

УДК 523.3

Прогноз содержания железа и титана в лунном реголите для сопоставления с данными КА «Лунар Проспектор»

Ю. Г. Шкуратов¹, В. Г. Кайдаш¹,
Н. В. Опанасенко¹, Д. Г. Станкевич¹, В. Г. Парусимов²

¹ Астрономічна обсерваторія Харківського університету

² Головна астрономічна обсерваторія НАН України, Київ

Надійшла до редакції 22.05.97

Для видимої півкулі Місяця побудовані карти вмісту заліза і титану в шарі поверхні товщиною біля 100 мкм. Метою створення карт є їх зіставлення з результатами геохімічної зйомки, яку планується провести за допомогою американського КА «Лунар Проспектор». Карти побудовані за оптичними вимірюваннями в чотирьох ділянках спектру: $\lambda\lambda$ 0.42; 0.65; 0.75; 0.95 мкм. Для калібровки шкали карт використані значення хімічного складу в місцях посадок КА «Аполлон», «Луна» та «Сервейор». Використовується модель розсіяння світла, що дозволяє від оптичних характеристик розсіюючого шару перейти до параметрів речовини. Карти представлені в прямій ортографічній проекції. Побудовані гістограми розподілу характеристик. Розподіл заліза — біомодальний з максимумами мод 6 і 17 %. Побудована кореляційна діаграма «залізо—титан»; її спільний аналіз з даними для місць посадок показав, що більшість місць посадок КА відносяться до нетипового поєднання вмісту заліза і титану. Побудована карта типовості поєднань вмісту FeO та TiO₂. Згідно з цією картою базальти Моря Спокою, які містять велику кількість титану при відносно низькій концентрації заліза, не є типовими для Місяця.

ВВЕДЕНИЕ

В последнее время наблюдается некоторое оживление в космических исследованиях Луны. Так, в 1992 г. была выполнена оптическая съемка части видимого и обратного полушарий Луны с помощью КА «Галилео» (Belton et al., 1992). Позднее, в 1994 г., была проведена глобальная спектрозональная съемка Луны с высоким пространственным разрешением с помощью КА «Клементина» (Nozette et al., 1994). В сентябре 1997 г. в США предполагается запустить на окололунную орбиту КА «Лунар Проспектор» для выполнения глобального геохимического исследования лунной поверхности. Возможна реализация и некоторых других космических проектов — их обзор дан в работе Кислюка и др. (1996).

© Ю. Г. ШКУРАТОВ, В. Г. КАЙДАШ, Н. В. ОПАНАСЕНКО,
Д. Г. СТАНКЕВИЧ, В. Г. ПАРУСИМОВ, 1997

КА «Лунар Проспектор» будет картографировать содержание некоторых химических элементов, в частности железа и титана, с помощью гамма-спектрометра. Этот прибор позволит проводить измерения с относительной точностью порядка 10 % с пространственным разрешением несколько десятков километров. Исследования в гамма-диапазоне дают информацию об элементном составе поверхностного слоя толщиной порядка 1 м.

Измерения гамма-спектров — не единственный метод дистанционной оценки состава лунной поверхности. Для этих же целей используются оптические данные. Оценки состава лунной поверхности по оптическим измерениям основаны на существовании корреляций между количеством основных хромофорных элементов, содержащихся в лунных породах, и такими характеристиками, как

альбедо и показатель цвета в видимом участке спектра (Шкуратов и др., 1996).

Хотя оптические методы дистанционной диагностики состава лунного грунта еще продолжают совершенствоваться (Шкуратов и др., 1996), однако уже сейчас эти методы во многих случаях не уступают по точности гамма- и рентгеновской съемке, позволяя, как правило, сильно выигрывать в пространственном разрешении. К этому следует добавить, что, в отличие от гамма-спектроскопии, оптические методы дают информацию о поверхности в сравнительно тонком слое — порядка 100 мкм. Необходимо также отметить, что оптические измерения чувствительны не только к валовому содержанию хромофорных элементов, но и к их валентному состоянию. Например, относительно небольшое количество восстановленного мелкодисперсного железа, открытого в поверхностных зонах частиц лунного реголита (см. обзор Немошканенко, 1996), приводит к заметному снижению их альбедо и изменению других спектральных свойств.

Относительное содержание таких форм восстановленного железа описывается параметром I_s/FeO (I_s — относительная концентрация мелкодисперсного железа, измеренная методом ферромагнитного резонанса). Этот параметр, как принято считать, является адекватной характеристикой степени зрелости лунного реголита (Morris, 1976; 1978). При прогнозировании содержания в лунном грунте железа и титана возникает необходимость и оценки параметра I_s/FeO . Эта задача привлекает к себе сейчас большое внимание (Fischer, Pieters, 1996).

Представляет значительный интерес сопоставление данных по определению химического состава лунных пород оптическим методом и методом гамма-спектроскопии. Это позволит лучше понять слабые стороны обоих методов.

В настоящей работе мы развиваем методику дистанционного оптического анализа состава лунной поверхности. С помощью нового подхода по данным телескопических измерений мы строим карты распределения по лунной поверхности железа и титана, а также степени зрелости реголита. Полученные распределения предполагается использовать для их сопоставления с результатами геохимических исследований лунной поверхности КА «Лунар Проспектор» в случае удачного выполнения им научной программы.

МЕТОДИКА ПРОГНОЗИРОВАНИЯ

Предшествующие работы. Развитие методов прогноза содержания в лунных породах химиче-

ских элементов по данным оптических измерений можно разделить на два этапа. Первый из них начался фактически в период доставки проб лунного грунта на Землю экспедициями «Аполлон» и АМС серии «Луна» — тогда стало возможным проводить сопоставления оптических параметров материала лунной поверхности с его химико-минерологическими характеристиками. Наиболее надежные из обнаруженных корреляций рассматриваются как калибровочные и применяются для выполнения прогноза. В частности, широко известна корреляция между содержанием в грунте TiO_2 и показателем цвета (отношением альбедо A для двух участков спектра) материала лунной поверхности — $C(\lambda_1 / \lambda_2) = A(\lambda_1)/A(\lambda_2)$, где λ_1 и λ_2 — длины волн видимого диапазона — чаще всего около 0.6 и 0.4 мкм. Эта корреляция была предсказана в работе Johnson, Soderblom (1969). Ее существование подтверждилось в работах Евсюкова (1974), Charette et al. (1974). Делались попытки найти аналогичные корреляции для другого хромофора, содержащегося в лунном грунте, — FeO . В частности, исследовалась связь содержания этого окисла с альбедо (Евсюков, 1974) и глубиной микронной полосы поглощения d-d-типа минералов пироксенового и оливинового рядов, которая характеризуется показателем цвета $C(0.95/0.75)$ (Евсюков, Шестopalов, 1978). Найденные корреляции оказались ненадежными; не было понятно, каким образом можно учесть влияние степени зрелости лунного реголита.

