

УДК 523.3

Возможность прогнозирования состава лунной поверхности по данным оптических измерений

Ю. Г. Шкуратов¹, В. Г. Кайдаш¹, Н. В. Опанасенко¹,
Д. Г. Станкевич¹, Н. Н. Евсюков², В. Г. Парусимов³

¹ Астрономічна обсерваторія Харківського державного університету, Харків

² Харківський державний університет,

³ Головна астрономічна обсерваторія НАН України, Київ

Надійшла до редакції 06.08.96

За новими даними про розподіл альбедо A (0.65 мкм) і показника кол'ору $C(0.65/0.42$ мкм) для видимої півкулі Місяця, а також за новими калібрівочними залежностями цих оптических параметрів від вмісту хромофорних елементів (заліза і титану) побудовані карти розповсюдженості породоутворюючих окислів TiO_2 и FeO . Співставлення діаграмами альбедо—колір для Місяця з хімічною діаграмою для зразків місячних порід, представленої також в осіх альбедо—колір, дозволило виділити чотири області на місячній діаграмі, що відповідають кільком видам місячних порід. Наприклад, окремому оптичному кластеру відповідає область, сформована ільменітовими та ільменіт-олівіновими базальтами. Використання цих даних дозволило побудувати карту розподілу деяких видів місячних порід, що відповідають класифікації Богатикова та ін. Методика такого прогнозування складу може бути використана при аналізі даних зйомки місячної поверхні, зробленої КА «Клементина».

Для прогноза хімико-минералогического состава лунной поверхности в слое толщиной около 100 мкм (глубина проникновения света в реголіт) уже давно используются экспериментально найденные корреляции между содержанием хромофорных элементов в лунном грунте и его оптическими параметрами, такими как альбедо и различные показатели цвета. Развитие методики такого прогнозирования актуально и в настоящее время в связи с возобновлением интереса к космическим исследованиям Луны (Кислюк и др., 1996).

В настоящей работе изучаются возможности построения по оптическим данным карт основных хромофорных элементов лунной поверхности и выполнения ее петрологического районирования.

КРАТКИЙ ОБЗОР ПРОБЛЕМЫ

На первый взгляд представляется странным то, что химический и даже минералогический состав лунной поверхности можно предсказать по значениям альбедо, измеренным всего лишь в двух или трех участках видимого и ближнего ИК-диапазона длин волн. Эта задача действительно безнадежна, если мы не имеем о поверхностиенной априорной информации. Однако в случае лунной поверхности такая информация имеется. Точнее, ее достаточно для того, чтобы решить обратную задачу в первом приближении.

По результатам лабораторных исследований лунного грунта известно, что в нем в заметных коли-

чествах содержится всего лишь два хромофорных элемента — железо и титан. Известно также, что из-за отсутствия воды минералогия лунной поверхности сравнительно проста — имеется всего лишь четыре основных минерала: полевой шпат, пироксен, оливин и ильменит. Вещество лунной поверхности сильно переработано космогенными процессами, такими как микрометеоритная бомбардировка и облучение частицами солнечного ветра. Продукт такой переработки — реголит — есть порошкообразная среда, структурные характеристики которой достигли некоторых «равновесных» значений на большей части площади (до 80 %) лунной поверхности (такой реголит называется зрелым). Перечисленные факторы способствуют проявлению физически очевидных корреляций между содержанием хромофорных элементов в лунном грунте и его альбедо A , а также показателями цвета

$$C = A(\lambda_1)/A(\lambda_2),$$

где λ — длина световой волны.

Впервые такие корреляции были независимо обнаружены Евсюковым (1974); Charette et al. (1974). В частности, было показано (Pieters, McCord, 1976), что для образцов зрелых морских грунтов справедлива следующая регрессионная зависимость между содержанием титана и показателем цвета C (0.56/0.40 мкм):

$$\text{TiO}_2 [\%] = a \exp(b/C), \quad (1)$$

где $a = 8.12 \cdot 10^{-5}$, $b = 14.38$. Другая аппроксимация была предложена в работе (Johnson et al., 1991):

$$\text{TiO}_2 [\%] = -532.5 + 1879.1R^{-1} - 2192.6R^{-2} + 848.0R^{-3} \quad (2)$$

по данным для шести мест взятия проб лунного грунта, где $R(0.56/0.40 \text{ мкм})$ — показатель цвета, взятый относительно стандартной лунной площадки MS-2.

Связь альбедо $A(0.62 \text{ мкм})$ с содержанием железа была найдена Евсюковым (1974) по результатам анализа данных для мест посадок некоторых космических аппаратов. Существование более тесной корреляции между альбедо и концентрацией основных хромофоров — суммой ($\text{Fe} + \text{Ti}$) — отмечалась Шкуратовым (1982).

Неоднократно предпринимались попытки (Charette et al., 1976; Евсюков, Шестопалов, 1978) использовать для оценок содержания железа в лунном грунте показатель цвета $C(0.95/0.75 \text{ мкм})$, который характеризует глубину полосы поглощения d -типа в минералах пироксенового и оливинового рядов и их стекол.

Существуют некоторые трудности в химической интерпретации отражательных свойств реголита в видимом и ИК-диапазоне спектра, связанные с процессами восстановления ионов Fe^{2+} и Ti^{4+} под действием облучения солнечным ветром. Исследования образцов реголита методами рентгеноэлектронной спектроскопии показали наличие восстановленного мелкодисперсного железа в верхних зонах реголитовых частиц, которое является сильным хромофором (см., например, обзор в статье Немошканенко (1996)). Соотношение $\text{Fe}^0/\text{Fe}^{2+}$ зависит от степени зрелости лунного грунта и влияет на его оптические характеристики. Лишь в последнее время удалось разработать методику, позволяющую приблизенно разделить влияние на оптические характеристики ионов Ti^{4+} , Fe^{2+} и эффекта зрелости реголита (Lucey et al., 1995, 1996; Fisher, Pieters, 1996).

