq E \leq 100$ Мэв и (3) низких, $E \leq 7$ Мэв. Ядерные реакции, приводящие к испусканию жестких фотонов, вызываются практически только заряженными частицами средних и высоких энергий, причем законы, описывающие процессы взаимодействия частиц с высокими и средними энергиями с веществом, существенно различаются. Потоки солнечных космических лучей существенно превышают потоки галактических (см. табл. 11), однако, по энергии в солнечном корпускулярном потоке очень мало частиц с энергией более нескольких сотен Мэв [14].

Таблица 11. Потоки солнечных и галактических космических лучей

| | Mev/нуклон | поток протонов, частиц/сек см$^2$ | Глубина проникновения (см) |
|---|---|---|---|
| солнечный ветер | $10^{-3}$ | $10^8$ | $10^{-6}$ (100 ангстрем) |
| солнечные вспышки | 1-100 | $10^2$ | $1 - 10^{-3}$ |
| галактические лучи | $10^2 - 10^4$ | 1 | $1 - 10^3$ |

Протоны низких энергий производят слабые структурные изменения в самых верхних зонах частиц лунного грунта. Накапливаясь в этих зонах в виде водорода, они создают огромный восстановительный потенциал лунного грунта; это приводит, например, к тому, что мельчайшие зерна восстановленного железа, содержащиеся в лунном грунте, не окисляются в течение многих лет, находясь в условиях земной атмосферы. До недавнего времени считалось, что водород (протоны) солнечного ветра могут быть ответственны за образование нанодисперсных форм восстановленных металлов в частицах лунного грунта. Однако, тщательный поиск молекул воды и соединений OH, которые должны сопутствовать такому образованию, не дали положительных результатов. Поэтому основным механизмом, образования мелкодисперсных фаз железа и других металлов считается субсолидусное восстановление и испарительно-конденсационный механизм.

При взаимодействии протонов средних энергий, большая часть которых является протонами солнечных вспышек, с атомными ядрами вещества мишени может происходить много различных процессов, среди которых, в частности, неупругое рассеяние и радиационный захват. Первое происходит, когда энергия налетающего протона больше энергии нижнего уровня ядра-мишени. В этом случае, возбуждаемое ядро распадается с образованием $\gamma$-кванта. Одновременно возможен захват протона ядром, что также сопровождается излучением $\gamma$-кванта. Если энергия протона значительно превышает энергию связи нуклонов в ядре, то возможны ядерные реакции с образованием $\alpha$-частиц. Спектр $\gamma$-квантов, испускаемых в таких реакциях при взаимодействии протонов с веществом типа лунного очень богат различными линиями. Диапазон такого характеристического спектра ограничен сверху примерно 9 Мэв [38].

Помимо солнечного ветра, поверхность Луны свободна к воздействию галактических космических лучей. Как и в случае солнечного ветра галактические космические лучи состоят в основном из протонов и $\alpha$-частиц. Спектр энергий галактических лучей лежит в диапазоне от 0.1 до $10^{10}$ Гэв. При энергиях выше нескольких Гэв плотность потока галактических лучей постоянна; при

более низких энергиях на их спектр существенно влияет магнитное поле Солнца. Это явление известно, как Форбуш-эффект. Солнечная модуляция приводит к уменьшению потока примерно в 2-3 раза в период высокой солнечной активности по сравнению с потоком в годы спокойного Солнца. Энергетический спектр галактических космических лучей описывается следующей формулой [14]: $f_c(E)_{E>E_0} = \frac{a}{(Mc^2 + E_0)^b}$, где $f_c$ - интегральная плотность потока с энергией более $E_0$ [част./(см$^2$ сек)]; $E$ – кинетическая энергия частицы [Гэв/нуклон]; $Mc^2$ – энергия покоя частиц [Гэв]; $a$ и $b$ – константы разные для разных частиц. Значения этих констант приведены в табл. 12.

Таблица 12. Состав и параметры энергетического спектра галактических космических лучей

| Вид частиц | Плотность потока* | $a$ | $b$ |
|---|---|---|---|
| Протоны | 3.6 | 4.000 | 1.5 |
| α-частицы | 0.4 | 0.350 | 1.5 |
| Электроны и фотоны (E>4 Гэв) | 0.04 | - | - |
| Средние ядра (C, N, O,) | 0.03 | 0.025 | 1.5 |
| Тяжелые ядра (10<Z<30) | 0.006 | 0.030 | 1.5 |
| Очень тяжелые ядра (Z>31) | 0.0005 | - | - |
| Легкие ядра (Li, Be, B) | $8\cdot10^{-8}$ | 0.012 | 1.5 |

* Плотность потока дана для минимума солнечной активности [част./см$^2$ сек].

При взаимодействии протонов высоких энергий с лунной поверхностью можно выделить три типа процессов ядерного взаимодействия: расщепление, деление и фрагментация. Для описания реакции расщепления используется каскадно-испарительная модель, которая рассматривает две фазы – возбуждение ядра (внутриядерный каскад, который длится $10^{-22}$ – $10^{-23}$ сек, сопровождается выбиванием быстрых нуклонов) и его охлаждение (испускание нуклонов, α-частиц и легких ядер с энергиями порядка 1 Мэв за $10^{-13}$ – $10^{-18}$ сек). Процесс деления ядер также вписывается в каскадно-испарительную модель. Понятие фрагментация включает в себя процессы, приводящие к образованию легких ядер. Реакции фрагментации ядер наименее изучены, но именно они оказываются наиболее важными в случае вещества Луны. Они, как и другие реакции, ведут к изменению первичного состава лунного вещества; в облучаемом слое образуются космогенные радионуклиды. Большинство этих радионуклидов являются γ-излучателями. Для некоторых из них в табл. 13 приведены данные для их периодов полураспада.

Таблица 13. Некоторые долгоживущие космогенные радионуклиды (периоды полураспада даны в годах)

| Нуклид | $^{3}H$ | $^{14}C$ | $^{22}Na$ | $^{26}Al$ | $^{32}Si$ | $^{39}Ar$ | $^{44}Ti$ | $^{53}Mn$ | $^{55}Fe$ | $^{59}Ni$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Период полураспада | 12.3 | 5.8 | 2.6 | $7.4\cdot10^{6}$ | 700 | 270 | 48 | $2\cdot10^{6}$ | 2.6 | $10^{5}$ |

Плотность потока γ-квантов, возникающих при распаде космогенных нуклидов составляет примерно 0.08 и 0.04 квант/(см$^2$ сек), что соответствует минимуму и максимуму солнечной активности. Этот поток сравнительно мал. В табл. 14 дано сравнение вкладов потоков γ-излучения лунной поверхности для разных процессов образования этого излучения.

Таблица 14. Вклад различных процессов в γ-излучение лунной поверхности

| Процесс | Число γ-квант.* | Доля излучения, % |
|---|---|---|
| Возбуждение ядер в реакциях с галактическими космическими лучами | 1.15 | 35 |
| Распад $\pi^0$ мезонов | 0.91 | 28 |
| Распад космогенных нуклидов в реакциях с галактическими космическими лучами | 0.06 | 2 |
| Распад космогенных нуклидов в реакциях с солнечными космическими лучами | 0.04 | 1 |
| Распад естественных нуклидов | 1.13 | 34 |

* Число γ-квантов на см$^2$ за сек дано при $E \leq 3$ Мэв.

Просуммировав данные во второй колонке таблицы, нетрудно получить, что полный поток γ-квантов на см$^2$ лунной поверхности за секунду равен 3.29 кванта для энергий $E \leq 3$ Мэв.

