

УДК 523.3

Ю. Г. Шкуратов<sup>1, 2</sup>, В. В. Омельченко<sup>1</sup>, Д. Г. Станкевич<sup>1</sup>,  
В. Г. Кайдаш<sup>1</sup>, К. Питерс<sup>3</sup>, П. Пине<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Харківський національний університет ім. В. Н. Каразіна, Харків

<sup>2</sup>Радіоастрономічний інститут НАН України, Харків

<sup>3</sup>Університет Брауна, Провіденс, США

<sup>4</sup>Університет П. Сабатье, Тулуса, Франція

## Прогноз состава лунной поверхности по данным КА «Клементина» и результатам лабораторных исследований лунного грунта

*Надійшла до редакції 30.01.03*

Предложен метод дистанционного определения состава лунной поверхности, основанный на спектрофотометрических и химико-минералогических данных, которые были получены Lunar Soil Characterization Consortium для нескольких размерных фракций образцов лунного грунта из всех мест посадок КК Аполлон. С использованием фотометрических мозаик Луны километрового разрешения, созданных Геологической службой США для пяти длин волн, с помощью этого метода построены карты прогноза содержания основных породообразующих окислов ( $\text{SiO}_2$ ,  $\text{FeO}$ ,  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), минералов (пироксена, оливина, плагиоклаза и ильменита), а также степени зрелости ( $I_s / \text{FeO}$ ) и характерного размера частиц. Анализ карт показывает, в частности, что реголит молодых морских кратеров характеризуется высоким содержанием пироксена, большим размером частиц и низкой степенью зрелости.

### ВВЕДЕНИЕ

Спектрофотометрия является мощным дистанционным методом исследования поверхностей безатмосферных тел Солнечной системы. Спектральные измерения дают информацию о первых нескольких миллиметрах лунной поверхности. Спектральная оптическая съемка пока обеспечивает наивысшее пространственное разрешение по сравнению с другими методами дистанционного зондирования, что важно для геологических исследований Луны.

После долгого перерыва в изучении Луны космическими средствами в начале 1990-х гг. космический эксперимент «Галилео» дал новый импульс комплексным исследованиям лунной поверхности, проведя спектральную съемку западного лимба Луны и части обратной стороны в пяти узких спектральных полосах [3]. Анализ данных КА «Галилео» выявил аномалии состава лунной поверхно-

сти в бассейне Южный полюс — кратер Эйткен. Это дало основание предположить, что удар, образовавший этот крупнейший бассейн, извлек темный материал нижней коры или мантии [5]. Данные КА Галилео также позволили исследовать криптомуоры — регионы, содержащие древние базальты, которые скрыты ударными выбросами другого материала [5].

В 1994 г. был запущен КА «Клементина», который с помощью камеры UVVIS провел пятицветную спектральную съемку лунной поверхности с высоким пространственным разрешением, покрыв более чем 90 % лунной поверхности [11]. Данные КА «Клементина» позволили значительно продвинуться в понимании истории и эволюционных процессов лунной поверхности [7, 8, 14, 16]. Данные КА «Клементина» в сочетании с наземными наблюдениями и лабораторными измерениями образцов лунного грунта позволили продолжить разработку методов дистанционной оценки химического соста-

ва лунной поверхности. Широко применяемый в настоящее время подход для оценки содержания  $\text{TiO}_2$  и  $\text{FeO}$ , а также степени зрелости лунной поверхности был сравнительно недавно предложен Люси и др. [7, 8]. Однако продолжаются попытки найти другие более надежные алгоритмы предсказания [15, 21]. В частности, детальный химико-минералогический и спектральный анализ образцов лунного грунта, проведенный Lunar Sample Characterization Consortium (LSCC) [22], предоставил уникальную возможность такого рода.

Настоящая статья является развитием нашей работы [15]. В ней представлена новая методика дистанционного определения состава лунной поверхности по данным камеры UVVis KA «Клементина» и данным LSCC; также приведены карты прогноза химико-минералогического состава для одного участка лунной поверхности и дано их описание.

#### ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ И ИХ АНАЛИЗ

Мы использовали изученные LSCC образцы лунного морского грунта, доставленного КК «Аполлон-11, -12, -15 и -17» [22]. Материковый реголит представлен образцами «Аполлон»-14 и «Аполлон-16». В исследования LSCC включены образцы лунного грунта, отобранные так, чтобы представлять различные типы реголитов, имеющих разную степень зрелости. Спектральные и химико-минералогические измерения каждого образца были проведены для трех размерных фракций: менее 10 мкм, 10—20 мкм и 20—45 мкм. В общей сложности использовались данные по 42 фракциям образцов. Следует отметить, что реголит с размером частиц менее 45 мкм является оптически доминирующим материалом лунной поверхности [13], поэтому фракции лунного грунта с более крупными частицами не были включены в анализ. В этой работе мы ограничились анализом 10 вещественных характеристик: содержание  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{FeO}$ ,  $\text{SiO}_2$  и  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (химический состав), содержание пироксена, оливина, ильменита, плагиоклаза (минералогический состав), степень зрелости ( $I_s/\text{FeO}$ ) и характерный размер  $d$  частиц. Измерения отражательной способности образцов реголита, имитирующие наблюдения Луны при фазовом угле 30°, были проведены с помощью прибора RELAB (Университет Брауна, США) в спектральном диапазоне  $\lambda\lambda$  300—2600 нм. Затем эти данные были свернуты с кривыми пропускания фильтров и кривой чувствительности ПЗС-камеры UVVis KA «Клементина»; использовались все пять спектральных каналов камеры ( $\lambda\lambda$  415, 750, 900, 950, 1000 нм).

Главным в нашем подходе является поиск статистических взаимосвязей, которые дают наиболее высокие коэффициенты корреляции между двумя типами данных. Первый тип — это различные комбинации оптических параметров. Второй тип — это состав лунного грунта по данным лабораторных измерений, приведенным в спектральную систему камеры UVVis KA «Клементина». Мы выбрали следующий набор оптических параметров:

$$\begin{aligned} A_R &= A(750 \text{ нм}), \\ C_{br} &= A(415 \text{ нм})/A(750 \text{ нм}), \\ C_{IR1} &= A(900 \text{ нм})/A(750 \text{ нм}) \\ C_{IR2} &= A(950 \text{ нм})/A(750 \text{ нм}), \\ C_{IR3} &= A(1000 \text{ нм})/A(750 \text{ нм}) \end{aligned}$$

и глубина полосы

$$D = A(750 \text{ нм})A(1000 \text{ нм}) / [A(900 \text{ нм})]^2.$$

Выбор альбедо  $A_R$  и колор-индексов  $C_{br}$ ,  $C_{IR1}$ ,  $C_{IR2}$ ,  $C_{IR3}$  вполне понятен; эти параметры давно используются для лунной спектрофотометрии. Менее очевиден параметр  $D$ . В первом приближении он характеризует глубину пироксеновой полосы. Картирование этого параметра по данным KA «Клементина» оказалось полезным для поиска регионов с неморским лунным вулканализмом [17]. Набор оптических параметров, которые мы используем, не является единственным возможным, однако это обстоятельство не сильно влияет на результаты [12]. Для получения высоких коэффициентов корреляции хорошо подошло уравнение

$$\lg P = aA_R + bC_{br} + cC_{IR1} + hC_{IR2} + fC_{IR3} + eD + g, \quad (1)$$

где  $P$  — изучаемый параметр,  $a, b, c, h, f, e, g$  — коэффициенты, которые находятся методом наименьших квадратов по набору лабораторных образцов. Эти коэффициенты представлены в табл. 1. Здесь же даны коэффициенты корреляции  $k$ , которые характеризуют взаимосвязи между предсказанными и измеренными значениями исследуемых параметров. Во всех случаях коэффициенты корреляции достаточно велики, что говорит о надежности предложенного подхода.

Результатом наших исследований являются карты прогноза распределений химико-минералогического состава лунной поверхности и других характеристик. В качестве исходных данных для прогнозирования мы использовали спектральные мозаики с разрешением 1 км, составленные Геологической службой США на основе изображений высокого разрешения, полученных камерой UVVis KA «Кле-

ментина». Эти мозаики покрывают примерно 75 % площади лунной поверхности. Мы исследуем район северо-западной части лунного диска, который охватывает большую часть Океана Бурь (рис. 1).

### ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ

Связь между содержанием  $TiO_2$  в лунном морском грунте и наклоном непрерывного спектра в видимом диапазоне была впервые надежно установлена в работе [4]. Были предложены различные объяснения этой эмпирической закономерности, в частности Ю. Г. Шкуратовым [2], но до полного понимания природы этой взаимосвязи еще далеко. Используя формулу (1) с соответствующими коэффициентами из табл. 1 и данные КА «Клементина», мы оценили распределение содержания  $TiO_2$  по лунной поверхности.

Результат показан на рис. 2. Качественно это распределение очень похоже на то, что опубликовано в работах [7, 21]. По нашим данным содержание  $TiO_2$  варьирует в пределах 0.1–12 %, что выглядит вполне правдоподобно. На изображении различаются границы некоторых морских участков; это говорит о вариациях состава лавовых потоков, излившихся из разных источников.