Имея оценки таких важных породообразующих элементов, как железо и титан, можно ставить вопрос об определении вида пород, слагающих тот или иной участок лунной поверхности. Эта возможность возникает благодаря тому, что некоторые виды лунных пород характеризуются преимущественными комбинациями содержаний Ti и Fe (Богатиков и др., 1985).

Конечно, такой способ определения видов пород является довольно условным. Прежде всего потому, что большая часть лунной поверхности представлена не первичными (условно магматическими) породами, а зрелым грунтом, который на 60—70 % состоит из агглютинатов, брекчий и стекла, сформировавшихся под действием импактных процессов различных масштабов. Однако в основном лунный реголит развивается за счет подстилающих пород (Флоренский и др., 1981), при этом его средний химический состав по крайней мере в местах посадок космических аппаратов удивительно мало отличается от среднего состава пород (Николаева, 1995). Это и дает основание ставить задачу условного определения вида лунных пород по комбинации величин содержания Fe и Ti , найденных по данным оптических измерений.

Тысячи петрохимических анализов лунных образцов вместе с данными по их минералогии послужили основой для построения различных классификаций лунных пород. Например, в классификации Вуда (1975) породы Луны систематизированы на основе химического состава; информации об их структуре придается второстепенное значение.

Классификация лунных пород Богатикова и др. (1985) основана на анализе их химического состава и реальной минералогии. Она использует принципы систематики земных магматических пород. По

этой классификации среди отобранных образцов удалось выделить около 20 видов пород, часть из которых, правда, оказалась довольно редкими.

Параллельно с геохимической систематикой лунных пород выполнялись работы по оптической (спектральной) классификации. В работе Pieters (1978) дана классификация лунной поверхности по следующим оптическим параметрам: альбедо, колор-индекс, интенсивность полос поглощения в области 1 мкм и 2 мкм. Было выделено около 10 оптических типов лунных пород; некоторая их

часть не представлена в коллекции образцов, доставленных на Землю.

Попытка соединить химическую и оптическую классификации предпринималась в работе Евсюкова (1994); химическая диаграмма ($\text{FeO} + \text{TiO}_2$) – TiO_2 , построенная по данным для образцов лунных пород, была совмещена с оптической диаграммой $A(0.62 \text{ мкм}) - C(0.62/0.38 \text{ мкм})$, соответствующей видимому полушарию Луны, с помощью упомянутых калибровочных зависимостей между оптическими и химическими параметрами. Были выделены

Рис. 1. Фрагмент новой карты показателя цвета $C(0.65/0.42 \text{ мкм})$

ны «оптико-химические» кластеры, отвечающие отдельным видам пород, — 6 морских и 6 материальных.

Результаты такого анализа оказываются очень чувствительными к точности исходных данных. Недавно мы получили новые цифровые изображения видимого полушария Луны в параметрах $A(0.65 \text{ мкм})$ и $C(0.65/0.42 \text{ мкм})$. Их фотометрическая точность заметно выше, чем для карт Евсюкова (1973а, 1973б), которые использовались для выделения «оптико-химических» кластеров, поэтому было решено уточнить результаты и выводы работы Евсюкова (1994), используя новые наблюдательные данные, которые будут кратко описаны ниже.

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

Для построения цифровых фотометрических и колориметрических изображений Луны использовались фотографические данные, точность которых была существенно повышена с помощью компьютерной обработки, использующей данные прецизионных опорных каталогов.

Фотографические изображения Луны были получены на 60-см рефлекторе Цейса АФИ АН Казахстана 2 октября 1982 г., при угле фазы 6° . Использовались фотопластинки FP-1 ORWO (с фильтром KC-11) и WU-2 ORWO (с фильтрами CC-5 и CC-8). Эффективные длины волн составили 0.65 и 0.42 соответственно. Пространственное разрешение фотоснимков — около $2''$. Изображения вводились в ЭВМ с помощью автоматического сканирующего микрофотометра ГАО НАН Украины (Парусимов, 1981). Изображения представлены в формате 870×870 элементов при числе градаций около 2000. Размер элемента сканирования в угловой мере составлял примерно $2''$.

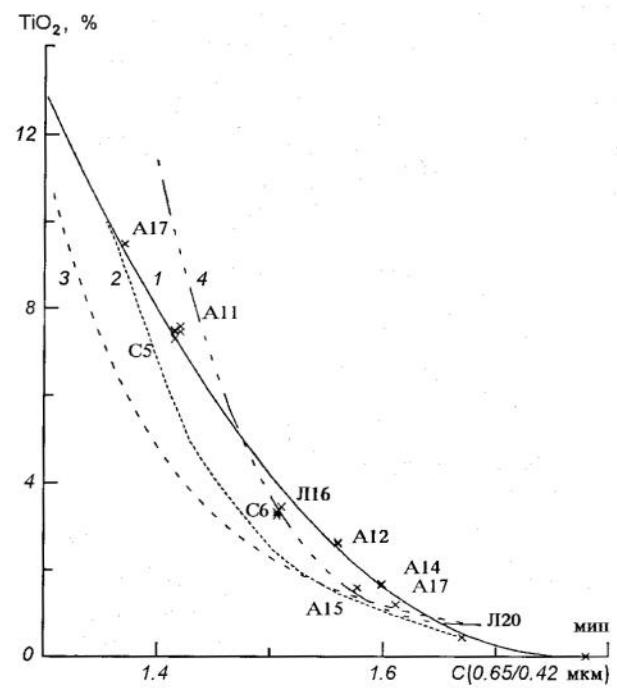
Характеристические кривые изображений строились по фотоэлектрическим данным, полученным Н. В. Опанасенко, на горе Майданак (Узбекистан) с помощью поляриметра ГАО НАН Украины (Shkuratov et al., 1992). Использовалось около 150 точек, равномерно распределенных по лунному диску. Характеристические кривые аппроксимировались полиномом четвертой степени, что позволило учесть их слабую нелинейность.