Радионуклиды со временем накапливаются в веществе мишени, достигая равновесного содержания, зависящем от интенсивности облучения. От периода полураспада зависит то, насколько быстро наступит равновесность – когда количество образующихся ядер равно количеству распадающихся. Для космогенных радионуклидов, содержащихся в веществе лунной поверхности, типичными являются скорости распада 1 – 100 расп./мин. на 1 кг вещества.

Скорость образования космогенных радионуклидов зависит от глубины залегания исследуемого объема немонотонно. Из расчетов следует, что максимальная скорость образования нуклидов $^{37}$Ar и $^{55}$Fe отвечает глубине около 60 г/см$^2$ (около 30 см), а отношение этой скорости к той, что на поверхности составляет 2.2 раза. В тоже время, нуклид $^3$H имеет максимальную скорость образования почти у самой поверхности. Для глубин более 100 г/см$^2$ скорость образования радионуклидов экспоненциально уменьшается с возрастанием глубины.

Исследование космогенных нуклидов в колонках лунного грунта позволяет определять длительность нахождения лунных пород на поверхности. В частности, для разных мест на лунной поверхности получены значения от 1 до 10 млн. лет. По глубинному распределению некоторых космогенных нуклидов получены данные о перемешивании лунного реголита и скорости эрозии лунной поверхности. В частности, полученная скорость эрозии составляет от 0.05 до 0.2 см за миллион лет.

Интересны ядерные процессы, связанные с образованием вторичных нуклонов в толще лунной поверхности. При неупругом взаимодействии первичного протона происходит образование вторичных нуклонов, заряженных и нейтральных пионов, которые имеют сравнительно низкие энергии. Вторичные частицы продолжают участвовать в каскаде, пока не покинут мишень, либо пока не израсходуют энергию на ионизацию атомов.

Вторичные частицы подразделяются на две энергетические группы. Для частиц с энергиями более 100 Мэв при ядерных взаимодействиях не важен тип этих частиц. При $E < 100$ Мэв природа частиц становится существенным фактором; наиболее сильно взаимодействуют с веществом мишени

нейтроны. Большая часть вторичных нейтронов, с энергиями порядка 1 Мэв, образуется в процессах испарения из возбужденных ядер. Остальные возникают в процессах выбивания и имеют более высокие энергии. Уместно отметить, что многие ядерные реакции неупругого рассеяния, дающие γ-кванты, имеют максимальное сечение как раз при энергиях нейтронов порядка 1 Мэв. Общее количество вторичных нейтронов в поверхностном слое Луны составляет примерно 17.5 нейтр./(см$^2$ сек), что в пересчете равно примерно 7 нейтронов на каждый первичный нуклон.

Если принять плотность потока первичных протонов с энергией больше 1 Гэв/нуклон равной 1.7 прот./ (см$^2$ сек), что является средним значением за солнечный цикл, то рассчитанные спектры плотности нейтронов в зависимости от глубины даст максимум примерно на глубине 100 г/см$^2$ , что при плотности реголита 2 г/см$^3$ примерно отвечает 50 см [14].

### 8.3. Лунная поверхность как источник корпускул

Поверхность Луны является источником не только электромагнитного излучения, но и корпускулярного. Измерения потоков корпускул различной природы и энергий дает важную информацию о составе и состоянии поверхностного слоя Луны и даже ее более глубоких слоев. К сожалению, в исследованиях корпускулярного излучения Луны получены пока только первые результаты. Одна из проблем состоит в том, что для проведения такого рода исследований необходимы космические аппараты, находящиеся достаточно близко к Луне. В настоящее время имеются только данные, полученные в ходе миссий Аполлон и данные КА Лунар Проспектор.

Корпускулярные потоки, идущие от Луны, представляют собой смесь частиц двух видов. Первый вид, это в основном частицы солнечного ветра, упруго рассеянные поверхностью. Второй – частицы рожденные в самой лунной поверхности в результате различных ядерных реакций. С точки зрения диагностики элементарного состава поверхности, изучение второго типа частиц представляет наибольший интерес. Для понимания некоторых физических свойств лунной поверхности полезными оказываются измерения потоков рассеянных корпускул. Рассмотрим пример исследований излучения α-частиц, идущих от лунной поверхности [28].

Альфа-частицы представляют собой ионизированные атомы гелия. Они имеют положительный заряд 2 и атомный вес 4. В окололунном пространстве альфа частицы содержатся в большом количестве в спокойном солнечном ветре; они имеют энергии порядка 1 Кэв (α-частицы с энергиями порядка 1 Мэв могут наблюдаться в солнечном ветре во время солнечных вспышек). Поток α-частиц от лунной поверхности возникает благодаря реакциям распада урана и тория, содержащихся в лунном веществе. Альфа-частицы образуются в основном в двух промежуточных реакциях распада урана-239 до стабильного свинца. Первая из них связана с распадом одного из изотопов радона, $^{222}$Rn, а вторая - изотопа полония, $^{210}$Po.

В природе радон (элемент с номером 86) встречается только в газообразном виде. Будучи самым тяжелым газом, радон очень летуч. Это редкий газ – в земной атмосфере его менее $10^{-16}$ % по весу. Время полураспада изотопа радона-222 составляет 3.82 дня. Добавим, что радон чрезвычайно токсичен и дорог; в малых дозах он применяется в медицине. Измерения радоновых эманаций (истечений) давно используется в задачах земной геологии, в частности, для прогноза землетрясений.

Полоний – элемент с номером 84 – хорошо известен благодаря развитию ядерной энергетики. На основе полония-210 создавались, в частности, ядерные источники энергии на тяжелых искусственных спутниках Космос-84 и -90, а также на КА Луноход-2. Свойство $^{210}$Po как ядерного горючего основано именно на том, что он является мощным излучателем α-частиц. Длина свободного пробега α-частиц в веществе сравнительно мала. Они быстро тормозятся в объеме вещества, приводя тем самым к сильному его разогреву. Выделяющаяся при этом удельная мощность для образца полония составляет весьма высокую величину, 1200 вт/см$^3$. На Луне полоний-210 появляется в результате распада радона-222: вначале возникает $^{210}$Pb, затем он распадается до $^{210}$Po.

Радиоактивный распад Th также на некотором этапе дает источник α-частиц, изотоп $^{220}Rn$ (торон). Однако, время полураспада такого изотопа всего 54.5 сек, поэтому при эманации он попадает на поверхность Луны в существенно меньших количествах, чем $^{222}Rn$. Это связано с тем, что мощность источника радона определяется толщиной верхнего слоя лунной поверхности, из которого атомы радона способны диффундировать на поверхность до своего распада.

При распаде изотопа $^{222}Rn$ образуются α-частицы с энергиями 5.486 Мэв, а при распаде изотопа $^{210}Po$ – 5.305 Мэв. Таким образом, измеряя поток α-частиц с энергией 5.486 Мэв можно оценить сколько радона находится на лунной поверхности в настоящем. Такого же рода измерения с энергией 5.305 Мэв дадут информацию о том, сколько радона было на лунной поверхности в недавнем прошлом, несколько десятков лет назад. В самом деле, хотя период полураспада $^{210}Po$ составляет примерно 138 дней, однако, этот изотоп появляется через промежуточный распад изотопа свинца-210, а время полураспада последнего равно 21 году. Следовательно, отношение количеств α-частиц, указанных энергий, является мерой стабильности потока радона в данной точке лунной поверхности на протяжении времени порядка полураспада $^{210}Pb$.