Железо — очень важный пордообразующий элемент. Он входит в состав нескольких важнейших минералов и существенно влияет на альбедо лунной поверхности. В ближней ИК-области ион двухвалентного железа имеет полосы поглощения, соответствующие пироксену и оливину. В частности, в спектре альбедо Луны хорошо видна полоса поглощения  $Fe^{2+}$ , находящаяся вблизи 1 мкм. Следовательно, можно ожидать корреляцию альбедо и колор-индексов вблизи 1 мкм с содержанием FeO.

Результаты нашего прогноза FeO приведены на рис. 3. Как можно было ожидать, содержание железа в материковом материале значительно ни-

же, чем в морском. Вариации FeO в морях менее заметны, чем в случае титана. Отметим схожесть изображений, отвечающих распределениям FeO и  $TiO_2$ . Отчасти это может быть связано с тем, что оба окисла, входя в состав ильменита (наиболее темного лунного минерала), варьируют одновременно при изменениях содержания ильменита в лунном грунте.

Отметим еще одну интересную особенность распределений FeO и  $TiO_2$ . На них почти не выделяются большинство небольших молодых кратеров, имеющих высокое альбедо. Этого следовало ожидать, поскольку высокое альбедо молодых кратеров обусловлено в основном наличием незрелого грунта, а не аномалиями состава. Однако не все молодые кратеры исчезают на описываемых изображениях. Наиболее крупные из них хорошо заметны, например кратер Аристарх. Отличие таких кратеров от окружающих морских областей указывает на то, что в ходе кратерообразующего события из глубины был извлечен материковый материал с низким содержанием железа и титана.

Мы также построили распределение содержания  $Al_2O_3$ . Алюминий не хромофорный элемент (т. е. сам по себе  $Al_2O_3$  не проявляется спектрально), но он сильно антикоррелирует с содержанием такого хромофора, как железо [15]. Таким образом, содержание  $Al_2O_3$  может быть сравнительно надежно оценено по оптическим измерениям. Распределение  $Al_2O_3$  представлено на рис. 4. Хорошо видно, что этот параметр действительно связан обратной зависимостью с содержанием FeO: чем больше количество  $Al_2O_3$  (материковый материал), тем ниже содержание FeO.

На рис. 5 представлено распределение основного пордообразующего окисла  $SiO_2$ . Он также не является хромофором; его картографирование по оптическим измерениям возможно благодаря косвенным корреляциям, когда формальная взаимозависимость  $SiO_2$  и оптических параметров генерируется, с одной

Таблица 1. Коэффициенты уравнения (1) и коэффициенты корреляции  $k$  для рассматриваемых параметров лунного грунта (альбедо в процентах)

Параметр	a	b	c	d	e	f	g	k
Содержание $TiO_2$	-0.045	2.114	61.522	-29.290	-9.528	14.793	-37.988	0.87
Содержание FeO	-0.023	0.349	24.664	-15.632	-1.233	5.190	-11.968	0.86
Содержание $SiO_2$	0.0018	-0.214	-2.091	-0.554	1.597	-0.736	3.511	0.87
Содержание $Al_2O_3$	0.014	-0.119	-16.289	9.812	1.476	-3.378	9.498	0.86
Содержание ильменита	-0.049	3.273	75.175	-31.233	-16.225	18.239	-47.110	0.8
Содержание оливина	-0.031	3.284	12.939	-7.416	-0.226	4.690	-11.405	0.74
Содержание пироксена	-0.023	0.079	16.771	-19.487	4.959	1.666	-2.782	0.83
Содержание плагиоклаза	0.016	0.861	-6.888	7.360	-1.527	-0.322	1.972	0.71
$I_s/FeO$	-0.013	-2.466	-35.496	17.736	5.303	-10.710	26.712	0.87
$d$	-0.025	2.081	-35.245	18.137	3.931	-7.031	20.836	0.75

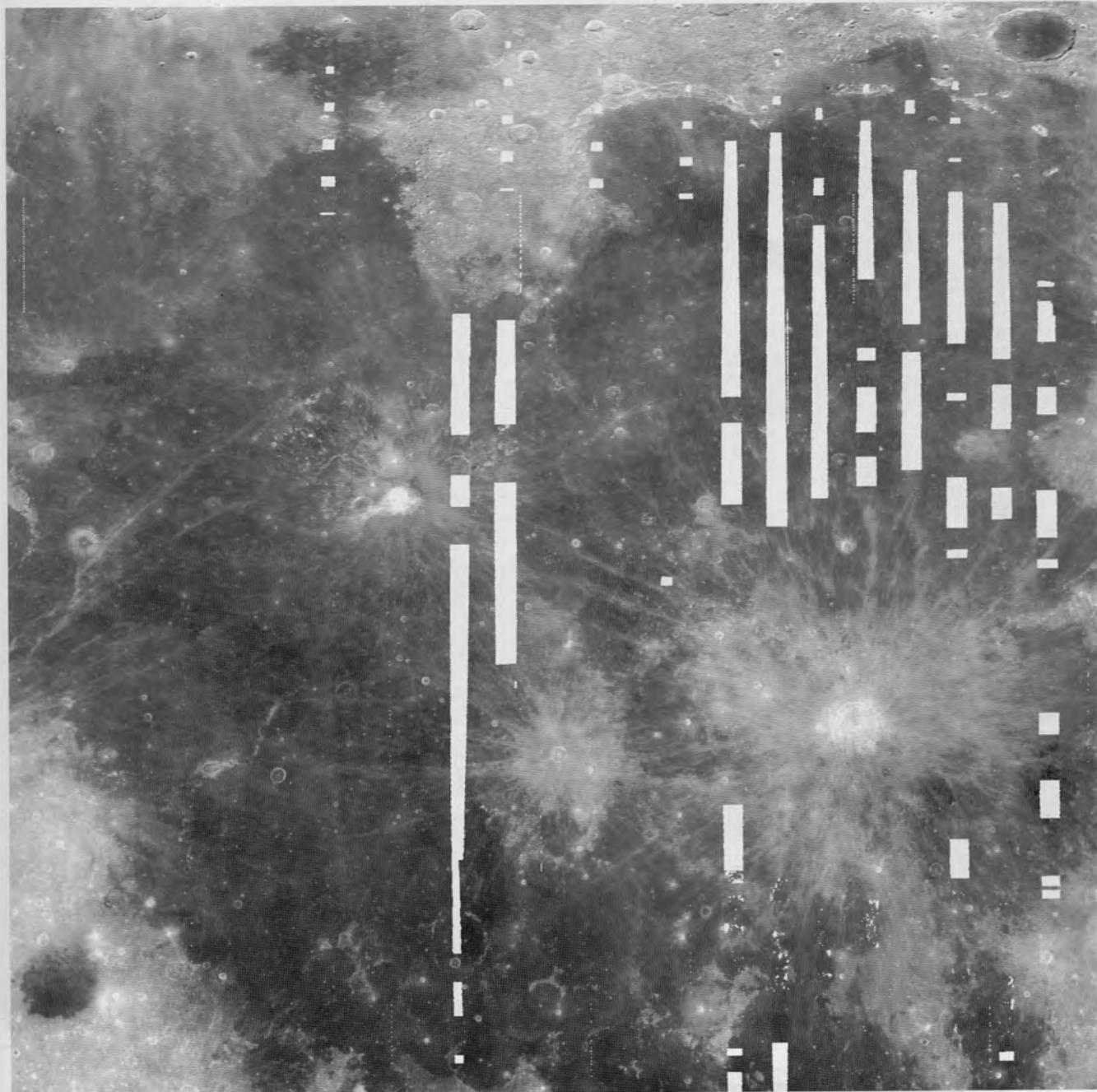


Рис. 1. Северо-западная часть видимого полушария Луны по данным КА «Клементина». Темные и светлые вертикальные полосы соответствуют районам, для которых отсутствуют данные