Для повышения точности данных был применен метод фотометрической коррекции изображений, описанный в работе Shkuratov, Opanasenko (1992). Изображения исправлялись с помощью опорной сети данных из фотоэлектрических каталогов (Акимов и др., 1986; Shkuratov et al., 1992). Эти

данные приводились к фотометрическим условиям на момент съемки Луны. При этом использовалась эмпирическая формула Акимова (1979), которая даже при больших фазовых углах описывает наблюдавшееся распределение яркости по лунному диску с относительной точностью не хуже первых процентов.

Для дальнейшего повышения точности фотографической фотометрии проводилось усреднение шести изображений в синей и пяти — в красной частях спектра. Применялся алгоритм усреднения, позволяющий эффективно отсеивать локальные дефекты фотографических изображений.

Хотя глобальный ход яркости лимба — терминатор при фазовом угле 6° мал, однако его устранение представляется желательным. Для корректировки использовалась упоминавшаяся формула Акимова. После этой коррекции отсчеты изображений переводились в шкалу альбедо с помощью каталога Акимова и др. (1986). Колориметрическое изображение получено в результате деления соответствующих альбедных изображений. Оно также корректировалось с помощью дискретных колориметрических данных (Shkuratov et al., 1992).



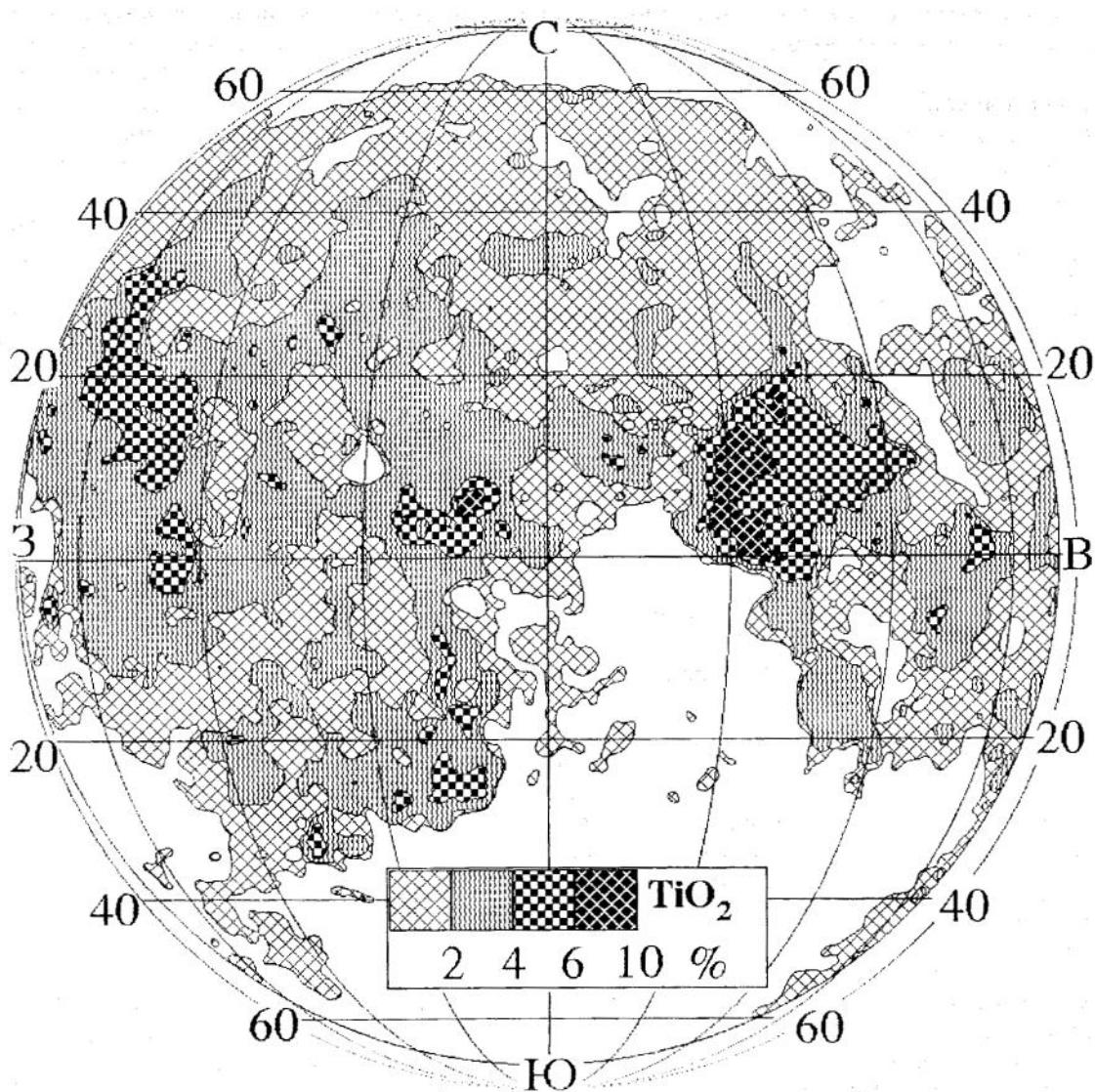


Рис. 3. Карта содержания в лунном грунте TiO_2 , построенная по калибровочной зависимости, описывающейся формулой (3)

В геометрической трансформации изображений к нулевой либрации и прямой ортографической проекции, использована билинейная интерполяция значений отсчетов.