### 8.4. Микрометеоритная бомбардировка

В зависимости от соотношения величин ударника и частиц мишени, микрометеоритные процессы на лунной поверхности можно разделить на три типа [10]. К первому типу относится случай, когда величина ударника заметно больше размера частиц поверхности мишени и эта поверхность может рассматриваться как сплошная среда. Этот случай наиболее изучен. Для второго типа микрометеоритных процессов характерным является примерное равенство размеров ударника и частиц мишени. Этот тип процессов почти не исследовался. К счастью вклад таких событий в формирование лунной поверхности не велик. Третий тип процессов – это образование микрократеров на поверхностях реголитовых частиц за счет взаимодействия ударника существенно меньшего по сравнению с размером частиц лунного грунта. Сопоставление плотности микрометеоритных кратеров с радиационным возрастом лунной породы показало, что микрократеры размером менее 0.5 образуются со скоростью 1-3 кратера/см$^2$ за миллион лет.

Распределение числа ударников, воздействующих на лунную поверхность в современную эпоху, по массам: $\log(N) = -10.6 - 0.6 \cdot \log(M)$ [см$^2$ сек] для $10^{-14} < M < 10^{-6}$ г.

## 9. ПЕРСПЕКТИВНЫЕ КОСМИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

### 9.1. Очерк космических исследований Луны автоматическими станциями

*КА серии Луна.* Эти аппараты разделяются на три поколения. Первое поколение этих станций (модель Е-3) создавалось для решения задачи достижения Луны. Среди успешных полетов этих станций отметим полеты КА Луна-2 (попадание в Луну) и КА Луна-3 (фотографирование обратной стороны). Начиная с КА Луна-4 и до КА Луна-14 для полетов, использовалась модель Е-6, в двух модификациях: аппарат мягкой посадки и лунный спутник. Из примерно 12 попыток мягкой посадки успешно завершились лишь две (КА Луна-9 и Луна-13). Полеты лунных спутников, например, КА Луна-10-12 и Луна-14 проходили более удачно. Исследования Луны с помощью КА серии Луна моделей Е-6 и Е-8 были вспомогательной частью программы пилотируемого полета к Луне. Аппараты модели Е-8 начинаются с КА Луна-15, хотя до этого было три неудачных запуска из этой серии. Было создано три модификации: (1) луноход, (2) аппарат с устройством взятия лунного грунта с его последующей доставкой на Землю и (3) лунный спутник. Несмотря на ряд неудач при запусках, аппараты этой модели были наиболее результативными в советской программе лунных

исследований. В частности, был доставлен грунт из трех мест лунной поверхности (КА Луна-16, 20 и 24), в том числе из материкового района Луны (КА Луна-20). На станциях Луна-16, 20 и 24 использовались грунтозаборные устройства вращательно-ударного типа, которые были способны бурить, не только реголитовую массу, но и камни. Использовался полый бур, который постепенно заполнялся грунтом во время бурения. После завершения операции заполненный бур погружался на возвращаемый аппарат, двигатели которого обеспечивали вертикальный взлет и разгон до скорости 2.7 км/с. Советские КА доставили всего около 320 г лунного грунта, однако и это количество было важно, т.к. грунт был привезен из мест, в которых КК Аполлон не летали. Часть этого грунта была использована для обмена на американские пробы грунта, что позволило советским ученым исследовать химические и физические характеристики лунного вещества почти на равных с американцами. В основном эти исследования велись в Институте геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского РАН, в котором лунное вещество сохраняется по сей день. Среди наиболее существенных научных результатов, полученных при изучении лунного грунта, является открытие в верхних зонах частиц реголита микровключений суперпарамагнитной фазы восстановленного железа.

Большой объем исследований был проведен с помощью КА Луноход 1 и 2, которые были доставлены КА Луна-17 и 21. Успешный запуск Луноходов имел большой резонанс в мире. Фактически это были передвижные научные лаборатории. По материалам работы Лунохода-1 издан атлас фотографий с подробными комментариями геологов, анализировавших их. Спутники модели Е-8, КА Луна 19 и Луна-22 отрабатывали маневры на лунной орбите и вели дистанционные исследования Луны, результаты которых были однако малопродуктивны. Отметим, съемку лунной поверхности, выполненную КА Луна-22 с помощью механического сканирующего устройства.

*КА серии Рейнджер.* Аппараты этой серии были предназначены для выполнения первых разведочных исследований лунной поверхности. Сначала их планировалось пять, но когда высадка человека на Луну стала в США национальной программой, число полетов было решено увеличить. Главным было получение снимков лунной поверхности с разным разрешением в процессе падения аппарата на лунную поверхность. КА Рейнджер 1 и 2 запускались на околоземную орбиту для проведения испытаний систем будущих полетов аппаратов этой серии к Луне. КА Рейнджер 3 – 5 несли на себе интересные научные приборы: камеры (видиконные системы) для съемки лунной поверхности в процессе падения, а также капсулы с сейсмометрами, которые должны были работать после прилунения. Полеты КА Рейнджер 3 – 5 оказались неудачными. Следующие аппараты этой серии, Рейнджер 6 – 9, были выполнены скромнее – они были оснащены только телевизионными камерами. Каждый аппарат нес 6 камер, разделенные на две полностью автономные группы. Такое дублирование повышало шансы удачной съемки. Однако полет Рейнджера 6 был, тем не менее, неудачен – камеры не включились. КА Рейнджер 7 – 9 полностью выполнили свою программу, передав на Землю изображения лунной поверхности высокого качества. Последние изображения имели разрешение несколько десятков сантиметров.

*КА серии Лунар Орбитер.* Аппараты этой серии предназначались для получения высококачественных изображений Луны с целью выбора мест посадки для аппаратов серии Сервейер и КК Аполлон. Изображения регистрировались на фотопленке, которая обрабатывалась на борту станции, и с помощью сканирующего фототелевизионного устройства передавались на Землю. Все аппараты этой серии, Лунар Орбитер 1 – 5, выполнили свои программы. Анализ параметров орбит аппаратов этой серии позволил открыть масконы. Это одно из наиболее важных открытий, сделанных автоматическими космическими аппаратами при исследовании Луны. Некоторые изображения были получены с очень высоким пространственным разрешением. Аппараты Лунар Орбитер 4 и 5 имели почти полярные орбиты. Отснято около 99% площади лунной поверхности.

*КА серии Сервейер.* Эти аппараты предназначались для выполнения разведочных исследований лунной поверхности с помощью приборов, непосредственно размещенных на этой поверхности.

Тормозные двигатели аппаратов этой серии обеспечивали гашение скорости практически до нуля на высоте около 4 м. Затем двигатели отключались и аппарат в свободном падении садился на поверхность, амортизируя удар опорами. Такая схема позволяла свести к минимуму возмущение лунной поверхности струями газов, истекающих из двигателей. Опоры этих станций были рассчитаны на большую нагрузку. Начиная с КА Сервейер-5, аппараты этой серии были оснащены альфа-анализаторами для определения элементного состава лунной поверхности в месте посадки. КА Сервейер-6, после исследования места посадки по полной программе, был поднят управляющими двигателями и смещен на 2.5 м в сторону и продолжил исследования. КА Сервейер-7 был направлен в точку близкую к кратеру Тихо. В этом уникальном месте также был измерен химический состав с помощью альфа-анализатора. КА Сервейер-7 были зарегистрированы перемещения облаков пыли, очень не плотных, но способных вероятно за длительное время обновлять поверхность в масштабах порядка микрона. Пылевые облака на Луне образуются за счет электростатического зависания частиц субмикронных размеров при взаимодействии лунного реголита с солнечным ветром.