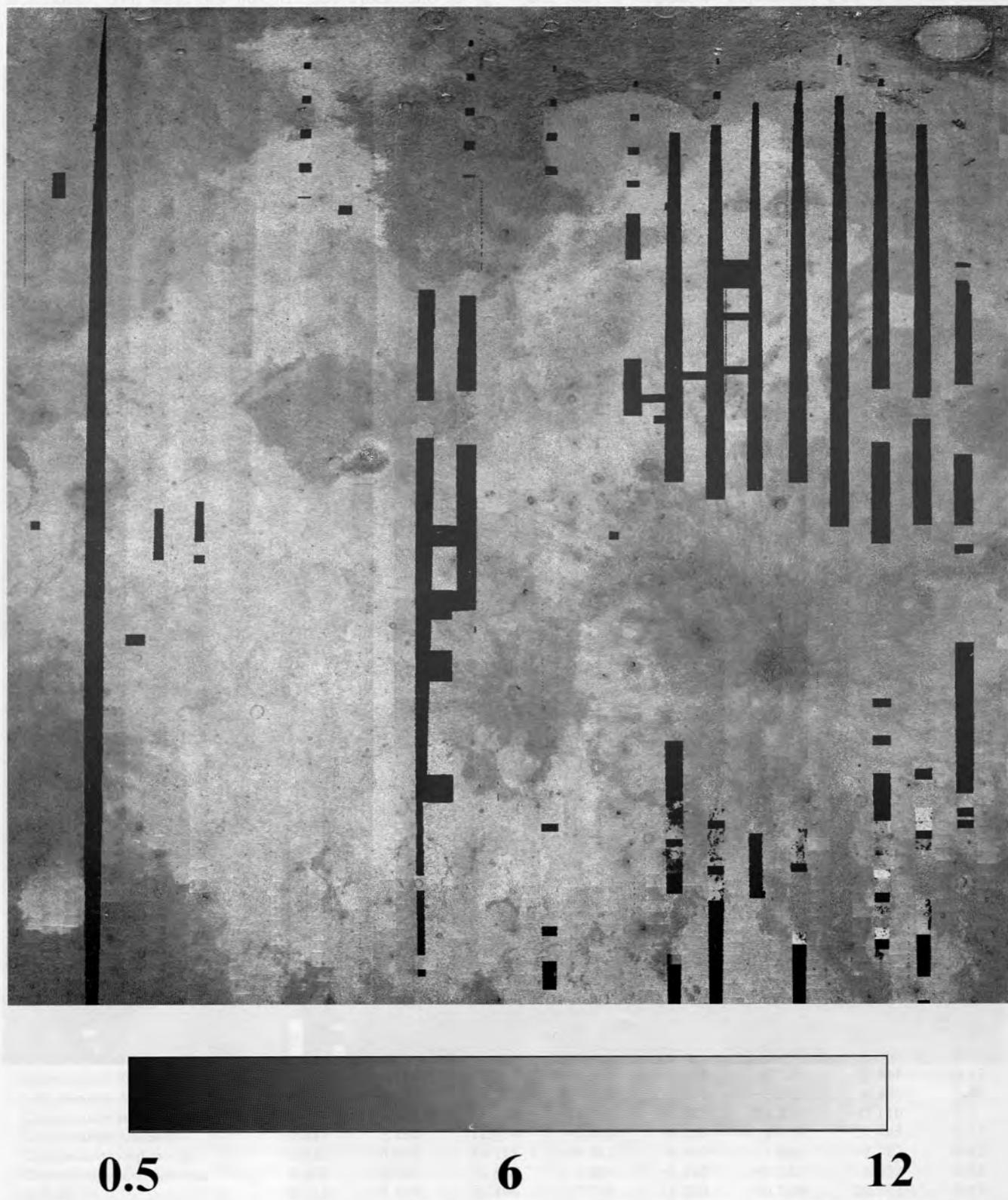
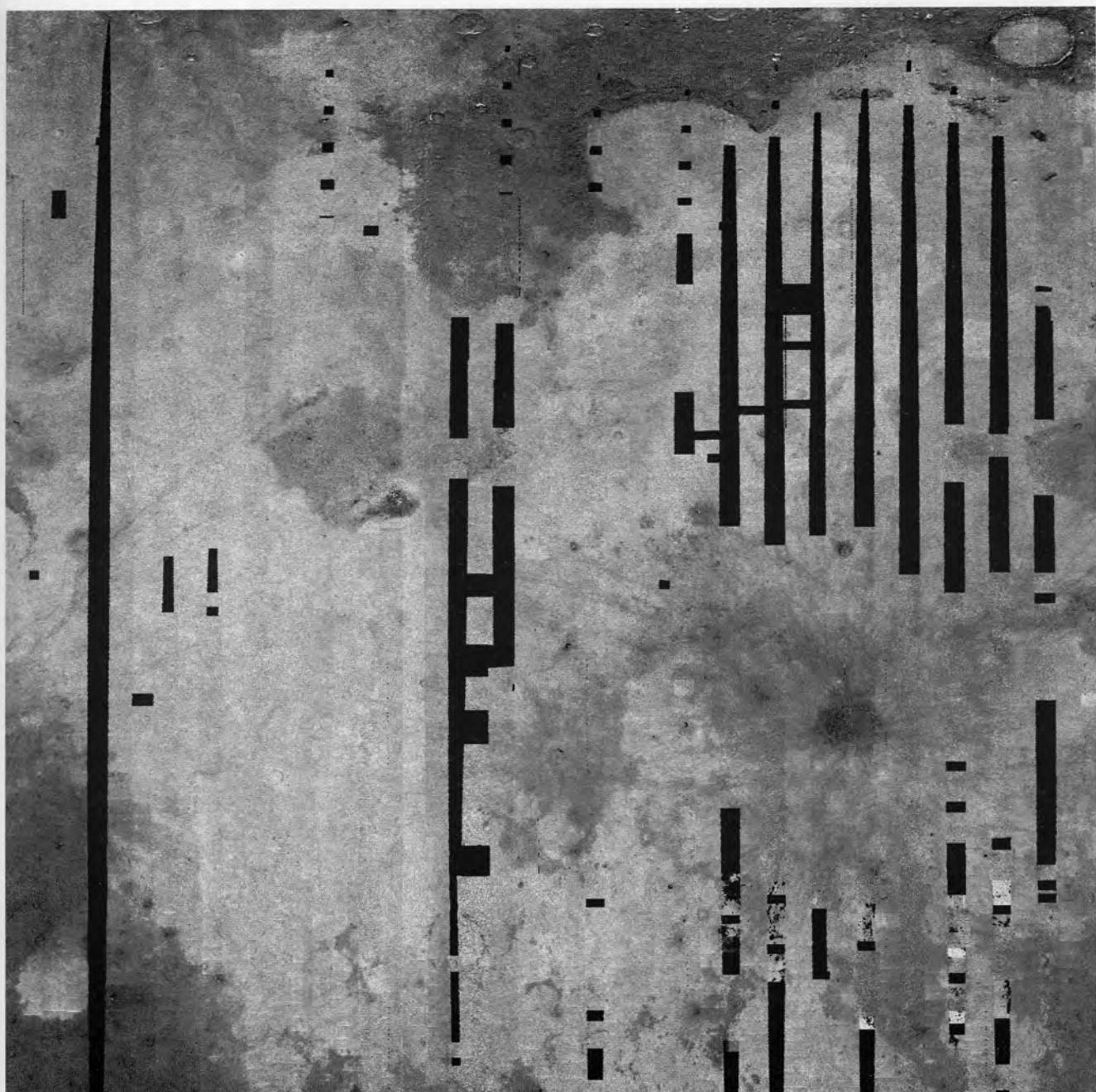