Сравнение полученного файла колориметрических данных с независимыми спектрофотометрическими измерениями К. Питерса, Т. Маккорда и их коллег показало хорошую сходимость (подробно этот вопрос будет рассмотрен в другой работе).

Для иллюстрации на рис. 1 представлен фрагмент нашей новой карты показателя цвета Луны

$C(0.65/0.42 \text{ мкм})$. Этот фрагмент охватывает северо-западную часть лунного диска.

НОВЫЕ КАЛИБРОВКИ И КАРТЫ СОДЕРЖАНИЯ ТИТАНА И ЖЕЛЕЗА

Достоверность прогноза химического состава лунной поверхности зависит от статистической надежности калибровочных оптико-химических корреляционных зависимостей. Для построения таких за-

вистимостей мы использовали данные для мест посадок КА серии «Луна», «Аполлон» и «Сервейер». Значения альбедо и показателя цвета найдены по цифровым изображениям Опанасенко и др. (1996), а данные по среднему химическому составу взяты из нескольких работ (Кинг, 1979; Мейсон, Мелсон, 1973; Нава, Филпоттс, 1979; Финней и др., 1975; Taylor, 1972). В тех случаях, когда для одних и тех же мест посадок в разных источниках приводились отличающиеся значения параметров, мы использовали их как независимые. Сюда не включены данные для КА «Аполлон-16» (незрелый грунт (Charette et al., 1974)) и «Луна-24» (грунт, непредставительный для данного района (Ryder et al., 1977))

Собранныя информация использовалась для линейного регрессионного анализа, результаты которого приведены в таблице. Как и следовало ожидать по опыту предшествующих работ, среди всех комбинаций оптических и химических параметров наиболее высокие коэффициенты корреляции показывают пары $A(0.65 \text{ мкм}) - (\text{FeO} + \text{TiO}_2)$ и $C(0.65/0.42 \text{ мкм}) - \text{TiO}_2$. Рассмотрим эти зависимости подробнее.

На рис. 2 крестиками приведена экспериментальная зависимость содержания TiO_2 [%] от параметра $C(0.65/0.42 \text{ мкм})$. Как показывают измерения лунного грунта (Charette et al., 1974), при низком содержании титана функция $C(\text{TiO}_2 [\%])$ становится нелинейной (вообще для этой части кривой мало данных и использовать ее для целей прогноза затруднительно). При вычислении параметров кривой, наилучшим образом описывающей исследуемую зависимость (кривая I на рис. 2), мы сделали предположение, что материковые участки лунной поверхности, характеризующиеся наибольшим избытком красного цвета, имеют исчезающее малое содержание Ti. Уравнение этой кривой имеет вид

$$\text{TiO}_2 [\%] = 183.91 - 208.016C + 58.82C^2. \quad (3)$$

На рис. 2 представлены для сравнения аналогич-

ные калибровочные кривые других авторов; все данные приведены к нашей системе длин волн. Как видно, наблюдаются заметные отличия в ходе приведенных четырех кривых, что говорит о сравнительно невысокой точности использующихся калибровок. Наиболее близкой к нашим данным оказывается кривая, приведенная в работе Johnson et al. (1991).

Использование колориметрического цифрового изображения видимого полушария Луны и калибровочной зависимости (3) позволило нам построить карту распределения титана по лунной поверхности. В отличие от существующих карт такого рода (Johnson et al., 1977), мы рискнули дать прогноз содержания TiO_2 и на часть лунного материка, хотя большая его площадь из-за ненадежности калибровочной зависимости прогнозом не охвачена (рис. 3).

Обратимся теперь к исследованию зависимости $A(0.65 \text{ мкм}) - (\text{FeO} + \text{TiO}_2)$. Соответствующие экспериментальные данные и кривая, наилучшим образом описывающая их, приведены на рис. 4. Уравнение этой кривой имеет следующий вид:

$$\begin{aligned} & (\text{FeO} + \text{TiO}_2) [\%] = \\ & = 9.09 [3.6 - \sqrt{12.96 - 1.1(17 - A)}]. \end{aligned} \quad (4)$$

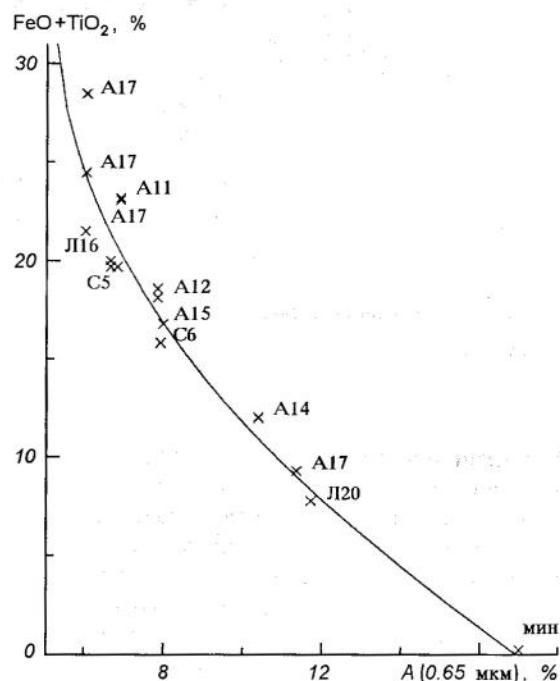


Рис. 4. Калибровочная зависимость содержания хромофорных элементов — $(\text{FeO} + \text{TiO}_2)$ от альбедо по данным для мест посадок (Л — «Луна», А — «Аполлон», С — «Сервейер»)