*КА серии Зонд.* Эти аппараты являлись беспилотными версиями космического корабля Союз 7К-Л1. Этот корабль был создан для реализации советского проекта Л1 – пилотируемого облета вокруг Луны и возврата на Землю. Для посадки на Землю станций серии Зонд была выбрана схема с рикошетирующим входом. Посадочный аппарат должен был войти в атмосферу в довольно узком коридоре, шириной всего около 10 км, опуститься до 40 – 50 км, а затем, используя аэродинамическое качество (подъемную силу) выйти в верхние слои атмосферы, а затем повторно погрузиться в нее. Этот маневр очень эффективен для гашения высокой скорости аппарата. Только два аппарата этой серии, КА Зонд-6 и Зонд-7, смогли совершить такой маневр. Действительно успешный полет аппарата серии Зонд, когда было признано, что пилоты, если бы они были на корабле, вернулись бы живыми, состоялся лишь в августе 1969 г. (КА Зонд-7), на 8 месяцев позднее пилотируемого полета КК Аполлон-8. С помощью КА Зонд-6 и Зонд-8 были получены изображения Луны очень высокого качества, поскольку отснятая пленка обрабатывалась на Земле.

*КА Клементина* был первым американским аппаратом, запущенным специально для исследования Луны после экспедиций Аполлон. Этот аппарат создавался как высоко маневренный космический робот для изучения искусственных объектов в околоземном пространстве в рамках программы «звездных войн». Зонд Клементина [36] был выведен на полярную орбиту с периодом обращения вокруг Луны около 5 часов. Минимальное расстояние до поверхности составляло около 400 км, а максимальное - 2900 км. На этой орбите зонд находился до 3 мая того же года. За это время Клементина отсняла 38 миллионов квадратных километров площади лунной поверхности с высоким разрешением. Объем переданной информации – это более миллиона полноценных изображений - заметно превышает то, что было получено в ходе всех предшествующих космических полетов к Луне, включая экспедиции Аполлон. Зонд был оснащен четырьмя съемочными камерами. Камера UVVIS позволила провести съемку лунной поверхности в пяти сравнительно узких участках спектра: 0.42; 0.75; 0.90; 0.95; 1.00 мкм со средним разрешением на поверхности 200 метров на элемент ПЗС матрицы. Камера NIR работала в шести спектральных каналах: 1.10; 1.25; 1.50; 2.00; 2.60; 2.78 мкм почти с тем же пространственным разрешением, что и камера UVVIS. Этими камерами было получено около миллиона изображений четкостью примерно 300 x 300 элементов. Еще около 300000 изображений было получено камерой LWIR, которая работала в тепловом диапазоне, в полосе 8.0 – 9.5 мкм (четкость изображений примерно 100 x 100 элементов, среднее разрешение на поверхности около 100 м). На зонде имелась камера HIRES для изучения избранных участков лунной поверхности с высоким разрешением (около 20 м на поверхности). Этой камерой было получено около 600000 изображений в 4 участках спектра видимого диапазона. Эта же камера служила питающей оптикой для лазерного альтиметра (дальномера), который работал на длине волны 1.06 мкм, обеспечивая пространственное разрешение 20 м и точность измерения дальности 40 м при высоте полета аппарата 500 км над лунной поверхностью.

*КА Лунар Проспектор.* Проводил глобальную γ - съемку для определения химического состава пород. Кроме того, проводилась магнитометрическая съемка и съемка с помощью нейтронного спектрометра, который показал избыток водорода на полюсах Луны. 31 июля 1999 г. КА Лунар Проспектор был направлен в кратер вблизи южного полюса Луны, днище которого находится в области вечной тени. Предполагалось, что удар этого аппарата о поверхность освободит достаточное количество водяных паров, для того чтобы их можно было бы наблюдать. Ожидалось, что, по крайней мере, линии ультрафиолетовой эмиссии гидроксила ОН, который должен был бы образоваться при ударе аппарата о поверхность, удастся зарегистрировать спектрально. Это послужило бы дополнительным доказательством присутствия водяного льда на полюсах Луны. Наблюдения проводились во многих обсерваториях, а координировались обсерваторией Мак Доналд (Техасский университет, Остин). Однако никаких признаков падения аппарата зарегистрировано не было. Наблюдения проводились также на космическом телескопе Хаббла. Результат был так же отрицательным. Рассматривается несколько причин этого. Наиболее вероятными являются следующие.

1. Аппарат не попал в ожидаемую точку падения, т.е. то, что наблюдали с помощью телескопов оказалось вообще не местом падения аппарата.

2. Аппарат попал в район днища кратера, в котором нет льда, хотя он и находится в зоне вечной тени.

3. Вода сильно связана в гидратированных минералах, поэтому ее выход слишком мал, что бы быть зарегистрированным.

4. Водяного льда на полюсах Луны нет вообще, а то, что открыл Лунар Проспектор есть водород внедренный в материл лунной поверхности потоками солнечного ветра.

Последняя причина представляется сейчас наиболее вероятной.

*Миссия Смарт-1.* (Европейское агентство, SMART-1 Small Mission for Advanced Research in Technology). Старт состоялся в конце 2003 г. Масса 350 кг. Используются двигатели малой тяги (после достижения Луны в январе 2005 г. масса спутника – 305 кг). Хотя эта миссия предусматривает решение ряда научных задач, связанных с исследованиями Луны (рентгеновская и оптическая съемка Луны), основной ее целью является проверка новых технологических концепций для подготовки будущих космических полетов с применением плазменных двигателей малой тяги, использующих солнечную энергию для ионизации газа (ксенона), который применяется как рабочее вещество. Такие двигатели весьма экономичны.

КА Смарт-1 был запущен на геостационарную переходную орбиту. Для полета к Луне использовался плазменный двигатель малой тяги. Он позволил за 15 –18 месяцев увеличить размер орбиты настолько, чтобы перевести аппарат в область гравитационного захвата Луной. Для оптимизации процесса такого перевода использовались небесно механические резонансы, связанные с движением Луны. Сформирована околополярная эллиптическая орбита спутника Луны; ее плоскость постоянна в пространстве в течение всего времени штатной работы аппарата вблизи Луны. Номинальное время работы спутника в окрестности Луны около полугода. Затем планируется аппарат Смарт-1 направить к одному из приближающихся астероидов. Работа спутника на лунной орбите разбивается на два ориентационных режима: когда направление солнечных лучей либо примерно перпендикулярно, либо примерно параллельно плоскости орбиты (в секторах $\pm 45^0$). Спутник Смарт-1 обеспечен стабилизацией в пространстве по трем осям. Сам аппарат представляет собой примерно кубическую платформу со стороной около 1 м. Сторона платформы, противоположная той, на которой находится основной двигатель, в штатном режиме постоянно обращена в сторону лунной поверхности (ось +Z постоянно обращена в надир). Источником энергии служат солнечные батареи. Пропускная способность телеметрического канала равна 30 Кбод. Объем бортового запоминающего устройства будет около 1-2 Гбит. Масса полезной нагрузки (научная

аппаратура) составит около 15 кг. В состав научной аппаратуры входят, в частности, три прибора для исследования лунной поверхности.

1. Компактный рентгеновский спектрометр D-CIXS (Demonstration of a Compact Imaging X-ray Spectrometer), который позволяет определять элементный состав лунной поверхности (содержание Si, Mg, Fe, Na, O, C) с наилучшим пространственным разрешением около 30 км. Спектрометр работает в диапазоне энергий 0.5 – 10 Кэв, при этом обеспечиваться абсолютная калибровка прибора относительно солнечного рентгеновского потока. Особый интерес с точки зрения происхождения и эволюции Луны представляют измерения отношения Mg/(Mg+Fe).

2. Камера AMIE (Asteroid Moon micro-Imager Experiment), которая была отобрана ESA для использования в миссии Смарт-1. Поле зрения камеры составляет примерно 7°. Используется ПЗС матрица 1024 x 1024 элемента. На расстоянии 300 км от лунной поверхности камера захватывает полосу около 30 км, обеспечивая линейное разрешение 30 м на пиксель. Это разрешение выше, чем в случае съемки КА Клементина. Однако, вблизи экваториальной зоны пространственное разрешение изображений, полученных с помощью камеры AMIE, близко к тому, что дала камера UVVIS КА Клементина. Камера AMIE способна одновременно регистрировать изображения в четырех спектральных каналах: широком (белом) и трех узких, центрированных на 0.75, 0.91 и 0.96 мкм.