Рис. 2. Карта прогноза распределения  $\text{TiO}_2$ , %



5

13.5

22

Рис. 3. Карта прогноза распределения  $\text{FeO}$ , %

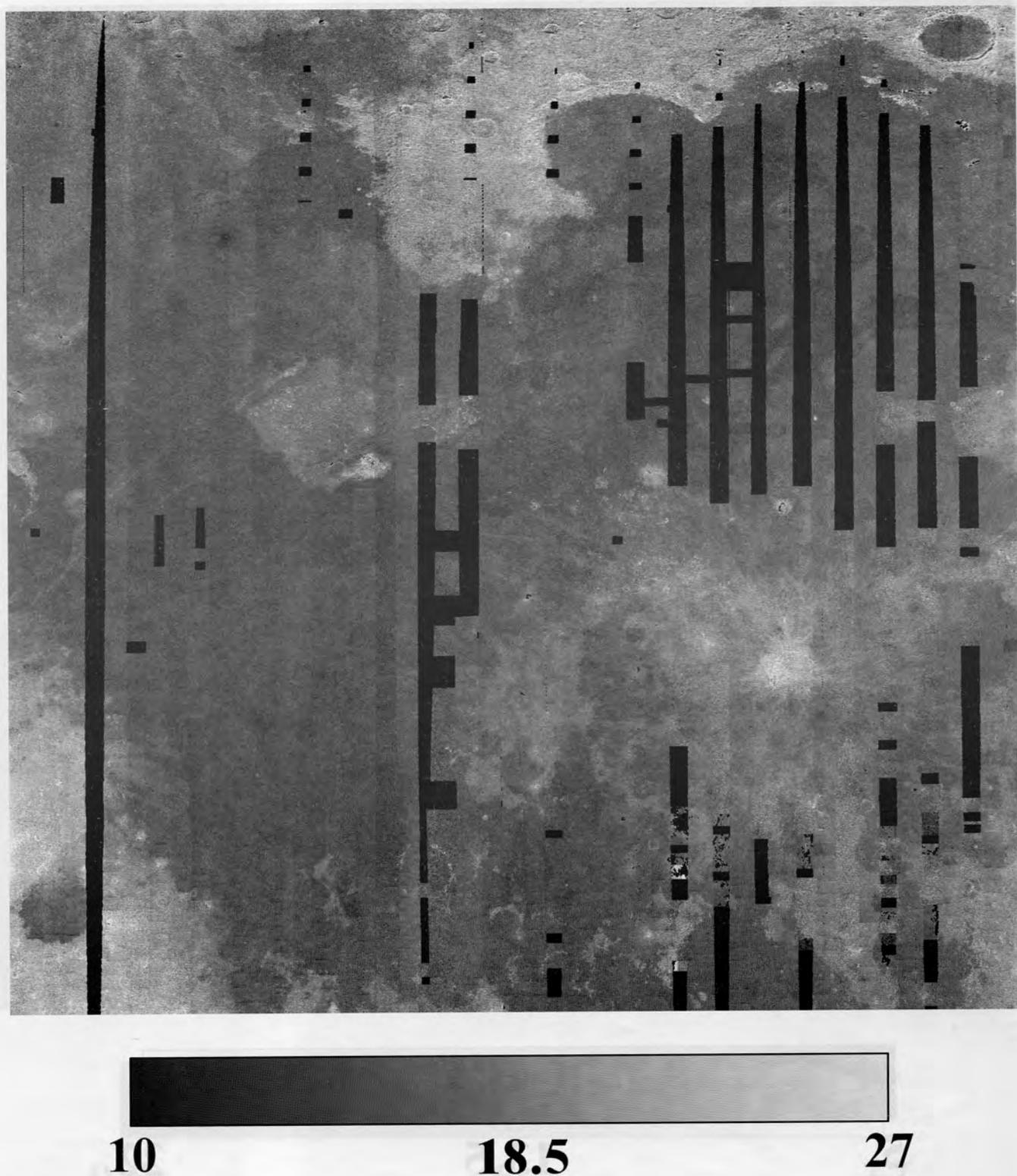
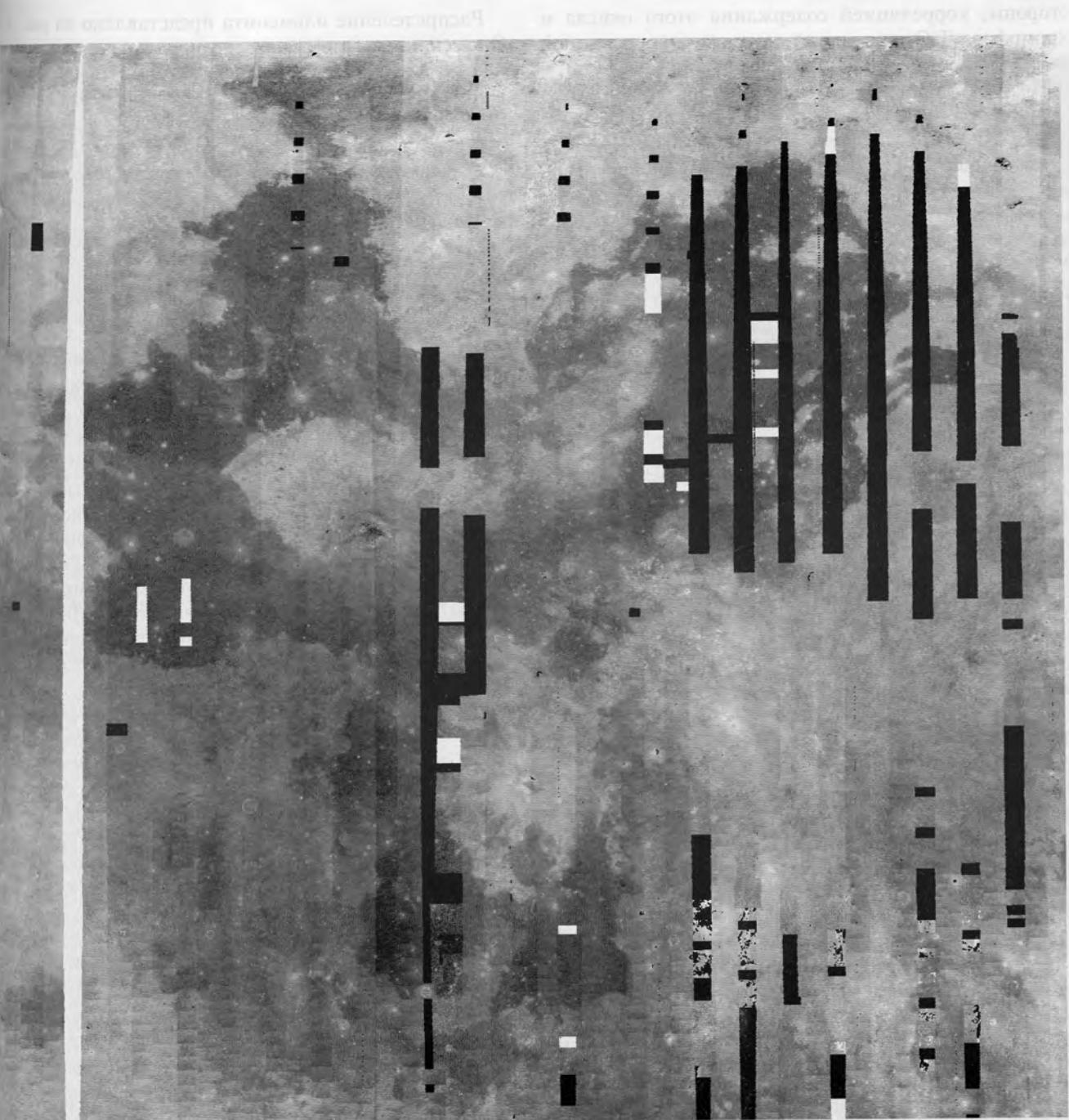


Рис. 4. Карта прогноза распределения Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, %

**38****43****48**Рис. 5. Карта прогноза распределения  $\text{SiO}_2$ , %

стороны, корреляцией содержания этого окисла и хромофора  $TiO_2$ , а с другой стороны — корреляцией этого хромофора и оптических параметров.

По данным карты прогноза распределения  $SiO_2$  его вариации лежат в узких пределах от 38 % до 47 %. Наиболее выражены вариации  $SiO_2$  в морских районах. Лавы в северной части Океана Бурь и западной части Моря Дождей являются ультраосновными. Материковый материал имеет более кислый состав, особенно районы к северо-западу от Моря Дождей. Отметим исчезновение границы море-материк в некоторых местах. Так, Залив Радуги слился с материком, хотя по распределению других параметров этого не происходит.

### МИНЕРАЛОГИЧЕСКИЙ СОСТАВ

На рис. 6 показано распределение пироксена, полученное при помощи формулы (1). Среднее значение содержания пироксена для рассматриваемого региона — 12.5 %. Вариации содержания пироксена от 3 % до 20 % выглядят вполне приемлемо. Региональное распределение пироксена похоже на распределение железа. Это объясняется тем, что пироксен содержит довольно много железа и именно благодаря этому проявляется спектрально в области полосы поглощения  $\lambda = 1 \text{ мкм}$ .

Карта распределения пироксена показывает, что молодые морские кратеры, например кратер Аристарх, имеют более высокое содержание этого минерала в материале валов и зон выбросов, чем окружающие области. Это объясняется различиями возраста: свежий кристаллический материал кратеров не успел перейти в агглютинаты за счет микрометеоритной переработки, тогда как для соседних морских областей это произошло.

Представляется интересным прогноз распределения оливина по лунной поверхности. Рис. 7 показывает, что морской регион содержит множество сравнительно небольших участков, различающихся содержанием оливина, а граница море/материк имеет довольно низкий контраст. Обращает на себя внимание то, что среднее прогнозируемое значение содержания оливина составляет всего около 2.5 %; это кажется слишком малым. Однако если проанализировать имеющиеся в нашем распоряжении данные по лунным образцам, то это содержание окажется типичным. Таким образом, возможно, по оливину используемый нами набор данных оказывается не представительным. Тем не менее, можно надеяться, что, по крайней мере качественно, прогнозируемое распределение оливина соответствует действительному.