Значения коэффициентов корреляции для разных комбинаций оптических и химических характеристик

Параметры	TiO_2 , %	FeO , %	$\text{FeO} + \text{TiO}_2$, %
$A(0.65 \text{ мкм})$	-0.736	-0.892	-0.949
$C(0.65/0.42)$	-0.953	-0.690	-0.931
$C^*(0.65/0.42)$	-0.995	—	—
$A^*(0.65 \text{ мкм})$	—	—	-0.985

Примечание.

$$C^* = 183.91 - 208.016C + 58.82C^2;$$

$$A^* = 9.09 [3.6 - \sqrt{12.96 - 1.1(17 - A)}]$$

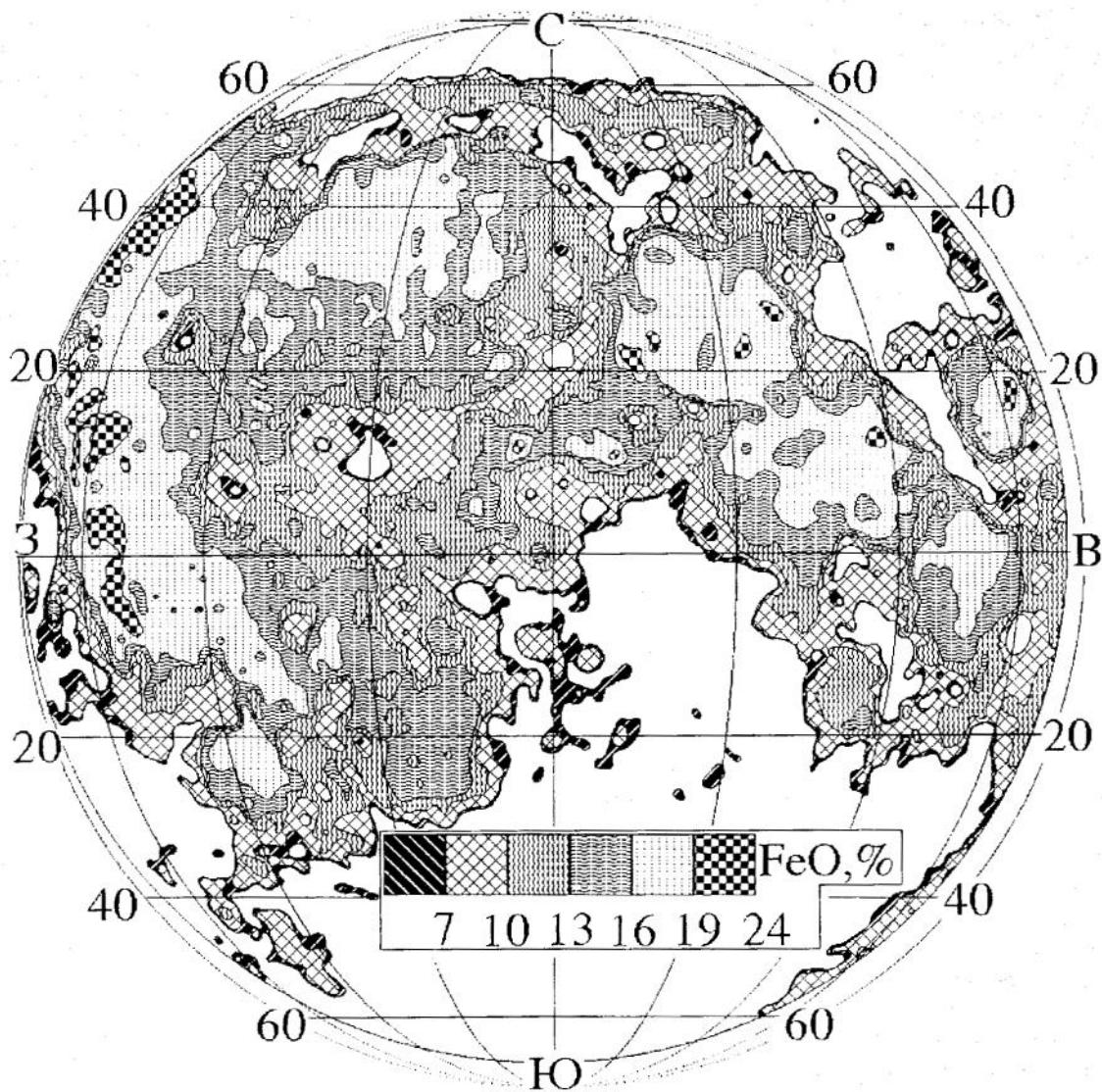


Рис. 5. Карта содержания в лунном грунте FeO, построенная по калибровочным зависимостям (3) и (4)

Мы предположили, что для материковых участков с достаточно высоким альбедо, но при этом покрытых зрелым реголитом, содержание железа мало и определяется лишь контаминацией метеоритным веществом (для железа это составляет примерно 0.3 % (Morris et al., 1978)). Границное альбедо, которому соответствует эта оценка, принято равным 17 %. В случае незрелого грунта для участков с альбедо выше 17 % зависимость (4) несправедлива.

Формальные коэффициенты корреляции, характеризующие разброс данных вблизи кривых, кото-

рые заданы уравнениями (3) и (4), приведены в нижней части таблицы; как видно, они довольно высокие.