Второй этап в развитии методов оптической диагностики лунной поверхности начался недавно — с появлением работ Lucey et al. (1995, 1996), Fischer, Pieters (1996), Шкуратов и др. (1996), Lucey, Blewett (1997), Blewett et al. (1997a, b). Лабораторные исследования лунного грунта (Lucey et al., 1995) показали некоторую закономерность в расположении на диаграмме альбедо—цвет, $A(0.75) — C(0.95/0.75)$, данных для образцов разной зрелости и состава. Оказалось, что образцы одного состава, но разной степени зрелости образуют последовательности, которые приблизительно ориентированы в направлении некоторой «особой» точки диаграммы, причем расстояние от этой точки характеризует степень зрелости образца: чем меньше расстояние, тем выше зрелость. Используя это, Lucey et al. (1995) предложили перейти на плоскости $A(0.75)$, $C(0.95/0.75)$ к новой системе полярных координат с центром в «особой» точке. В этом случае полярный угол оказывается связанным с содержанием железа, а радиальная координата — со зрелостью образцов грунта. Аналогичный подход был использован для «развязывания» влияния хи-

мии и зрелости применительно к определению содержания титана в лунных породах (Lucey et al., 1996; Blewett et al., 1997a). Для этого диаграмма $A(0.65) - C(0.65/0.42)$ представляется в новой прямоугольной системе координат — такой, что одна из осей минимизирует разброс точек на корреляционной диаграмме «титан—новая координата». Описанным способом были построены карты содержания в лунном грунте железа и титана для всей поверхности Луны (пространственное разрешение около 30 км); для этого использовались данные КА «Клементина» (Lucey et al., 1995, 1996).

Представленный подход, однако, обладает рядом недостатков. Отметим некоторые из них.

Прежде всего, предположение о существовании особой точки на диаграмме $A(0.75) - C(0.95/0.75)$ не обосновано физически. Рассматриваемая возможность разделения влияния состава и зрелости должна восприниматься только как эмпирический факт. При этом неясны границы его применимости. В частности, исследования показывают (Opanasenko et al., 1996), что, если совместить диаграмму $A(0.75) - C(0.95/0.75)$, построенную для образцов, с аналогичной диаграммой для видимого полушария Луны, то «особые» точки у них не совпадут.

Необходимо также обратить внимание на то, что в рамках рассматриваемого подхода распределение степени зрелости может быть найдено двумя способами: по диаграмме $A(0.75) - C(0.95/0.75)$ и по диаграмме $A(0.65) - C(0.65/0.42)$, однако эти распределения сильно отличаются друг от друга (Shkuratov et al., 1996; Opanasenko et al., 1996), что говорит об определенном несовершенстве метода.

Следует особо подчеркнуть недостаток, который очень характерен для современных работ, касающихся интерпретации спектров лунной поверхности и других безатмосферных небесных тел. Речь идет о том, что корреляции химического состава вещества рассеивающей поверхности обычно ищут с оптическими характеристиками этой поверхности, а не с оптическими постоянными ее вещества, как это следует делать. На это обращал внимание еще Розенберг (1967). Однако до сих пор из-за трудностей теории рассеяния света порошковыми поверхностями схема Розенберга используется редко (Шкуратов, 1987б).

Новый подход. Для демонстрации нашего подхода мы использовали собственные наблюдательные данные для видимого полушария Луны. Фотографические изображения были получены на 60-см рефлекторах Астрофизического института АН Казахстана и Майданакской наблюдательной станции ГАО НАН Украины (Опанасенко и др., 1996). Изображения вводились в ЭВМ с помощью автома-

тического сканирующего микроденситометра (Парусимов, 1981). Затем значения фотографической плотности преобразовывались в величины альбедо $A(0.42)$, $A(0.65)$, $A(0.75)$ и $A(0.95)$. Для этого использовались характеристические кривые, построенные непосредственно по изображению Луны с помощью фотометрического каталога (Shkuratov et al., 1992). Изображения приводились к нулевой либрации и одинаковому пространственному разрешению, равному примерно 12 км в центре лунного диска. Кроме того, с помощью эмпирической формулы Акимова (1979) на них устранился систематический ход яркости лимб-терминатор, возникающий за счет эффекта фазы (средний фазовый угол составлял примерно 6°). После этого, изображения корректировались по дискретному каталогу опорных точек с помощью методики, описанной в нашей работе (Shkuratov, Opanasenko, 1992).

В основном отличия нашего подхода от используемого в работах Lucey et al. (1995, 1996), Lucey, Blewett (1997), Blewett et al. (1997a, b) заключаются в следующем.

Для того чтобы корректно решить обратную спектроаналитическую задачу (Розенберг, 1967), мы перешли от абсолютных значений альбедо лунной поверхности $A(0.42)$, $A(0.65)$, $A(0.75)$ и $A(0.95)$ к оптическим характеристикам ее вещества. При этом применялась геометрооптическая модель, развитая в работах Шкуратова (1982, 1987а, б), Старухиной, Шкуратова (1996). Хотя эта модель и является приближенной, однако она неплохо зарекомендовала себя в оптике безатмосферных небесных тел; ее предсказания хорошо согласуются с результатами лабораторных измерений. Модель описывает светорассеяние порошкообразной средой с оптическими константами n и k (вещественная и мнимая части показателя преломления соответственно). Распространение лучей между рассеяниями характеризуется коэффициентом поглощения $\tau = 4\pi kl/\lambda$, где l — средний путь в частице между двумя внутренними отражениями. Элементарные акты отражения и преломления описываются усредненными по углам коэффициентами Френеля. Модель использует параметр s упаковки частиц.

Важным свойством этой модели является ее обратимость, т. е. возможность решить обратную спектроаналитическую задачу (Розенберг, 1967), когда по известному альбедо A , которое формируется как физическими свойствами вещества, так и структурой поверхности, находятся параметры вещества, а именно, мнимая часть показателя преломления. Из четырех параметров модели наибольшее влияние на альбедо оказывает произведение kl (Шкуратов, 1987а, б) и потому, используя априор-

ные оценки n , l и s , можно оценить величину k . Соответствующие формулы имеют вид (Старухина, Шкуратов, 1996):

$$k = \frac{\lambda}{4\pi l} \ln \left[\frac{b}{a} + \sqrt{\left(\frac{b}{a} \right)^2 - \frac{c}{a}} \right],$$

где

$$\begin{aligned} a &= T_e T_i (y R_b + s T_e), \\ b &= y R_b R_i + \frac{s}{2} T_e^2 (1 + T_i) - T_e (1 - s R_b), \\ c &= 2 y R_b - 2 T_e (1 - s R_b) + s T_b^2, \\ y &= (1 - A)^2 / 2A. \end{aligned}$$

Величины R_b и R_f — соответственно средние коэффициенты отражения назад и вперед от границы частицы при падении света извне; R_i — средний коэффициент отражения от границы внутри частицы; T_e и T_i — средние коэффициенты пропускания света, проходящего снаружи внутрь частицы; соотношения между средними коэффициентами отражения и пропускания:

$$T_e = 1 - R_e \quad \text{и} \quad T_i = 1 - R_i,$$

где $R_e = R_b + R_f$ — коэффициент внешнего отражения, усредненный по всем направлениям.

Можно показать, что $R_i = 1 - (1 - R_e)/n^2$, поэтому $T_i = T_e/n^2$. Расчеты показали, что при $n = 1.4$ — 1.7 хорошие аппроксимации дают выражения:

$$R_b \approx (0.28n - 0.20)R_e;$$

$$R_e \approx r_0 + 0.05;$$

$$R_i \approx 1.04 - 1/n^2,$$

где r_0 — френелевский коэффициент отражения при нормальном падении.

Эти формулы и аппроксимации используются ниже для перехода от значений измеренных альбедо $A(0.42)$, $A(0.65)$, $A(0.75)$ и $A(0.95)$ (см. ниже) к величинам $k(0.42)$, $k(0.65)$, $k(0.75)$ и $k(0.95)$; при этом принимаются следующие значения остальных параметров: $s = 0.5$; $n = 1.5$; $l = 50$ мкм (последняя величина отвечает среднему размеру частиц лунного реголита).

