

К-14038

П305006

ВЕСТНИК

ХАРЬКОВСКОГО
УНИВЕРСИТЕТА

№ 232

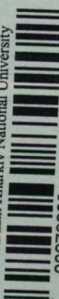
АСТРОМЕТРИЯ И ФИЗИКА
СОЛНЕЧНОЙ СИСТЕМЫ

85 к.



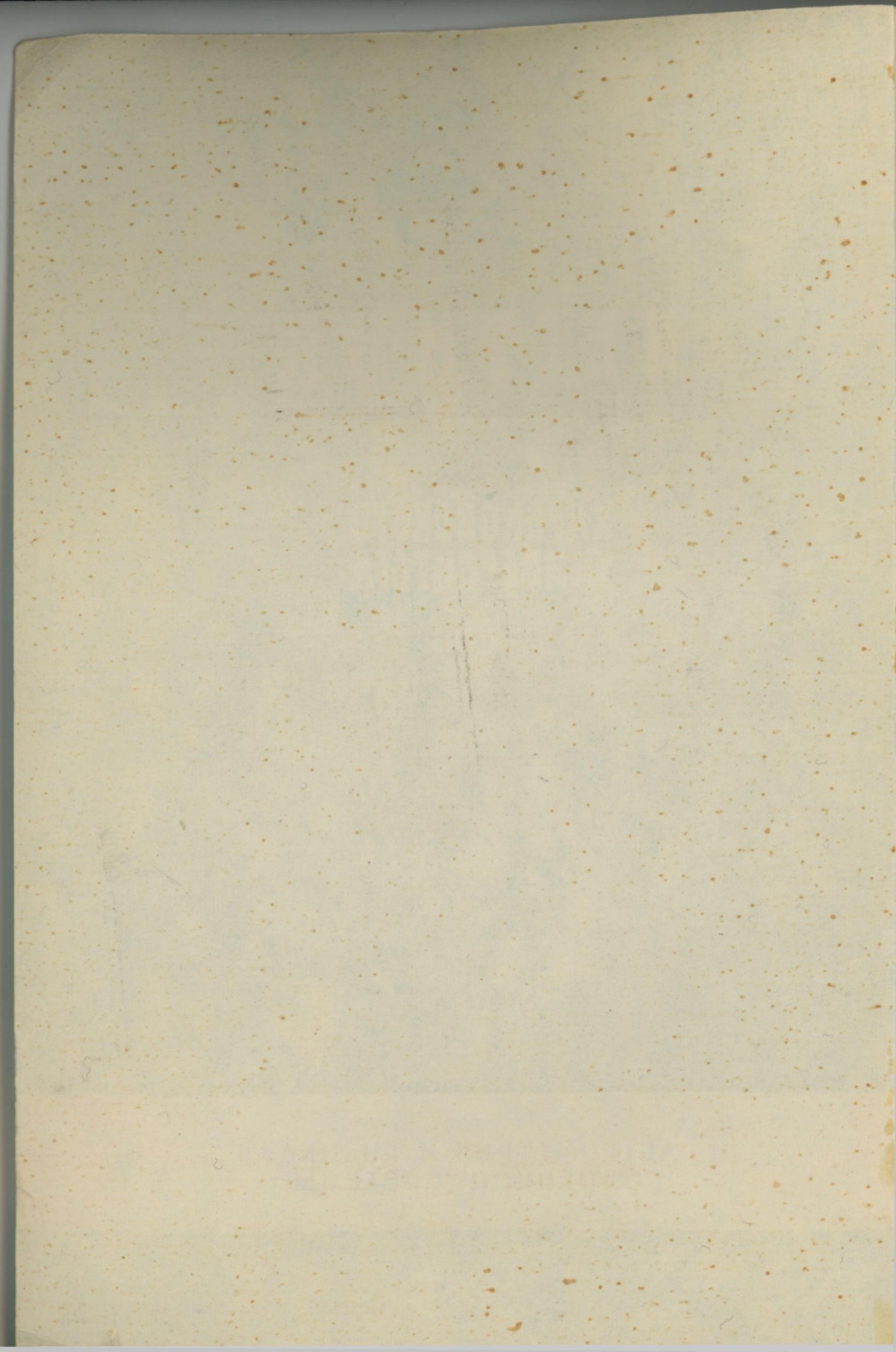
Вестн. Харьк. ун-та, 1982, № 232, 1—85.

V.N. Karazin Kharkiv National University



00279608

2



МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО
СПЕЦИАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ УССР

ВЕСТНИК ХАРЬКОВСКОГО УНИВЕРСИТЕТА № 232

АСТРОМЕТРИЯ И ФИЗИКА
СОЛНЕЧНОЙ СИСТЕМЫ

Основан в 1965 г.

ХАРЬКОВ
ИЗДАТЕЛЬСТВО ПРИ ХАРЬКОВСКОМ
ГОСУДАРСТВЕННОМ УНИВЕРСИТЕТЕ
ИЗДАТЕЛЬСКОГО ОБЪЕДИНЕНИЯ
«ВИЩА ШКОЛА»

1982

Астрометрия и физика Солнечной системы. Вып. 17. — Вестн. Харьк. ун-та, № 232. — Харьков: Вища школа. Изд-во при Харьк. ун-те, 1982. — 82+3 с.

Вестник посвящен вопросам исследования определений всемирного времени, фотометрии Луны, Марса и астероидов. Приведены результаты наблюдений покрытий звезд Луной.

Нормативные материалы приведены по состоянию на 1 января 1981 г. Предназначен для научных работников и специалистов.

Редакционная коллегия: Ю. В. Александров (отв. редактор), К. Н. Деркач (отв. секретарь), Л. А. Акимов, Д. Ф. Лупишко, В. С. Цветкова.

Печатается по решению редакционной коллегии Астрономической обсерватории Харьковского госуниверситета от 4 сентября 1981 г.

Адрес редакционной коллегии: 310022, Харьков-22, ул. Сумская, 35, Астрономическая обсерватория Харьковского университета, тел. 43-24-28.

Редакция естественнонаучной литературы

В 1705020000—051
М 226(04) — 82

©Харьковский государственный университет, 1982

Центральна наукова

ХДУ

№ 305006

К. Н. ДЕРКАЧ, В. М. КИРПАТОВСКИЙ,
П. П. ПАВЛЕНКО, Р. М. ШУТЬЕВА

**НАБЛЮДЕНИЯ ПОКРЫТИЙ ЗВЕЗД ЛУНОЙ В 1978—1980 гг.
ЭКСПЕДИЦИЯ ПО НАБЛЮДЕНИЯМ КАСАТЕЛЬНЫХ ПОКРЫТИЙ
В 1977 г.**

Работа по наблюдениям покрытий звезд Луной является традиционной на АО ХГУ. Продолжалась она и в 1978—1980 гг. Приводим результаты наблюдений за указанный период (см. табл. 1).

Привязку зафиксированных моментов времени к единой шкале всемирного времени осуществляли по результатам приема радиосигналов точного времени с помощью приемника ПРВ и печатающего хронографа 21-П. Синхронный мотор хронографа питался током частоты 100 гц от кварцевого генератора, который включали за два часа до наблюдения. Таким образом, наблюдения проводились на линейном участке изменения частоты генератора. Радиосигналы точного времени станции РАТ, как правило, принимались до и после наблюдений. Точность определения поправок хронографа и хронометра составляла $\pm 0,05$ с. Следовательно, эта ошибка значительно меньше личных ошибок наблюдений. Личные уравнения наблюдателей не учтены.

В таблице приняты следующие сокращения и обозначения: № SAO (номера звезд по каталогу SAO). Телескоп: М-рефрактор Мерца ($D=16$ см, $F=180$ см); Ц — рефрактор Цейсса ($D=20$ см, $F=300$ см); А — зеркально-менисковый телескоп АЗТ-7 ($D=20$ см, $F=200$ см); З — переносная зрительная труба — рефрактор ЗРТ-452 ($D=7$ см, $F=50$ см); Т — бинокляр ТЗК ($D=8$ см); Р — переносная труба рефрактор ($D=8$ см, $F=80$ см).

Наблюдатель: КД — К. Н. Деркач, ВК — В. М. Кирпатовский, РШ — Р. М. Шутьева, ПП. — П. П. Павленко, АЖ — А. П. Железняк, ГП — Г. В. Пичугина.

Явление: ПТ — покрытие темным краем, ПС — покрытие светлым краем, ОС — открытие светлым краем, ПК — касательное покрытие.

Оценка. Дается субъективная оценка запаздывания по шкале К. К. Дубровского: 5 — до 0,1 — 0,2 с; 4 — до 0,5 с; 3 — до 1 с; 2 — более 1 с; 1 — грубое, неаккуратное наблюдение.

Примечания: 1 — темный край Луны виден; 2 — темный край не виден; 3 — перистые облака; 4 — гало вокруг Луны, 5 — Луна вблизи полнолуния; 6 — Луна в полупрозрачных высокослоистых облаках, но видны и плотные облака более

Таблица 1

Всемирное время	Звезда		Телескоп × увеличение	Наблюда- тель	Явление	Оценка	Примеча- ния	Регис- трация времени
	№ SAO	Вели- чина						
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1978 г.								
Апрель								
11 ^d 19 ^h 00 ^m 10,9 ^s	94027	1,1	M×180	ВК	ПТ	5	2,3	ГК
	94027		T×10	РШ	ПТ	4	2,3	СД
13 17 57 57,2	+170595	8,0	M×180	ВК	ПТ	4	1,4,9	ГК
17 17 21 10,8	98621	7,9	Ц×240	ПП	ПТ	4	1,4,9	ГК
Май								
11 18 05 ...	96112	7,9	M×180	ВК	ПК	—	1,8	—
18 30 11,1	96138	8,8	Ц×240	ПП	ПТ	5	—	—
Сентябрь								
14 19 28 26,1	164639	5,4	З×40	РШ	ПС	5	5	СД
16 18 36 58,8	146820	8,5	A×200	РШ	ПС	5	6,7	СД
16 19 09 55,8	28833189	10,3	A×200	РШ	ПС	4	6,7,9	СД
Ноябрь								
7 16 15 49,0	164147	7,3	M×180	АЖ	ПТ	5	2,3	ГК
12 17 08 17,9	110009	7,1	M×180	АЖ	ПТ	4	2	ГК
13 16 15 30,5	110537	8,5	M×180	ВК	ПТ	5	2	ГК
13 16 15 31,6	110537	8,5	A×200	АЖ	ПТ	4	2	СМ
13 16 15 32,4	110537	8,5	P×80	ГП	ПТ	3	2	СМ
1979 г.								
Февраль								
5 15 24 20,9	93868	3,9	M×180	ВК	ПТ	5	2,4	ГК
	93868	3,9	A×200	КД	ПТ	5	2,4	СД
	93868	3,9	M×180	ВК	ОС	4	4	ГК
8 17 21 21,3	96288	6,9	A×200	РШ	ПТ	5	2	СД
Март								
1 ^d 16 ^h 14 ^m 28,1 ^s	109835	7,0	Ц×240	ПП	ПТ	5	—	СД
	109835	7,0	P×80	АЖ	ПТ	5	1	СД
	109835	7,0	M×180	ВК	ПТ	5	1,13	ГК
	109835	7,0	З×50	ГП	ПТ	3	1	СМ
16 23 48,2	109832	8,3	M×180	ВК	ПТ	5	1	ГК
	109832	8,3	Ц×240	ПП	ПТ	5	—	СД
16 54 19,4	109858	8,9	Ц×240	ПП	ПТ	5	—	СД
Апрель								
1 16 05 20,8	94027	1,1	M×180	АЖ	ПТ	5	2,11,16	ГК
35 01,6	94027	1,1	M×180	АЖ	ОС	4	16	ГК
Май								
5 17 30 44,2	118171	7,5	Ц×240	ПП	ПТ	5	—	СД
	118171	7,5	A×200	РШ	ПТ	4	2	СМ
6 18 23 45,0	118619	8,3	A×200	РШ	ПТ	5	2	СМ
9 17 58 25,2	139304	4,3	A×200	РШ	ПТ	5	2	СМ
25,3	139304	4,3	M×180	АЖ	ПТ	4	2,5	ГК

1			2	3	4	5	6	7	8	9
30	18 49	21,0	97782	8,3	Ц×240	ПП	ПТ	5	—	СД
		21,4	97782	8,3	А×200	РШ	ПТ	5	1	СМ
		21,5	97782	8,3	М×180	АЖ	ПТ	4	1	ГК
	19 04	30,2	97784	9,2	Ц×240	ПП	ПТ	1	12	СД
	31	18 41	30,9	98421	8,5	Ц×240	ПП	ПТ	5	—
31,1			98421	8,5	М×180	АЖ	ПТ	5	1	ГК
31,1			98421	8,5	А×200	РШ	ПТ	5	1	СД
Июнь										
2	18 34	57,1	118476	8,1	А×200	РШ	ПТ	5	1,5	СД
3	18 42	10,5	118902	8,0	Ц×240	ПП	ПТ	5	—	СД
4	19 18	30,6	138710	5,9	З×50	РШ	ПТ	5	2	СД
Сентябрь										
2 ^д	18 ^д 02 ^м	32,6 ^с	162413	5,0	Ц×240	ПП	ПТ	5	—	СД
		33,0	162413	5,0	М×180	ВК	ПТ	5	2	ГК
	18 27	09,4	162432	6,8	Ц×240	ПП	ПТ	5	—	СД
		11,1	162432	6,8	М×180	ВК	ПТ	3	2,14	ГК
Ноябрь										
2	16 30	56,6	109793	5,3	А×200	РШ	ПТ	5	2	СД
Декабрь										
25	14 48	49,4	146922	7,7	А×200	РШ	ПТ	5	1	СД
26	16 53	39,9	109441	7,8	А×200	РШ	ПТ	5	1	СД
27	18 11	59,2	110065	4,7	А×200	РШ	ПТ	5	1	СД
28	14 39	04,0	110566	7,6	А×200	РШ	ПТ	4	2,17	СД
		4,6	110566	7,6	М×180	ВК	ПТ	4	2,17	ГК
1980 г.										
Январь										
20	12 29	38,3	Венера	—3,5	Ц×240	КД	ПТ	—	2,18,19	СД
		46,7	165201	8,5	Ц×240	КД	ПТ	3	1	СД
		49,1	165201	8,5	М×180	ВК	ПТ	4	1	СМ
	16 18	45,3	165215	8,4	Ц×240	КД	ПТ	3	1	СД
		46,3	165215	8,4	М×180	ВК	ПТ	4	1	СМ
21	16 27	12,1	165217	7,2	Ц×240	КД	ПТ	5	1	СД
		12,4	165217	7,2	М×180	ВК	ПТ	5	1	СМ
		37,4	146781	9,0	Ц×240	ПП	ПТ	4	1	СМ
	16 26	11,6	146797	9,1	Ц×240	ПП	ПТ	4	1	СМ
		19,6	146808	8,7	Ц×240	ПП	ПТ	4	1	СМ
22	15 51	17,9	128789	7,5	А×200	РШ	ПТ	5	1	СД
		07,5	128818	8,5	Ц×240	ПП	ПТ	5	1	СМ
	17 43	49,1	128823	7,1	Ц×240	ПП	ПТ	5	1	СМ
		49,4	128823	7,1	А×200	РШ	ПТ	5	1	СД
22 ^д	17 ^д 58 ^м	05,0 ^с	128825	8,5	Ц×240	ПП	ПТ	5	1	СД
		27,4	128843	5,9	Ц×240	ПП	ПТ	5	1	СМ
24	15 54	11,4	110464	7,1	А×200	РШ	ПТ	4	2,4	СД
26	16 15	48,6	93775	6,0	А×200	РШ	ПТ	5	2	СД
		48,9	93775	6,0	М×180	ВК	ПТ	5	2	СМ
Февраль										
19	15 29	53,4	109653	7,0	М×180	ВК	ПТ	5	1	СМ
		54,1	109653	7,0	А×200	РШ	ПТ	5	3,15	СД
	18 14	28,7	109715	6,2	М×180	ВК	ПТ	5	1	СМ
20	15 53	39,5	110288	8,8	А×200	РШ	ПТ	5	1	СД

низкого яруса, в разрывах которых велись наблюдения; 7 — полная фаза лунного затмения; 8 — звезда приближалась со стороны темного края диска Луны, но не коснулась его; ближайшее ее расстояние к лунному диску было у крайней точки линии терминатора (звезда почти коснулась диска Луны в этой точке); 9 — номер звезды дан по каталогу ВД; 10 — прозрачные перистослоистые облака; 11 — угасание блеска звезды в течение 0,5—0,6 с; 12 — наблюдатель предполагает запаздывание, равное 5 с; 13 — звезда гасла постепенно; 14 — возможно запаздывание, равное 2 с; 15 — возможна ошибка в — 0,5 с (при снятии отсчета с хронометра); 16 — различие с предвычисленным моментом в 5 мин, секунды и доли секунд уверенные, в минутах возможна ошибка; 17 — непосредственно перед наблюдением звезда часто ослаблялась проходящими обрывками высокослоистых облаков, которые закрыли все небо через 5 мин после наблюдения; 18 — первый контакт, момент зафиксирован примерно через 1 с после появления на лимбе Венеры черной прямой линии; 19 — изображение объектов периодически исчезало в быстроидущих высококучевых облаках.

Регистрация моментов времени: ГК — регистрация методом «глаз-клавиша»; СД, СМ — наблюдения при помощи секундомеров с точностью снятия отсчетов соответственно 0,1, 0,2 с.