По аналогии с предыдущим случаем альбедное цифровое изображение видимого полушария Луны и калибровочную зависимость (4) можно использовать для построения карты содержания суммы основных хромофоров — (Fe + Ti). Менее тривиальной задачей представляется определение содержания железа по данным о распределении Ti и суммы (Fe + + Ti). Соответствующая карта приведена на рис. 5.

Рассмотрение карты содержания TiO_2 показывает, что наибольшее количество титана содержит поверхность западной части Моря Спокойствия и участок южнее Залива Зноя. Напротив, окрестности кратеров Коперник, Кеплер, Лангрен, Птолемей показывают низкое содержание TiO_2 . Центральная часть Моря Ясности и отдельные детали Моря Дождей обнаруживают низкое содержание TiO_2 , характерное для материковых районов. Распределение железа по лунной поверхности в основном коррелирует с альбедо, хотя для участков с высоким содержанием Ti вид карты содержания FeO заметно зависит и от распределения показателя цвета. Примером может служить западная часть Моря Спокойствия (Kaydash et al., 1995). По нашим данным наибольшее содержание FeO прогнозируется для западной части Океана Бурь, Залива Зноя, а также восточной части Моря Спокойствия.

Сравнение результатов нашего картирования содержания железа в лунном грунте с аналогичными данными, полученными с использованием методики Lucey et al. (1995), показывает хорошую согласованность карт содержания FeO (Opanasenko et al., 1996). Некоторое расхождение в оценках про-

является для регионов с малым содержанием железа, так как для высокоальбидных районов калибровочная зависимость $A(0.65 \text{ мкм}) - (FeO + TiO_2)$ работает ненадежно.

КАРТА ВИДОВ МОРСКИХ ПОРОД

Евсюковым (1994) проанализированы 920 образцов пород из различных районов Луны и каждый отнесен к тому или иному виду по классификации Богатикова и др. (1985). Ниже эти данные привлекаются для петрологической интерпретации диаграммы альбедо—цвет ($A-C$) лунной поверхности, которую мы построили по новым фотометрическим и колориметрическим изображениям.

С помощью уравнений (3) и (4) данные для образцов лунных пород, разделенных по видам, отображались на диаграмме $A-C$. Большинство видов пород заняли в координатах A , C области, существенно выходящие за контур лунной диаграммы. К таким видам относятся, например, троктолит и шпинелевый троктолит, оливиновое высокоглиноземистое габбро, лейкогаббро (см. рис. 6) и

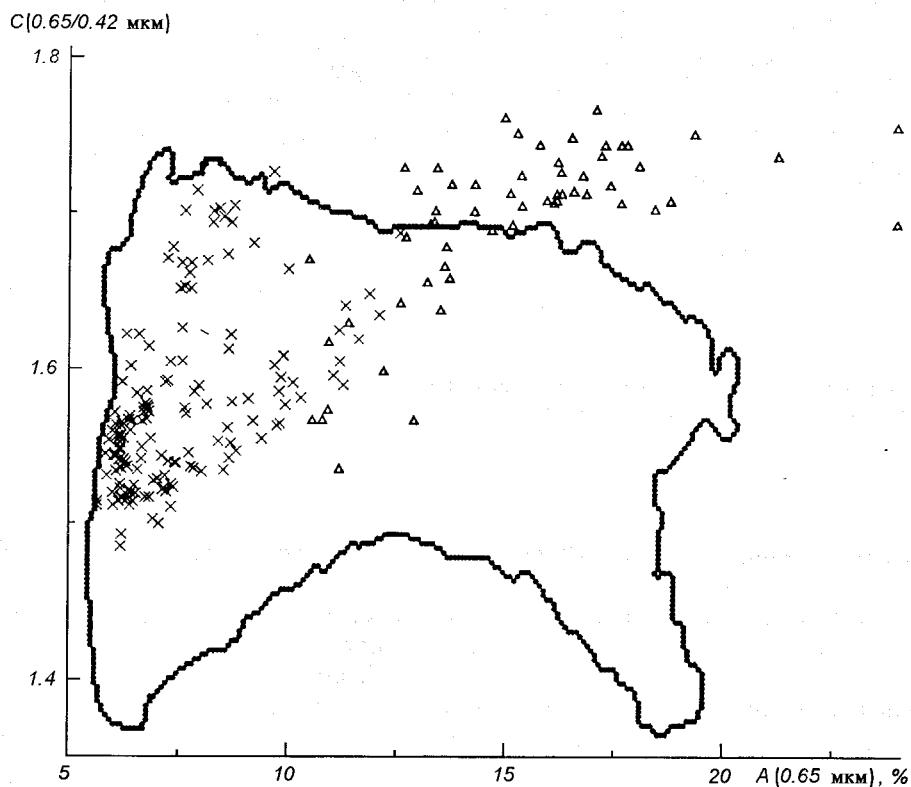


Рис. 6. Примеры отображения на лунной диаграмме альбедо—цвет некоторых типов пород, определенных по классификации Богатикова и др. (1985). Треугольники соответствуют лейкогаббро, крестики — оливиновым базальтам