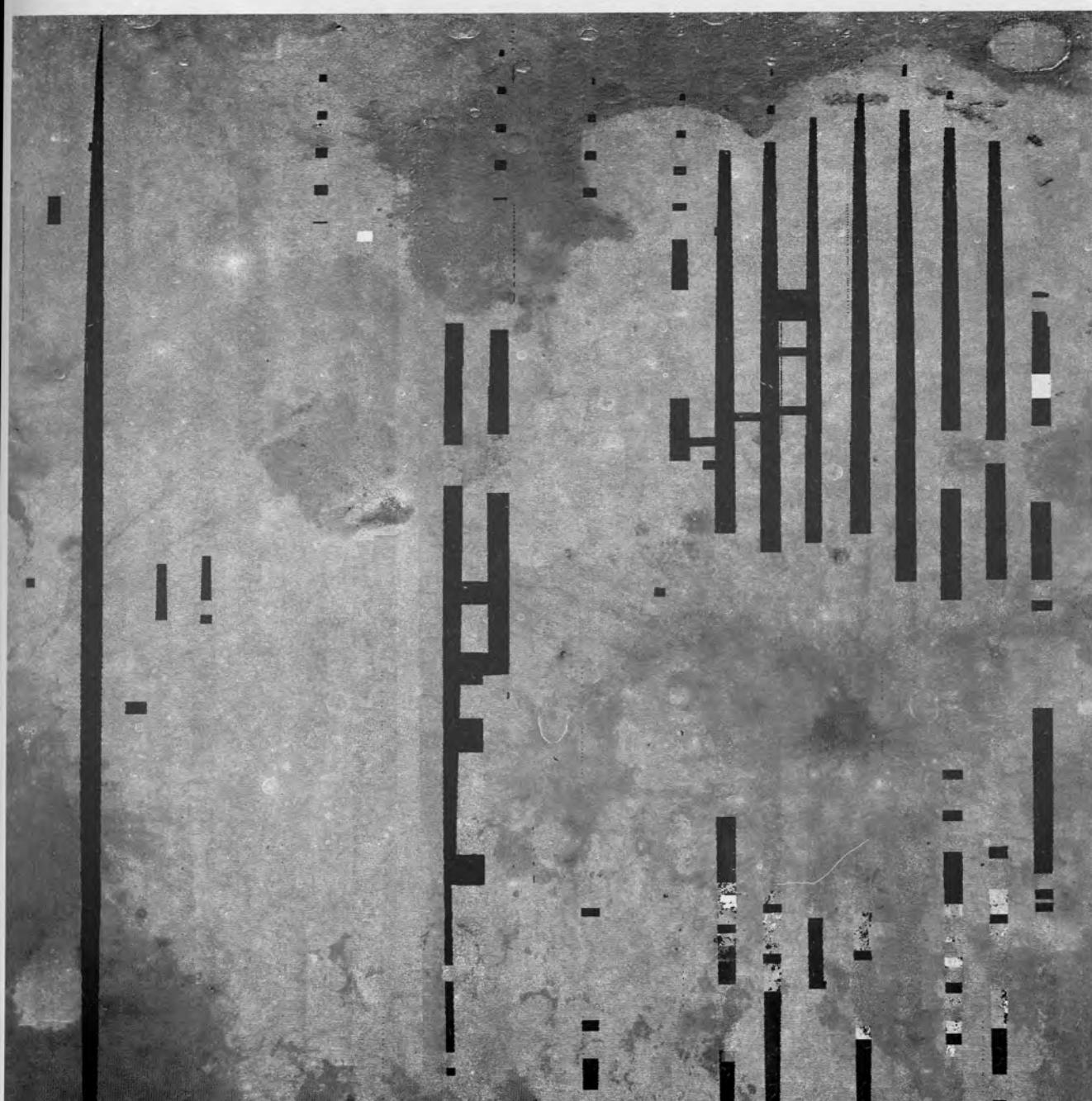
Распределение ильменита представлено на рис. 8. Оно сильно напоминает распределение основных хромофорных окислов  $TiO_2$  и  $FeO$ , что не удивительно, поскольку химическая формула ильменита  $FeTiO_3$ . Среднее содержание ильменита около 10 % выглядит приемлемо. Распределение плагиоклаза (рис. 9), как и следовало ожидать, очень сильно коррелирует с альбено — в материковом материале содержание плагиоклаза значительно выше, чем в морском.

### ЗРЕЛОСТЬ И РАЗМЕР ЧАСТИЦ

Есть различные определения степени зрелости лунного грунта, см., например [8]. Здесь мы используем степень зрелости, определенную как  $I_s/FeO$ , которая была введена и изучалась в работе [6]. Эта характеристика представляет отношение содержания нанофазного металлического железа  $I_s$ , измеренного методом ферромагнитного резонанса, к содержанию оксида железа в образце. Зерна нанофазного железа могут формироваться несколькими процессами: восстановление водородом (его источником являются протоны солнечного ветра), селективным распылением атомов кислорода частицами солнечного ветра и селективной конденсацией продуктов испарения (железа) при микрометеоритной бомбардировке [10]. Метод ферромагнитного резонанса способен обнаруживать металлические вкрапления с размером более 4 нм, но менее чем 30 нм [10]. Отметим также метод рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии [1], который широко применялся для исследований нанофазного железа в образцах лунного реголита, доставленного в ходе американских и советских космических миссий к Луне.

Количество  $FeO$  пропорционально объему частицы. Если  $I_s$  строго пропорционально площади поверхности частицы, то величина  $I_s/FeO$  будет обратно пропорциональна среднему размеру частиц реголита. В работе [10] найдено, что это справедливо для незрелого грунта. Для зрелого грунта такой зависимости практически нет; это подразумевает, что нанофазное железо распределено в основном в объеме частицы.

Исследования лунного грунта LSCC сделали возможным существенно улучшить предсказание параметра  $I_s/FeO$ . На рис. 10 показано распределение величины  $I_s/FeO$ , полученное с помощью формулы (1). Молодые морские кратеры (их выбросы и валы) имеют низкую степень зрелости. Формация Reiner-γ (свирль) также является примером области с очень незрелым грунтом (в среднем величина