В отличие от работ Lucey et al. (1995, 1996), Lucey, Blewett (1997), Blewett et al. (1997a, b), в которых диаграммы $A(0.75)$ — $C(0.95/0.75)$ и $A(0.65)$ — $C(0.65/0.42)$ рассматривались независимо (это приводило к двум несходимым между собой распределениям степени зрелости), мы решили работать с трехмерной диаграммой $k(0.42)$ — $C_k(0.42/0.65)$ — $D_k(0.95)$, где $C_k(0.42/0.65) = k(0.42)/k(0.65)$, а $D_k(0.95)$ — характеристика глубины микронной полосы поглощения (индекс k

означает, что величины относятся к функции $k(\lambda)$). Параметр $D_k(0.95)$ используется вместо отношения $k(0.75)/k(0.95)$ потому, что это отношение характеризует не только полосу, но зависит от общего наклона спектра поглощения в видимом и ближнем ИК-диапазоне. Для ослабления влияния этого наклона можно использовать величину $D_k(0.95) = k(0.95)/k_c(0.95)$, где $k_c(0.95)$ — коэффициент поглощения в континууме, найденный путем линейной экстраполяции функции $k(\lambda)$ по трем длинам волн — 0.42; 0.65; 0.75 мкм. Для экстраполяции применялся метод наименьших квадратов.

Далее ставилась задача нахождения в пространстве параметров $k(0.65)$, $C_k(0.42/0.65)$, $D_k(0.95)$ такой системы координат, которая удовлетворяет трем условиям. Первое из них формальное: новые координаты должны коррелировать с содержанием титана и железа лучше (независимо от зрелости), чем исходные оптические параметры. Два других условия отражают некоторые априорные знания о веществе лунной поверхности. Прежде всего, исследования образцов лунного грунта разной степени зрелости показали, что параметр I_s/FeO не коррелирует с содержанием железа (Morris, 1978). Это означает, что на изображении, передающем распределение степени зрелости, граница море/материк должна отсутствовать. Кроме этого, можно предполагать, что материал лучевых систем, образовавшихся на древнем материке, сравнительно мало отличается по содержанию железа и титана от материала соседних областей. Действительно, лучевые системы образуются при вскрытии вещества, в основном за счет вторичных ударов, вызванных падением материала, выброшенного при возникновении основного кратера (Флоренский и др., 1982). Характерный диаметр вторичных кратеров составляет несколько сотен метров. В процессе их образования на поверхность извлекается вещество с глубин в десятки метров. Геологические исследования лунной поверхности, выполненные экспедициями «Аполлон», не дают никаких оснований предполагать наличие в области древнего материка систематической вертикальной неоднородности химического состава с характерным масштабом десятки метров. Таким образом, на изображениях, передающих распределения железа и титана по лунной поверхности, контраст лучевых систем в материковой области (например, для лучей кратера Тихо) должен быть сильно приглушен.

Чтобы выполнить сформулированные условия, мы перешли от системы координат $k(0.65)$, $C_k(0.42/0.65)$ и $D_k(0.95)$ к косоугольной системе, в которой две координаты, $C_k(0.42/0.65)$ и $D_k(0.95)$, остались почти неизменными, а вместо координаты

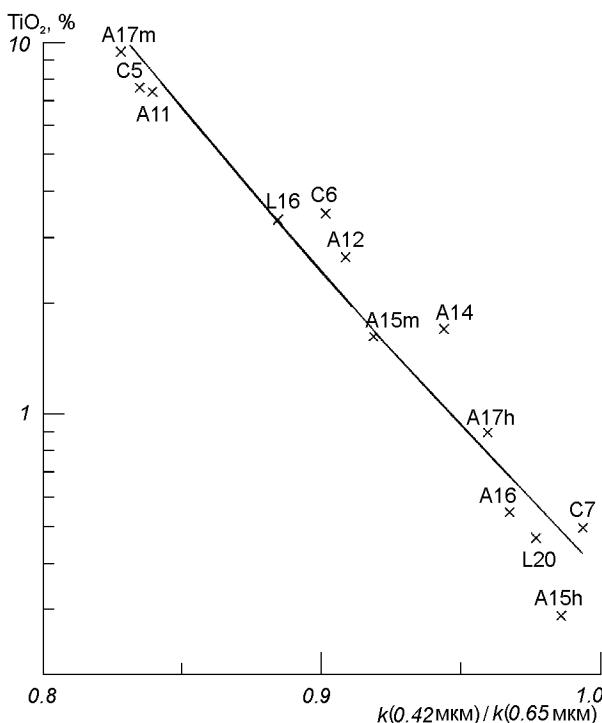


Рис. 1. Зависимость содержания TiO_2 от $k(0.42)/k(0.65)$ для мест посадки космических аппаратов серии «Аполлон», «Луна» и «Сервейер»

$k(0.65)$ используется параметр $\text{comb} = k(0.65)10^4 + 5D_k(0.95)$.

Для сопоставления новых координат с содержанием хромофорных элементов мы использовали усредненные данные для мест посадок космических аппаратов серий «Сервейер», «Луна» и «Аполлон» (Вуд, 1975; Кинг, 1979; Мейсон, Мелсон, 1973; Нава, Филпоттс, 1979; Финней и др., 1975; Флоренский и др., 1981; Taylor, 1972). Мы не использовали данные АМС «Луна-24», поскольку место посадки этой станции не является представительным для данного района (Ryder et al., 1977). Для некоторых мест посадок КА «Аполлон» (в тех случаях, когда астронавтам, благодаря наличию лунного автомобиля, удавалось собирать образцы в разной местности) удается получить данные, соответствующие морским и материковым районам. Здесь уместно отметить, что по материалам КА «Клементина» удается даже делать привязку оптических данных к местам отбора грунта по маршруту движения лунных автомобилей в экспедициях «Аполлон-15 и -17» (Blewett et al., 1997).

На рис. 1 и 2 представлены калибровочные оптико-химические зависимости для следующих пар параметров: $(\text{FeO} + \text{TiO}_2)$ — comb и TiO_2 —

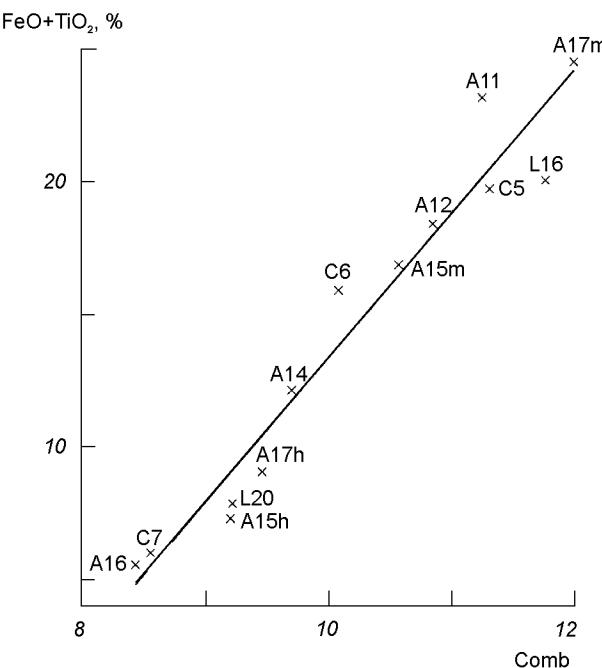


Рис. 2. Зависимость содержания $\text{FeO} + \text{TiO}_2$ от параметра $\text{comb} = k(0.65)10^4 + 5D_k(0.95)$ для мест посадки КА «Аполлон», «Луна» и «Сервейер»

$C_k(0.42/0.65)$. Несмотря на малочисленность данных (13 точек) зависимости представляются убедительными — линейный регрессионный анализ дал в обоих случаях коэффициент корреляции 0.97. Отметим, что даже точка, отвечающая месту посадки «Аполлон-16» (это незрелый грунт), хорошо ложится на общую зависимость; для параметров TiO_2 и $C(0.41/0.56)$ (здесь $C(0.41/0.56)$ — обычный показатель цвета) эта точка сильно отклоняется (Charette et al., 1974).