В 1978 г. в наблюдениях принимали участие студенты I курса астрономической специальности Харьковского государственного университета А. П. Железняк и Г. В. Пичугина.

В 1977 г. Харьковской обсерваторией была организована экспедиция за пределы Харькова для наблюдений касательных покрытий звезд Луной.

В экспедиции участвовали представители трех учреждений Харькова: А. Е. Савченко — Планетарий им. Ю. А. Гагарина; Д. Г. Станкевич — Дворец пионеров Орджоникидзевского района; В. М. Кирпатовский — Астрономическая обсерватория.

Пункт наблюдения — юго-восточная окраина г. Новые Санжары (УССР, Полтавская обл.). Дата: 1977 год, сентябрь 22, Звезда ZC 2969, 3,2^m. Северная граница. Возраст Луны — 9,6^d. Касание на светлом крае. Наблюдатели располагались друг от друга на расстоянии 500 и 300 метров.

Таблица 2

Всемирное время	Телескоп и увеличение	Наблюдатель	Явление	Оценка	Примечание
21 ^h 50 ^m 23,8 ^s	PX80	ДС	ПС	3	20
52 13,4	PX80	ВК	ПС	3	21
52 27,5	ЛX120	АС	ПС	1	22
55 23,0	ЛX120	АС	ОС	1	24
55 27,5	PX80	ВК	ОС	3	23
59 59,0	PX80	ВК	ОС	2	25
22 00 26,5	ЛX120	АС	ОС	1	26

Приводим сводную табл. 2 результатов наблюдений, обозначения те же, что и в табл. 1. Дополнительные обозначения следующие.

Телескоп: Л — любительский рефрактор 80/1200 фирмы «Карл Цейсс Йена» ($D=8$ см, $F=120$ см).

Наблюдатель: АС — А. Е. Савченко, ДС — Д. Г. Станкевич.

Примечания: Ясно, прозрачность хорошая. Умеренный ветер.

Изображение Луны начинает краснеть. В поле зрения инструментов светлый край Луны сильно дрожит, образуя прикраевую светлую полосу — турбулентный слой.

20 — момент отмечен сразу после входа звезды в турбулентный слой; 21 — перед регистрацией исчезновения 1—2 мин наблюдалась звезда в турбулентном слое; 22 — перед регистрацией момента звезда двигалась в верхней границе турбулентного слоя; 23 — момент отмечен по резкому изменению структуры и блеска турбулентного слоя в некоторой его точке и сразу же эта точка была потеряна; 24 — на протяжении 1 с наблюдалась яркая точка в турбулентном слое (приведенный момент относится к началу этого промежутка); 25 — звезда увидена за турбулентным слоем; 26 — звезда увидена на расстоянии 15—20 дуговых с от лунного края.

Регистрация моментов времени: наблюдатель ДС использовал пишущий переносный хронограф с двумя перьями. Одно перо записывало секунды звездного хронометра, другое перо — наблюдаемые моменты явления. Длина секунды на ленте 9 мм. Поправка за параллакс перьев учтена.

Наблюдатель ВК фиксировал моменты двухстрелочными секундомерами с ценой деления 0,1 с. Показания секундомеров сравнивались с показаниями среднего хронометра.

Наблюдатель АС применил переносной магнитофон «Весна». На магнитную ленту записывались удары среднего хронометра и одновременно голос наблюдателя, отмечавшего метки времени и наблюдаемые моменты явления.

Поправки хронометров определялись до и после наблюдений в ближайшие сеансы передач радиосигналов времени станции «Маяк» («Шесть точек»).

Личные уравнения наблюдателей не определялись.

Поступила в редколлегию 26.0.81.

С. Р. ИЗМАЙЛОВ, В. М. КИРПАТОВСКИЙ,
Н. Г. ЛИТКЕВИЧ

СРАВНЕНИЕ ДВУХ ПРОГРАММ НАБЛЮДЕНИЙ ВСЕМИРНОГО ВРЕМЕНИ И МЕТОДОВ ИХ ОБРАБОТКИ

Определение всемирного времени в объединенной службе времени АО ХГУ и ХГНИИМ с 1959 г. ведется на базе группового, а затем вторичного эталона времени и частоты пассажным инструментом АПМ-1 № 540001 ($f=100$ см, $d=100$ мм), оснащенный фотоэлектрической регистрацией классического типа.

В 1979 г. в службе времени поставлена задача — накопленный более чем за 20-летний период наблюдательный материал использовать для получения поправок $\Delta\alpha$ близзенитной зоны ($|A| \approx 0,300$) исходного каталога КСВ и дальнейшего исследования вопроса о возможности определения поправок к собственным движениям звезд $\Delta\mu\alpha$ по материалам службы времени.

В 1981 г. заканчивается переобработка астрономических наблюдений за 1959—1962 гг., 1972—1974 и 1979—1980 гг. согласно требованиям названной задачи. Интервалы наблюдений выбирались с учетом их общих метрологических характеристик, а также непрерывности в наблюдениях и их общей численности.

При сравнительно неизменной технической оснащенности Харьковской наблюдательной службы за исследуемый интервал времени программа наблюдений и методика их обработки менялась. Так, в 1956 г., в период МГГ, всем службам было предписано определять поправки часов по программе служб времени [1]. В этом случае близполюсные и экваториальные звезды не входят в программу наблюдений, а азимут инструмента и поправка часов определяют из совместного решения системы уравнений

$$U + A_i \alpha - U'_i = v_i$$

по способу наименьших квадратов. Начиная с 1968 г. до настоящего времени программа наблюдений в Харьковской службе включает экваториальные звезды для определения азимута, а поправка часов определяется из звезд времени. На целесообразность применения экваториальных звезд для определения азимута Н. Н. Павлов [2] указывал еще в 1960 г.

Вопрос сравнительной оценки двух методов определения поправки часов возник попутно в процессе решения основной задачи, сформулированной выше. Для переобработки данных наблюдений за указанные три интервала времени были состав-

лены программы определения поправки часов двумя методами, так как в программе наблюдений за 1959 — 1962 гг. отсутствуют экваториальные звезды. Переобработка наблюдений выполнена на ЭВМ М-222 вычислительного центра ХГУ. Сравнительная оценка двух методов обработки выполнена по наблюдениям 1972 — 1974 гг. и 1979 — 1980 гг., поскольку только на этих интервалах можно было применить две программы обработки результатов наблюдений. Наблюдения за 1972—1974 гг. и 1979—1980 гг. включают 7845 звездных прохождений, из них 5334 прохождения звезд зенитной зоны. Всего пронаблюдено 267 звезд с $|A| \approx 0,300$ и 178 экваториальных звезд с $A \leq 0,500$ для определения азимута инструмента. Если азимут в течение вечера заметно менялся $|\Delta a| > 0,030$, то обработка велась часовыми группами. В случае устойчивого азимута принималось среднее его значение за вечер. В программе обработки первым методом, т. е. методом наименьших квадратов, экваториальные звезды вообще отбрасывались, при этом соблюдалось условие $\Sigma A_i \approx 0$.

Год	$\varepsilon_{\text{ЭКВ}}$	$\varepsilon_{\text{М.Н.К}}$	$U_{\text{ЭКВ.}} - U_{\text{М.Н.К}}$
1972	$\pm 0,00509$ с	$\pm 0,00530$ с	$+0,00051$ с
1973	$\pm 0,00549$	$\pm 0,00581$	$-0,00004$
1974	$\pm 0,00502$	$\pm 0,00539$	$-0,00002$
1979	$\pm 0,00572$	$\pm 0,00613$	$-0,00032$
1980	$\pm 0,00577$	$\pm 0,00622$	$-0,00064$

В таблице представлены среднегодовые среднеквадратические ошибки определения поправки часов, полученные двумя методами.

Как видно из таблицы, различия в ε незначительные и составляют $\sim 7\%$. Анализ всех 443 поправок за исследуемый интервал времени показывает, что 314 поправок имеют $\varepsilon_{\text{ЭКВ}} < \varepsilon_{\text{М.Н.К.}}$; 102 поправки — $\varepsilon_{\text{ЭКВ}} > \varepsilon_{\text{М.Н.К.}}$ и 27 — $\varepsilon_{\text{ЭКВ}} = \varepsilon_{\text{М.Н.К.}}$, или 70,9%; 23,0% и 6,1% соответственно. Среднегодовые разности поправок, представленные в таблице, говорят о хорошем согласии между поправками. Однако при этом не учитывались поправки. разности между которыми превышали 8—10 мс. Анализ таких аномальных вечеров позволяет утверждать, что эти различия обусловлены неуверенным определением азимута методом наименьших квадратов. Просмотр средних квадратических ошибок в этих случаях показал, что и внутренняя сходимость метода наименьших квадратов значительно хуже, чем сходимость при обработке с использованием экваториальных звезд.

Рассмотрение обширного статистического материала позволяет сделать вывод, что при условии использования полных

часовых программ оба метода дают хорошее согласие. Отклонения от этого условия ($\Sigma A \approx 0$) отрицательно сказываются на определении азимута методом наименьших квадратов и, соответственно, на значении поправки часов. Это согласуется с [2] о целесообразности обработки результатов наблюдений служб времени с использованием экваториальных звезд для определения азимута.

Список литературы: 1. Долгов П. Н. Определение времени пассажным инструментом в меридиане. — М.: Гостехтеоретиздат, 1952, с. 299—308. 2. Павлов Н. Н. Предварительный каталог прямых восхождений звезд, наблюденных в Пулкове во время МГТ на фотоэлектрическом пассажном ин-те Ф-3. — Изв. Гл. астроном. обсерватории в Пулкове, 1961, № 168, с. 2—15.

Поступила в редколлегию 26.04.81.

УДК 521.852.

С. Р. ИЗМАЙЛОВ, Д. Г. СТАНКЕВИЧ

НАБЛЮДЕНИЯ ПОКРЫТИЙ ЗВЕЗД ЛУНОЙ НА ЮНОШЕСКОЙ АСТРОНОМИЧЕСКОЙ ОБСЕРВАТОРИИ г. ХАРЬКОВА В 1977—1978 ГОДАХ

Наблюдения велись на рефракторе Цейсса $D=130$ мм; $F=1950$ мм. Моменты регистрировались на печатающий хронограф, питаемый кварцевым генератором, методом «глаз — клавиша». Личное уравнение не исследовалось. Сигналы точного времени (программа «Маяк») впечатывались на хронограф с помощью клавиши. Точность привязки к сигналам времени составляет $\pm 0,05^s$. Прилагаем сводку наблюдений со следующими сокращениями и обозначениями: № SAO — номер звезды по каталогу SAO; наблюдатели: ИС — Измайлов С. Р.; СД — Станкевич Д. Г.; Д — покрытие; R открытие; оценка — субъективная оценка качества наблюдений в условной пятибалльной системе (см. К. К. Дубровский. Инструкция для наблюдений покрытий звезд Луной. Астрономический календарь. Постоянная часть. Изд. 5-е. 1962, с. 481—489).

Дата	Всемирное время ИТС	Звезда	Увеличе- ние	Наблю- датель	Оцен- ка	Приме- чание
1	2	3	4	5	6	
24.02.77	17 28 36.2	093372 8.6	120	СД	4	—
24.02.77	17 36 58.3	093368 9.0	120	СД	3	
26.03.77	17 18 55.2	094586 6.6	120	СД	4	
26.03.77	17 44 13.2	094589 8.2	120	СД	4	
26.03.77	18 24 01.6	094606 8.7	120	СД	4	
26.03.77	18 39 24.8	094617 7.0	120	СД	4	
26.03.77	18 45 40.1	094621 9.0	120	СД	3	1
21.04.77	17 18 31.9	093907 4.8	120	СД	4	

1	2	3	4	5	6
21.04.77	17 28 11.7	— 9.3	120	СД	2 2
21.04.77	18 11 52.2	093927 7.9	120	СД	4
23.04.77	17 49 35.2	095195 8.7	120	СД	4
23.04.77	17 59 56.9	095211 8.7	120	СД	5
27.08.77	17 33 00.2	164415 6.5	120	ИС	4
20.10.77	16 20 40.4	163968 8.7	120	СД	3
20.10.77	16 41 31.1	163968 8.7	120	СД	3
20.10.77	16 53 29.6	163982 8.7	120	СД	3
13.12.77	14 35 57.4	163366 8.8	120	ИС	4
13.12.77	14 53 54.3	163374 8.8	120	ИС	3
13.12.77	15 06 26.7	163380 9.0	120	ИС	3
13.12.77	15 11 03.9	163389 8.6	120	ИС	4
13.12.77	15 58 29.4	163414 8.7	120	ИС	3
14.12.77	15 01 45.5	164233 8.9	120	СД	4
14.12.77	15 09 22.9	164238 7.7	120	СД	4
14.12.77	16 13 52.0	164260 8.9	120	СД	3
14.12.77	17 35 47.2	164292 8.0	80	СД	3
15.12.77	15 14 53.5	145907 8.7	120	СД	4
15.12.77	17 23 07.2	145938 7.0	80	СД	4
15.12.77	17 28 25.3	145947 9.3	80	СД	2 3
16.12.77	14 13 05.4	146441 8.5	120	СД	4
16.12.77	14 52 28.8	146451 6.2	80	СД	4
16.12.77	14 52 40.9	146448 9.0	80	СД	4
18.12.77	13 58 17.2	109355 7.3	80	СД	4
18.12.77	15 12 50.3	109370 8.3	80	СД	4
18.12.77	15 29 29.3	109382 9.0	80	СД	3
18.12.77	16 09 15.1	109392 7.6	80	СД	4
18.12.77	17 09 33.6	109416 8.6	80	СД	2
15.01.78	18 56 46.2	109818 8.6	80	СД	1 4
15.01.78	19 15 00.2	109824 8.6	80	СД	4
11.04.78	19 00 16.9	094027 1.1	80	СД	5
12.04.78	17 42 37.8	094513 8.2	80	СД	4
12.04.78	17 56 26.2	094523 8.7	80	СД	4
12.04.78	18 00 06.9	094526 5.1	80	СД	4
22.04.78	18 44 25.0	139544 6.2	80	СД	3 5
09.09.78	17 06 10.4	160046 5.0	80	СД	4
16.09.78	18 37 03.9	146820 8.5	80	СД	4 6
16.09.78	18 38 48.4	146804 8.0	80	СД	3 6
16.09.78	19 07 58.5	146827 9.0	80	СД	2

Примечания: 1 — звезда видна очень плохо; 2 — видна плохо, звезды нет в SAO, ее номер в AGK 3+17°0387; 3 — видна плохо; 4 — момент регистрации неуверенный; 5 — слилась со светлым краем Луны; 6 — во время полного лунного затмения.

Поступила в редколлегию 21.09.81.

ИЗМЕНЕНИЕ ЯРКОСТИ ЛУННЫХ ОБРАЗОВАНИЙ С ФАЗОЙ

Изменение яркости лунных деталей с углом фазы несет значительную информацию о физических свойствах и строении рельефа исследуемого района. Однако как извлечь ее из фазовых кривых, не совсем ясно, поскольку фазовые кривые яркости разных образований на Луне ведут себя по-разному в зависимости от положения на диске, от отражательной способности, от строения и состава поверхности. В статье приведена простая модель поведения фазовых кривых блеска, введено четыре параметра, описывающих это поведение, указан способ их определения. Эти параметры можно использовать для построения карт физических характеристик лунной поверхности, для описания фазовых кривых блеска астероидов и других тел солнечной системы.

Если вся планета покрыта одним и тем же материалом, то вполне естественно, что для яркости любой точки можно записать

$$B(\alpha, \varphi, \lambda) = B_0 S(\alpha) b(\alpha, \varphi, \lambda), \quad (1)$$

где φ и λ — фотометрическая широта, отсчитываемая от экватора интенсивности, и долгота, отсчитываемая от центрального фотометрического меридиана в сторону Солнца; α — угол фазы; $b(\alpha, \varphi, \lambda)$ — относительное распределение яркости по диску. Эта функция равна единице в некоторой стандартной точке на диске, причем координаты стандартной точки могут меняться в зависимости от угла фазы; $B_0 S(\alpha)$ — яркость стандартной точки; $S(\alpha) = 1$ для некоторого стандартного угла фазы; B_0 — яркость этой точки при стандартном угле фазы.

К выбору стандартных условий освещения надо относиться серьезно. Желательно, чтобы координаты этой точки были простой функцией угла фазы. Например, лимб на экваторе интенсивности имеет одну и ту же долготу $\lambda = 90^\circ$. Эту точку многие авторы выбирают стандартной [1, 2]. Можно взять подсолнечную точку, для нее $\lambda = \alpha$, угол падения света равен нулю, угол отражения α . Наконец, можно взять зеркальную точку, которая

будет стандартной в данной работе. Для нее $\lambda = \frac{\alpha}{2}$ угол падения света равен углу отражения, что ставит их в равноправное положение. Яркость этой точки в дальнейшем будем называть эквигональной. Сила света, отраженного от поверхности, является симметричной функцией относительно этой точки. Благодаря такой симметрии зеркальная точка на диске является наиболее представительной для широкой окрестности окружающих областей.

Вполне понятно, что если поверхность представлена разнородным материалом, то все величины, входящие в формулу (1), являются функциями планетоцентрических координат.

Ясно, что для сравнительного изучения фотометрических свойств различных районов на планете эти районы нужно исследовать в одних и тех же фотометрических условиях. Однако обычно плоскость экватора интенсивности лежит вблизи плоскости экватора планеты, поэтому наблюдать все точки в одинаковых фотометрических условиях не представляется возможным. Луна повернута к нам одной стороной, поэтому даже для точек вблизи экватора при наблюдениях с Земли нельзя отыскать идентичные фотометрические условия. Поэтому весьма важно разработать процедуры перевода наблюдаемых значений яркости в яркость, которую имела бы изучаемая область в одних и тех же стандартных условиях.