5

15

25

Рис. 6. Карта прогноза распределения пироксена, %

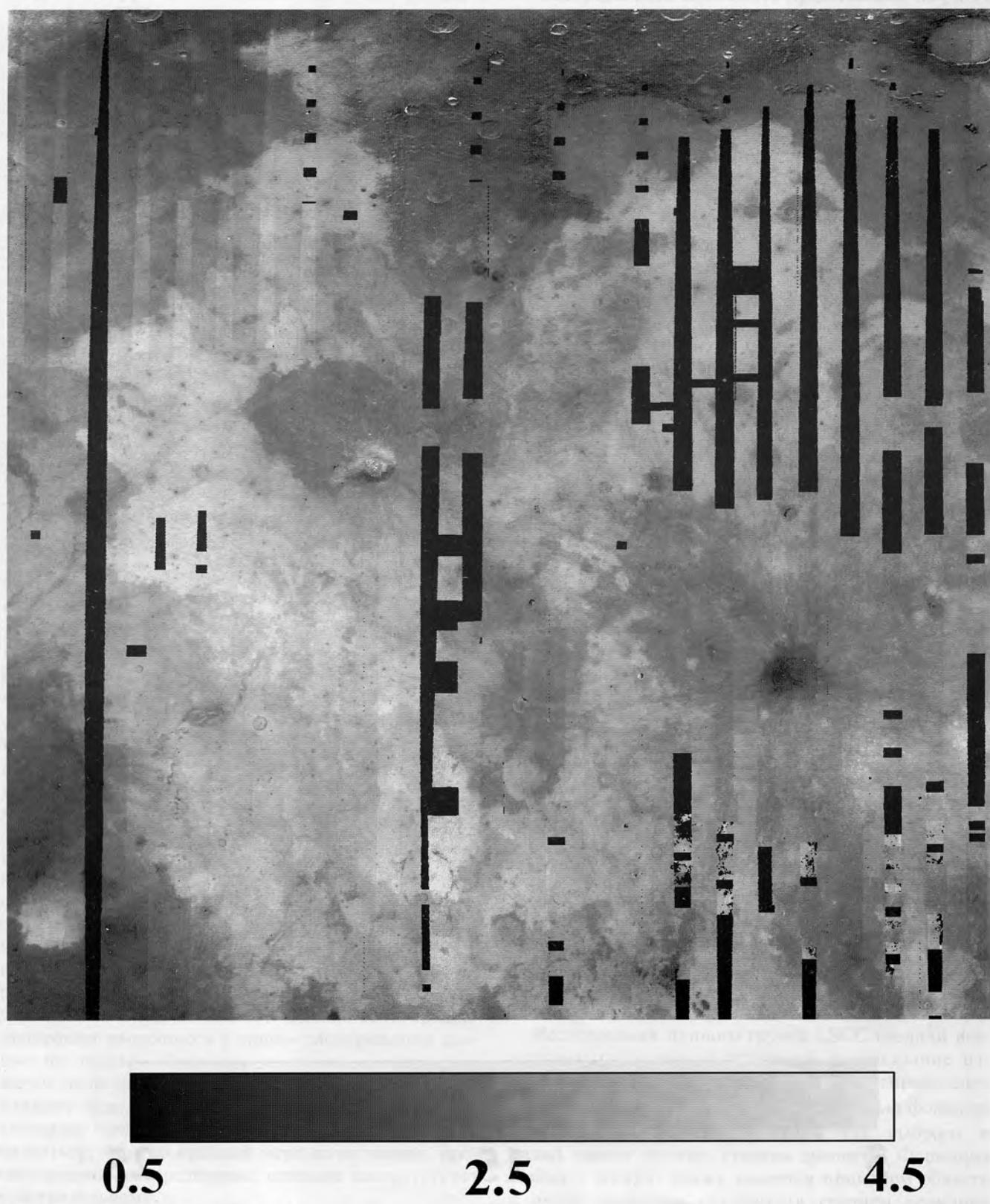


Рис. 7. Карта прогноза распределения оливина, %

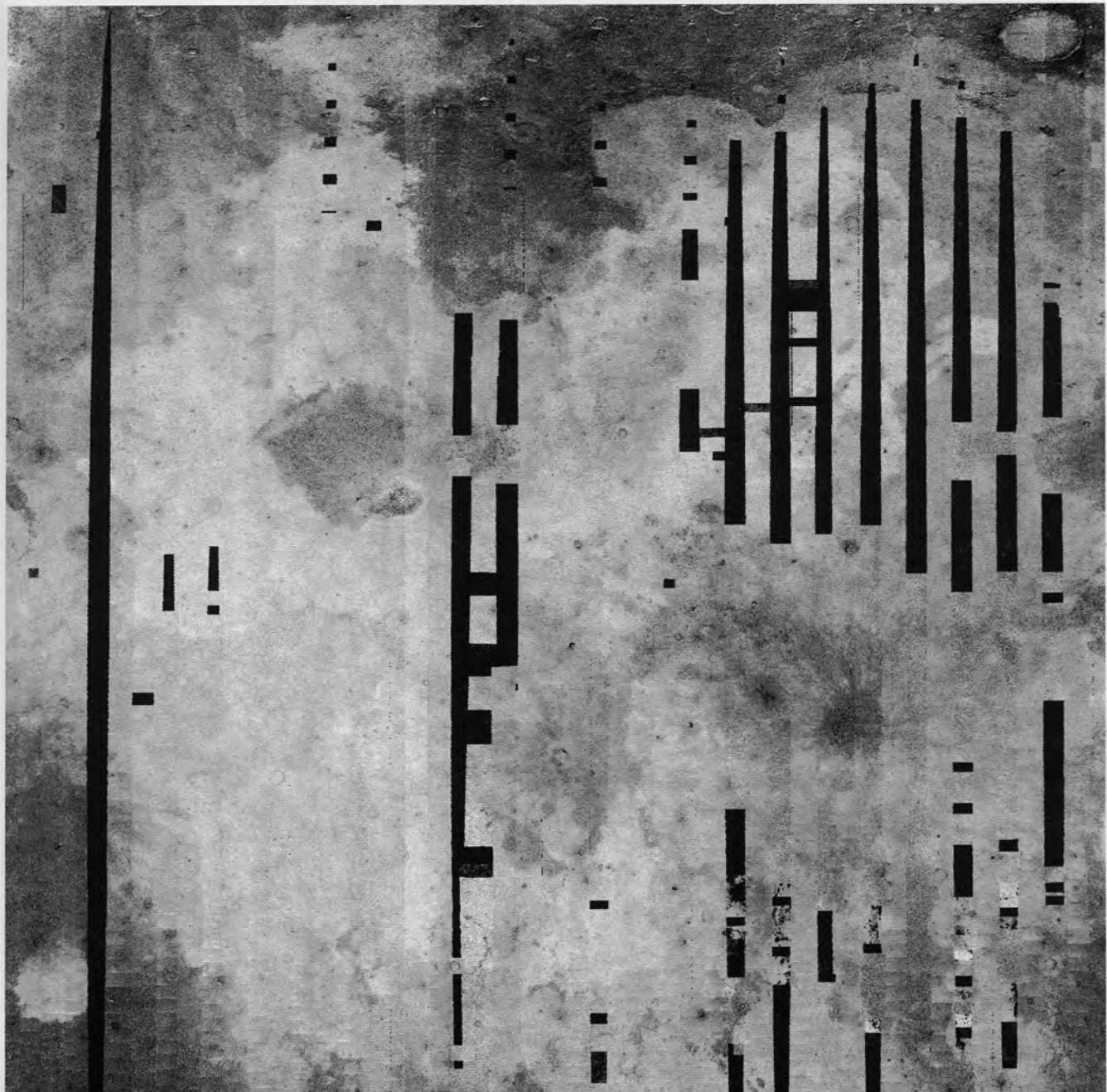


Рис. 8. Карта прогноза распределения ильменита, %.

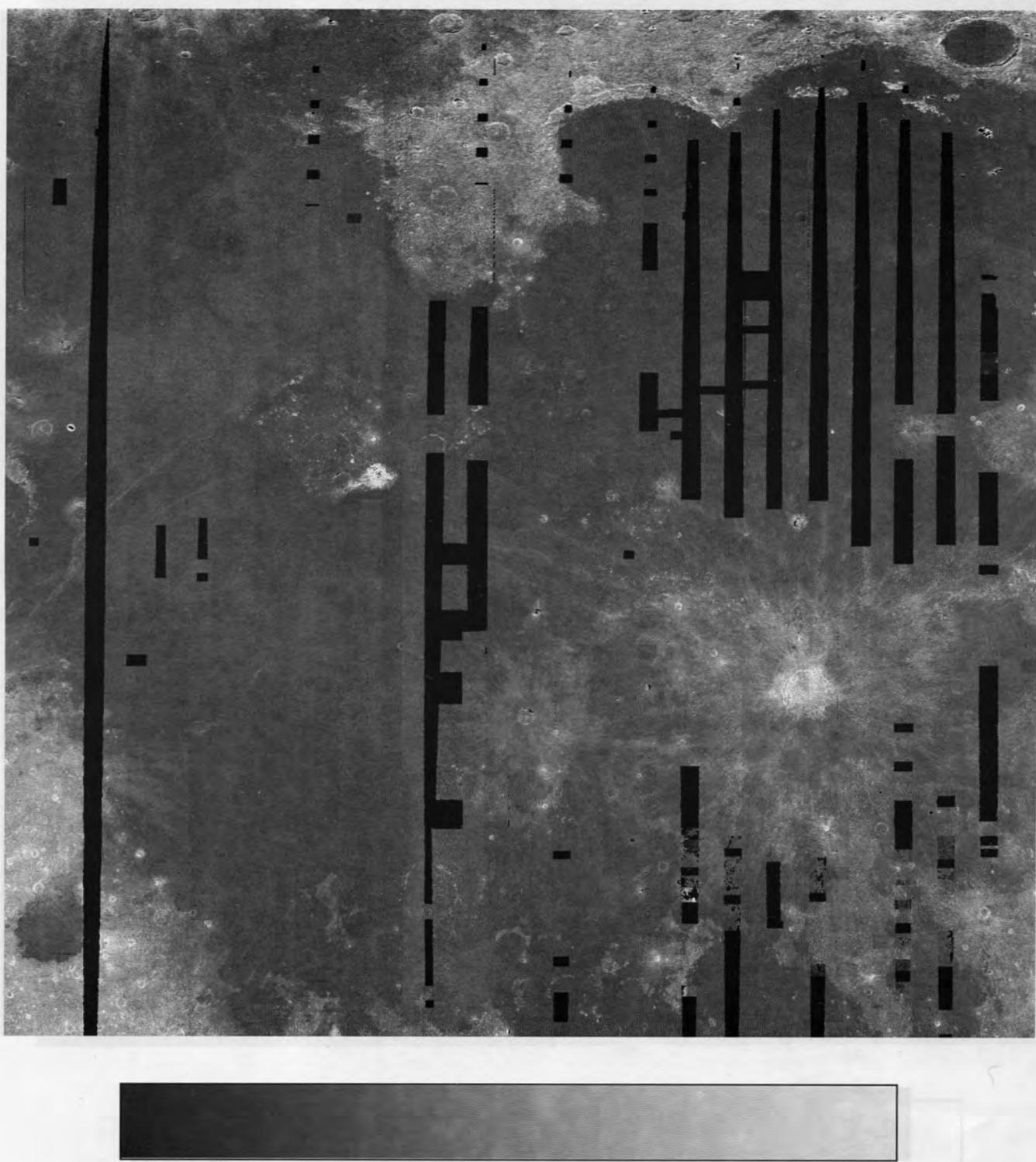
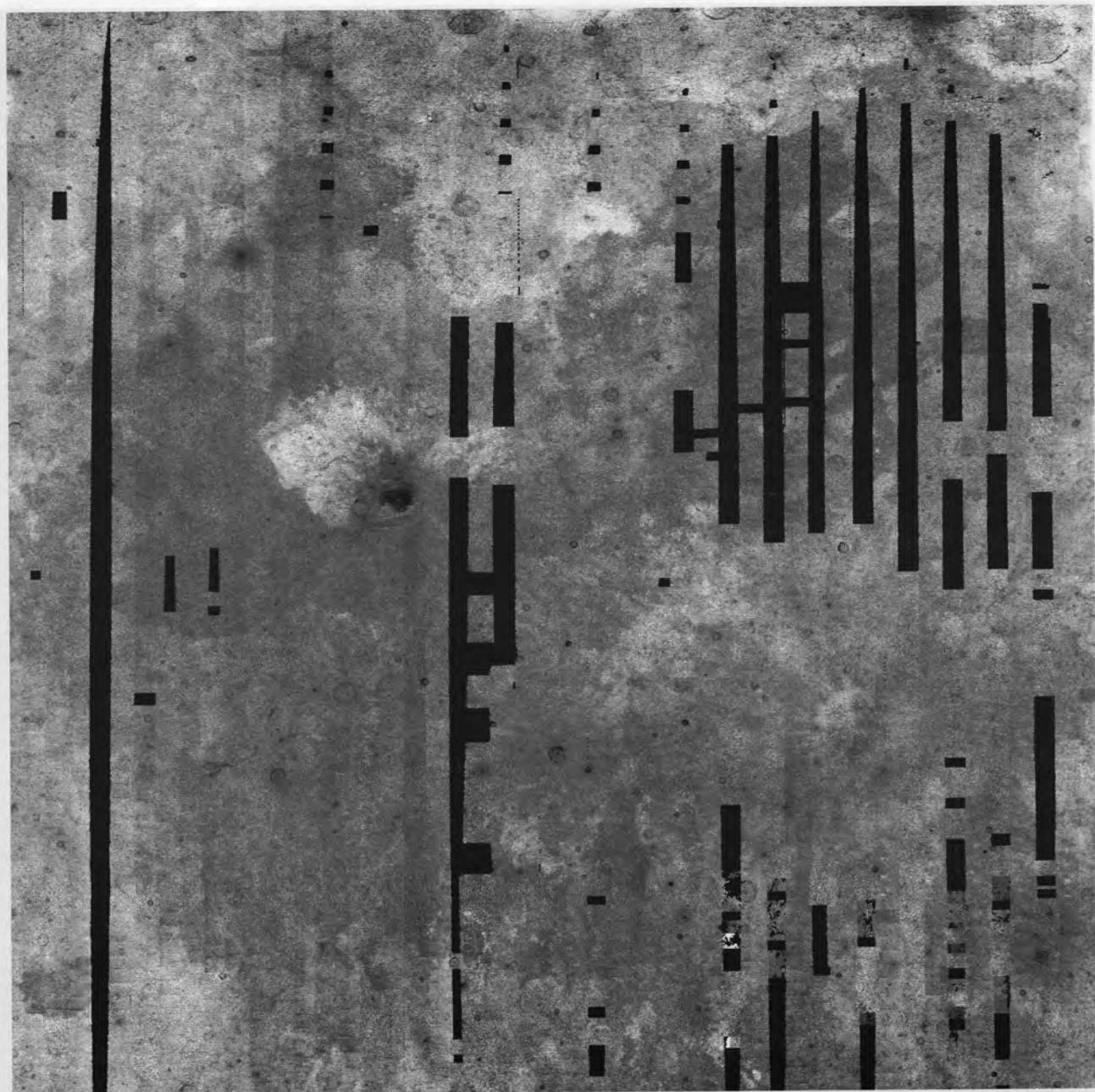