Описываемые калибровочные зависимости использовались для построения карт распределения TiO_2 и FeO по видимому полушарию Луны (рис. 3 и 4). Было также получено распределение степени зрелости лунного реголита (рис. 5). К сожалению, из-за отсутствия соответствующих калибровочных данных это распределение пока не может быть представлено в виде карты параметра I_s/FeO . Карты на рис. 3 и 4, а также изображение на рис. 5, представлены в прямой ортографической проекции.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Распределение железа по видимому полушарию Луны имеет ярко выраженный бимодальный характер (возможно даже наличие слабой третьей моды).

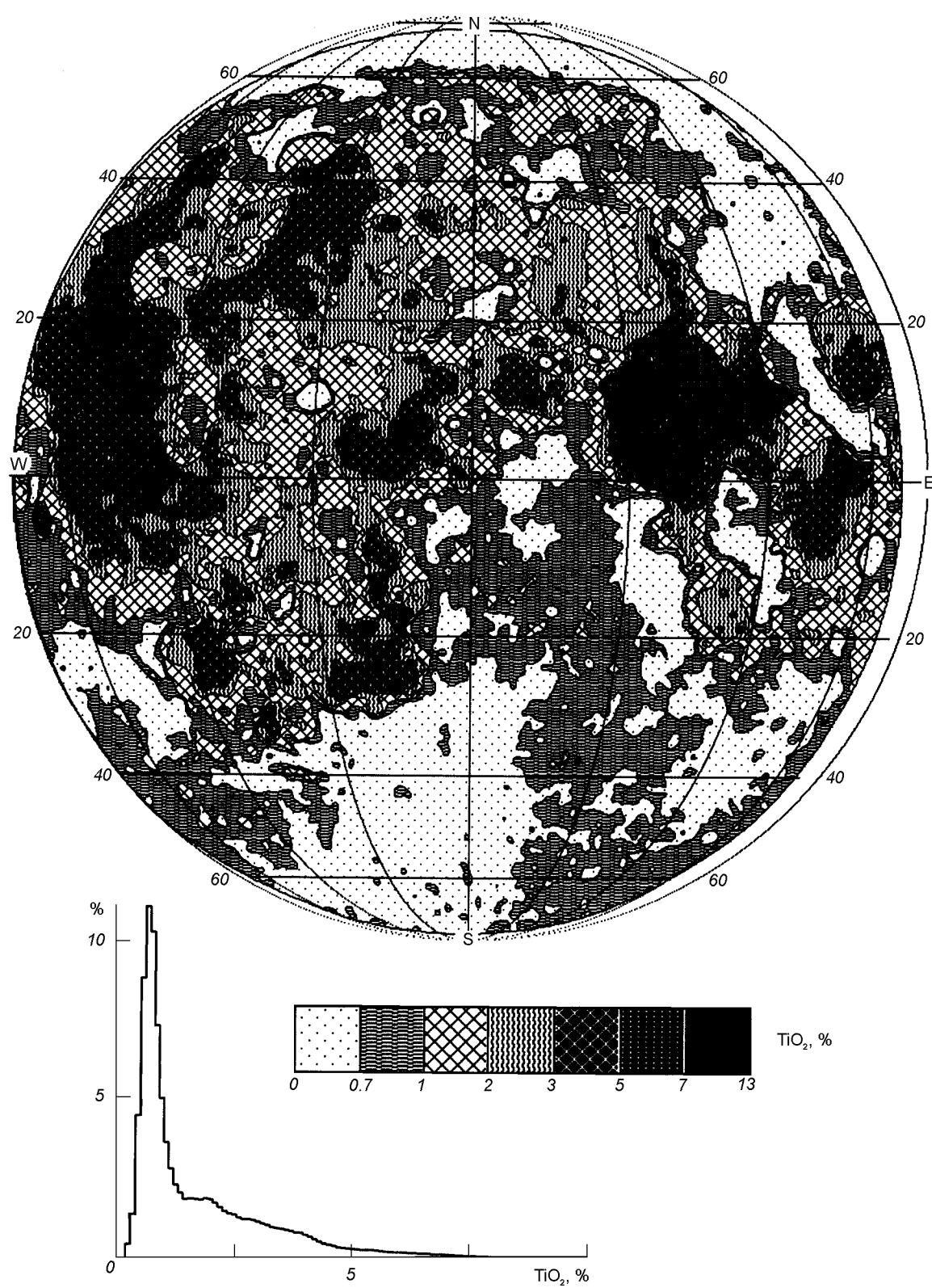


Рис. 3. Карта содержания титана в реголите поверхности видимого полушария Луны и гистограмма распределения