При изучении фазовой зависимости яркости поставленная задача будет решена, если известен закон распределения яркости по диску планеты.

В работе [3] были предложены два закона распределения яркости по диску Луны. Теоретический, выведенный в предположении чрезвычайной раздробленности поверхности

$$b(\alpha, \varphi, \lambda) = \frac{\cos \left[\frac{\pi}{\pi - \alpha} \left(\lambda - \frac{\alpha}{2} \right) \right] \cos \frac{\alpha}{2}}{\cos \lambda} \quad (2)$$

и эмпирический

$$b(\alpha, \varphi, \lambda) = \frac{\left[\cos^p \left(\lambda - \frac{\alpha}{2} \right) - \sin^p \frac{\alpha}{2} \right] \cos^{p-1} \varphi \cos \frac{\alpha}{2}}{\cos \lambda \left(1 - \sin^p \frac{\alpha}{2} \right)} \quad (3)$$

В работе [4] показано, что формула (3) с изменяющимся параметром p описывает широкий набор шероховатых поверхностей, от лунной ($p=1$) до ортотропно рассеивающей ($p=2$). Для образцов лунного грунта $p=1,1 \div 1,2$, для окиси железа $p=1$.

Следует отметить, что формулы (2) и (3) при изменении λ , φ , α от 0 до 60° дают значения, отличающиеся не более чем на 3% и обе с успехом могут применяться для описания распределения яркости по диску Луны при сравнительно малых углах фазы.

В работе [4] отмечено также, что при альбедо ниже 20% шероховатые поверхности при увеличении сложности микро-рельефа сравнительно быстро по закону распределения приближаются к предельному случаю, когда $p=1$, независимо от отражательной способности, т. е. для Луны, отличающейся сильной раздробленностью поверхности и низкой отражательной

способностью, можно считать, что закон распределения яркости по диску одинаков для всех деталей. Это обстоятельство чрезвычайно упрощает задачу изучения фазовой зависимости яркости лунных образований. В дальнейшем будем применять для Луны формулу (2), а для земных образцов — формулу (3).

В работе [5], где обсуждается природа оппозиционного эффекта в рамках геометрической оптики при малой отражательной способности, показано, что в формировании фазовой зависимости яркости основную роль играет взаимное затенение частиц, создающее теневую концентрацию света в противостоянии, и эффекты типа глории и уголкового отражателя, создающие оптическую концентрацию света в противостоянии.

В соответствии с этим фазовую зависимость яркости какой-либо стандартной точки можно представить выражением

$$S(\alpha) = T(\alpha)[L(\alpha) + O(\alpha)], \quad (4)$$

где $T(\alpha)$ формируется взаимным затенением частиц и определяется микро- и мезорельефом; $L(\alpha)$ описывает диффузное рассеяние света частицами; $O(\alpha)$ описывает оппозиционную концентрацию света. При этом $T(\alpha)$ и $L(\alpha)$ меняются гораздо медленнее, чем $O(\alpha)$, так что в области, где $O(\alpha)$ отлична от нуля, $T(\alpha)$ можно считать величиной постоянной.

Теоретически получить функции $T(\alpha)$, $L(\alpha)$, $O(\alpha)$ практически невозможно, так как они зависят от геометрической структуры поверхности, для задания которой, в свою очередь, нужно делать какие-то предположения или брать эмпирические зависимости; от прозрачности зерен, коэффициента преломления, от строения зерен микрорельефа, их формы и т. д. Работы, в той или иной мере соответствующие этому направлению, имеются [6, 7], однако в них по-прежнему присутствует эмпиризм при задании вероятности отклонения поверхности от средней плоскости, распределения элементов по наклонам, индивидуальных рассеивающих свойств зерен микрорельефа.

Наблюдения яркости деталей лунной поверхности, астероидов показывают, что в значительном диапазоне углов фаз в шкале звездных величин блеск поверхности близок к линейной функции углов фазы.

Подбор эмпирических зависимостей, описывающих изменение яркости стандартной области, показывает, что в достаточно широком интервале углов фаз яркость зеркальной точки можно представить выражением вида

$$T(\alpha)L(\alpha) = me^{-\mu\alpha}. \quad (5)$$

Оптическая концентрация, вызываемая глорией, должна быть обратной функцией угла фазы, а уголковое отражение — δ -функцией угла фазы, но несовершенство форм частиц, соиз-

меримость их с длиной волны освещающего света приводит к размытию этих зависимостей. Поэтому с какой-то степенью уверенности оптическую концентрацию также можно представить экспонентой

$$T(\alpha)L(\alpha) = ge^{-\gamma\alpha}. \quad (6)$$

Таким образом, полагаем, что яркость стандартной зеркальной точки описывается выражением

$$S(\alpha) = me^{-\mu\alpha} + ge^{-\gamma\alpha}. \quad (7)$$

Ясно, что вклад глории заметен лишь в противостоянии и распространяется, значительно ослабляясь, до радуги, которая для силикатов наблюдается при углах фазы в $12 \div 15^\circ$. Угловое отражение существенно в еще более узком интервале углов фазы.

Индикатометрические измерения глории на шариках габбро-диабазы [5] указывают на то, что величина γ заключена в пределах $8 \div 10$. Для углового эффекта в зависимости от размеров частиц, совершенства их формы $\gamma \approx 15-20$.

Для оценки величин γ и g предположим, что весь рост яркости вблизи полнолуния [8, 9] вызван оптической концентрацией света. Полагая, что от $\alpha=5^\circ$ до 0° яркость возрастает в 1,4 раза со средней скоростью 6% на градус при $\alpha=3^\circ$, мы получаем, что $g \approx 0,5$, $\gamma \approx 10$.

Для определения средних значений коэффициентов в формуле (7) воспользуемся наблюдениями интегрального блеска Луны. На сегодняшний день заслуживающими наибольшего доверия являются наблюдения Ружье [10]. В предположении, что наблюдаемая яркость лунных образований описывается формулой (1), где $\bar{B}_0$ в данном случае — средняя яркость лунного диска при стандартном угле фазы, а распределение яркости описывается формулой (2), для интегрального блеска получим

$$\psi(\alpha) = \bar{B}_0 S(\alpha) \cos \frac{\alpha}{2} \frac{\pi - \alpha}{\pi}. \quad (8)$$

С помощью этого выражения можно вычислить фазовую функцию $S(\alpha)$. Используя наблюдения Ружье, в которых мы для углов фазы, больших 10° , возьмем среднее значение блеска до и после полнолуния, а для углов фазы, меньших 10° , — лишь наблюдения в зимний период 1932/33 г., когда либрация менялась незначительно и наблюдения более однородны, получим изменение яркости для зеркальной точки, приведенное в табл. 1. Яркость при $\alpha=5^\circ$ принята за единицу. В табл. 1 дано также значение функции, вычисленное по формуле $S(\alpha) = 0,90 e^{-0,85\alpha} + 0,52 e^{-13\alpha}$. Расходимость вычисленных и наблюдаемых значений не превышает 4% (точность интегральных наблюдений), за исключением больших углов фазы, где значительную роль

Таблица 1

α (град)	$S(\alpha)$ набл.	$0,9 e^{-0,85\alpha}$	$0,52 e^{-13\alpha}$	$S(\alpha)$ вычисл.
0		0,900	0,520	1,420
2,5	1,160	0,866	0,294	1,160
5	1,000	0,834	0,167	1,001
7,5	0,897	0,804	0,095	0,899
10	0,830	0,775	0,054	0,829
15	0,748	0,720	0,017	0,737
20	0,683	0,669	0,006	0,675
30	0,574	0,576		0,576
40	0,491	0,497		0,497
50	0,428	0,428		0,428
60	0,374	0,370		0,370
70	0,326	0,318		0,318
80	0,280	0,274		0,274
90	0,232	0,237		0,237
100	0,205	0,204		0,204
120	0,159	0,150		0,150
140	0,127	0,113		0,113

играет неравномерное распределение морского и материкового вещества по диску Луны.

Возрастание яркости от 5° до 0° угла фазы в 1,42 раза также не противоречит наблюдениям. Наблюдения Ружье относятся к голубой части спектра ($\lambda_{эф} = 0,48 \mu$).

Таблица 2

α (град.)	Платон		Лемонье		Тихо	
	набл.	вычисл.	набл.	вычисл.	набл.	вычисл.
0		1,460		1,400		1,380
1,0	1,319	1,328	1,320	1,285	1,250	1,251
2,5	1,185	1,176	1,167	1,175	1,130	1,121
5	1,000	1,004	1,000	1,018	1,000	1,000
7,5	0,893	0,893	0,920	0,943	0,937	0,944
10	0,825	0,818	0,857	0,870	0,898	0,905
15	0,726	0,723	0,784	0,786	0,840	0,840
20	0,659	0,659	0,730	0,724	0,798	0,794
30	0,556	0,562	0,640	0,634	0,722	0,715
40	0,485	0,485	0,567	0,557	0,652	0,645
50	0,423	0,418	0,488	0,487	0,584	0,582
60	0,367	0,361	0,421	0,430	0,515	0,522
70	0,314	0,312	0,362	0,376	0,466	0,470

Далее для проверки возможностей формулы (7) воспользуемся наблюдениями поверхностной яркости лунных образований. В табл. 2 приведены данные для трех областей Луны (Тихо, Лемонье, Платон), наиболее часто наблюдаемых различными авторами. Тихо — наиболее яркая область на Луне, кратеры Лемонье и Платон, имеющие почти одинаковую морскую отражательную способность, различаются по скорости,

изменения яркости с углом фазы. Абсолютные измерения яркости, заслуживающие наибольшего доверия, сделаны Шароновым В. В. [11] и Пикоком [12]. Однако этим наблюдателям не удалось провести многочисленные измерения вблизи полнолуния. Поэтому в табл. 2 данные [11, 12] усреднены и к ним добавлены относительные наблюдения вблизи полнолуния [8, 9]. С помощью постоянного множителя при $\alpha=20^\circ$ все наблюдения приведены в одну систему. Данные до и после полнолуния с помощью формулы (2) были приведены к стандартным условиям и усреднены.

Из этих наблюдений для Платона $S(\alpha) = 0,88e^{-0,85\alpha} + 0,58e^{-13\alpha}$; для Лемонье $S(\alpha) = 0,95e^{-0,75\alpha} + 0,45e^{-13\alpha}$; для Тихо $S(\alpha) = 0,98e^{-0,6\alpha} + 0,40e^{-20\alpha}$.

Из этих исследований видно, что при $\alpha=10^\circ$ вклад оптической концентрации в общую яркость в 10 раз меньше, чем в полнолуние. Однако в полнолуние оптическая концентрация создает около 30% общей яркости — весьма ощутимый вклад.

Следует заметить также, что при угле фазы $\alpha=7^\circ,5$ падение яркости теневой составляющей приблизительно равно по величине вкладу оптической концентрации, т. е. яркость при угле фазы $\alpha=7^\circ,5$ приблизительно равна m , что можно использовать для оценки этой величины.

Таблица 3

α (град.)	2		4		6		8		9	
	набл.	вычисл.	набл.	вычисл.	набл.	вычисл.	набл.	вычисл.	набл.	вычисл.
0		1,240		1,280		1,229		1,080		1,395
2,5	1,084	1,090	1,113	1,108	1,126	1,124	1,050	1,040	1,200	1,170
5	1,000	0,998	1,000	1,002	1,043	1,043	1,000	0,994	1,000	1,030
7,5	0,940	0,939	0,936	0,934						
10	0,903	0,919	0,898	0,888	0,968	0,987	0,910	0,910	0,860	0,819
15	0,854	0,847	0,843	0,828					0,764	0,727
20	0,806	0,809	0,791	0,785	0,896	0,900	0,765	0,764	0,695	0,668
30	0,742	0,754	0,714	0,716	0,846	0,840	0,622	0,642	0,630	0,622
40	0,695	0,703	0,650	0,656	0,789	0,783	0,526	0,539	0,589	0,603
50	0,650	0,656	0,597	0,601	0,717	0,731	0,450	0,452	0,581	0,591
60	0,612	0,612	0,550	0,551	0,676	0,681	0,379	0,380	0,588	0,581

Для определения границ применимости формулы (7) были исследованы образцы, данные в табл. 3. Описание и основные характеристики образцов представлены в работе [4]. Нумерация сохранена.

2. Лунный грунт «Луна-20» ($0,127 \text{ мм} < d < 0,2 \text{ мм}$)

$$S(\alpha) = 0,93e^{-0,4\alpha} + 0,31e^{-13\alpha}.$$

4. Лунный грунт «Луна-20» ($d < 0,083 \text{ мм}$)

$$S(\alpha) = 0,93e^{-0,5\alpha} + 0,35e^{-13\alpha}.$$

6. Андезит-базальт $S(\alpha) = 1,04e^{-0,4\alpha} + 0,25e^{-20\alpha}$.
8. Окись железа $S(\alpha) = 1,08e^{-\alpha}$.
9. Шарик габбро-диабаз $S(\alpha) = 0,645e^{-0,1\alpha} + 0,750e^{-8\alpha}$.

Отклонения вычисленных и наблюдаемых значений функций $S(\alpha)$ не превышают 4%, что свидетельствует о реальной возможности применения формулы (7) для описания фазовой зависимости яркости. Исключение составляет образец 9, где при $\alpha = 12^\circ,5$ наблюдается радуга, никак не учитываемая формулой (7). Причем лунные образцы можно описывать с постоянным $\gamma = 13$. Для окиси железа (лимонит) в синей области вовсе нет ни глории, ни уголкового эффекта, и хотя кривая значительно меняется с фазой, она целиком описывается экспонентой с $\mu = 1$. Дробленый андезит-базальт повсюду представляется пологой экспонентой, однако вблизи оппозиции заметен резкий всплеск с коэффициентом роста экспоненты $\gamma = 20$, что, по-видимому, свидетельствует о наличии уголковой оптической концентрации. Шарик габбро-диабаз обладают ярко выраженной глорией, заметна радуга при $\alpha = 12^\circ,5$.

Таким образом, уголковый эффект и gloria описываются разными показателями γ . Однако для лунной поверхности, где имеют место и тот и другой эффект и нелинейная теневая концентрация, обусловленная мостовыми структурами и частицами, лежащими на прозрачном стекле или кристалле, все эти явления перемешаны. Отделить их друг от друга весьма сложно. Число 13, используемое для γ в этой работе, до некоторой степени символизирует создавшуюся ситуацию. Поскольку измерения фазовых зависимостей с Земли возможны лишь при $\alpha > 1^\circ$, и в полнолуние яркость неизвестна, а изменением величины g до некоторой степени можно скомпенсировать неточность в определении γ при $\alpha > 1^\circ$, то в первом приближении можно оставить γ неизменным для большинства деталей Луны. Хотя при более тонком изучении оптических свойств лунных образований вблизи полнолуния это ограничение снять необходимо.

В рамках рассмотренной модели легко описать изменение цвета с углом фазы. В работе [13] отмечалось, что для некоторых образцов лунного грунта показатель цвета минимален при угле фазы $5^\circ < \alpha < 10^\circ$ и растет как к полнолунию, так и при увеличении угла фазы после 10° . В табл. 4 дана эквигональная яркость образца Луны 16 в красной и синей области спектра.

Далее приведено значение показателя цвета $\frac{S_k(\alpha)}{S_c(\alpha)} = C$ и рядом вычисленное значение. При этом для красной области спектра ($\lambda_{эф} = 0,65 \mu$), $S_k(\alpha) = 0,92e^{-0,72\alpha} + 0,43e^{-13\alpha}$, для синей ($\lambda_{эф} = 0,43 \mu$) $S_c(\alpha) = 0,95e^{-0,8\alpha} + 0,36e^{-13\alpha}$. В синей части показатель шероховатости μ больше, чем в красной, что приводит к увеличению показателя цвета с фазой на величину $0,97e^{-0,1\alpha}$, т. е. около 10% на радиан. Но поскольку прозрачность частиц

в синей части меньше, чем в красной, интенсивность оппозиционного пика g уменьшается с уменьшением длины волны, что приводит к увеличению показателя цвета с уменьшением угла фазы в области, где оппозиционный эффект имеет существенное значение.

Таблица 4

α (град)	$S_k(\alpha)$ набл.	$S_c(\alpha)$ набл.	C набл.	C вычисл.
0				1,031
2,5	1,130	1,121	1,008	1,013
5	1,000	1,000	1,000	1,002
7,5	0,917	0,927	0,989	0,997
10	0,857	0,865	0,990	0,994
15	0,784	0,778	1,008	0,997
20	0,725	0,718	1,010	1,004
30	0,632	0,620	1,019	1,019
40	0,567	0,543	1,044	1,039

Вопрос о влиянии альbedo на фазовую зависимость яркости нами пока не обсуждался; мы лишь потребовали, чтобы оно было мало. Однако эффекты, пропорциональные квадрату отражательной способности, должны иметь место. Увеличение прозрачности зерен грунта приводит к засветке теней, тем большей, чем меньше размер зерна. Малые частицы перестают создавать затенение, что эквивалентно уменьшению шероховатости поверхности, т. е. μ уменьшается с увеличением альbedo.