Рис. 9. Карта прогноза распределения плагиоклаза, %



10

70

130

Рис. 10. Карта прогноза распределения  $I_S / \text{FeO}$

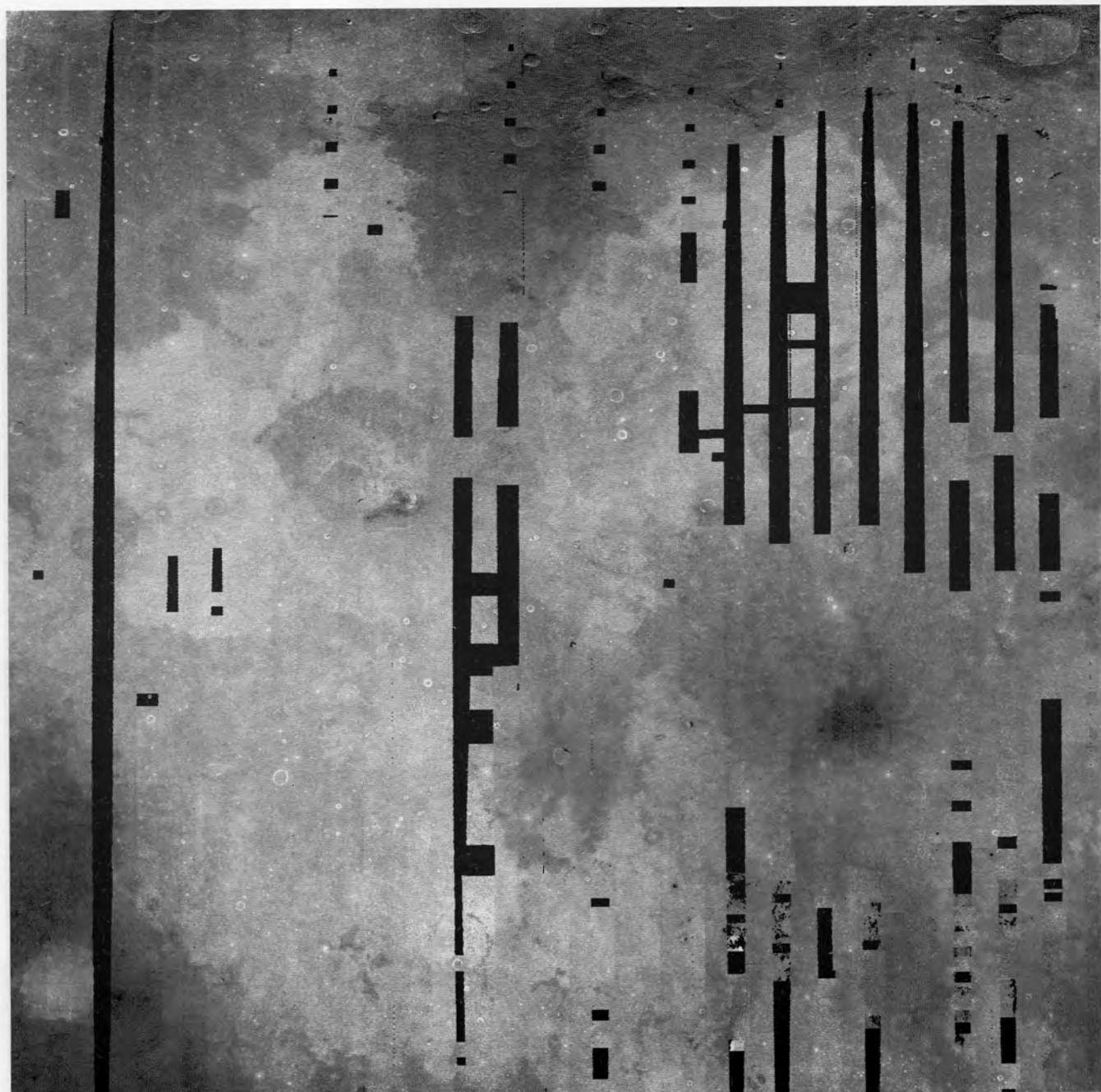


Рис. 11. Карта прогноза распределения характерного размера частиц (мкм)

$I_s/\text{FeO}$  здесь около 25—40); это согласуется с выводами [16] о том, что образование Reiner- $\gamma$  молодое. Если по карте  $I_s/\text{FeO}$  сравнивать молодые кратеры с их морским окружением, то это будет сильно напоминать ситуацию с распределением пироксена. Это вполне естественно, так как количество кристаллического материала коррелирует со степенью зрелости реголита. Все известные районы пирокластических отложений, например Плато Аристарха или мыс Лапласа, имеют высокую степень зрелости. Однако едва ли это обусловлено реальными аномалиями отношения  $I_s/\text{FeO}$ ; скорее причина состоит в том, что пирокластический материал практически не представлен в используемой нами базе данных для лунных образцов и потому проявляет себя как аномальный. Тем не менее, карты прогноза  $I_s/\text{FeO}$  могут быть формально использованы как хороший индикатор для поиска новых мест пирокластических отложений.

Хотя для нашего анализа были доступны всего три размерные фракции частиц образцов лунного грунта, мы решили рассмотреть характерный размер частиц  $d$ , отвечающий этим фракциям, как независимый параметр. Результаты нашей оценки характерного размера частиц для лунной поверхности показаны на рис. 11. Большой размер частиц получился для валов и выбросов свежего материала, что вполне естественно, так как незрелый грунт Луны более крупнозернистый [9]. Материки имеют сравнительно малый характерный размер частиц. Такое различие между материковым и морским реголитами известно по результатам исследований образцов: плагиоклаз, который преобладает в материковом материале, разрушается более эффективно при микрометиоритной бомбардировке, чем магматический материал, преобладающий в морских регионах. Об этом свидетельствуют данные, представленные в нашем распоряжение О. Д. Роде (ГЕОХИ РАН), которая изучала гранулометрический состав морских образцов АМС «Луна-24» (24118, 24160, 24176, 24214) [18] и материковых образцов «Луна-20» и «Аполлон-16» (65501). Было показано, что материковый грунт имеет повышенное содержание

пыли по сравнению с морским (см. табл. 2). В частности, оказалось, что весовой процент частиц размером менее 10 мкм более чем в три раза выше для материкового грунта, чем для морского.