3. Инфракрасный дифракционный спектрометр SIR (Spectrometer for Infrared) позволяет снимать спектры отдельных участков лунной поверхности в диапазоне 0.9 – 2.4 мкм. Вес прибора всего около 1 кг. Спектрометр SIR позволяет получить детальную информацию о минералогическом составе лунной поверхности. В частности, он позволяет оценивать относительное содержание пироксенов, оливинов и плагиоклазов в лунном грунте.

*Селена.* (Япония). Старт этого аппарата намечен на 2007 г. Аппарат будет состоять из посадочного модуля и спутника, который будет помещен на полярную круговую орбиту с высотой около 100 км. Посадочный модуль позволит испытать систему мягкой посадки на лунную поверхность. Наиболее интересные научные результаты будут получены со спутника. Он будет оснащен приборами для детальной гравиметрии и исследования лунной прецессии. С помощью оптической съемки предполагается выполнить картографирование с высоким пространственным разрешением химического и минералогического состава лунной поверхности. Спутник будет оснащен также магнитометром (для определения остаточной намагниченности лунной поверхности), гамма и рентгеновским спектрометрами (для определения элементного состава лунной поверхности). Вероятно, наиболее интересным с точки зрения понимания эволюции лунной поверхности на ранних стадиях ее формирования будет эксперимент по низкочастотной радиолокации Луны. Низкочастотными радиоволнами лунная поверхность будет зондироваться на глубину несколько километров.

*Лунар-А.* (Япония). Старт планировался на 1999 г., однако был смещен на 2006 г., из-за того, что пенетраторы не прошли испытания. Масса аппарата 520 кг. Задачей миссии является сброс двух пенетраторов (по 13 кг каждый, с глубиной внедрения 1-3 м) в экваториальной области на видимой и обратной стороне Луны. Пенетраторы – снаряды длиной 90 см и диаметром 14 см, рассчитанные на перегрузки 10000 G, – оснащены сейсмометрами и измерителями теплового потока, идущего из недр Луны. Сейсмометры будут вести мониторинг сейсмической активности в течение года, что позволит исследовать внутренне строение Луны. Опрос приборов пенетраторов будет производиться орбитальным модулем, который также выполнит съемку отдельных районов лунной поверхности с разрешением 30 м при низком положении Солнца над горизонтом (в основном, для исследования структуры лавовых потоков в лунных морях).

### 9.2. Украинский лунный полярный спутник (КА Укрселена)

Собственный космический проект, целью которого является исследование Луны, мог бы продвинуть Украину в число тех немногих стран, которые занимаются освоением Солнечной системы [8]. Наиболее простым в реализации, доступным по средствам и эффективным по научным достижениям является проект полярного спутника Луны [17,41]. Один из вариантов такого проекта представлен ниже.

Важной современной тенденцией в планетных исследованиях является специализация космических миссий, отказ от «универсальных» и сложных проектов. Примером могут служить лунные полярные спутники Клементина и Лунар Проспектор, основными целями которых фактически были: (1) спектрозональная съемка и (2) гамма (нейтронная) спектрометрия поверхности Луны, соответственно. Концентрация на нескольких (3-4) оригинальных экспериментах, стремление к их простоте и кратковременность проведения экспериментов – это путь к существенному повышению надежности миссий.

Принимая во внимание современное состояние наших знаний о Луне, основной задачей Украинского лунного полярного спутника могло бы быть комплексное изучение лунной поверхности с помощью двух приборов: (1) радар бокового обзора (РИ НАНУ, ИРЭ НАНУ) и (2) панорамный фотополяриметр (ГАО НАНУ, НИИ Астрономии ХНУ). Отметим, что украинские научные учреждения имеют опыт создания таких приборов. Предлагаемая научная программа, ориентированная на глобальное картирование структурных характеристик лунной поверхности, рассчитана на короткий срок, 2-3 месяца.

*Цели космической миссии Укрселена:*

1. Получение радарных изображений (длина волны 3 мм) высокого пространственного разрешения (до 100 м) постоянно затененных участков в районах лунных полюсов.

2. Одновременная радарная и оптическая съемка высокого разрешения освещенных участков для исследования структурных характеристик поверхности и определения функции рельефа поверхности.

3. Картирование содержания $TiO_2$ в материале поверхности и картирование степени зрелости реголита по данным спектрозональной съемки на длинах волн 0.25 мкм, 0.42 мкм и 0.56 мкм.

### 9.3. Обоснование научных задач

Ось вращения Луны почти перпендикулярна солнечным лучам. Благодаря этому в кратерах полярных областей Луны имеются участки, которые никогда не освещаются Солнцем (см. рис. 16). Это означает, что получить изображения этих участков можно только радиолокационными методами. Расчеты показывают, что такие участки занимают площадь около 2% всей площади поверхности, что составляет примерно $10^6$ км$^2$ [11].

При пространственном разрешении на поверхности 100 м покрыть такую площадь можно примерно 100 высококачественными изображениями. Исследование районов постоянного затенения представляет собой задачу очень большой важности. Эти районы являются холодными ловушками. В них в течение сотен миллионов лет могли накапливаться летучие соединения, несущие важную информацию об истории Солнечной системы. Некоторые исследователи считают, что там мог накапливаться водяной лед. Следует также отметить, что в полярных областях Луны существуют так называемые участки двойного затенения – это участки, которые не освещаются не только прямыми солнечными лучами, но и лучами, рассеянными лунной поверхностью. Температура поверхности в этих участках составляет около 40°К. Оценки показывают, что их площадь может достигать 0.3% общей площади; это составляет примерно $10^5$ км$^2$. Обнаружение и исследование таких участков

радарными методами представляет огромный интерес для будущих научных экспериментов, связанных с доставкой лунного грунта на Землю, или его изучением *in situ*.