Многократное рассеяние, учет которого наиболее корректно проведен в работе [7], также приводит к более пологому падению яркости с увеличением угла фазы. При этом, если вторичное отражение создает фон, слабо меняющийся с фазой, то в рамках выражения (7) при достаточно малом альbedo и при углах фазы меньше радиана его можно описать некоторым пропорциональным альbedo уменьшением коэффициента μ и пропорциональным квадрату альbedo увеличением m . Таким образом, не выходя за рамки выражения (7), можно записать

$$S(\alpha) = me^{-h\alpha + k\alpha^2} + ge^{-\gamma\alpha}, \quad (9)$$

где $e^{k\alpha^2}$ с какой-то степенью точности учитывает влияние альbedo на фазовую зависимость яркости, а h — влияние шероховатости, $\mu = h - km$.

Оценить значение коэффициента k можно по наблюдениям интегрального блеска [14] в разных длинах волн, наивно полагая, что с увеличением длины волны меняется лишь альbedo, а коэффициент шероховатости остается постоянным.

Используя зависимость (8), можно найти фазовый интеграл $q = 2 \int_0^\pi \psi(\alpha) \sin \alpha d\alpha$. Подставляя сюда (8) и проведя интегрирование, мы получим связь q с μ . Конечное выражение получается

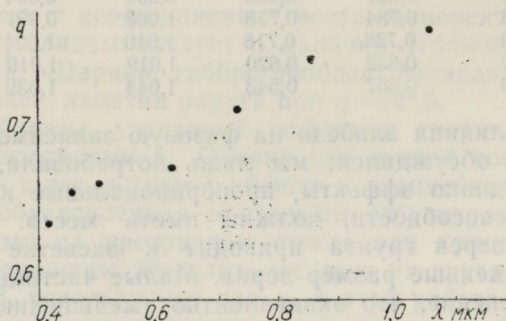
громоздким, однако в области $\mu=1 \div 0,6$ его, с точностью до процента, можно представить выражением

$$q = 0,576 + \frac{1}{2}(1 - \mu) + 0,3(1 - \mu)^2. \quad (10)$$

С другой стороны, величину фазового интеграла соотношением, подобным предложенному Расселом, можно связать с интегральным блеском при $\alpha=50^\circ$. В случае справедливости (7)

$$q = 2,12 \psi(50^\circ). \quad (11)$$

Вычисленное из наблюдений [14] по формуле (11) значение фазового интеграла в зависимости от длины волны света при-



Зависимость фазового интеграла от длины волны.

ведено на рисунке. При этом величина m , необходимая для калибровки кривой, вычислялась по наклону фазовой кривой блеска и геометрическому альбедо. Связь вычисленного по формуле (10) значения μ с m удовлетворительно представляется формулой $\mu = 1 - 2,5 m$. По ходу контраста материк-море с углом фазы тоже можно оценить k . По нашим наблюдениям получается, что $\mu = 1,1 - 3 m$.

Для того чтобы исследовать сравнительную отражательную способность и фазовую зависимость яркости различных образований на Луне, их надо рассматривать в идентичных фотометрических условиях. Установленный закон распределения яркости по диску Луны и доказательство с приемлемой точностью его независимости от альбедо позволяют отыскивать по яркости в любой точке лунного диска яркость точки в стандартных фотометрических условиях. Такой стандартной областью предлагается выбрать зеркальную точку (точку, где был бы блик, если бы Луна была зеркальной). Эта точка наблюдается при всех углах фазы. Углы падения и отражения света в ней равны. Яркость этой точки будем называть экви-

гональной яркостью при данном угле фазы. Эквигональная яркость довольно широкого набора лунных деталей, образцов лунного грунта и раздробленных земных пород может быть представлена эмпирической зависимостью $S(\alpha) = me^{-\mu\alpha} + ge^{-\gamma\alpha}$, имеющей достаточно прозрачную физическую интерпретацию входящих в нее параметров; $m+g=bn$ — нормальное альbedo; m — яркость диффузно рассеивающей составляющей поверхности в полнолуние. Эта величина несет информацию об оптических свойствах той части и тех частиц, отражение от которых играет основную роль при углах фазы, больших 10° . Она определяет сферическое альbedo. При расчетах теплового режима поверхности планеты необходимо брать величину m , поскольку вклад оппозиционного эффекта в фазовый интеграл весьма мал; $\mu = h + kt$ определяет фазовый интеграл и вместе с m — тепловой режим поверхности. Будем называть его крутизной фазового роста яркости; h характеризует степень взаимного затенения частиц, зависит от микро- и мезорельефа, т. е. от геометрического строения поверхности. В работе [5] показано, что h равно полусумме модулей перепадов высот рельефа между соседними точками сечения поверхности на единице расстояния между достаточно удаленными точками поверхности, лежащими в плоскости сечения. Будем называть его показателем шероховатости. Он зависит от механических свойств грунта, от степени переработанности его и тем самым — от времени экспонирования грунта на поверхности. Можно надеяться с помощью показателя шероховатости провести стратиграфию лунных образований. Например, для Лемонье и Платона альbedo почти одинаковое, разница в показателе μ показывает, что показатель шероховатости Платона больше; k — коэффициент, характеризующий влияние альbedo на фазовый ход яркости. Наличие связи между крутизной фазового роста яркости и альbedo может быть использовано при определении альbedo астероидов, делая какие-то предположения относительно h или определяя h из наблюдений в разных участках спектра, если альbedo по спектру меняется значительно; g — яркость в полнолуние, вносимая частицами, создающими нелинейную теневую и оптическую концентрацию света на источник. Эта величина несет информацию о количестве частиц, создающих оппозиционный эффект, их прозрачности. Будем называть ее интенсивностью оппозиционного пика; γ — коэффициент, характеризующий качество частиц, создающих оптическую концентрацию, их форму, коэффициент преломления, прозрачность, размеры, наличие рассеивающих центров внутри частиц. Будем называть его показателем направленности оппозиционного пика.

Из изложенного ясно, что при исследовании параметров фазовой зависимости используются разные части зависимости эквигональной яркости от угла фазы. Для построения карты

альбедо нужно использовать углы фазы $7^\circ \div 15^\circ$, для крутизны фазового роста — $7^\circ \div 40^\circ$, оппозиционных характеристик — $7^\circ \div 0^\circ$.

Список литературы: 1. Фесенко В. Г. Фотометрические особенности Луны. — Астрон. журн., 1960, 3, с. 496—500. 2. Псарев В. А. Численная модель лунной индикатрисы. — Астрон. циркуляр., 1980, № 1129. 3. Акимов Л. А. О влиянии мезорельефа на распределение яркости по диску планеты. — Астрон. журн., 1975, т. 52, вып. 3, с. 635—641. 4. Акимов Л. А. О распределении яркости по диску Луны и планет. — Астрон. журн., 1979, 56, вып. 2, с. 412—418. 5. Акимов Л. А. О природе оппозиционного эффекта. — Вестн. Харьк. ун-та, 1980, № 204, вып. 15, с. 3—12. 6. Басс Ф. Г., Фукс И. М. Рассеяние волн на статистически неровной поверхности. — М.: Наука, 1972. — 424 с. 7. Мороженко А. В., Яновицкий Э. Г. Оптические свойства поверхностного слоя Луны. — Астрон. журн., 1971, 48, вып. 1, с. 172—183. 8. Gehrels T., Coffeen Owings P. Wavelength dependence of polarisation III. The lunar surface. — Astron. Journ., 1964, 69, N 10, p. 826—852. 9. Wildey R. I., Pohn H. A. Detailed photoelectric photometry of the Moon. — Astron. Journ., 1964, 69, N 8, p. 619—634. 10. Rougier G. Photometric photoelectrique global de la Lune. — Annal. Obs. Strasburg, 1933, 2, p. 205—399. 11. Сытинская Н. Н., Шаронов В. В. Исследование отражательной способности лунной поверхности. — Уч. зап. Ленингр. ун-та, 1952, № 153, с. 114—154. 12. Peacock K. Multicolor photoelectric photometry of the lunar surface. — Icarus, 1968, N 9, p. 16—66. 13. Akimov L. A., Antipova-Karataeva I. I., Shkuratov I. G. Indicatrix measurements of the lunar soil Luna-24, Luna-16, Luna-20. Lunar and planet. Sci X, 1979, p. 9—12. 14. Irvine W. M., Lane A. P. Monochromatic phase curves and albedos for the lunar disk. — The astronomical journ., 1973, 78, N 3, p. 267—277.

Поступила в редколлегию 18.05.81.

УДК 523.3

Ю. Г. ШКУРАТОВ

АЛЬБЕДО ЛУНЫ

Поверхностный слой лунного вещества (реголит) в основной массе является порошком, отдельные частицы которого представлены фрагментами пород и минералов, микробрекчиями, стеклами эндогенного и космогенного происхождения. Разнообразие типов частиц грунта и сложность поверхностного слоя, который эти частицы формирует, сильно затрудняет решение задач, связанных с дистанционным определением физических и химико-минералогических свойств лунного реголита по его оптическим характеристикам. В частности, размеры частиц грунта варьируют от субмикронных до значительно больших длины световой волны. Крупные частицы имеют обычно сложную морфологию поверхности, т. е. шероховаты, кроме того, эти частицы обволакиваются «шубой» более мелких частиц. Это указывает на необходимость учета волновых свойств света при анализе процессов рассеяния. Однако задача в такой общей постановке не поддается решению. Это связано с неудовлетворительным состоянием теории рассеяния электромаг-

нитных волн близко расположенными частицами произвольных размеров, форм и состава.

В этой ситуации оправдано создание некоторой приближенной картины формирования оптических характеристик Луны, основанной на геометрической оптике. Используем двухкомпонентную модель формирования отражательной способности Луны, т. е. предполагаем, что отраженный световой поток состоит из диффузной (внутренней, преломленной) и зеркальной (френелевской) составляющих. Возможно ли, хотя бы приближенно, разделить эти две составляющие и какую информацию при этом можно извлечь из их исследования? Эти вопросы мы и рассмотрим.

Оптические свойства вещества частиц, составляющих отражающий слой, характеризуются комплексным коэффициентом преломления $m = n + i\kappa$, где n — действительная, κ — мнимая части. Параметры n и κ зависят от длины световой волны λ . В случае силикатного состава частиц $\kappa \ll n$. Более точно: $n \approx 1,50 - 1,75$, а $\kappa = 10^{-4} - 10^{-3}$. Такие значения n и κ позволяют считать, что зеркальная составляющая альbedo силикатов ρ_e определяется в основном параметром n , так как

$$\rho_e \sim \frac{(n-1)^2 + \kappa^2}{(n+1)^2 + \kappa^2}, \quad (1)$$

а внутренняя составляющая ρ_i зависит от κ более сильно:

$$\rho_i \sim \exp\left(-\frac{4\pi\kappa}{\lambda} l\right), \quad (2)$$

где l — размер частиц.

Таким образом, независимое исследование ρ_e и ρ_i дает информацию о фундаментальной физической характеристике вещества, т. е. m .

Характер зависимости лунного альbedo от длины волны определяется частотной зависимостью френелевской и внутренней составляющей и их относительными вкладами в суммарный поток. В видимой части спектра альbedo Луны определяется в основном внутренней составляющей. Следовательно, в этой части спектра можно изучать ρ_i . В ультрафиолетовом диапазоне ($\lambda < 3000 \text{ \AA}$) внутренняя составляющая сравнима по величине с зеркальной. В ультрафиолете ($\lambda \approx 2000 \text{ \AA}$) лунные силикаты очень темные ($\rho_e + \rho_i \approx 2-3\%$). Минимум диффузной составляющей в области $1500-2000 \text{ \AA}$ обусловлен собственным поглощением силикатов и сильными полосами поглощения переноса заряда типа $O^{2-} \rightarrow Ti^{4+}$; $O^{2-} \rightarrow Fe^{2+}$. Длинноволновое крыло результирующей полосы поглощения простирается далеко в видимую часть спектра, особенно у той фракции лунного грунта, которая подверглась вторичной переработке. Обычно у силикатов возрастание поглощательной способности сопро-

возбуждается увеличением n , а значит, и ρ_e . Следовательно, в тех участках спектра, где расположены очень сильные полосы поглощения и при этом l достаточно велико, френелевская составляющая может стать больше, чем внутренняя. Таким образом, представляется возможным внутреннюю и внешнюю составляющие разделять, исследуя альбедо в различных участках спектра. Это, однако, не решает проблемы, поскольку желательно иметь информацию о преломленном и зеркальном компоненте для одной и той же длины волны.

Трудность преодолима, если учесть, что при углах фазы, близких к $100^\circ - 110^\circ$, внешний компонент видимой части спектра (особенно коротковолновой) хотя и мал, но поляризован, а внутренний практически неполяризован. Следовательно, по измерениям коэффициента поляризации и результирующего альбедо можно получать информацию о френелевской составляющей светового потока. Практически для этого можно воспользоваться приближенной формулой [1]:

$$\rho_e = P_{\max} \rho, \quad (3)$$

где $P_{\max}$ — максимальная степень поляризации.

Выразим ρ_e через френелевский коэффициент отражения. Считаем, что на исследуемом участке лунной поверхности площади S_0 имеется доля зеркальных микроплощадок dS , дающих солнечный «блик» в направлении наблюдателя. Угол фазы обозначим α , а углы падения и отражения равны $\frac{\alpha}{2}$. Отраженный шероховатой поверхностью в данном направлении световой поток выражается формулой

$$d\Phi = E_0 R \left(\frac{\alpha}{2} \right) \cos \frac{\alpha}{2} dS, \quad (4)$$

где E_0 — освещенность при нормальном падении. Свяжем dS с угловыми характеристиками распределения микроплощадок, полагая

$$dS = S_0 f(\omega) d\omega, \quad (5)$$

где $f(\omega)$ — функция распределения микроплощадок по углам; $d\omega$ — телесный угол, в котором находятся нормали микроплощадок, принадлежащих dS . Естественно предположить, что в случае такой сложной в структурном отношении поверхности, как лунная, распределение микрограней в пространстве равновероятно, т. е. $f = \text{const}$, переходя в выражении (5) от телесного угла нормалей к телесному углу отраженных лучей, получим

$$d\Phi = \frac{E_0}{4} R \left(\frac{\alpha}{2} \right) f S_0 \cos \frac{\alpha}{2} d\omega', \quad (6)$$

отсюда следует формула для яркости

$$B = \frac{E_0}{4} f R \left(\frac{\alpha}{2} \right) \quad (7)$$

и формула для видимого альбедо

$$\rho_e = \frac{\pi}{4} f R \left(\frac{\alpha}{2} \right). \quad (8)$$

Нормировка f легко определяется из формулы (5): $f = 1/\pi$. Возможный вклад дифракционных эффектов будем описывать функцией $G(\alpha)$. Используя это и выражения (3) и (8), можно записать:

$$P_{\max \rho} = \frac{G(\alpha_0)}{8} \left(\frac{n^2 - 1}{n^2 + 1} \right)^2, \quad (9)$$

где α_0 — угол Брюстера; $\frac{1}{2} \left(\frac{n^2 - 1}{n^2 + 1} \right)$ — френелевский коэффициент отражения при угле Брюстера.

Микроструктурные свойства (субмикронная шероховатость) лунной поверхности, как показывают исследования, очень однородны, т. е. $G(\alpha)$ приближенно не зависит от положения точки на диске. Тогда формулу (9) можно использовать для определения дисперсии $n(\lambda)$ по измерениям $P_{\max}(\lambda)$, $\rho(\lambda)$:

$$n(\lambda) = \left[\frac{1 + \left(\frac{8}{G} P_{\max \rho} \right)^{1/2}}{1 - \left(\frac{8}{G} P_{\max \rho} \right)^{1/2}} \right]^{1/2}. \quad (10)$$

Пример такого определения представлен на рис. 1. Одновременные измерения $\rho(\lambda)$ и $P(\lambda)$ для одних и тех же деталей отсутствуют, поэтому среди совокупности независимых измерений $\rho(\lambda)$ Т. Маккорда [2] и $P(\lambda)$ А. Дольфюса [3] мы выбрали две площадки, расположенные в Море Кризисов близко друг к другу. Эти площадки имеют примерно равное альбедо и колориметрические свойства, а также сходны по морфологическому типу. Кривые $\rho(\lambda)$, $P_{\max}(\lambda)$ и $P_{\max}(\lambda)\rho(\lambda)$ для этих площадок приведены на рис. 1, а. По формуле (10) определялась функция $n(\lambda)$ (кривая 4 на рис. 1, б), при этом величина $G(\alpha_0)$ принималась равной 0,5. На этом же рисунке для сравнения показан спектральный ход n для тяжелого флинта (кривая 1), кварца (кривая 5) и базальтового стекла земного происхождения (кривая 3).

Имеется возможность оценить влияние дифракции более точно. Эта возможность основана на результатах работ В. К. Полянского. Считаем, что величина микроплощадок L сравнима по порядку величины с длиной световой волны,

излучение, рассеянное в пределах микроплощадки, когерентно, а различные микроплощадки рассеивают независимо. В рамках этих предположений можно получить

$$G(\alpha_0) = \frac{1}{2} \left(1 - \frac{5\lambda^2}{8\pi^2 L^2 \cos \frac{\alpha_0}{2}} \right). \quad (11)$$

Для примера мы провели расчет по формуле (10) с учетом (11) при условии, что $L=2$ мкм. Результат представлен на рис. 1, б (кривая 2, пунктир).

Перейдем к выводу формулы для альбеда отражающего слоя с учетом внутреннего компонента.