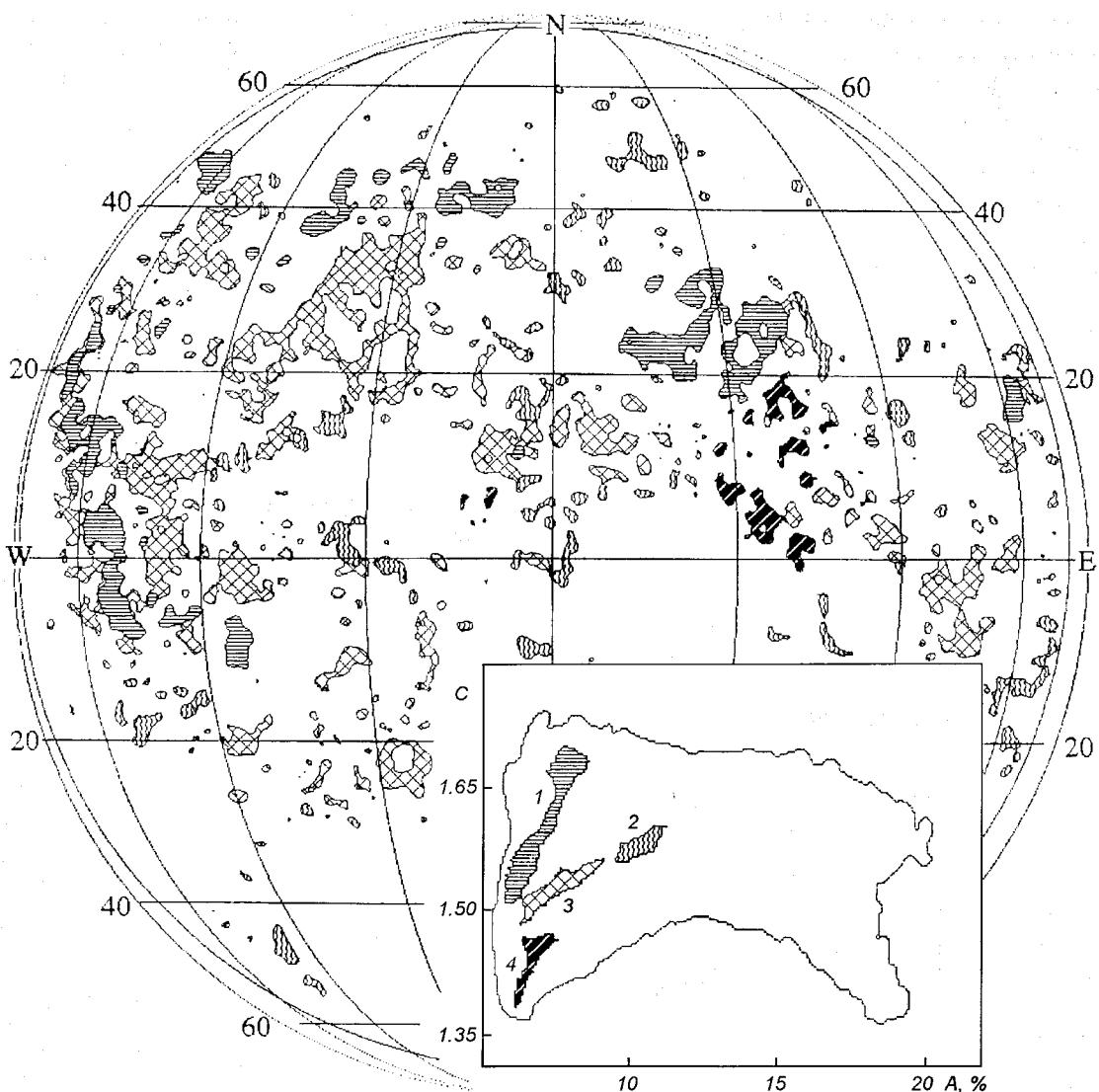


Рис. 7. Карта видов лунных пород и их положение на диаграмме альбено—цвет: 1 — оливиновый базальт; 2 — норит, оливиновый норит; 3 — лейкобазальт, лейкодолерит и оливиновый базальт; 4 — ильменитовый и ильменит—долеритовый базальт и долерит

т. д. Такое несоответствие вызвано существенно большим оптико-химическим разнообразием отдельных образцов лунных пород по сравнению с участками лунной поверхности размером несколько километров.

Уверенно попадают в пределы диаграммы $A-C$ данные для ильменитового и ильменит-оливинового базальта и долерита — пород с высоким содержанием двуокиси титана. На оптической диаграмме нашли отражение две ветви оливиновых базальтов (см. рис. 6), одна из которых характеризуется

большими вариациями показателя цвета при небольших изменениях альбено, а другая (наклонная в осиях A , C) накладывается на области лейкобазальта и лейкодолерита, а также норита.

Всего удалось надежно выделить на диаграмме $A-C$ четыре области, в которые хорошо попадают данные для некоторых видов пород (см. диаграмму на рис. 7). Первой области соответствуют оливиновые базальты; второй — норит, оливиновый норит; третьей — лейкобазальт, лейкодолерит, а также оливиновый базальт; четвертой — ильменитовый и

ильменит-оливиновый базальт и долерит. Как уже отмечалось, с помощью рассматриваемой методики, но по другим исходным данным, было получено соответствие между оптическими и химическими классами для заметно большего числа видов лунных пород (Евсюков, 1994). Это может объясняться тем, что вид диаграммы А—С довольно сильно зависит от характеристик исходных данных, например от пространственного разрешения использующихся изображений.

Выделив на оптической диаграмме зоны, занятые отдельными видами пород, можно провести условное петрологическое районирование лунной поверхности. Условность состоит в том, что, говоря о распространенности в данном районе того или иного вида пород, мы должны помнить, что большая часть материала поверхности представлена там агломератами и брекчиями, сформировавшимися за счет породы, и что лишь небольшой процент этой породы может быть найден в сравнительно неизменном виде.