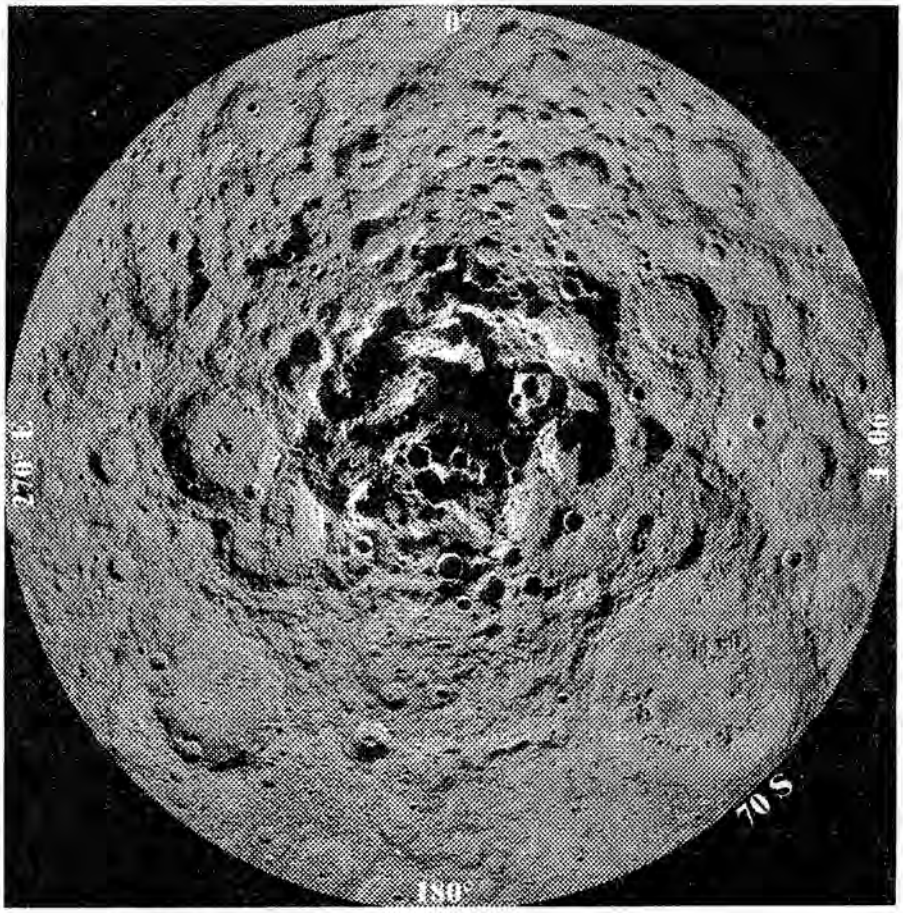


Рис. 16. Мозаика изображений района Южного полюса Луны, полученных КА Клементина.

Радарные измерения постоянно затененных участков лунной поверхности предполагается проводить локатором бокового обзора на длине волны 3 мм. Для получения изображений высокого разрешения будет использован метод синтезированной апертуры. Лунная поверхность в миллиметровом диапазоне длин волн практически не исследовалась; это одна из причин выбора указанной длины волны. Такой выбор позволит также существенно выиграть в весе аппаратуры. Кроме того, в РИ НАНУ предполагается провести радиолокационные измерения Луны на той же длине волны с помощью радиотелескопа РТ-22, расположенного в Крыму. Наземные измерения позволят отработать методику проведения и интерпретацию измерений на длине волны 3 мм. Кроме того, данные, полученные РТ-22, могут быть использованы для калибровки будущих космических изображений.

Радарные изображения постоянно затененных участков будут, несомненно, пользоваться огромным спросом у научной общественности и организаций, занимающихся планированием и осуществлением лунных космических проектов (НАСА, ЕКА, Космические агентства России, Японии, Китая и Индии).

Сравнение данных одновременной радарной и оптической съемки одних и тех же участков Луны позволит изучать структурные различия поверхностных слоев реголита, формирующих рассеяние в двух столь разных диапазонах длин волн. В случае оптических измерений этот слой составляет несколько сотен микрометров, тогда как слой, формирующий рассеяние радиоволн на 3 мм составляет несколько сантиметров. Предположительно вариации яркости на радарных изображениях дадут информацию о шероховатости лунной поверхности в мм-см масштабах. На изображениях будут видны крупные кратеры и их выбросы, выходы блоков коренных пород, скопления мелких кратеров и камней, размеры которых находятся под элементом разрешения изображений.

Оптическая съемка лунной поверхности с помощью спутников проводилась неоднократно, например, с помощью камеры UVVIS КА Клементина. Аналогичные исследования планируются провести с борта КА Смарт-1, который начал свою работу в окололунном пространстве. Во всех случаях проводилась или будет проводиться спектрозональная съемка, данные которой позволяют выполнить прогноз и картирование химических и минералогических характеристик лунной поверхности. Повторение Украиной таких измерений едва ли имеет смысл. Необходимы эксперименты, которые ранее не проводились и которые не планируются в ближайших космических миссиях. К таким экспериментам относится съемка участков лунной поверхности при больших фазовых углах с помощью панорамного фотополяриметра в трех спектральных диапазонах (0.56; 0.42; 0.25 мкм) с пространственным разрешением около 100 м.

Хотя поляриметрия Луны с борта КА не проводилась, однако, из опыта наземных поляриметрических исследований Луны, а также лабораторных измерений лунного грунта и его аналогов, известно, что данные о распределении второго параметра Стокса могут дать информацию о региональных вариациях среднего размера частиц. Такие оценки позволяют судить об относительном возрасте поверхности и эволюционных процессах на Луне.

При больших фазовых углах, около 90 – 110°, высоких значений степени поляризации (до 50%) следует ожидать в УФ диапазоне (0.25 мкм), где альбедо лунной поверхности минимально, около 3%. Столь низкая отражательная способность говорит о том, что многократное рассеяние между частицами поверхности развито слабо, поэтому возможна большая поляризация (эффект Умова). Участки поверхности, соответствующие отклонениям от эффекта Умова (поляриметрические аномалии) представляют для изучения наибольший интерес, поскольку они, вероятно, являются и структурными аномалиями.

Важными являются измерения положения плоскости поляризации. Вариации этого параметра определяются в первую очередь рельефом поверхности. Таким образом, полученные результаты в совокупности с данными радарной съемки могут быть использованы для создания (проверки) модели рельефа поверхности.

Исследования показателей цвета (отношения яркости в двух разных длинах волн) $C$(0.56/0.42 мкм) и $C$(0.56/0.25 мкм) обнаруживают тесную корреляцию с интенсивностью электронных переходов $O^{2-} \rightarrow Ti^{4+}$ и $O^{2-} \rightarrow Fe^{2+}$ в лунном грунте и его степенью зрелости. Если такую корреляцию использовать как калибровочную, то это позволит количественно оценить содержание $TiO_2$ в реголите лунной поверхности [22]. Из-за недостаточности спектральных каналов в коротковолновой части спектра надежное картирование содержания $TiO_2$ с помощью КА Клементина провести не удалось. Поэтому предлагается выполнить спектрозональную съемку в спектральных каналах 0.56; 0.42 и 0.25 мкм (в последнем канале проводится также поляриметрия). Данные съемки в спектральных каналах 0.56; 0.42; 0.25 мкм позволят не только уточнить распределение содержания

$TiO_2$, но также провести оценку степени зрелости лунного реголита, параметра, который тесно связан с относительным возрастом поверхности и ее микроструктурой.

### 9.4. Функционирование КА Укрселена, требования к параметрам его орбиты и основные технические характеристики

Для выполнения поставленных задач космический аппарат должен быть выведен на окололунную эллиптическую полярную орбиту (угол наклона не менее 88°) с периодом обращения около 6 часов. Большая ось эллипса орбиты должна лежать вблизи экватора Луны. Это позволит исследовать как южный, так и северный полюсы Луны с равным пространственным разрешением. Расстояние аппарата до лунной поверхности в перицентре должно составлять примерно 200 км. В апоцентре это расстояние составит около 4 тыс. км. Это устойчивая орбита, практически не требующая коррекции в течение всего времени работы спутника. При орбитальном движении ось –Z аппарата должна быть направлена в надир (постоянная планетоцентрическая ориентация), а ось X (она перпендикулярна плоскости солнечных батарей) – в сторону Солнца в пределах ±45°; это необходимо для обеспечения работы солнечных батарей (см. рис. 17). В таком режиме аппарат может работать около 2-3 месяцев, пока угол освещения солнечных батарей не слишком велик (см. рис. 17).