Яркость реальной поверхности в данном направлении зависит не только от n и κ , но и от угла фазы, причем эта зависимость обу-

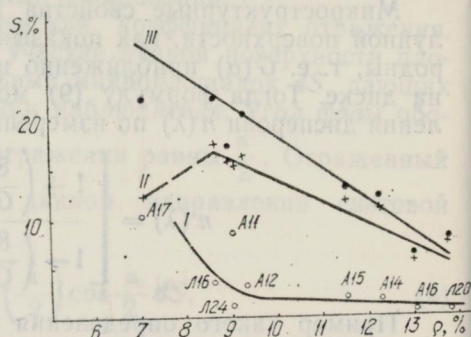
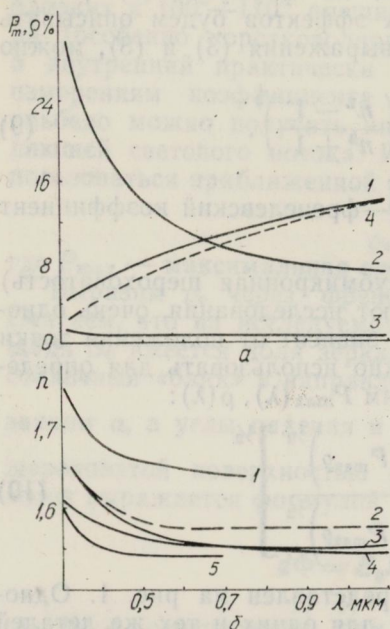


Рис. 1. Зависимость наблюдаемого альбеда, величины максимальной поляризации и френелевского альбеда лунной площадки в Море Кризисов (кривые 1, 2, 3 соответственно) кривая 4 вычислена по формуле (22) и данным [5] — (а). Дисперсия коэффициента преломления для: тяжелого флинта — 1, кварца — 5, базальтового стекла земного происхождения — 3, лунного грунта, вычисленная по формуле (10), без учета дифракции — 4 и с учетом дифракции — 2 (б).

Рис. 2. Зависимость концентрации TiO_2 (I), FeO (II) и $\text{FeO}+\text{TiO}_2$ (III) от альбеда по данным для мест посадок различных космических аппаратов.

словлена прежде всего теньвым эффектом. Абстрагируемся от этого эффекта, тогда яркость поверхности сложенной полупрозрачными частицами должна слабо зависеть от направления. Это позволяет при определении зависимости диффузной составляющей от параметров n и κ принимать во внимание лишь общий энергетический баланс, отвлекаясь от

угловой структуры рассеянного светового потока. Для расчетов яркости в реальных условиях можно рассматривать произведение $\rho(n, \kappa, l)$ на теневую функцию, т. е. считать $\rho(n, \kappa, l)$ нормальным альбедо. Это предположение дает возможность воспользоваться для расчетов $\rho(n, \kappa, l)$ некоторой специальной моделью светорассеивающего слоя.

Как было показано в ряде работ, светорассеяние порошкообразных сред хорошо описывается формулами для стопы плоскопараллельных пластин [4]. При этом считают, что отражение и пропускание однослойного ряда плотно упакованных частиц эквивалентно плоскопараллельной пластинке, толщина которой соответствует средней длине пути, по которому свет проходит в среде без преломления. Очень грубо эту длину можно считать равной среднему размеру частиц слоя.

К недостаткам существующих моделей стопы, кроме главного и неустранимого, т. е. отсутствия информации об угловой структуре рассеянного излучения, относится пренебрежение эффектами полного внутреннего отражения. На это неоднократно указывалось в литературе. Кроме того, в моделях стопы неправильно учитываются лучи различной кратности внутреннего отражения (для высокой кратности) при вычислении потоков, идущих вниз и вверх.

Рассмотрим модель стопы без указанных недостатков.

Пусть солнечный свет падает на слой частиц со средним коэффициентом отражения $\bar{R}_e$:

$$\bar{R}_e = \frac{\int_0^{2\pi} d\psi \int_0^{\pi/2} d\varphi R_e(\varphi) \cos \varphi \sin \varphi}{\int_0^{2\pi} d\psi \int_0^{\pi/2} d\varphi \sin \varphi} = \int_0^{\pi/2} d\varphi R_e(\varphi) \cos \varphi \cdot \sin \varphi, \quad (12)$$

где

$$R_e = \frac{[(n^2 - \sin^2 \varphi)^{1/2} - \cos \varphi]^2 [n^2 - \sin^2 \varphi + \sin^2 \varphi \operatorname{tg}^2 \varphi]}{[(n^2 - \sin^2 \varphi)^{1/2} + \cos \varphi]^2 [(n^2 - \sin^2 \varphi)^{1/2} + \sin \varphi \operatorname{tg} \varphi]^2}. \quad (13)$$

При записи формулы (12) и далее считаем функцию распределения микроплощадок по углам постоянной.

Внутри элементарного слоя проникает доля энергии $(1 - \bar{R}_e)$. При каждом отражении от внутренних граней частиц поток ослабляется в $\bar{R}_i \exp(-\tau l)$ раз, где $\tau \approx 4\pi\kappa/\lambda$, а $\bar{R}_i$ — средний коэффициент внутреннего отражения

$$\bar{R}_i = \frac{\int_0^{2\pi} d\psi \int_0^{\pi/2} d\varphi R_i(\varphi) \cos \varphi \sin \varphi}{\int_0^{2\pi} d\psi \int_0^{\pi/2} d\varphi \sin \varphi} = \frac{n^2 - 1}{2n^2} + \int_0^{\varphi_0} d\varphi R_i(\varphi) \cos \varphi \sin \varphi.$$

В этой формуле $\varphi_0 = \arcsin(1/n)$ — угол полного внутреннего отражения, а

$$R_t = \frac{[(1 - n^2 \sin^2 \varphi)^{1/2} - n \cos \varphi]^2 [1 - n^2 \sin^2 \varphi + n^2 \sin^2 \varphi \operatorname{tg}^2 \varphi]}{[(1 - n^2 \sin^2 \varphi)^{1/2} + n \cos \varphi]^2 [(1 - n^2 \sin^2 \varphi)^{1/2} + n \sin \varphi \operatorname{tg} \varphi]^2}. \quad (15)$$

n	1,40	1,50	1,55	1,60	1,65	1,70	1,80	2,00
$R_e _{\varphi=0}$	2,8	4,0	4,7	5,3	6,0	6,7	8,2	11,1
$\bar{R}_e$	3,8	4,6	5,0	5,3	5,7	6,0	6,7	8,5
$\bar{R}_t$	26,5	29,8	31,3	32,5	33,7	34,8	36,7	39,5

В таблице представлены результаты расчетов по формулам (12) — (15) для различных n . Как видно, функция $\bar{R}_e(n)$ довольно близка к $R_e(n)|_{\varphi=0}$, но величина $\bar{R}_t$ значительно больше $R_e(n)|_{\varphi=0}$.

Будем считать, что после рассеяния света в самом верхнем слое частиц освещение нижних слоев равномерное диффузное. Предполагаем также, что при направленном освещении верхнего слоя свет после вхождения в этот слой и, по крайней мере, однократного внутреннего отражения имеет равную вероятность, как выйти в верхнюю полусферу, так и в нижнюю.

Коэффициент отражения плоскопараллельной пластинки с учетом специфики, присущей реальному светорассеивающему слою частиц при направленном освещении, определим следующим образом:

$$r = \bar{R}_e + \frac{1}{2} (1 - \bar{R}_e) (1 - \bar{R}_t) \bar{R}_t e^{-2\tau l} + \frac{1}{2} (1 - \bar{R}_e) (1 - \bar{R}_t) \bar{R}_t^2 e^{-3\tau l} + \dots, \quad (16)$$

а коэффициент пропускания

$$t = (1 - \bar{R}_e) (1 - \bar{R}_t) e^{-\tau l} + \frac{1}{2} (1 - \bar{R}_e) (1 - \bar{R}_t) \bar{R}_t e^{-2\tau l} + \frac{1}{2} (1 - \bar{R}_e) (1 - \bar{R}_t) \bar{R}_t^2 e^{-3\tau l} + \dots \quad (17)$$

Ряды (16) и (17) легко суммируются:

$$r = \bar{R}_e + \frac{1}{2} (1 - \bar{R}_e) (1 - \bar{R}_t) \bar{R}_t e^{-2\tau l} / (1 - \bar{R}_t e^{-\tau l}); \quad (18)$$

$$t = (1 - \bar{R}_e) (1 - \bar{R}_t) e^{-\tau l} + \frac{1}{2} (1 - \bar{R}_e) (1 - \bar{R}_t) \bar{R}_t e^{-2\tau l} / (1 - \bar{R}_t e^{-\tau l}). \quad (19)$$

В случае диффузного равномерного освещения частиц слоя коэффициент отражения эквивалентной плоскопараллельной пластинки равен

$$r' = \bar{R}_e + t' = \bar{R}_e + \frac{1}{2} \frac{(1 - \bar{R}_e)(1 - \bar{R}_l)e^{-\tau l}}{1 - \bar{R}_l e^{-\tau l}}. \quad (20)$$

Обозначим альbedo бесконечной стопы (исключая самый верхний слой) R' . Тогда суммарное альbedo всей стопы пластинок

$$\rho = r + tt'R' + tt'(R')^2 r' + tt'(R')^3 (r')^2 + \dots \quad (21)$$

После суммирования получим

$$\rho = r + tt'R'/(1 - R'r'). \quad (22)$$

Теперь определим величину R' . Как и ранее, выделим верхний слой частиц в бесконечной стопе, имеющей альbedo R' . Очевидно, что устранение этого слоя не изменит альbedo. Следовательно,

$$R' = r' + (t')^2 R' / (1 - R'r'). \quad (23)$$

Отсюда

$$R' = \frac{(r')^2 - (t')^2 + 1}{2(r')} - \sqrt{\left[\frac{(r')^2 - (t')^2 + 1}{2r'} \right]^2 - 1}. \quad (24)$$

Формула (22) получена из энергетических соображений и удовлетворяет естественным предельным случаям: $\kappa=0$, $\rho=1$ и $\kappa \rightarrow \infty$, $\rho \rightarrow \bar{R}_e$. Однако при использовании формулы (22) для оценки альbedo в данном направлении, более правильно считать, что при $\kappa \rightarrow \infty$, $\rho \rightarrow \rho_e = \frac{\bar{R}_e}{4}$. Внося эту коррективу, мы несколько отступаем от принятой модели, но зато будем более правильно определять $\rho(n, \kappa, l)$ при больших κ .

Использование полученных формул позволило рассчитать ход $\rho(\lambda)$ по известным функциям $n(\lambda)$ и $\kappa(\lambda)$ для случая базальтов земного происхождения [5]. При этом средний размер частиц (точнее, средний путь луча в монослое частиц) принимался равным 20 мкм. Результаты представлены на рис. 1, а. Как видно из рисунка, теоретическая кривая (пунктир) заметно круче наблюдаемой. Эти расхождения мы объясняем тем, что в развитой модели используется средний размер частиц — l , а не их функция распределения. Проверим это утверждение, используя нормально логарифмический закон распределения частиц по размерам. Вычислим спектральный ход альbedo по формуле

$$\rho_\sigma = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \int_0^\infty dl \frac{\rho(l)}{l} e^{-\frac{\ln^2(l_0/l)}{2\sigma^2}}. \quad (25)$$

При l_0 , равном 20 мкм и σ^2 , равном 0,5, ход альbedo по спектру для тех же $n(\lambda)$ и $\kappa(\lambda)$ стал почти неотличим от наблюдательных данных.

Влияние функций распределения частиц по размерам на вид функции спектрального альbedo указывает на необходимость осторожного использования спектральных измерений для целей диагностики содержания тех или иных минералов в грунте. В реальной ситуации на Луне различные минералы и породы имеют разные функции распределения частиц. Следовательно, разные участки спектральной кривой могут преимущественно формироваться частицами различного состава.

Формула (3) по известной функции $\rho(n, \kappa, l)$ позволяет определить $P_{\max}(n, \kappa, l)$.

Параметры $n(\lambda)$ и $\kappa(\lambda)$, которые можно определять в предложенной схеме по характеристикам $\rho_e(\lambda)$, $\rho_i(\lambda)$, точнее $\rho(\lambda)$ и $P_{\max}(\lambda)$, являются феноменологическими параметрами вещества. Они являются основой исследований различных микрофизических особенностей рассеивающей среды. Рассмотрим некоторые из этих особенностей применительно к лунной поверхности.

В ряде работ (см., например, [6]) отмечалось наличие тесной корреляционной зависимости альbedo от величины Al/Si, региональные вариации которой измерялись в ходе лунных геохимических экспериментов на орбитальных модулях КК «Аполлон-15 и 16». Наличие такой корреляции может показаться странным, поскольку Al и Si являются непреходными элементами. Противоречие легко разрешимо, если учесть, что величина Al_2O_3 тесно коррелирует с содержанием FeO в лунных породах [7], а SiO_2 изменяется слабо. Железо является сильным хромофором и, следовательно, зависимость альbedo — Al/Si должна индуцироваться зависимостью альbedo — Fe.

Кроме железа в лунных грунтах (особенно морских) имеется довольно много титана, который также является переходным металлом. В связи с этим представляет интерес исследование корреляций альbedo — Fe и альbedo — Ti. Эти зависимости представлены на рис. 2. Они построены по результатам исследований мест посадок АМС серии «Луна» и экспедиции «Аполлон».

Как оказалось, TiO_2 плохо коррелирует с альbedo. Лишь когда содержание $TiO_2 > 2\%$, появляется тенденция уменьшения альbedo. Содержание FeO коррелирует с ρ хорошо. Однако точка «Аполлон-17» сильно отклоняется от зависимости. Необходимо отметить, что эта же зависимость изучалась в работе [8], однако в этой работе использовалась карта альbedo [9], которая для некоторых мест посадок дает весьма ошибочные данные. Например, альbedo места посадки «Аполлон-17», по данным этой карты, — 11,4—11,7%, в то же время измерения альbedo, проведенные примерно в той же фотометрической

системе на орбитальных модулях КК «Аполлон», дает значения 6—7% [10].

Наилучшим образом с альбедо коррелирует $\text{FeO} + \text{TiO}_2$. В эту зависимость хорошо укладывается и точка «Аполлон-17».

Особенности описанных зависимостей, по-видимому, связаны с тем, что, во-первых, содержание Ti в породах обычно существенно меньше, чем Fe , во-вторых, титан содержится в основном в ильмените, а железо, кроме того, имеется в пироксенах и оливинах. В случае, когда в лунных породах достаточно ильменита (содержание $\text{TiO}_2 > 2\%$), интенсивность переходов $\text{Fe}^{2+} \rightarrow \text{Ti}^{4+}$ достаточна, чтобы заметным образом влиять на альбедо грунта.

Автор признателен Н. П. Стадниковой за выполнение большого объема вычислений на ЭВМ.

Список литературы: 1. Шкуратов Ю. Г. О природе взаимосвязи альбедо — степень поляризации лунной поверхности. — Вестн. Харьк. ун-та, № 190. Физика Луны и планет. Фундаментальная астрометрия, 1979, с. 44—52. 2. Маккорд Т. Б., Адамс Дж. Б. Использование наземных телескопов для определения состава поверхности тел Солнечной системы. — В кн.: Космохимия Луны и планет. — М.: Наука, 1975, с. 547—573. 3. Dollfus A., Bowell E. Polavimetric properties of lunar surface and its interpretation. — *Astron. and Astrophys.*, 1971, 10, N 1, p. 29—53. 4. Иванов А. П. Оптика рассеивающих сред. — Минск: Наука и техника, 1969. — 592 с. 5. Pollack I. B., Toon O. B., Khare B. N. Optical properties of some terrestrial rocks and glass. — *Icarus*, 1973, 19, p. 371—389. 6. Results of the Apollo 15 and 16 X-ray experiments/Adler, I. Trombka, R. Schmadebeck et al. — *Proc. Lunar Sci. Conf.* 4 th, 1973, p. 2783—2791. 7. Хаббард Н. Дж., Родс Дж. М. Химическая модель формирования лунных неморских пород. — В кн.: Космохимия Луны и планет. — М.: Наука, 1975, с. 425—438. 8. Евсюков Н. Н. Опыт дистанционного оптического анализа химического состава лунной поверхности. — *Астроном. вестн.*, 1976, вып. 10, с. 177—189. 9. Евсюков Н. Н. Карта альбедо видимого полушария Луны. — Киев: Наук. думка, 1973, 10, с. 25—31. 10. El-Baz F. The moon after Apollo. — *Icarus*, 1975, 25, p. 495—537.

Поступила в редколлегия 06.04.81.

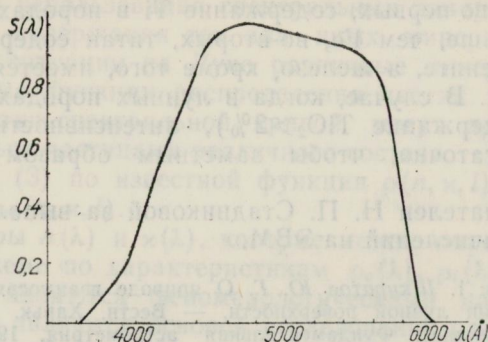
УДК 523.3

В. А. ПСАРЕВ

ЧИСЛЕННЫЙ АНАЛИЗ ПЕРВЫХ ЛУННЫХ ФОТОМЕТРИЧЕСКИХ КАТАЛОГОВ

Данные фотометрических лунных каталогов до настоящего времени используются как яркостные и индикатометрические стандарты. В связи с общим повышением требований к точности фотометрических исследований возник вопрос об оценке погрешностей лунных каталогов, используемых в качестве опорных. В данной работе проведен анализ погрешностей одних из первых каталогов, составленных В. А. Федорец [1] и Р. Л. Вильдзем и Г. А. Поном [2]. Первый из рассматриваемых каталогов

составлен методом фотографической фотометрии, второй основан на фотоэлектрических измерениях в фотометрической системе UVV. Была предпринята попытка уточнить фотометрическую систему каталога В. А. Федорец. Известно, что съемка велась на пластинках Изоорто, спектральное пропускание обь-



Кривая относительной спектральной реакции фотометрической системы лунного каталога В. А. Федорец.