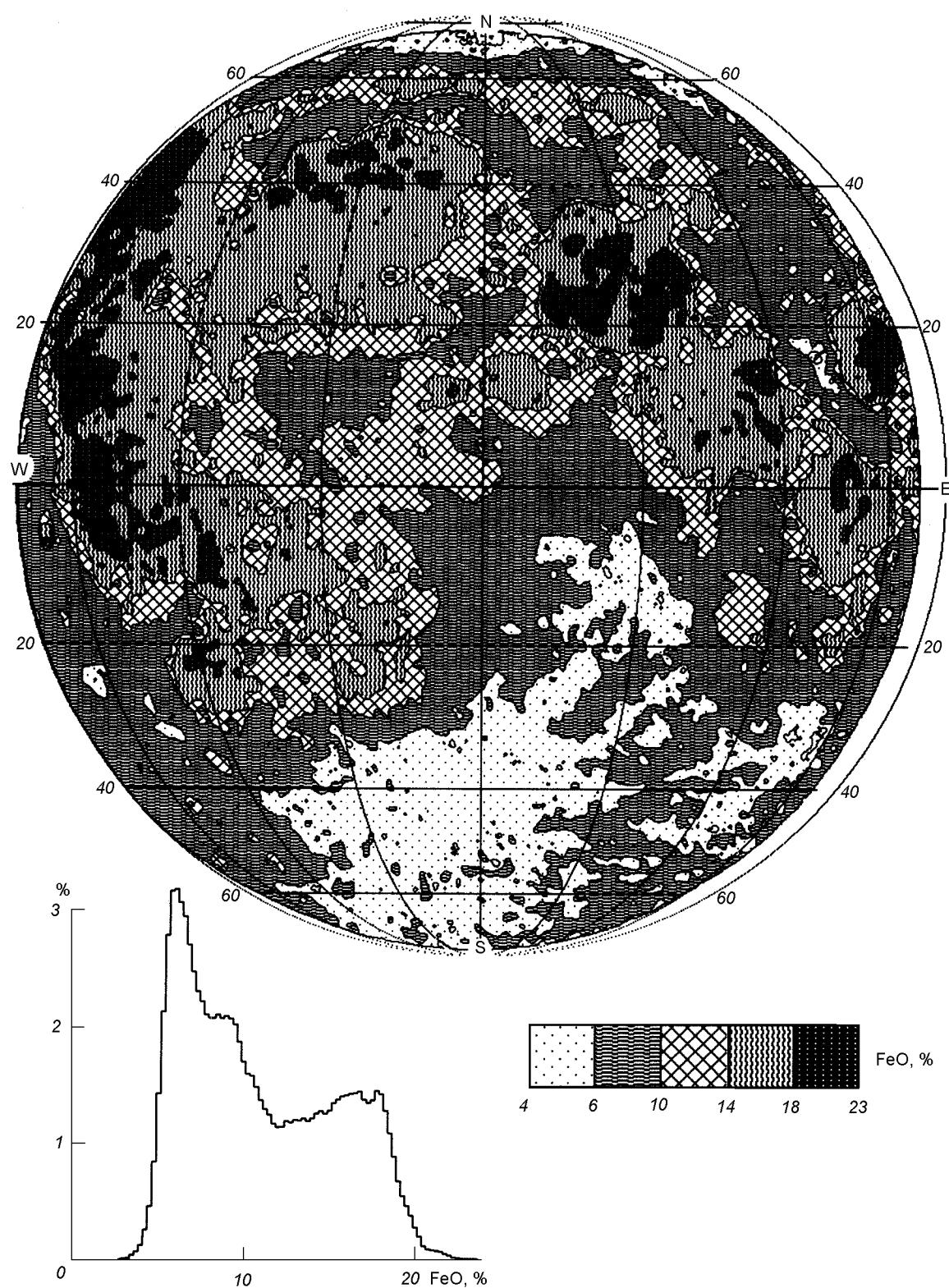


Рис. 4. Карта содержания железа в реголите поверхности видимого полушария Луны и гистограмма распределения

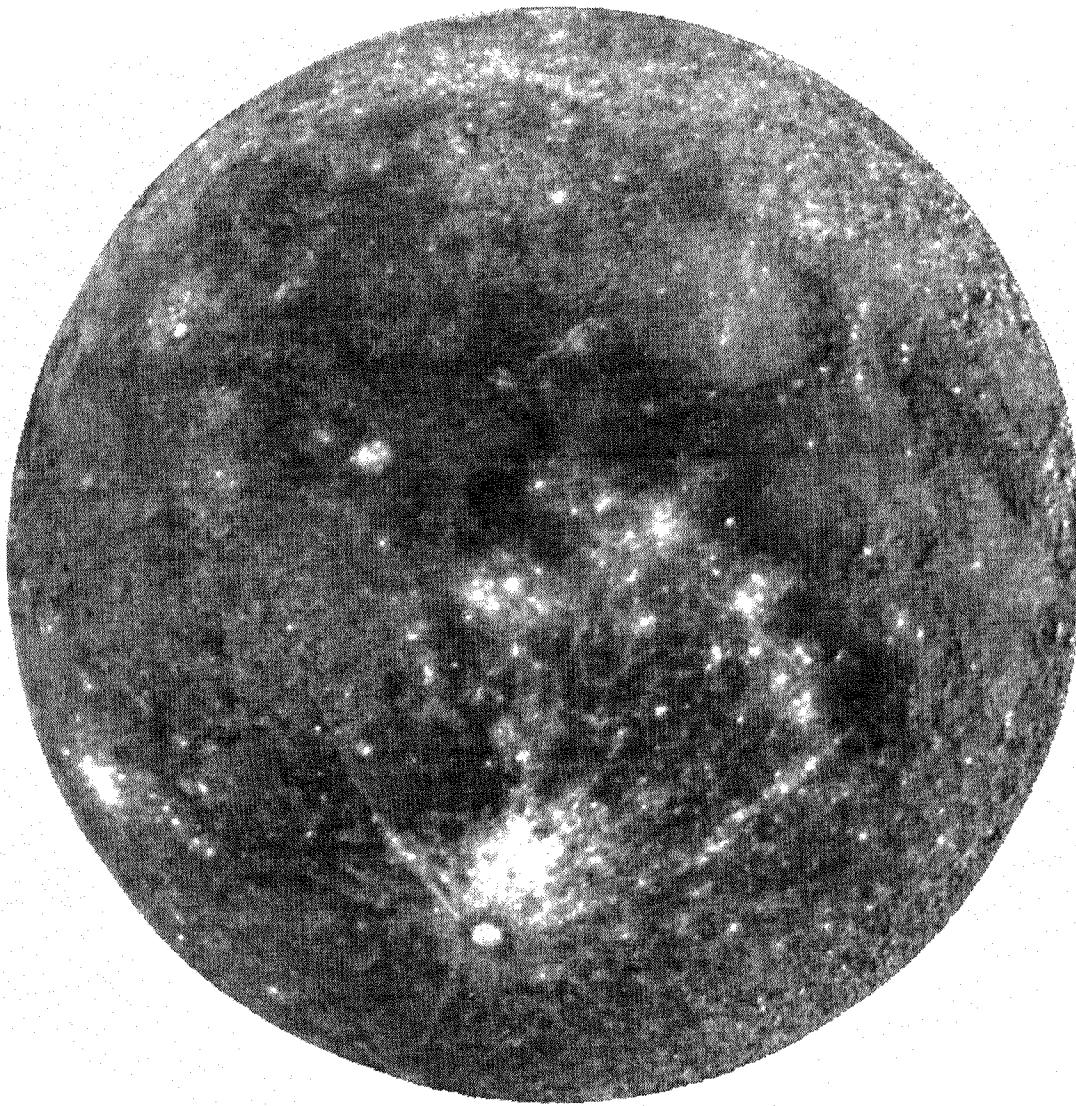


Рис. 5. Распределение степени зрелости реголита видимого полушария Луны

Это видно из гистограммы распределения, представленной на рис. 4. Максимум моды, отвечающей низкому содержанию железа, расположен вблизи 6 %, что хорошо согласуется с данными для поверхности видимого полушария Луны, полученным по данным КА «Клементина» (Lucey et al., 1997). Положение второй моды в нашем случае заметно смещено в сторону больших значений — 17 % против 10 %, получившихся в работе (Lucey et al., 1997). Слабая третья мода центрируется вблизи 8 %. Области с наименьшим содержанием железа расположены на южном материке и формально ассоциируются с зоной выбросов кратера Тихо. Однако, детальное сравнение картины лучевой си-

стемы этого кратера с выделившейся областью на карте содержания FeO не показывает хорошего совпадения. Вероятно, здесь мы все же имеем дело с химической неоднородностью материала, а не с остаточным влиянием фактора незрелости материала. Области с наибольшим содержанием железа в основном расположены на западе в Океане Бурь, а на востоке в Море Ясности. Следует отметить, что в Море Спокойствия (несмотря на его сравнительно низкое альбедо) не очень много районов с высоким содержанием железа.