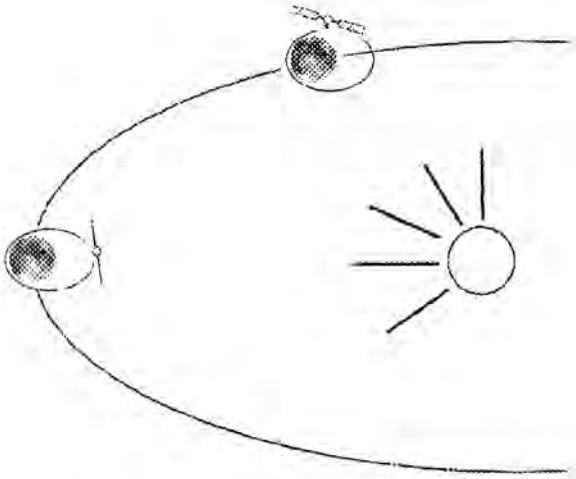

Рис. 17. Положение плоскости орбиты и плоскости солнечных батарей спутника в пространстве

По мере движения спутника по орбите, в то время, когда аппарат близок к Луне, радар и панорамный фотополяриметр будут проводить съемку поверхности в полосе шириной примерно 50 км и длиной, равной полуокружности Луны от одного полюса к другому. Оси визирования и радара и фотополяриметра должны быть отклонены на 20-30° от направления в надир в сторону Солнца. В случае радара это необходимо для выполнения апертурного синтеза, а в случае фотополяриметра – для достижения больших фазовых углов. В то время когда спутник будет далек от Луны (апоцентр), можно проводить телеметрические сеансы для передачи на Землю информации, накопленной за виток (или несколько витков). За месяц Луна совершит полный оборот относительно плоскости

орбиты спутника, ориентация которой в пространстве неизменна. За время одного витка смещение лунной поверхности под аппаратом составит примерно 90 км на экваторе. При ширине съемки поверхности 50 км в зоне экватора неизбежно будут зазоры шириной до 40 км. Они могут быть полностью покрыты съемкой в течение второго месяца работы спутника (аналогичная стратегия применялась в работе КА Клементина).

После выполнения основной программы спутник может быть переведен на низкую орбиту для более детальной съемки избранных участков лунной поверхности, например, областей свирлов, примером которых является образование Рейнер-гамма. Радарная и оптическая съемка с высоким разрешением позволит существенно продвинуться в понимании природы таких образований.

*Некоторые дополнительные предпроектные характеристики:*

Масса научной аппаратуры: 40 кг.
из них 25 кг – радиолокационная система, 15 кг – поляриметр.
Энергетика: 500 вт в среднем.
Количество информации за виток: ~ 100 Мбайт
Пропускная способность телеметрического канала: не хуже 500 Кбод.

Более детальную проработку проекта создания КА Укрселена и ее вывода на окололунную орбиту планируется осуществить на этапе подготовки технических предложений и эскизного проекта с участием ГКБ «Южное» и других организаций космической отрасли Украины. Предполагается также широкая международная кооперация.

## 10. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Можно предложить следующий перечень научных открытий, сделанных благодаря реализации лунных космических программ.

1. Луна необитаема: на ней нет живых организмов, нет следов прошлой жизни, не найдено даже следов органических соединений, образовавшихся *in situ*.

2. Луна – древнее тело, поверхность которого сохранила следы ранней истории Солнечной системы. В огромном диапазоне масштабов (от сотен километров до долей микрона) основным морфологическим элементом поверхности Луны являются кратеры. В подавляющем большинстве они ударного происхождения.

3. Луна сформировалась из вещества, принадлежащего, вероятно, тому же источнику, из которого сформировалась Земля. Луна прошла сложную эволюцию (химическую дифференциацию) за сравнительно короткое время и имеет внутреннее строение типичное для планеты земной группы.

4. Поверхностные лунные породы сформировались в высокотемпературных процессах в условиях отсутствия воды. В полярных районах Луны, находящихся в зоне вечной тени (днища кратеров), возможно присутствие льдов, или, по крайней мере, следов конденсатов летучих, привнесенных столкновениями с кометами.

5. Все лунные породы имеют земные аналоги. Они подразделяются на два основных типа: базальты (моря) и анортозиты (материки). Поверхность Луны покрыта слоем реголита – рыхлого материала (типа песка), состоящего из фрагментов пород, брекчий, стекла ударного и даже вулканического происхождения.

6. История Луны многоэтапна. В частности, был период, когда поверхность Луны была расплавлена полностью или почти полностью; существовал океан магмы глубиной многие десятки километров (современные материки сохраняют остатки материала этого океана). Первичная лунная поверхность, образованная застывшей магмой, была затем нарушена ударами крупных тел, которые породили бассейны, заполненные позднее потоками лавы (современные моря).

7. Луна немного асимметрична в объеме. Ее кора на обратном полушарии почти вдвое толще, чем на видимом полушарии. Луна неоднородна, по крайней мере, в приповерхностном объеме – обнаруживаются концентрации масс, обычно ассоциирующиеся с ударными бассейнами.

8. Некоторые лунные породы обладают остаточной намагниченностью, что говорит о существовании в прошлом планетарного магнитного поля, хотя сейчас такого поля у Луны нет.

9. Луна – не полностью мертвое тело. Зарегистрированы землетрясения, порожденные глубоко расположенными источниками (на глубинах порядка 1000 км). Найдены области повышенной эманации радона, что говорит о слабом потоке вулканических газов. Наблюдались перемещения пылевых облаков, образованных заряженными пылевыми частицами лунного грунта.

Новые космические полеты к Луне, включая проект Укрселена, позволят существенно расширить знания о нашем спутнике, углубляя понимание перечисленных выше открытий и приводя к новым научным достижениям.


1. Абалакин В.К. Основы эфемеридной астрономии. – М.: Наука. 1979. – 448 с.
2. Афсар М.Н., Баттон К.Дж. Измерения диэлектрических характеристик материалов в диапазоне миллиметровых волн // ТИИЭР. - 1985. – **73**, № 1. - С.143-167.
3. Бондаренко Н.В., Шкуратов Ю.Г. Карта толщины реголитового слоя видимого полушария Луны по радиолокационным и оптическим данным // Астрон. вестн. - 1998. – **32**, №4. С.301-309.
4. Долгинов Ш.Ш. Магнетизм планет // Итоги науки и техники. Сер. Исследование космического пространства. - М.: ВИНИТИ. - 1982. – т.18. - 132 с.
5. Жарков В.Н. Геофизические исследования планет и спутников. - М.: ОИФЗ РАН, 2003. - 102 с.
6. Кислюк В.С. Геометрические и динамические характеристики Луны. - Киев: Наук. думка, 1988.-184 с.
7. Кислюк В.С. Ориентация эллипсоида инерции Луны по данным измерений КА «Лунар Проспектор» // Кинематика и физика небес. тел. – 1999. – **15**, №3. – С.232-242.
8. Кислюк В.С., Шкуратов Ю.Г., Яцків Я.С. Космічні дослідження Місяця: задачі, можливості і перспективи української науки і техніки // Космічна наука і технологія. - 1996. – **2**, № 1-2. - С.3-16.
9. Крупенио Н.Н. Радиолокационные исследования Луны. - М.: Наука, 1971. - 172 с.
10. Мелош Г. Образование ударных кратеров. - М.: Мир, 1994. - 336 с.
11. Петров Д.В., Шкуратов Ю.Г., Станкевич Д.Г. и др. Площадь холодных ловушек на поверхности Луны // Астрон. вестн. – 2003. - **37**, 4. – р.285-291.
12. Петрова Н.К. Таблицы физической либрации Луны, основанные на теории движения Луны Шмидта (главная проблема) // Тр. Казан. Гор. Астрон. Обсерватории. – 1993. - № 53. – С.48-80.
13. Питьева Е.В. Современные численные теории движения Солнца, Луны и больших планет // Сообщ. ИПА РАН. – 2003. - № 156. – 34 с.
14. Сурков Ю.А. Гамма-спектрометрия в космических исследованиях. - М.: Атомиздат, 1977. - 239 с.
15. Флоренский К.П., Базилевский А.Т., Николаева О.В. Лунный грунт: свойства и аналоги. – М.: ГЕОХИ АН СССР, 1975.
16. Фрондел Дж. Минералогия Луны. - М.: Мир. 1978. - 334 с.
17. Шкуратов Ю.Г., Бондаренко Н.В., Качанов А.С. Задачи лунного полярного спутника после КА "Клементина" // Космічна наука і технологія. - 1998. – **4**, №1. - С. 46-53.
18. Шкуратов Ю.Г. Актуальные задачи наблюдения Луны наземными астрономическими средствами // Астрон. вестн. - 2000. – **34**, № 3. - С. 216-232.
19. Шкуратов Ю.Г., Омельченко В.В., Станкевич Д.Г., Кайдаш В.Г., Питерс К.М., Пине П.К. Прогноз состава лунной поверхности по данным КА Клементина и результатам лабораторных исследований лунного грунта // Космічна наука і технологія. – 2003. - **9**, №1. – С.54-70.
20. Burns R.G. Mineralogical Application of Crystal Field Theory. 1993. Cambridge University Press. Cambridge. Ma. 1993. - 551 p.
21. Cameron A.G.W., Ward W.R. The origin of the Moon // Lunar Science VII. LPI Houston. -1976. -P. 120-122.