ектива телескопа и линзы увеличительной камеры точно не установлены. Система каталога (с учетом распределения энергии в спектре Солнца, спектральной отражательной способности лунной поверхности и спектрального пропускания земной атмосферы) характеризуется следующими значениями общепринятых величин: длина волны, на которой реакция системы максимальна $\lambda_{\text{max}} = 4800 \text{ Å}$, средняя (эффективная) длина волны $\lambda_0 = 4930 \text{ Å}$, полуширина системы $\Delta\lambda = 1650 \text{ Å}$. Кривая спектральной реакции каталога В. А. Федорец приведена на рисунке. Калибрующий множитель $K = 4,646$ для перехода от каталожных значений относительной яркости к яркостному фактору $\rho = KB_{\text{кат}}$ определен с учетом найденных параметров фотометрической системы каталога, данных Т. Б. Маккорда и Дж. Б. Адамса [3], характеризующих спектральный ход альбеда лунной поверхности, и результатов привязки каталога, проведенной В. И. Езерским и В. А. Езерской [4].

Оценка погрешностей представленных в анализируемых каталогах величин проводилась следующим образом. Значения яркостных факторов каждой детали были редуцированы к лимбу с помощью эмпирического закона Л. А. Акимова [5], описывающего распределение яркости по лунному диску. Полученные фазовые кривые $F(\alpha)$, их гладкость и взаимное соответствие двух ветвей, полученных до и после полнолуния, некоторым образом уже характеризуют точность каталожных данных. Затем из полученных фазовых зависимостей была вычленена индикатриса рассеяния света одной сферической полупрозрачной частицей $I(\alpha)$ в виде, предложенном Б. Хапке [6]. Частное $B(\alpha) =$

$=F(\alpha)/I(\alpha)$, представляющее теневую функцию, хорошо описывается аналитическим выражением вида $1 - a_0 e^{a_1 \alpha} a_2$ где α — угол фазы, выраженный в радианной мере; a_0, a_1, a_2 — параметры, зависящие от частных свойств рассеивающей поверхности. Последние определялись для каждой детали анализируемых каталогов методом наименьших квадратов. Из совокупности решений для данной детали, найденных при различных априорных значениях нормального альbedo, выбирались те, при которых σ , среднеквадратичное относительное отклонение каталожных значений от гладкой теоретической кривой, минимально, $\sigma = \left[\sum_{i=1}^n (1 - f_i^k/f_i^r)^2 / (n-1) \right]^{1/2}$. Здесь n — число узлов,

в которых задается аппроксимируемая кривая и проводится сравнение f^r и f^k — теоретических и каталожных значений фотометрической функции. Значения нормального альbedo ρ_0 в процессе анализа варьировались с шагом, уменьшающимся вдвое в каждом цикле, окончательное значение шага $\Delta\rho_0 = 0,0002$ некоторым образом характеризует абсолютную погрешность определения нормального альbedo.

Результаты анализа представлены в табл. 1, 2, где приведены нумерация участков согласно каталогам, селенографические координаты деталей — λ, β , морфологические признаки m, t , в соответствии с которыми деталь отнесена к морскому или материковому типу образований, параметры модели теневой функции — $a_0, -a_1, a_2$, нормальное альbedo ρ_0 , выраженное в процентах отражательной способности абсолютно белого, ортотропно рассеивающего экрана, ориентированного перпендикулярно падающим лучам, величина σ , характеризующая как погрешность аппроксимации, так и погрешность каталожных данных.

Результаты проведенного численного анализа двух лунных фотометрических каталогов позволяют утверждать, что их средние относительные погрешности составляют около $\pm 15\%$, отклонения отдельных точек фазовой зависимости от гладкой теоретической кривой достигают $\pm 30\%$. Следует отметить отсутствие корреляции параметров a_0, a_1, a_2 с нормальным альbedo соответствующих участков лунной поверхности, что можно объяснить значительными погрешностями каталожных данных. Учитывая то обстоятельство, что при анализе данных каталога В. А. Федорец в диапазоне малых углов фазы такие корреляции были отмечены [7, 8], хотя весьма слабые и только для морских деталей лунного рельефа, можно полагать, что погрешности каталожных данных при средних и больших углах фазы ($\alpha > 30^\circ$) превышают таковые при фазах малых.

Исходя из полученных результатов можно сделать вывод, что при обращении к рассмотренным каталогам как к опорным следует пользоваться по возможности большим количеством

Каталог В. А. Федорен

№ п/п	λ°	β°	m, t	a_0	$-a_1$	a_2	$\rho_0, \%$	$\sigma\%$
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	61,1	20,0	<i>m</i>	0,711	0,358	0,576	10,90	13,6
2	54,5	18,2	<i>m</i>	1,338	0,809	0,765	10,99	15,7
3	56,5	12,2	<i>m</i>	1,774	0,968	0,862	11,08	22,1
4	42,8	14,0	<i>t</i>	0,646	0,414	0,780	12,76	12,3
5	34,1	-15,0	<i>m</i>	1,056	0,804	0,776	12,05	12,7
6	60,7	-8,5	<i>t</i>	0,730	0,507	0,765	16,56	12,0
7	61,6	-17,0	<i>t</i>	1,821	1,084	1,015	14,64	15,6
8	59,5	-24,3	<i>t</i>	0,900	0,605	0,832	16,68	11,5
9	55,0	6,5	<i>t</i>	1,227	0,867	1,009	15,10	16,3
10	56,0	27,3	<i>t</i>	0,244	-0,685	-0,113	17,98	20,5
11	80,0	-30,7	<i>t</i>	0,448	0,039	0,411	14,28	9,4
12	65,0	43,0	<i>t</i>	0,324	-0,510	-0,014	20,60	24,6
13	17,0	20,0	<i>m</i>	0,700	0,539	0,559	10,06	10,9
14	18,0	22,1	<i>m</i>	0,319	-0,113	0,089	9,38	15,8
15	17,0	25,9	<i>m</i>	0,976	0,735	0,652	9,44	14,5
15a	10,0	28,8	<i>m</i>	1,197	0,815	0,741	9,48	13,1
16	20,0	21,0	<i>m</i>	0,648	0,421	0,565	8,76	15,4
16a	27,0	22,0	<i>m</i>	0,592	0,267	0,537	8,69	13,3
17	13,0	22,0	<i>m</i>	0,745	0,424	0,563	8,58	15,5
18	26,5	29,9	<i>m</i>	0,648	0,360	0,542	8,71	9,4
19	34,0	27,7	<i>t</i>	0,174	-0,696	0,086	11,93	11,9
20	35,0	35,5	<i>m</i>	0,234	-0,440	0,195	9,66	11,1
21	32,3	-21,2	<i>t</i>	0,867	0,630	0,834	14,11	10,8
22	26,8	-11,7	<i>t</i>	0,343	-0,185	0,066	18,49	23,2
23	24,0	-13,3	<i>t</i>	0,155	-0,732	-0,140	19,70	16,5
24	23,0	-17,4	<i>t</i>	0,307	-0,146	0,147	18,41	19,8
25	-17,0	58,0	<i>m</i>	0,446	0,199	0,234	12,88	24,2
26	30,0	51,0	<i>m</i>	0,338	-0,187	0,325	11,05	15,0
27	29,5	31,9	<i>t</i>	0,144	-0,772	-0,075	12,96	14,4
28	15,9	16,0	<i>t</i>	0,139	-0,497	0,305	11,92	11,7
29	8,5	14,4	<i>t</i>	0,140	-0,276	0,282	11,61	9,6
30	56,0	-3,1	<i>m</i>	2,068	1,196	0,950	11,57	23,2
31	46,0	-4,0	<i>m</i>	1,322	0,830	0,750	11,38	16,4
32	47,0	-7,5	<i>t</i>	0,989	0,616	0,765	14,67	16,9
33	45,0	-7,5	<i>m</i>	1,808	1,103	0,952	13,34	21,2
34	68,0	8,2	<i>t</i>	0,378	0,447	0,045	22,21	30,7
35	45,2	16,4	<i>t</i>	0,130	-0,035	-0,269	17,86	17,1
36	25,0	-4,0	<i>m</i>	0,901	0,663	0,658	11,40	12,6
37	35,0	-25,0	<i>t</i>	0,782	0,629	0,836	15,80	7,9
38	12,0	13,0	<i>t</i>	0,891	0,545	0,645	11,85	15,6
39	14,0	-3,0	<i>t</i>	0,492	0,451	0,592	14,08	17,0
40	43,0	38,0	<i>t</i>	1,227	0,849	0,986	15,87	16,1
41	30,0	8,0	<i>m</i>	1,100	0,676	0,663	9,29	14,9
42	37,0	12,0	<i>m</i>	0,749	0,400	0,603	8,63	11,3
43	25,0	1,0	<i>m</i>	1,078	0,769	0,742	10,38	10,3
44	5,1	-5,0	<i>t</i>	1,498	1,278	1,116	15,42	18,6
45	2,0	33,3	<i>t</i>	0,329	0,022	0,455	11,63	12,9
46	2,0	30,9	<i>t</i>	0,440	0,115	0,516	11,90	11,9
47	1,3	30,9	<i>t</i>	0,485	0,485	0,636	11,49	10,3
48	0,5	33,3	<i>t</i>	1,049	1,093	0,841	11,94	14,0

1	2	3	4	5	6	7	8	9
49	2,0	14,0	<i>m</i>	0,589	0,493	0,660	8,74	9,7
51	8,0	10,0	<i>m</i>	0,586	0,385	0,575	8,95	12,7
52	-2,8	-8,1	<i>t</i>	0,643	0,576	0,725	12,46	12,3
53	-3,3	-12,8	<i>t</i>	0,499	0,349	0,702	13,50	12,7
54	-4,4	-13,3	<i>t</i>	0,296	0,042	0,464	12,46	15,2
55	-2,0	-13,1	<i>t</i>	0,694	0,857	0,795	12,73	17,5
56	-10,0	51,2	<i>m</i>	0,935	0,764	0,369	12,80	22,4
57	-8,7	50,5	<i>t</i>	0,847	0,737	0,461	11,60	20,0
58	-2,0	17,0	<i>t</i>	0,674	0,570	0,708	12,63	14,0
59	0	0	<i>m</i>	0,362	0,389	0,329	10,84	14,0
60	-8,0	7,0	<i>m</i>	1,139	0,866	0,760	8,83	15,3
61	-11,1	-43,0	<i>t</i>	1,196	1,495	0,608	21,86	24,6
62	-8,0	-41,1	<i>t</i>	1,261	1,556	0,699	20,00	15,0
63	-11,0	-40,0	<i>t</i>	0,696	1,059	0,368	18,38	13,2
64	-13,0	-43,0	<i>t</i>	0,703	1,028	0,433	20,57	22,0
65	-28,0	-36,5	<i>t</i>	0,585	0,444	0,681	13,58	13,0
66	-28,0	-35,0	<i>t</i>	0,316	0,125	0,502	10,86	11,4
67	-24,0	-23,0	<i>t</i>	0,863	0,723	0,778	11,68	9,8
68	-21,5	-23,0	<i>t</i>	0,754	0,921	0,697	9,76	8,3
69	-25,0	-54,5	<i>t</i>	0,824	0,694	0,871	18,51	10,5
70	-27,0	-54,0	<i>t</i>	0,337	0,113	0,514	15,61	12,3
71	-4,0	29,8	<i>m</i>	1,447	1,121	0,441	16,39	26,7
72	-20,0	9,0	<i>t</i>	0,452	0,834	0,584	13,27	9,1
73	-17,7	12,3	<i>t</i>	1,397	1,213	0,981	14,15	15,2
73a	-17,0	11,0	<i>t</i>	0,754	0,959	0,756	11,25	13,3
74	-22,0	6,0	<i>t</i>	0,393	0,436	0,508	10,41	9,5
74a	-21,5	7,0	<i>t</i>	2,292	1,884	1,674	12,11	9,0
75	-21,8	23,0	<i>m</i>	1,147	0,767	0,759	12,12	14,0
76	-22,8	23,0	<i>m</i>	0,660	0,560	0,507	9,76	12,8
77	-15,5	28,0	<i>m</i>	0,856	0,545	0,639	11,24	13,3
78	-14,0	27,0	<i>m</i>	0,664	0,591	0,539	9,14	13,0
79	5,1	33,8	<i>t</i>	1,172	1,005	0,958	17,39	24,5
79a	7,0	-35,0	<i>t</i>	0,325	0,039	0,428	15,52	14,3
79b	10,0	-37,0	<i>t</i>	0,473	0,359	0,640	18,28	15,2
79c	10,0	-35,0	<i>t</i>	0,352	-0,048	0,385	17,62	14,1
80	-37,8	7,5	<i>t</i>	0,984	0,671	0,843	15,73	14,3
81	-36,5	8,0	<i>t</i>	2,088	1,380	1,085	13,09	26,1
82	-36,5	4,5	<i>m</i>	0,787	0,668	0,744	10,25	11,2
83	-17,0	30,0	<i>m</i>	0,705	0,413	0,563	9,36	18,3
84	-12,0	51,3	<i>t</i>	0,621	0,410	0,146	16,26	26,7
85	4,5	-11,7	<i>t</i>	0,574	0,653	0,607	12,50	13,9
86	-2,8	-17,8	<i>t</i>	0,526	0,365	0,598	16,19	16,9
87	5,0	32,5	<i>m</i>	0,634	0,500	0,501	11,13	13,9
88	-16,0	43,0	<i>m</i>	0,458	0,247	0,422	8,71	17,1
89	-35,0	28,5	<i>m</i>	0,358	0,082	0,459	8,88	9,4
90	-43,0	42,0	<i>t</i>	0,632	0,184	0,560	14,41	12,2
91	-28,0	40,0	<i>m</i>	1,222	0,762	0,758	9,76	17,1
92	6,0	29,0	<i>m</i>	0,786	0,721	0,686	10,63	15,8
93	-14,9	-21,8	<i>m</i>	1,772	1,485	0,890	10,21	11,8
94	-15,0	-26,0	<i>m</i>	1,721	1,465	0,961	10,21	8,2
95	-13,0	-8,0	<i>m</i>	1,738	1,264	0,893	9,95	10,7
96	-13,8	-29,1	<i>m</i>	0,818	0,587	0,279	15,32	24,8
97	-15,0	-58,0	<i>t</i>	1,080	1,140	1,071	18,81	10,5
97a	-18,8	-56,5	<i>t</i>	0,918	0,917	0,345	23,09	29,2

1	2	3	4	5	6	7	8	9
97в	-8,0	-57,0	<i>t</i>	3,218	3,015	1,285	17,35	11,7
97с	-6,8	-57,0	<i>t</i>	0,989	0,947	0,975	17,82	13,1
98	-10,0	12,0	<i>m</i>	0,742	0,726	0,505	11,91	16,8
99	-3,6	12,0	<i>t</i>	0,058	0,848	0,710	10,50	14,6
100	-32,5	45,0	<i>m</i>	0,381	-0,247	0,009	12,40	25,1
101	-34,0	45,0	<i>m</i>	0,873	0,536	0,711	9,39	13,8
102	-47,1	23,0	<i>t</i>	0,332	-0,068	0,994	20,56	13,1
103	-37,6	-22,6	<i>m</i>	1,078	0,812	0,784	8,92	14,6
104	5,0	25,0	<i>t</i>	0,658	0,505	0,598	11,48	12,0
105	4,0	38,6	<i>t</i>	0,504	0,353	0,382	12,35	17,9
106	-58,0	-0,1	<i>m</i>	0,841	0,391	0,470	10,57	21,6
107	-46,0	32,0	<i>m</i>	0,542	0,224	0,556	9,00	10,0
108	-45,0	10,0	<i>m</i>	0,802	0,506	0,679	8,97	11,7
109	-66,0	50,0	<i>t</i>	0,518	0,093	0,333	14,07	14,4
110	-52,0	42,0	<i>m</i>	0,683	0,281	0,610	9,13	17,0
111	-50,0	24,0	<i>m</i>	1,319	0,784	0,783	11,88	20,2
112	-48,0	26,0	<i>t</i>	1,881	1,031	1,054	17,44	21,2
113	-46,0	26,0	<i>t</i>	0,820	0,712	0,782	10,67	9,9
114	-40,0	-17,7	<i>t</i>	1,203	0,852	0,973	12,86	12,3
115	-63,0	-5,0	<i>t</i>	1,297	1,059	0,973	13,94	22,0
116	-32,1	-25,0	<i>m</i>	1,521	1,109	0,984	9,70	14,9
117	-55,4	-43,8	<i>t</i>	0,228	-0,743	-0,232	20,31	24,7
118	-67,1	-5,2	<i>m</i>	0,342	-0,080	0,324	9,08	21,8
119	-78,0	-6,0	<i>t</i>	0,577	0,370	0,645	12,31	12,1
120	-57,5	-42,8	<i>t</i>	0,761	0,233	0,437	15,10	15,9
121	-53,0	-46,0	<i>t</i>	0,482	-0,088	0,271	15,06	15,2
122	-65,0	23,0	<i>m</i>	0,223	0,463	0,299	8,83	11,6
123	35,0	-5,0	<i>t</i>	0,687	0,413	0,792	13,92	6,2
124	-8,0	-3,0	<i>t</i>	0,764	1,195	0,566	12,28	16,3
125	0	-25,0	<i>t</i>	0,717	1,291	0,796	14,73	11,0
126	-10,0	54,0	<i>t</i>	1,360	0,799	0,938	19,00	41,8
128	70,0	0	<i>t</i>	1,175	0,785	0,822	15,38	14,4
129	70,0	22,0	<i>t</i>	0,818	0,437	0,597	16,90	18,2
130	65,0	60,0	<i>t</i>	0,533	0,019	0,418	17,63	16,1
131	-10,0	70,0	<i>t</i>	0,314	-0,422	0,312	19,67	18,0
132	0	-70,0	<i>t</i>	2,277	1,759	1,190	18,70	13,3
133	70,0	-60,0	<i>t</i>	0,920	0,502	0,852	16,65	8,5
134	-75,0	-1,0	<i>t</i>	0,222	-0,450	0,224	14,50	16,1
135	-80,0	-30,0	<i>t</i>	0,653	0,391	0,721	15,66	13,9
136	-80,0	-30,0	<i>t</i>	0,345	-0,377	0,335	16,96	16,3
137	-75,0	30,0	<i>t</i>	0,267	-0,308	-0,001	11,14	22,7
138	-75,0	60,0	<i>t</i>	0,630	0,185	0,637	13,86	11,5
140	46,4	16,2	<i>t</i>	0,255	-0,429	0,516	21,73	15,7
142	20,0	31,7	<i>m</i>	0,526	0,246	0,462	8,95	9,2
143	22,0	31,7	<i>t</i>	0,796	0,445	0,712	20,19	10,8
144	36,0	-34,2	<i>t</i>	1,289	0,841	0,937	16,02	21,9
145	11,2	-8,0	<i>t</i>	0,326	-0,004	0,580	15,60	13,3
146	14,0	-35,0	<i>t</i>	1,218	1,392	0,721	16,64	18,4
147	59,6	-37,1	<i>t</i>	0,271	0,589	0,259	18,83	17,1
147а	59,6	37,0	<i>t</i>	0,776	0,464	0,602	16,12	19,5
148	61,8	-32,5	<i>t</i>	0,468	0,207	0,648	15,35	9,7
149	50,7	-29,5	<i>t</i>	0,219	-0,615	-0,030	18,60	16,9
150	42,9	-27,0	<i>t</i>	0,588	0,358	0,679	15,13	8,3
151	41,0	-58,1	<i>t</i>	1,328	0,833	1,202	15,65	21,9