Мы отмечаем заметные вариации параметра  $d$  в морских регионах. Районы, сравнительно крупнозернистого реголита, расположены к юго-западу от Плато Аристарха и к юго-западу от кратера Кеплер. Эти районы уже характеризовались ранее как содержащие крупнозернистый грунт по данным поляриметрических измерений [19]. Они также обнаруживались как фотометрические аномалии [20].

К сожалению, карта распределения размера частиц является единственной в своем роде, и нет возможности ее сравнить с другими результатами. Средние значения параметра  $d$  составляют 21 мкм, а его вариации лежат в пределах от 10 мкм до 45 мкм. Следует подчеркнуть, что параметр  $d$  не следует отождествлять со средним размером частиц лунного реголита, который примерно в 2.5 раза выше [9]. Такое различие связано с тем, что мы использовали в своем анализе только данные для фракций лунного грунта с размером частиц менее 45 мкм, поскольку именно эти фракции наиболее существенно влияют на оптические свойства лунной поверхности. Можно, однако, надеяться, что параметр  $d$  дает качественно правильное представление о гранулометрическом составе реголита в том или ином районе лунной поверхности. Если исключить из рассмотрения области незрелого грунта, параметр  $d$  довольно слабо коррелирует с отношением  $I_s/\text{FeO}$ . Это согласуется с выводами работы [10].

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Мы предлагаем новый подход к дистанционному прогнозированию состава лунной поверхности по данным спектральной съемки. Он основан на использовании спектрофотометрических и химико-минералогических данных Lunar Soil Characterization Consortium для 42 образцов лунного грунта. С помощью изображений, полученных КА «Клементина» для северо-западной части лунного диска, мы сделали прогноз распределений содержания  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{FeO}$ ,  $\text{SiO}_2$  и  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (химический состав), содержания пироксена, оливина, ильменита, плагиоклаза (минералогический состав), степени зрелости ( $I_s/\text{FeO}$ ) и характерного размера частиц  $d$ .

Распределения содержаний  $\text{TiO}_2$  и  $\text{FeO}$  хорошо коррелируют между собой и антикоррелируют с  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Карта содержания  $\text{SiO}_2$ , построенная впервые, выявила заметные вариации этой характеристики в лунных морях; эти вариации во многих

Таблица 2. Весовое содержание фракций с разным размером частиц  $d$  для материкового и морского грунта

Образцы	$d < 70 \text{ мкм}$	$d < 10 \text{ мкм}$	$d < 2 \text{ мкм}$
65501	59.5 %	30.7 %	3.8 %
«Луна-24»	50 %	10 %	1-2 %

Примечание. «Луна-24» включает данные для образцов 24118, 24160, 24176 и 24214

случаях превосходят различия между морским и материковым материалом.

Карта прогноза содержания пироксена показала, что молодые морские кратеры имеют более высокое содержание пироксена, чем соседние районы. Это согласуется с низкой степенью зрелости молодых кратеров, которая характеризуется отношением  $I_s/\text{FeO}$ . На карте распределения параметра  $I_s/\text{FeO}$  хорошо выделяются пирокластические районы. Это позволяет использовать наши данные для поиска неизвестных ранее пирокластических районов.

Впервые выполнено картографирование характерного размера частиц лунной поверхности. Прогноз этого параметра показал, что относительно крупнозернистый реголит находится в молодых кратерах и зонах их выбросов, что согласуется с общепринятыми представлениями. Для материкового материала размер частиц оказался меньше, чем для морского. Это связано с тем, что материковые плагиоклазы разрушаются микрометоритной бомбардировкой более эффективно, чем морской мафический материал.

Работа выполнена при частичной поддержке фонда INTAS (грант 2000-0792).

1. Немошканенко В. В. Дослідження місячного реголіту // Космічна наука і технологія.—1996.—2, № 1/2.—С. 16—23.
2. Шкуратов Ю. Г. Цветовые различия и содержание химических элементов в грунтах лунной поверхности // Астрон. вестн.—1982.—16, № 2.—С. 69—76.
3. Belton M., Head J., Pieters C., et al. Lunar impact basins and crustal heterogeneity: new western limb and far side data from Galileo // Science.—1992.—255.—P. 570—576.
4. 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.
5. Head J., Murchie S., Mustard J., et al. Lunar impact basins: New data for the western limb and farside (Orientale and South Pole — Aitken basins) from the first Galileo flyby // J. Geophys. Res.—1993.—98, N E9.—P. 17,149—17,181.
6. Housley R., Grant R., Paton N. Origin and characteristics of excess Fe metal in lunar glass welded aggregates // Proc. Lunar Sci. Conf., 4<sup>th</sup>. — Houston: LPI, 1973.—P. 2737—2749.
7. Lucey P. G., Blewett D. T., Jolliff B. L. Lunar iron and titanium abundance algorithms based on final processing of Clementine ultraviolet-visible images // J. Geophys. Res.—2000.—105, N E8.—P. 20,297—20,306.
8. Lucey P. G., Blewett D. T., Taylor G. J., Hawke B. R. Imaging of the lunar surface maturity // J. Geophys. Res.—2000.—105, N E8.—P. 20,377—20,386.
9. McKay D. G. Heiken A. Basu, et al. The lunar regolith // Lunar source-book. — NY., Cambridge Univ. Press, 1991.—P. 285—356.
10. Morris R. Origin and size distribution of metallic iron particles in the lunar regolith // Proc. Lunar Sci. Conf. 11-th. — Houston: LPI, 1980.—P. 1697—1712.
11. Nozette S., Rustan P., Pleasance L. D., et al. The Clementine

mission to the Moon: Scientific overview // Science—1994.—266.—P. 1835—1839.

12. Omelchenko V., Shkuratov Yu., Stankevich D., et al. A comparison of two approaches using three NIR-VIS wavelengths for predicting the lunar surface composition // Abstracts of papers of 36-th International Microsymposium on Planetology. — Moscow, 2002.—Abstract MS074.
13. Pieters C., Fischer E., Rode O., Basu A. Optical effects of space weathering: The role of the finest fraction // J. Geophys. Res.—1993.—98 N E11.—P. 20,817—20,824.
14. Pieters C., Stade M., Fischer E., et al. A sharper view of the craters from Clementine data // Science.—1994.—266.—P. 1844—1848.
15. Pieters C. M., Stankevich D. G., Shkuratov Yu. G., Taylor L. A. Statistical analysis of the links between lunar mare soil mineralogy, chemistry and reflectance spectra // Icarus.—2002.—155.—P. 285—298.
16. Pinet P., Shevchenko V., Chevrel S., et al. Local and regional lunar regolith characteristics at Reiner GAMMA formation: Optical and spectroscopic properties from Clementine and Earth-based data // J. Geophys. Res.—2000. 105, N E4.—P. 9457—9475.
17. Raitala J., Kreslavsky M., Shkuratov Yu., et al. Non-mare volcanism on the Moon: characteristics from remote sensing data // Lunar and Planet. Sci. 30<sup>th</sup>. — Houston: LPI, 1999.—Abstract 1457.
18. Rode O. D., Ivanov A. V. Grain size of Luna-24 core samples: new data // Lunar Planet. Sci. Conf., 14<sup>th</sup>. — Houston: LPI, 1983.—P. 648—649.
19. Shkuratov Yu. G., Opanasenko N. V. Polarimetric and photometric properties of the Moon: Telescope observation and laboratory simulation. 2. The positive polarization // Icarus.—1992.—99.—P. 468—484.
20. Shkuratov Yu. G., Starukhina L. V., Kreslavsky M. A., et al. Principle of perturbation invariance in photometry of atmosphereless celestial bodies // Icarus.—1994.—109.—P. 168—190.
21. Shkuratov Yu. G., Kaydash V. G., Opanasenko N. V. Iron and titanium abundance and maturity degree distribution on lunar nearside // Icarus.—1999.—137.—P. 222—234.
22. Taylor L. A., Pieters C. M., Morris R. V., et al. Lunar mare soils: Space weathering and the major effects of surface-correlated nanophase Fe // J. Geophys. Res.—2001.—106, N E11.—P. 27,985—28,000.

#### PROGNOSIS OF LUNAR SURFACE COMPOSITION FROM LABORATORY STUDIES OF LUNAR SAMPLES AND CLEMENTINE DATA

Yu. G. Shkuratov, V. V. Omel'chenko, D. G. Stankevich, V. G. Kaidash, P. Pieters, P. Pinet

A new approach to remote sensing determination of the lunar surface composition is presented. The technique is based on the Clementine UVVIS data as well as on the results of spectral and chemical/mineral studies of lunar samples by the Lunar Soil Characterization Consortium. The distributions of the main rock-forming oxides ( $\text{SiO}_2$ ,  $\text{FeO}$ ,  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), minerals (pyroxene, olivine, plagioclase, ilmenite), maturity degree ( $I_s/\text{FeO}$ ), and characteristic particle size are mapped with a resolution of 1 km. Our analysis shows that young crater regoliths are characterized by a high pyroxene content, large size of particles, and a low degree of maturity.