На рис. 7 представлена карта видов лунных пород. Ильменитовые и ильменит-оливиновые базальты довольно компактно залегают в Море Спокойствия. Оливиновые базальты занимают большие площади в Море Ясности, западной части океана Бурь, а также в северной части Моря Дождей. Лейкобазальты и лейкодолериты встречаются в большинстве морских образований на поверхности Луны. Нориты, наименее обогащенные железом из рассмотренных четырех видов пород, распространены преимущественно на материковых участках лунного диска.

В заключение отметим, что рассмотренная методика прогноза состава лунных пород может использоваться при анализе данных съемки лунной поверхности, осуществленной КА «Клементина», или данных, которые будут получены в будущих космических миссиях к Луне.

Акимов Л. А. О распределении яркости по диску Луны и планет // Астрон. журн.—1979.—56.—С. 412—418.

Акимов Л. А., Латынина И. И., Олифер Н. С. Опорный каталог оптических характеристик выбранных участков лунной поверхности. — Харьков: ХГУ, 1986.—31 с.—(Деп. в УкрНИИТИ 18.11.86; № 2689).

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. Карта альбедо видимого полушария Луны. — Киев: Наук. думка, 1973а.

Евсюков Н. Н. Карта цвета видимого полушария Луны. — Киев: Наук. думка, 1973б.

Евсюков Н. Н. Связь оптических характеристик с химико-мине-

ралогическим составом лунных пород // Астрон. журн.—1974.—51.—С. 1316—1325.

Евсюков Н. Н. Надежность алгоритма дистанционного оптического анализа химического состава зрелых пород Луны // Астрон. вестн.—1994.—26, № 3.—С. 59—73.

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 // Космічна наука і технологія.—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 // Космічна наука і технологія.—1996.—2, № 1—2.—С. 16—23.

Николаева О. В. Земля для Луны — прошлое, Луна для Земли — будущее // Природа.—1995. № 10.—С. 13—25.

Парусимов В. Г. Автоматический цифровой двухкоординатный микротометр для ввода фотографических изображений в ЭВМ // Астрометрия и астрофизика.—1981.—Вып. 45.—С. 86—99.

Финней В., Уорнер Дж., Симмондс К. Типы лунных материковых 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. Альbedo Луны // Вест. Харьк. ун-та.—№ 232. Астрометрия и физика Солнечной системы.—1982.—Вып. 17.—С. 22—31.

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.

Charette M., Soderblom L., Adams J. et al. Age-color relationships in the lunar highland // Proc. Lunar Sci. Conf. 7th. — LPI Houston.—1976.—P. 2579—2592.

Fisher 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., 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.

Kaydash V. G., Shkuratov Yu. G., Stankevich D. G., et al. Mapping of the Fe content in lunar regolith by albedo and color-index measurements // Abstr. of papers subm. to 22nd Russian-American microsymposium, October 1995. — Moscow, 1995.—P. 27—29.

Lucey P., Blewett D., Johnson J. Lunar titanium content from UV-VIS measurements // Abstr. of papers subm. to 27th Lunar and Planetary Science Conf. — Houston, 1996.—P. 781.

Lucey P., Taylor G., Malaret E. Abundance and distribution of iron on the Moon // Science.—1995.—268.—P. 1150—1153.

Morris R. Origin and evolution of the grain-size dependence of concentration of fine-grained metal in lunar soils: The maturation of lunar soils to steady-state stage // Proc. Lunar

- Planet. Sci. Conf. 9th. — LPI Houston.—1978.—P. 2287—2297.
- Opanasenko N. V., Shkuratov Yu. G., Kaydash V. G. Estimations of iron content in lunar regolith by measurements of spectral slope in $0.95 \mu\text{m}$ absorption band // Abstr. of papers subm. to 24nd Russian-American microsymposium, October 1996. — Moscow, 1996.—P. 70—71.
- Pieters C. A summary of spectral reflectance data // Proc. Lunar Sci. Conf. 9 th. — LPI Houston.—1978.—P. 2825—2849.
- Pieters C., McCord T. Characterization of lunar mare basalt types // Proc. Lunar Sci. Conf. 7th. — LPI Houston.—1976.—P. 2677—2690.
- 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. Polarimetric and photometric properties of the Moon: telescope observation and laboratory simulation. 2 // Icarus.—1992.—99.—P. 468—484.
- Shkuratov Yu. G., Opanasenko N. V., Kreslavsky M. A. Polarimetric and photometric properties of the Moon: telescope observation and laboratory simulation. 1 // Icarus.—1992.—95.—P. 282—299.
- Taylor S. Lunar science: Post Apollo Era. — N. Y., 1972.—370 p.

A POSSIBILITY OF PROGNOSTICATING THE LUNAR SURFACE COMPOSITION PREDICTION FROM OPTICAL MEASUREMENT DATA

*Yu. G. Shkuratov, V. G. Kaidash, N. V. Opanasenko,
D. G. Stankevich, N. N. Esvyukov, and V. G. Parusimov*

Maps of rock-forming oxides (TiO_2 and FeO) were drawn for the Moon's visible side. For this purpose we used new albedo ($0.65 \mu\text{m}$) and color-index ($0.65 / 0.42 \mu\text{m}$) distribution data and new calibration relationships between these optical parameters and the content of chromophore elements (iron and titanium). Comparison of the lunar albedo-color diagram with the chemical diagram for lunar rocks presented in the albedo-color axes allowed us to outline four clusters in the lunar diagram which correspond to some lunar rock types. For example, one of the clusters corresponds to the region formed by ilmenite and ilmenite-olivine basalts. This data allowed us to map the distribution of some lunar rock types corresponding to the classification of Bogatikov et al. (1985). Such a method of composition prediction may be applied to the analysis of the data obtained in the «Clementine» survey of the lunar surface.