1	2	3	4	5	6	7	8	9
152	27,2	-52,0	<i>t</i>	1,868	1,244	1,281	15,62	24,0
153	20,8	-45,9	<i>t</i>	0,159	-0,834	-0,130	16,61	16,3
154	15,2	-39,0	<i>t</i>	0,884	0,629	0,972	16,44	13,2
155	-6,0	-7,2	<i>t</i>	0,629	0,515	0,310	18,07	17,2
156	-36,1	-4,9	<i>m</i>	0,547	0,218	0,515	8,79	18,2
160	-37,0	19,5	<i>m</i>	0,385	0,025	0,498	8,91	11,6
161	-35,0	0	<i>m</i>	1,058	0,888	0,819	10,20	12,1
162	-41,8	-2,5	<i>m</i>	0,650	0,343	0,592	8,36	10,9
163	-52,0	-11,0	<i>m</i>	0,691	0,372	0,623	9,34	16,8
164	-50,0	32,5	<i>m</i>	0,648	0,380	0,502	8,62	16,4
165	-41,4	32,5	<i>m</i>	0,453	0,059	0,451	9,32	10,4
166	-6,5	-15,5	<i>t</i>	0,195	-0,034	0,208	10,56	12,0
167	-46,6	-17,0	<i>t</i>	0,886	0,785	0,746	12,56	9,6
168	-53,8	-18,5	<i>t</i>	0,541	0,198	0,658	15,03	9,4

Таблица 2

Каталог Р. Л. Вильдэ и Г. А. Пона

№ п/п	Наименование	<i>mt</i>	a_0	$-a_1$	a_2	ρ_0 %	σ %
1	2	3	4	5	6	7	8

 $\lambda = 0,36$ мкм

1	Бюрги	<i>t</i>	4,422	3,067	1,190	11,21	19,7
2	Океан Бурь	<i>m</i>	1,390	0,749	0,268	11,67	15,6
3	Аристарх	<i>t</i>	0,460	0,277	0,174	12,10	14,9
4	Кеплер	<i>t</i>	0,603	-0,260	0,070	11,78	14,4
7	Буллинальд	<i>t</i>	0,612	-0,357	0,063	11,57	11,2
10	Коперник	<i>t</i>	0,614	-0,243	0,096	12,60	8,6
11	Эратосфен	<i>t</i>	0,587	-0,477	0,018	11,04	11,0
12	Берт	<i>t</i>	1,196	0,991	0,509	7,78	14,0
13	Тихо	<i>t</i>	0,629	-0,128	0,139	14,85	16,6
14	Табит	<i>t</i>	0,442	-0,778	-0,001	11,96	17,2
15	Море Паров	<i>m</i>	0,730	-0,134	0,066	9,36	11,9
16	Аристилл	<i>t</i>	0,611	-0,379	0,060	11,03	10,4
17	Анаксагор	<i>t</i>	0,669	-0,055	0,238	12,07	18,7
18	Аристотель	<i>t</i>	0,728	-0,030	0,148	11,18	11,2
19	Менелай	<i>m</i>	2,180	1,820	0,868	8,82	16,3
20	Годен	<i>t</i>	0,620	-0,163	0,104	12,64	9,9
21	Дионисий	<i>t</i>	0,742	0,127	0,184	12,53	18,7
22	Геофил	<i>m</i>	0,755	-0,722	0,448	7,07	16,9
23	Медлер	<i>m</i>	0,483	0,072	0,187	8,64	16,9
24	Лемонье	<i>m</i>	0,693	0,240	0,046	9,32	10,2
26	Прокл	<i>t</i>	0,978	-0,896	0,395	11,64	21,0
27	Море Кризисов	<i>m</i>	0,453	0,625	0,162	5,14	15,1
28	Гарунций	<i>m</i>	0,463	0,338	0,081	6,86	9,6
29	Стевин	<i>t</i>	0,604	0,158	0,110	17,85	18,8
30	Платон	<i>m</i>	0,657	-0,328	0,026	9,68	15,1

1	2	3	4	5	6	7	8
$\lambda = 0,44$ мкм							
1	Бюрги	<i>t</i>	2,211	2,497	0,835	16,16	15,8
2	Океан Бурь	<i>m</i>	0,993	0,444	0,200	10,83	13,9
3	Аристарх	<i>t</i>	0,361	—0,056	0,026	18,52	13,8
4	Кеплер	<i>t</i>	0,500	—0,142	0,206	11,46	11,0
7	Буллияльд	<i>t</i>	0,511	—0,500	0,066	13,71	11,3
10	Коперник	<i>t</i>	0,490	—0,431	0,091	15,14	7,7
11	Эратосфен	<i>t</i>	0,449	—0,058	0,166	8,88	16,7
12	Берт	<i>t</i>	0,907	0,737	0,422	10,66	11,4
13	Тихо	<i>t</i>	0,609	0,024	0,200	18,25	15,3
14	Табит	<i>t</i>	0,379	—0,839	0,030	14,48	15,5
15	Море Паров	<i>m</i>	0,712	0,042	0,153	9,27	10,4
16	Аристилл	<i>t</i>	0,523	—0,438	0,066	12,72	8,6
17	Анаксагор	<i>t</i>	0,677	0,247	0,386	14,38	16,7
18	Аристотель		0,666	0,237	0,326	10,70	8,9
19	Менелай	<i>m</i>	1,002	0,652	0,303	16,79	14,1
20	Годен	<i>t</i>	0,549	0,056	0,230	12,92	8,5
21	Дионисий	<i>t</i>	0,744	0,519	0,321	14,21	15,6
22	Теофил	<i>m</i>	0,210	—1,209	—0,170	10,86	17,9
23	Медлер	<i>m</i>	0,492	0,516	0,180	11,36	15,6
24	Лемонье	<i>m</i>	0,572	—0,004	0,224	6,99	8,8
26	Прокл	<i>t</i>	0,276	—1,322	—0,132	19,81	17,5
27	Море Кризисов	<i>m</i>	0,656	0,556	0,265	7,09	15,2
28	Тарунций	<i>m</i>	0,290	—0,523	—0,040	8,35	8,6
29	Стевин	<i>t</i>	0,417	—0,525	0,078	21,46	12,5
30	Платон	<i>m</i>	0,486	—0,564	0,072	8,41	12,5
$\lambda = 0,55$ мкм							
1	Бюрги	<i>t</i>	2,856	3,276	1,050	16,86	16,7
2	Океан Бурь	<i>m</i>	0,750	0,068	0,213	9,27	12,6
3	Аристарх	<i>t</i>	0,438	0,597	0,132	19,34	14,5
4	Кеплер	<i>t</i>	1,433	1,316	0,434	17,95	15,7
7	Буллияльд	<i>t</i>	0,467	—0,386	0,160	12,89	12,3
10	Коперник	<i>t</i>	0,394	—0,440	0,114	14,79	8,5
11	Эратосфен	<i>t</i>	0,323	—1,063	—0,020	11,12	12,6
12	Берт	<i>t</i>	0,844	0,728	0,399	12,42	11,6
13	Тихо	<i>t</i>	0,486	0,009	0,218	18,29	9,7
14	Табит	<i>t</i>	0,393	—0,632	0,153	15,09	9,4
15	Море Паров	<i>m</i>	1,383	1,591	0,288	12,44	21,5
16	Аристилл	<i>t</i>	0,439	—0,424	0,130	11,55	8,9
17	Анаксагор	<i>t</i>	0,569	0,074	0,305	17,06	8,7
18	Аристотель	<i>t</i>	0,513	—0,159	0,263	12,30	8,7
19	Менелай	<i>m</i>	0,883	0,883	0,422	14,51	13,7
20	Годен	<i>t</i>	0,500	0,100	0,219	14,34	8,8
21	Дионисий	<i>t</i>	0,738	0,689	0,334	15,94	14,0
22	Теофил	<i>m</i>	0,682	0,539	0,261	13,87	13,5
23	Медлер	<i>m</i>	0,370	0,114	0,094	12,97	14,0
24	Лемонье	<i>m</i>	0,609	0,080	0,310	7,39	8,8
26	Прокл	<i>t</i>	0,169	—1,716	—0,213	19,86	14,3
27	Море Кризисов	<i>m</i>	0,618	0,607	0,209	8,31	15,2
28	Тарунций	<i>m</i>	0,360	—0,305	0,039	10,24	10,6
29	Стевин	<i>t</i>	0,288	—0,830	0,089	21,27	9,1
30	Платон	<i>m</i>	0,542	—0,292	0,147	9,29	11,7

деталей, или же теми из них, для которых относительные расхождения теоретических и экспериментальных данных меньше средних. Представляется также целесообразным использование найденных для всех деталей каталогов параметров аналитического описания фотометрической функции соответствующих участков поверхности для вычисления ее значений при заданных условиях освещения и наблюдения.

Список литературы: 1. Федорец В. А. Фотографическая фотометрия лунной поверхности. — Уч. зап. Харьк. ун-та, Тр. астроном. обсерватория, 1952, 2(10), с. 49—172. 2. Wildey B. L., Pohn H. A. Detailed photoelectric photometry of the Moon. — The Astronomical Journ., 1964, 69, № 8, p. 619—634. 3. Маккорд Т. Б., Адамс Дж. Б. Использование наземных телескопов для определения состава поверхности тел солнечной системы. — В кн.: Космохимия Луны и планет. — М.: Наука, 1975, с. 547—573. 4. Езерский В. И., Езерская В. А. Сравнение каталогов отражательной способности лунной поверхности. — Астроном. циркуляр АН СССР, 1959, № 205, с. 10 — 11. 5. Акимов Л. А. О распределении яркости по диску Луны и планет. — Астроном. журн., 1979, 56, вып. 2, с. 412—418. 6. Hapke B. W. A theoretical photometric function for the lunar surface. — Journ. Geophys. Res., 1963, 68, N15, p. 4571—4586. 7. Псарев В. А. Лунная фотометрическая функция при малых углах фазы. — I. — Астроном. циркуляр АН СССР, 1979, № 1064, с. 3—7. 8. Псарев В. А. Лунная фотометрическая функция при малых углах фазы. II. Астроном. циркуляр АН СССР, 1979, № 1067, с. 5—7.

Поступила в редколлегию 07.09.81.

УДК 523.3

В. А. ПСАРЕВ

ОТНОСИТЕЛЬНАЯ ХРОНОЛОГИЯ ЛУННОЙ ПОВЕРХНОСТИ ПО ФОТОМЕТРИЧЕСКИМ ДАННЫМ

Установление корреляционных связей оптических параметров поверхностного слоя участков Луны с их экспозиционным возрастом — задача не новая, но достаточно актуальная. Ее актуальность определяется, помимо общенаучного значения, необходимостью разработки новых, менее трудоемких и, следовательно, более оперативных, чем существующие сейчас, методов хронологии деталей лунного рельефа. Эти новые методы могут быть использованы при изучении и освоении Луны и других безатмосферных небесных тел.

Под экспозиционным возрастом участка лунной поверхности подразумевается некоторый эффективный промежуток времени, определяемый или поставленный в соответствие со степенью переработанности слоя реголита, его толщиной, эродированностью его составляющих. Эти характеристики зависят от интенсивности и продолжительности воздействия внешних факторов. Факторы эти различны по механизму и масштабам воздействия — от солнечного ветра до метеоритной бомбардировки, под их влиянием изменяется рельеф местности, ее кратерированность, форма кратеров, морфологические характеристики

лунного реголита и химико-минералогический состав составляющих его частиц. К настоящему времени разработана методика хронологии участков лунной поверхности, основанная на анализе сложившейся геологической ситуации, на анализе данных о кратерной плотности, на учете изменений морфологии лунных кратеров.

Первый метод разработки в 50-е годы. В последнее десятилетие у нас в стране он развивался группой исследователей — К. П. Флоренским, А. Т. Базилевским, М. С. Марковым, А. Л. Сухановым, В. Г. Трифоновым, Л. М. Шкериным и др. Методика состоит в площадном геолого-морфологическом картографировании, при котором выделяются области распространения характерных типов рельефа, их взаимоотношение и стратиграфические периоды. Метод носит качественный характер, с его использованием откартографировано 95% лунной поверхности.

Второй метод, статистический, основанный на анализе вариаций плотности распределения кратеров разного диаметра, разработан в предположении экзогенной природы подавляющего большинства лунных кратеров. Значительный вклад в его становление и развитие внес Е. М. Шумейкер. Характерный диапазон размеров кратеров, обеспечивающий «чувствительность» метода, составляет сотни метров. Основным рабочим моментом является получение статистических данных о распределении кратеров различных диаметров и построение диаграммы «размер кратеров — частота встречаемости». Критическое значение диаметра кратеров (для исследуемой поверхности характерно динамическое насыщение кратерами этого и меньших размеров) зависит от продолжительности и интенсивности метеоритной бомбардировки, что дает возможность установить экспозиционный возраст исследуемых участков поверхности. Показательными в этом смысле являются также наклон равновесной части диаграммы и плотность распределения кратеров, диаметр которых больше критического значения. Этот метод определения экспозиционного возраста весьма трудоемкий и возможен только при наличии крупномасштабных изображений анализируемых участков поверхности.

Методы хронологии, основанные на анализе изменения морфологических характеристик кратеров, развивались Н. Дж. Траском, Л. А. Содербломом и Л. А. Лебофским, Дж. М. Бойсом и Д. А. Джонсоном и некоторыми другими исследователями. Траск соотносил экспозиционный возраст участка лунной поверхности со степенью деградации кратеров различного диаметра. Содерблом и Лебофский и их последователи выбрали в качестве параметра, зависящего от продолжительности и интенсивности метеоритной бомбардировки поверхности, максимальный наклон стенок кратеров данного диаметра. Характер-

ные размеры используемых в таком анализе кратеров — сотни метров, форма — сферическая, максимальный наклон внутренних стенок свежих, незэродированных кратеров — около 30° . Эти методы разработаны также в предположении о решающей роли экзогенных факторов в процессе кратерообразования, для их реализации тоже нужны крупномасштабные изображения, более того, предъявляются повышенные требования к их качеству. Еще одно обязательное условие — угол освещения местности во время фотосъемки должен составлять $10-20^\circ$. Этот метод менее трудоемкий, наиболее оперативный, с его использованием построена карта распределения участков с заданным экспозиционным возрастом в пределах видимого полушария Луны.