22. Charette M., McCord T., Pieters C., Adams J. Application of remote spectral reflectance measurements to lunar geology classification and determination of titanium content of lunar soils // J. Geophys. Res. - 1974. – **79**. – P. 1605 – 1613.
23. Dickey J.O., Bender P.L., Faller J.E. et al. Lunar laser ranging: a contributing legacy of the Apollo program // Science. – 1994. – **265**, N 5171. – P.482-490.
24. Dollfus A., Bowell E. Polarimetric properties of the lunar surface and interpretation. I. Telescope observation //Astron. Astrophys. -1971. -**10**. -P. 29-53.
25. Eckhardt D.H. Theory of the libration of the Moon // Moon and Planets.-1981.-**25**, N 1.-P.3-49.
26. Feldman, W. C., Barraclough B. L., Fuller K. R. Et al. The Lunar Prospector gamma-ray and neutron spectrometers // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A. - 1999. – **422**. – P. 562.
27. Heiken G.H., Vaniman D.T., French B.M. (Eds.). Lunar Sourcebook, A User's Guide to the Moon. Cambridge Univ. Press, Cambridge, 1991. - 736 p.
28. Gorenstein P. Alpha-particle spectrometry of the Moon // In: Remote geochemical analysis: elemental and mineral composition (Eds. Pieters C. and Englert P.) Cambridge Univ. Press. Cambridge, 1993. - P.235-243.
29. Kaydash V., Shkuratov Yu., Stankevich D. Et al. Maps characterizing the lunar regolith maturity // 35th Lunar Planet. Sci. Conf. LPI Houston TX USA. - 2004. Abstract # 1508.
30. Konopliv A.S., Binder A.B., Hood L.L. et al. Improved gravity field of the Moon from Lunar Prospector //Science.-1998.-**281**, N 5382.-P.1476-1480.
31. Konopliv A.S., Asmar S.W., Carranza E. et al. Recent gravity models as a result of the Lunar Prospector mission // Icarus. – 2001. - **150**, N 1. – P.1-18.
32. Krasinsky G.A., Saramonova E.Y., Sveshnikov M.L., Sveshnikova E.S. Universal time, lunar tidal deceleration and relativistic effects from observations of transits, eclipses and occultations in the XVIII-XX centuries // Astron. And Astrophys. – 1985. – **145**, N1. – P.90-96.
33. Lemoine F.G.R., Smith D.E., Zuber M.T. A 70th degree lunar gravity model (GLGM-2) from Clementine and other tracking data // J. Geophys. Res.- 1997.-**102**, N E7.-P.16339-16359.
34. Migus A. Analytical lunar librational tables // Moon and Planets.-1980.-**23**. N 4.-P.391-427.
35. Moons M. Analytical theory of libration of the Moon // Moon and Planets.- 1982.- **27**. N 3.- P.257-284.
36. Nozette S., Rustan P., Pleasance L.P. et al. The Clementine mission to the Moon: Scientific Overview //Science.-1994.-**266**. N 5192.-P.1835-1839.
37. Omelchenko V.V. Shkuratov Yu. G., Kaydash V.G., Pieters C. Maps of lunar pyroxenes // Abstr. of pap. 38th Inter. microsymp. on planetology. 27-29 October. -2003. Moscow, # MS 070.
38. Reedy R.C., Arnold J.R., Trombka J.I. Expected gamma-ray emission spectra from the lunar surface as a function of chemical composition // J. Geophys. Res. - 1973. - **78**. - P.5847.
39. Rode O.D., Ivanov A.V., Nazarov M.A. et al. Atlas of photomicrophotographs of the surface structures of lunar regolith particles. - Praha: Academia. - 1979. - 274 p.
40. Shkuratov Yu.G. Opanasenko N.V. Polarimetric and photometric properties of the Moon: Telescope observation and laboratory simulation // Icarus. - 1992. - **99**. - P.468-484.
41. Shkuratov Yu. G., Lytvynenko L. M., Shulga V. M. et al. Objectives of a prospective Ukrainian orbiter mission to the moon // Adv. Space Res. – 2003. - **31**, No. 11. - P.2341-2345.
42. Shkuratov Yu., Pinet P., Omelchenko V. Et al. Derivation of elemental abundance maps at 15-km spatial resolution from the merging of Clementine optical and Lunar Prospector geochemical data // 35th Lunar Planet. Sci. Conf. LPI Houston TX USA. - 2004. Abstract # 1162.
43. Shkuratov Yu., Videen G., Kreslavsky M.A. et al. Scattering properties of planetary regoliths near opposition // Photopolarimetry in Remote Sensing / Eds. G. Videen, Ya. Yatskiv, and M. Mishchenko. -2004. NATO Science Series. Kluwer Academic Publishers, London. -P. 191-208.
44. Smith D.E., Zuber M.T., Neumann G.A., Lemoine F.G. Topography of the Moon from the Clementine lidar // J. Geophys. Res. – 1997. – **102**, N E1. – P.1591-1611.
45. Starukhina L. V. and Shkuratov Yu. G. Swirls on the Moon and Mercury: meteoroid swarm encounters as a formation mechanism // Icarus. -2004, -167, No. 1, 136-147.
46. Williams J.G., Newhall X.X., Dickey J.O. Lunar moments tides orientation and coordinate frames // Planet Space Sci.-1996.- **44**. N 10.- P.1077-1080.
47. Zuber M.T., Smith D.E., Lemoine F.G., Neumann G.A. The shape and internal structure of the Moon from the Clementine mission // Science.-1994.-**266**. N 5192.-P.1839-1843.

## MODEL OF THE MOON 2004 FOR THE PROJECT "UKRSELENE"

*Yu. G. Shkuratov, V. S. Kislyuk, L. M. Lytvynenko, and Ya. S. Yatskiv*

Brief review of present state of Moon's investigations is given according to the following fields: celestial mechanics (orbital motion, tidal deceleration, rotation, and free libtation of the Moon), dynamics and figure (gravity and orientation of ellipsoid of inertia), geology (vertical structure of crust), chemistry and mineralogy (including content of natural radio-active elements), physics of surface (size and shape of particles, physical and mechanical, heat and physical as well as magnetic properties), optics (albedo, phase and spectral dependencies, polarizable characteristics, properties of reflection in millimeter range), interaction with surroundings (Moon's atmosphere, corpuscular emission, micrometeorite bombardment). Short history and prospective space investigations in particular by means of ukrainian polar satellite of the Moon "Ukrselene" are considered as well. It is expected to make high-resolution imaging of permanently shadowed sites in the lunar polar regions with synthetic aperture imaging radar and polarimetric imaging of some regions with UV-spectropolarimeter.