Гистограмма распределения титана весьма несимметрична, но одномодальна (см. рис. 3). Максимум распределения расположен примерно на

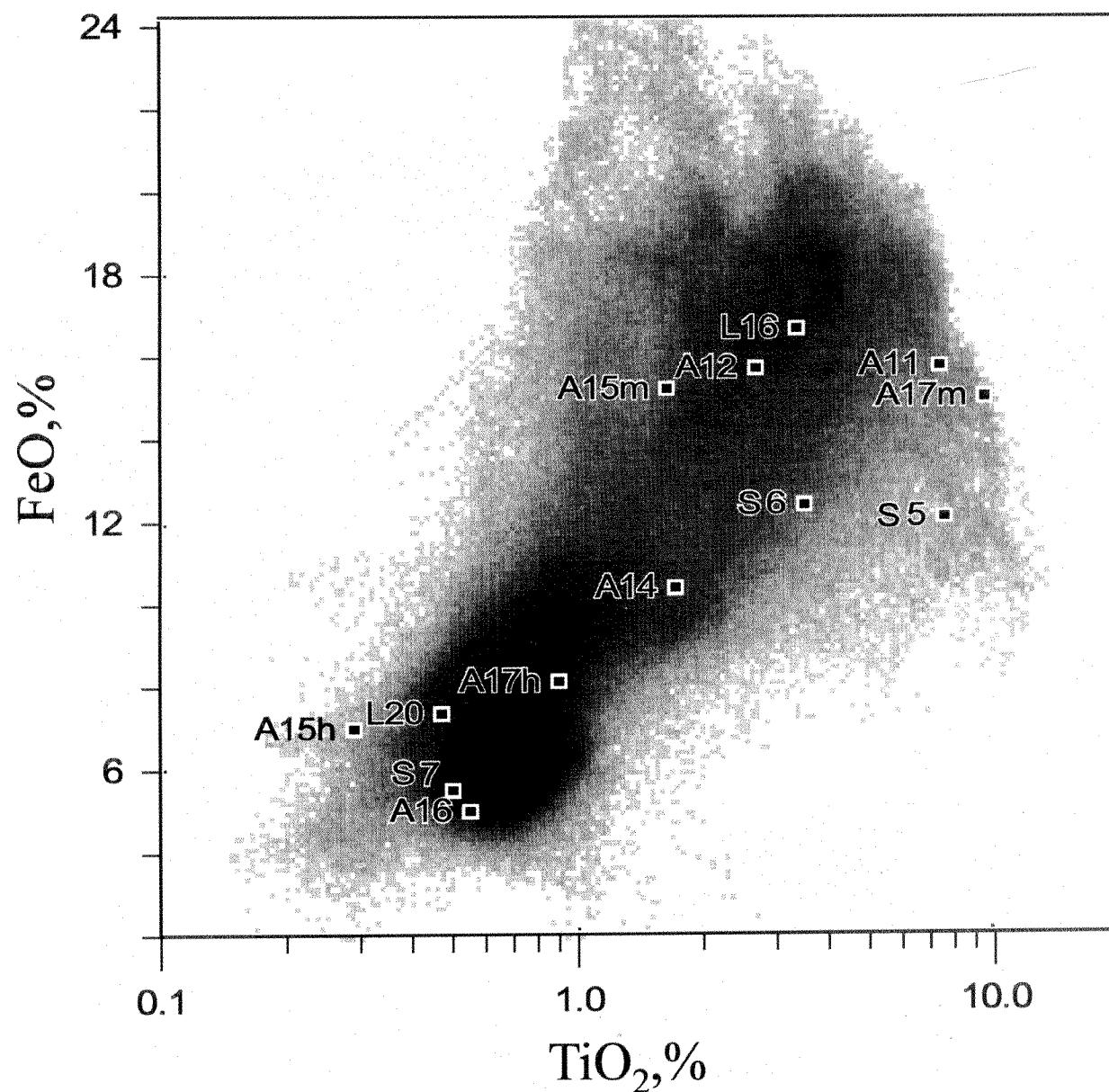


Рис. 6. Диаграмма FeO— TiO_2 для видимого полушария Луны и соответствующие данные для мест посадок космических аппаратов

0.7 %, т. е. большая часть поверхности видимого полушария Луны сложена материалом с низким содержанием титана. Особенно низко это содержание в областях южного и северо-восточного материка. Очень высока концентрация титана (до 13 %) в западной части Моря Спокойствия. Отметим, что поверхность, образованная этими высокотитанистыми лавами, является согласно карте (Вотусе, Jonson, 1978) сравнительно старой. Карты, представленные на рис. 3 и 4, неплохо согласуются с опубликованными ранее аналогичными картами,

построенными другим способом (Шкуратов и др., 1996), поэтому все выводы, сделанные нами ранее об особенностях распределения типов пород по лунной поверхности с использованием классификации Богатикова и др. (1985), остаются в силе. Существенные отличия могут наблюдаться лишь для областей с низким содержанием железа и титана. Для таких областей методика, рассмотренная нами ранее (Шкуратов и др., 1996), неприменима — она не учитывает влияние зрелости на альбедо и цвет лунных пород.

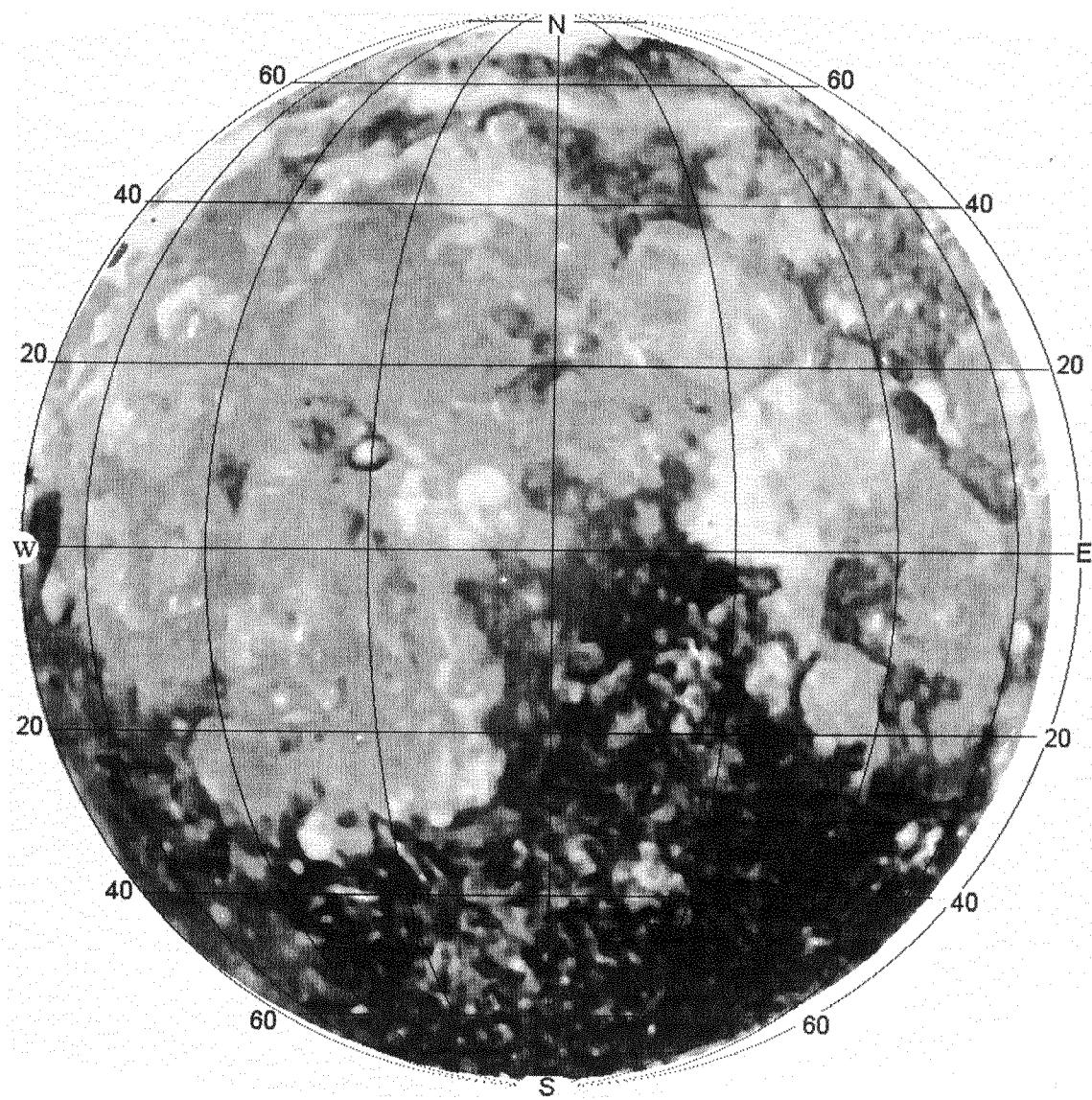


Рис. 7. Карта типичности лунных пород по содержанию железа и титана в реголите поверхности видимого полушария Луны

На изображении, передающем распределение степени зрелости лунного реголита (в относительных единицах), светлые тона отвечают меньшей зрелости (см. рис. 5). На этом изображении хорошо видны молодые кратеры и их зоны выбросов (незрелый грунт). Наиболее ярким примером может служить кратер Тихо. Заметно выделяется кратер Коперник, но при этом зона его выбросов совершенно не видна. Этот кратер заметно старше кратера Тихо. Вероятно материал его выбросов успел «созреть» и перемешаться с материалом подложки. Однако, внутри самого кратера, за счет существова-

ния достаточно сложного сравнительно круто-склонного рельефа, процессы переноса материала могли приводить к обновлению поверхности — вскрытию незрелого грунта. Граница море/материк на изображении практически повсеместно отсутствует. При этом хорошо выделяется область повышенной зрелости, включающая береговую полосу Моря Ясности (юго-западная часть) и Моря Спокойствия (западная часть); в нее почти целиком попадает Море Нектара. К сожалению, у нас пока нет надежных данных для представления изображения, передающего распределение степени зрело-

сти в величинах I_s/FeO . Однако, основываясь на данных работы (Fischer, Pieters, 1995), в которой предпринята попытка связать эту величину непосредственно с показателем цвета $C(0.95/0.75)$, мы можем утверждать, что в первом приближении использующиеся относительные значения, пропорциональны величине I_s/FeO .

Представляет интерес исследование корреляции между содержанием железа и титана по полученным распределениям. Соответствующая диаграмма приведена на рис. 6 («титановая» шкала дана в логарифмическом представлении). На этом же рисунке нанесены данные для мест посадок космических аппаратов. Из рис. 6 видно, что исследуемая корреляция довольно хорошо выражена. Коэффициент корреляции равен 0.81. Уравнение регрессии имеет следующий вид:

$$\lg(\text{TiO}_2 [\%]) = 0.06 (\text{FeO} [\%]) - 0.54.$$

На диаграмме «железо—титан» четко выделяется мощный материковый кластер. Он практически не имеет структуры. «Морская» часть диаграммы имеет более размытый и клочковатый вид — здесь можно выделить несколько слабых кластеров. Интересно отметить, что среди имеющихся точек, отвечающих данным для мест посадок космических аппаратов, только данные для КА «Аполлон-12» и «Луна-16» попадают в области кластеров и в этом смысле могут рассматриваться как примеры типичного грунта по комбинации железа и титана. Все другие аппараты привезли грунт недостаточно типичный для видимого полушария Луны.

В развитие задачи оценки типичности состава лунной поверхности, нами было построено изображение, каждой точке которого присвоено значение, взятое из корреляционной диаграммы «железо—титан»; это значение берется, в соответствии с отсчетами в этой точке FeO и TiO_2 (Шкуратов и др., 1996). На рис. 7 представлена карта типичности комбинаций количеств FeO и TiO_2 . Темным тонам соответствуют здесь более вероятные комбинации. Согласно этой карте, наиболее типичные комбинации встречаются в области южного материка. Базальты западной части Моря Спокойствия, содержащие большое количество титана, при сравнительно низкой концентрации железа, не являются типичными для видимого полушария Луны. Обращает на себя внимание «исчезновение» лучевой системы кратера Коперник; эта система столь же типична, как и окружающие морские участки.

Пространственное разрешение представленных карт несколько выше среднего разрешения данных, которые планируется получить с помощью КА «Лунар Проспектор». Однако, они вполне подходят для сопоставлений. При выполнении таких сопо-

ставлений прежде всего следовало бы выяснить, действительно ли зона выбросов кратера Тихо является областью с более низким содержанием железа и титана, чем ее окрестности. Следует также обратить внимание на распределение этих элементов в Море Спокойствия — действительно ли там аномально много титана при сравнительно небольшом содержании железа. Кроме того, представляется целесообразным провести детальный сравнительный анализ в областях с аномально высокой степенью зрелости. Это позволит убедиться в том, что эти области, хорошо видимые на изображении, представленном на рис. 5, не являются артефактами и не связаны, например, с аномально низким содержанием железа (это фактор, который может заметно влиять на глубину полосы поглощения в области 1 мкм).

Еще раз подчеркнем, что при сопоставлении оптических данных и результатов гамма-спектрографии надо иметь в виду, что в первом случае толщина «рабочего» слоя поверхности составляет первые десятки микрон, а во втором — первые метры. Поэтому расхождения, которые будут обнаружены, следует интерпретировать с осторожностью, имея ввиду, что они могут быть вызваны как ошибками измерений, так и быть связанными с существованием в некоторых местах вертикальных неоднородностей реголитового слоя.

- Акимов Л. А. О распределении яркости по диску Луны и планет // Астрон. журн.—1979.—56.—С. 412—418.
 Богатиков О. А., Гоньшакова В. И., Фрих-Хар Д. И. Классификация лунных магматических пород. — М.: Недра, 1985.—72 с.
 Вуд Дж. А. Обзор типов лунных пород и сравнение лунной и земной коры // Космохимия Луны и планет / Под ред. А. П. Виноградова. — М.: Наука, 1975.—С. 29—45.
 Евсюков Н. Н. Связь оптических характеристик с химико-минералогическим составом лунных пород // Астрон. журн.—1974.—51.—С. 1316—1325.
 Евсюков Н. Н., Шестопалов Д. И. О минералогическом составе лунных пород // Астрон. вестн.—1978.—12, № 1.—С. 18—26.
 Кинг А. Космическая геология. — М.: Мир, 1979.—379 с.
 Кислюк В. С., Шкуратов Ю. Г., Яцків Я. С. Космічні дослідження Місяця: задачі, можливості і перспективи української науки і техніки // Косміч. наука і технол.—1996.—2, № 1—2.—С. 3—14.
 Мейсон Б., Мелсон У. Лунные породы. — М: Мир, 1973.—165 с.
 Нава Д. Ф., Филпоттс Д. А. Модель дифференциации Луны в свете новых данных о химическом составе реголита «Луны-20» и «Аполлона-16» // Грунт из материкового района Луны // Под ред. В. Л. Барсукова. — М: Наука, 1979.—С. 337—344.
 Немошканенко В. В. Дослідження місячного реголіту // Косміч. наука і технол.—1996.—2, № 1—2.—С. 16—23.
 Опанасенко Н. В., Шкуратов Ю. Г., Станкевич Д. Г., Кайдаш В. Г. Колориметрическое картографирование видимого полушария Луны // Астрон. вестн.—1996.—30, № 5.—С. 398—408.

- Парусимов В. Г. Автоматический цифровой двухкоординатный микрофотометр для ввода фотографических изображений в ЭВМ // Астрономия и астрофизика.—1981.—Вып. 45.—С. 86—99.
- Розенберг Г. В. Физические основы спектроскопии светорассеивающих веществ // Успехи физич. наук.—1967.—91, № 4.—С. 569—608.
- Старухина Л. В., Шкуратов Ю. Г. Модель спектральной зависимости альбедо многокомпонентных реголитоподобных поверхностей // Астрон. вестн.—1996.—30, № 4.—С. 299—306.
- Финней В., Уорнер Дж., Симмондс К. Типы лунных магматических пород и их отношение к процессам ударного фракционирования // Космохимия Луны и планет / Под ред. А. П. Виноградова. — М.: Наука, 1975.—С. 54—88.
- Флоренский К. П., Базилевский А. Т., Бурба Г. А. и др. Очерки сравнительной планетологии. — М.: Наука, 1981.—328 с.
- Шкуратов Ю. Г. Модель спектрального хода альбедо твердых поверхностей космических тел // Кинематика и физика небес. тел.—1987.—3, № 5.—С. 39—46.
- Шкуратов Ю. Г. Интерпретация колориметрических характеристик поверхности Луны на основе модели спектрального хода альбедо порошкообразных поверхностей // Кинематика и физика небес. тел.—1987.—4, №2.—С. 17—21.
- Шкуратов Ю. Г., Кайдаш В. Г., Опанасенко Н. В. и др. Возможность прогнозирования состава лунной поверхности по данным оптических измерений // Космич. наука і технологія.—1996.—2, № 5—6.—С. 78—88.
- Belton M. J., Head J. W., Pieters C. M., et al. Lunar impact basins and crustal heterogeneity: new western limb and far side data from Galileo // Science.—1992.—255.—P. 570—576.
- Blewett D. T., Lucey P. G., Hawke B. R., et al. Clementine images of the lunar sample-return station: improvements to the TiO₂ mapping technique // Lunar and Planet. Sci. 28th (Abstracts). — LPI Houston, 1997a.—P. 119.
- Blewett D. T., Lucey P. G., Hawke B. R., et al. FeO mapping of the Moon: refinement using images of the sample-return stations // Lunar and Planet. Sci. 28th (Abstracts). — LPI Houston, 1997b.—P. 121.
- Boyce J., Jonson D. Age of flow units in the lunar nearside maria based on Lunar Orbiter V photographs // Proc. Lunar Planet. Conf. 9th. — LPI Houston, 1978.—P. 3275—3284.
- Charette M., McCord T. B., Pieters C., et al. 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.
- Fischer E., Pieters C. Composition and exposure age of the Apollo 16 Cayley and Descartes regions from Clementine data: normalizing the optical effect of space weathering // J. Geophys. Res.—1996.—101E, N 1.—P. 2225—2234.
- Johnson T. V., Soderblom L. A. Relative spectra (0.4—1.1 μ) of the lunar landing site Apollo 7 // J. Geophys. Res.—1969.—74, N 25.—P. 6046—6056.
- Johnson T. V., Saunders S., Matson D., Mosher J. A TiO₂ abundance map for northern maria // Proc. Lunar Sci. Conf. 8th. — LPI Houston, 1977.—P. 1029—1036.
- Johnson J. R., Larson S. M., Singer R. B. Remote sensing of potential lunar resources. I. Near-side composition properties // J. Geophys. Res.—1991.—96E, N 3.—P. 18861—18882.
- Lucey P., Taylor G., Malaret E. Abundance and distribution of iron on the Moon // Science.—1995.—268.—P. 1150—1153.
- Lucey P., Blewett D., Johnson J. Lunar titanium content from UV-VIS measurements // Lunar and Planet. Sci. Conf. 27th (abstracts). — LPI Houston, 1996.—P. 781.
- Lucey P., Blewett D. Some issues related to lunar FeO and TiO₂ multispectral mapping // Lunar and Planet. Sci. Conf. 28th (abstracts). — LPI Houston, 1997.—P. 841.
- Lucey P., Taylor G., Malaret E. Global abundance of FeO on the Moon: improved estimates from multispectral imaging and comparisons with the lunar meteorites // Lunar and Planet. Sci. Conf. 28th (abstracts). — LPI Houston, 1997.—P. 849.
- Morris R. Surface exposure indices of lunar soils: A comparative FMR study // Proc. Lunar Planet. Sci. Conf. 7th. — LPI Houston, 1976.—P. 315—335.
- Morris R. V. The surface exposure (maturity) of lunar soils: Some concepts and I_s/FeO compilation // Proc. Lunar Sci. Conf. 9th. — LPI Houston, 1978.—P. 2287—2297.
- Nozette S., Pleasance L. P., Horan D. M., et al. The Clementine mission to the Moon: science overview // Science.—1994.—266.—P. 1835—1862.
- Opanasenko N. V., Shkuratov Yu. G., Kajdash V. G. Estimations of iron content in lunar regolith by measurements of spectral slope in 0.95 μm absorption band // Abstr. of papers subm. to 24th Russian-American microsymp. on planet, October 1996. — Moscow: Vernadsky Inst.—P. 70—71.
- Pieters C., McCord T. Characterization of lunar mare basalt types // Proc. Lunar Sci. Conf. 7th. — LPI Houston, 1976.—P. 2677—2690.
- Pieters C. A summary of spectral reflectance data // Proc. Lunar Sci. Conf. 9th. — LPI Houston, 1978.—P. 2825—2849.
- Ryder J., McEwen H. G., Marvin U. B. Basalts from Mare Crisium // The Moon.—1977.—17.—P. 263—287.
- Shkuratov Yu. G., Opanasenko N. V., Kreslavsky M. A. Polarimetric and photometric properties of the Moon: telescope observation and laboratory simulation. 1. Negative polarization // Icarus.—1992.—95.—P. 282—299.
- Shkuratov Yu. G., Opanasenko N. V. Polarimetric and photometric properties of the Moon: telescope observation and laboratory simulation. 2. Positive polarization // Icarus.—1992.—99.—P. 468—484.
- Shkuratov Yu. G., Opanasenko N. V., Stankevich D. G. Lunar soil maturity determination on the base of spectra slope measurements in 0.95 mm band // Abstr. of papers subm. to 24th Russian-American microsymp. on planet, October 1996. — Moscow: Vernadsky Inst.—P. 86—87.
- Taylor S. Lunar science: Post Apollo Era. — N. Y., 1972.—370 p.
-
- PROGNOSIS OF IRON AND TITANIUM DISTRIBUTIONS ON THE LUNAR SURFACE FOR COMPARISON WITH THE «LUNAR PROSPECTOR» DATA**
- Yu. G. Shkuratov, V. G. Kajdash, N. V. Opanasenko,
D. G. Stankevich, and V. G. Parusimov
- Lunar nearside maps of iron and titanium distributions were made up. The purpose of this mapping is to compare its results with the data of geochemical survey which is planned in the «Lunar Prospector» mission. The maps are made from optical measurements in four spectral bands: λλ 0.42, 0.65, 0.75, 0.95 μm. To calibrate the maps, the chemical content data for «Apollo», «Luna», «Surveyor» landing sites were used. A model of light scattering was used to go from optical characteristics of scattering medium to substance parameters. The maps are presented in the right orthographic projection. Histograms of the parameters studied were calculated. In particular, the iron distribution is bimodal with maxima at 6 % and 17 %. The iron—titanium correlation diagram was built; analysis of this diagram made with the use of additional landing site data shows that the majority of landing sites belong to nontypical combinations of iron and titanium abundances. The map of typical FeO and TiO₂ content combinations was made up. According to this map, basalts of Mare Tranquillitatis with high titanium content and low iron concentration are not typical for the Moon nearside.