Фотометрические характеристики участков лунной поверхности до настоящего времени не использовались непосредственно для определения их экспозиционного возраста. При геолого-морфологическом картографировании нормальное альbedo используется как один из дешифровочных признаков, однако только на уровне глазомерных оценок. Такое положение в значительной мере объясняется недостаточно высокой точностью фотометрического анализа, оставшейся такой довольно долгое время. Второй важной причиной можно считать низкую помехоустойчивость метода, ведь достаточно появления очень тонкого слоя нехарактерной для данного участка субстанции, чтобы существенно изменить альbedo исследуемой поверхности. В то же время история формирования лунного рельефа весьма богата событиями, сопровождавшимися выбросами больших масс лунного грунта на значительные расстояния. Особенно подвержены такому воздействию районы вблизи переходной зоны «море—материк». Тем не менее попытки установить хотя бы качественную связь нормального альbedo участков лунной поверхности с их относительным возрастом предпринимались. Для морских районов была получена искомая зависимость — их альbedo возрастало со временем. Тогда же для этих участков была обнаружена корреляция нормального альbedo с фазовым градиентом яркости вблизи полнолуния [1, 2], т. е. уже можно было ставить задачу отыскания корреляционных зависимостей между экспозиционным возрастом участков лунной поверхности с их фотометрическими особенностями. Невысокая точность фотометрии не позволяла тогда и в значительной мере затрудняет сейчас установление таких корреляций. До настоящего времени существуют два противоположных мнения относительно величин отклонений фазовых зависимостей яркости деталей лунного рельефа от «средней» фотометрической функции. Одни считают, что эти отклонения носят случайный характер и не превышают $\pm 5\%$ [3]. Результаты исследований фотометрических свойств образцов лунного грунта [4—9], анализ фотографических изображений лунной поверхности, полученных на

окололунной орбите при малых фазах [10], результаты прямого картографирования «оппозиционного» эффекта [11] подтверждают мнение о реальности существенно более значительных отклонений фотометрической функции участков лунной поверхности от средних данных. Обусловленность этих отклонений

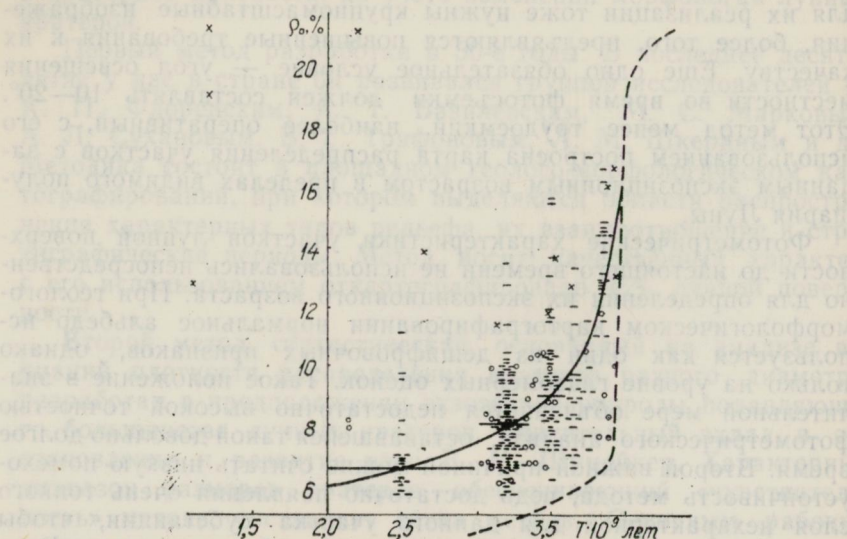


Рис. 1. Соотношение нормального альbedo участков лунной поверхности с их экспозиционным возрастом. Штриховая линия — аналогичный результат, полученный В. В. Шевченко.

определенными физическими причинами также не вызывает сейчас сомнений.

В последние годы в результате некоторого повышения точности лунной фотометрии появилась возможность привлекать фотометрические данные для определения экспозиционного возраста участков лунной поверхности. Так, В. В. Шевченко, используя корреляционные связи химического состава лунных грунтов с их отражательной способностью и кристаллизационным возрастом, получил прямую зависимость альbedo от возраста пород, рис. 1 (пунктирная линия). Наш результат (сплошная кривая, построенная по усредненным данным) получен в результате численного анализа [12] фотометрического каталога Р. В. Шортхилла и др. Данные об экспозиционном возрасте соответствующих участков поверхности взяты из работ Бойса и Джонсона [13] (черточки), Содерблома и Лебофского [14] (кружки — для морских участков и крестики — для кратерных образований). Характер обеих кривых совпадает. Расхождения значений p_0 при соответствующих T обусловлены различием редукции яркостного фактора к полнолунью.

Аналогичная зависимость построена и по данным цифровых карт нормального альбеда, составленных по материалам АМС «Зонд-6» и «Зонд-8» [15], рис. 2 (усредненные данные представлены сплошными черточками). Для сопоставления полученных зависимостей ρ_0 — T значения ρ_0 первой кривой ($\lambda=0,48$ мкм)

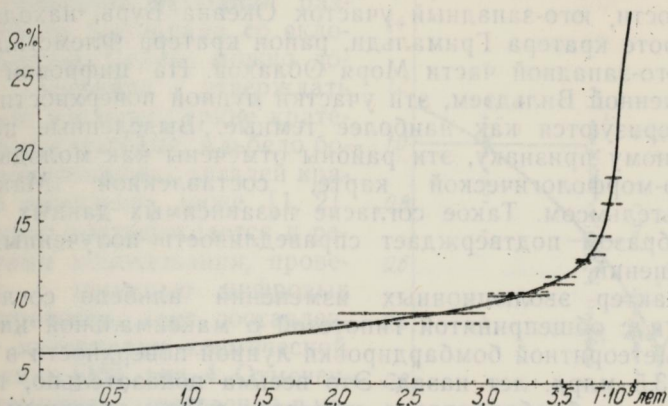


Рис. 2. Корреляционная связь нормального альбеда морских участков лунной поверхности с их экспозиционным возрастом.

редуцированы в фотометрическую систему используемых цифровых карт ($\lambda=0,62$ мкм) умножением на коэффициент 1,25. Редуцированные данные представлены на рис. 2 пунктиром. Результаты сопоставления свидетельствуют о хорошем согласии полученных данных. С использованием полученной совокупности данных была построена результирующая кривая, выражающая зависимость $\rho_0(T)$. Минимальное значение $\rho_0=0,06$ (при $T=0$) было определено с помощью составленных цифровых карт, это наименьшее альбеда морских участков в частях лунного диска, наиболее удаленных от терминатора (на оригинальных снимках Луны, с использованием которых и были составлены цифровые фотометрические карты), т. е. наименее отягощенных возможными ошибками. Анализ гистограмм статраспределения нормального альбеда в пределах листов составленных карт подтвердил правильность выбранного минимального значения ρ_0 .

С помощью полученной эмпирической зависимости было оценено значение нормального альбеда $\rho_0=0,09$ ($\lambda=0,62$ мкм) наиболее молодых участков морской поверхности, снятых АМС «Зонд-8», экспозиционный возраст которых не превышает 2 млрд. лет. Затем такие участки были найдены на составленной карте. Ими оказались локализованные районы западнее, севернее и юго-восточнее кратера Лихтенберг, область между

кратером Эддингтон и бороздой Крафта, районы юго-восточнее кратеров Эддингтон и Селевк, крайняя западная часть Моря Холода, находящаяся над Заливом Радуги, Залив Росы, участок Океана Бурь западнее Залива Радуги, юго-восточная часть Залива Радуги и прилегающая область Моря Дождей, участок юго-западнее Аристарха, северо-восточная часть Моря Влажности, юго-западный участок Океана Бурь, находящийся на широте кратера Гримальди, район кратера Флемстид, полоса в юго-западной части Моря Облаков. На цифровой карте, составленной Вильдзем, эти участки лунной поверхности также характеризуются как наиболее темные. Выделенные нами по альбедному признаку, эти районы отмечены как молодые и на геолого-морфологической карте, составленной Мак-Колли и Вильгельмсом. Такое согласие независимых данных некоторым образом подтверждает справедливость полученных нами соотношений.

Характер эволюционных изменений альбеда согласуется также и с общепринятой гипотезой о максимальной интенсивности метеоритной бомбардировки лунной поверхности в период около 3,5 млрд. лет назад. Это весьма показательно, так как метеоритная бомбардировка считается сейчас основным фактором, определяющим характер генезиса лунного реголита. Альбеда поверхности изменяется в процессе бомбардировки как за счет горизонтального перемешивания, особенно в переходной области «море—материк», так и за счет изменения структуры и размеров частиц реголита. На поздних стадиях обработки, когда присутствует в значительной мере определяющая светорассеивающие свойства поверхности мелкая фракция реголита (размеры частиц 10 — 200 мкм), существенным фактором становится бомбардировка микрометеоритами. Структурные эволюционные изменения реголита сопровождаются также изменением его фотометрической функции. Последняя зависит и от наличия сферических стеклянных частиц, которые образуются при метеоритной бомбардировке поверхности и, возможно, в процессах типа «испарение—конденсация и разбрызгивание», происходящих в жидкой лаве при ее излиянии на поверхность в условиях высокого вакуума. Количество таких частиц, если они образуются в основном при ударах метеоритов, зависит от экспозиционного возраста участков и определяет различную степень выраженности специфичных оптических явлений. Наличие такой связи подтверждается результатами сопоставления значений параметра a_2 фотометрической функции, полученных при анализе данных каталога Шортхилла и др. [12] и определяющих величину «оппозиционного эффекта» участков лунной поверхности с их экспозиционным возрастом, рис. 3. Аналогичные результаты были получены и при анализе фотометрической функции деталей лунного рельефа по данным каталога В. А. Федорца [16]. Выявленные корреляционные связи очень

важны для анализа деталей кратерного комплекса, экспозиционный возраст которых оценен весьма приближенно. Характер эволюционных изменений альbedo кратерных образований еще не выяснен окончательно. По-видимому, его особенности во многом определяются наличием значительных перепадов высот и, как результат этого — важной ролью процессов сползания раздробленного материала со склонов кратеров. Сейчас можно довольно уверенно утверждать лишь, что все очень яркие кратеры — самые молодые. Альbedo более экспонированных деталей кратерного комплекса ниже [1, 2]. Этот вывод подтверждается и результатами исследования, проведенного с помощью цифровых фотометрических карт, составленных по материалам космической фотосъемки [15], рис. 4. Отмеченное потемнение существенно в начальный период, дальнейшее изменение альbedo незначительно.

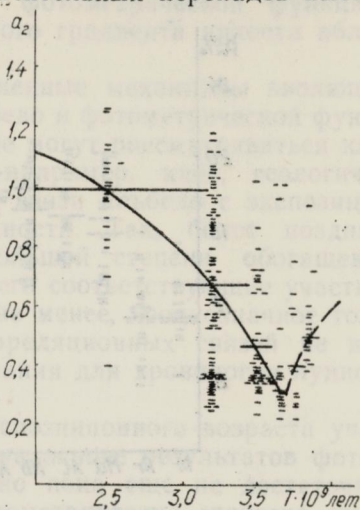


Рис. 3. Соотношение значений параметра a_2 численной модели лунной фотометрической функции (определяющего фазовый градиент яркости вблизи полнолуния) участков лунной поверхности с их экспозиционным возрастом.

Изменение нормального альbedo внекратерных образований, в частности морской поверхности, как показано выше, имеет противоположный характер. При экспозиционном возрасте менее 3,7 млрд. лет альbedo медленно растёт с возрастом, для более экспонированных участков поверхности характерно резкое повышение отражательной способности. По-видимому, ход нормального альbedo кратерных образований при $T > 3,7$ млрд. лет совпадает с эволюционными изменениями отражательной способности морской поверхности, однако сейчас недостаточно данных, чтобы утверждать это категорически. Причиной такого повышения альbedo может служить уменьшение размеров и увеличение количества частиц тонкой фракции реголита [4]. Как следствие изменений размеров и, возможно, морфологии частиц рассеивающего слоя происходит перераспределение вкладов теневой, оптической концентрации света и рассеяния высших порядков в процесс формирования отраженного потока. В этом смысле характерно, что этому же экспозиционному возрасту соответствует и перелом кривой полученной эмпирической зависимости $a_2 — T$. Отмеченные изменения согласуются и качественно: при уменьшении размеров частиц большее их количество становится прозрачными, альbedo слоя возрастает за счет увеличения вклада внут-

ренного отражения и рассеяния более высоких порядков, в то же время характер рассеяния света слоем таких частиц приближается к ортотропному, что выражается увеличением параметра a_2 в принятой нами для анализа модели фотометрической функции.

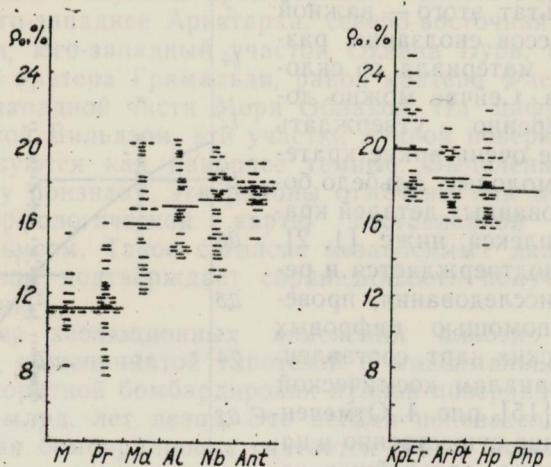


Рис. 4. Соотношение «стратиграфический период — нормальное альbedo» для деталей внекратерного и кратерного комплексов.

Проведенный анализ подтверждает целесообразность привлечения фотометрических данных участков лунной поверхности для определения их экспозиционного возраста. Полученные в работе эмпирические зависимости $a_2 - T$, $\rho_0 - T$ характеризуются значительным разбросом данных, что объясняется невысокой точностью исходных величин, особенно велики погрешности определения экспозиционного возраста. Локальные изменения химического состава лунных пород непосредственно влияют на их альbedo, внося тем самым дополнительную погрешность в хронологию лунной поверхности с помощью полученных соотношений. Неоднозначность эмпирических зависимостей свидетельствует о необходимости в сомнительных случаях пользоваться ими обоими одновременно. Полезны, по-видимому, будут рекомендации, обусловленные выводами, сделанными при детальном анализе участков лунной поверхности, входящих в фотометрический каталог Шортхилла и сильно отклонившихся от общей корреляционной зависимости $a_2 - \rho_0$. Такие детали делятся на два типа — это сильно изрезанные материковые участки, расположенные вблизи кратерных образований, либо морские участки, граничащие с материковым щитом, или перекрытые выбросами кратерных образований. В первом случае можно утверждать, что основная погрешность заключена в оп-

ределении параметра a_2 , так как наличие теней и относительно крутых склонов снижает точность фотометрии. Во втором случае нормальное альbedo поверхности несколько повышено в результате присутствия добавки материкового вещества, значения же параметра a_2 модели фотометрической функции, характеризующего величину фазового градиента яркости вблизи полнолуния, определены верно.

Следует отметить, что предложенные механизмы эволюционных изменений нормального альbedo и фотометрической функции участков лунной поверхности не могут рассматриваться как единственно верные. Существует, например, иное, геологическое истолкование корреляционной связи альbedo с экспозиционным возрастом участков поверхности. Так, более поздние выходы расплавленных пород в большей степени обогащены железом и титаном, в результате чего соответствующие участки имеют более низкое альbedo. Тем не менее, неоднозначное толкование природы выявленных корреляционных связей не исключает возможности их использования для хронологии лунной поверхности.

Таким образом, определение экспозиционного возраста участков и деталей лунного рельефа на основе результатов фотометрического анализа возможно, но пока еще не достаточно надежно. Необходимо изучать фотометрические свойства лунной поверхности в широком диапазоне спектра, чтобы выяснить, какой его участок обеспечит разработку наиболее точной методики хронологии. Сейчас метод может служить действенным дополнением к уже существующим способам. Метод перспективен, по мере повышения точности лунной фотометрии и уточнения необходимых корреляционных соотношений рассмотренная методика определения экспозиционного возраста участков лунной поверхности станет самостоятельным средством исследования.

Список литературы: 1. Барабашев Н. П., Езерская В. А., Езерский В. И., Латынина И. И. Каталог нормального альbedo и градиентов яркости участков лунной поверхности. — Вестн. Харьк. ун-та, № 82. Астрономия, 1972, вып. 7, с. 12—35. 2. Езерский В. И., Езерская В. А., Латынина И. И., Лацко В. И. О соотношении нормального альbedo участков лунных морей с кратерной плотностью. — Вестн. Харьк. ун-та, № 99. Астрономия, 1973, вып. 8, с. 9—18. 3. Шевченко В. В. Современная селенография. — М.: Наука, 1980. — 288 с. 4. Антипова-Каратаева И. И., Акимов Л. А., Езерский В. И., Псарев В. А. Сравнительное изучение фотометрической фазовой функции образцов реголита, доставленного АМС «Луна-16» и «Луна-20». — Вестн. Харьк. ун-та, № 137. Физика Луны и планет. Вопросы астрометрии, 1976, вып. 9, с. 56—61. 5. Akimov L. A., Antipova-Karataeva I. I., Shcuratov Lu. G. Indicatrix measurements of lunar samples from landing sites of Luna-24, Luna-16 and Luna-20. — In Proc. 10th lunar and planetary science conference. Houston. Texas, 1979, 1, p. 9—11. 6. Birkebak R. C., Cremers C. I., Dawson B. T. Optical and high-frequency electrical properties of lunar samples Science, 1970, 167, N 3912, p. 724—726. 7. Gold T., O'Leary B. T., Campbell M. I. Optical and high-frequency electrical properties of lunar samples

Science, 1969, 167, N 3918, p. 707—709. 8. O'Leary B. T., Briggs F. Optical properties of «Apollo-11» Moon samples. — Journ. Geophys. Res., 1970, 75, N 32, p. 6532—6537. 9. O'Leary B. T., Briggs F. Optical properties of «Apollo-12» Moon samples. — Journ. Geophys. Res., 1973, 78, N 5, p. 792—797. 10. Pohn H. A., Radin H. W., Wildey R. L. The Moon photometric function near zero phase angle from Apollo-8 photography. — The Astrophys. Journ. 1969, 157, N 3, p. 193—195. 11. Wildey R. L. The Moon in Heiligenschein. — Science, 1978, 200, N 4347, p. 1265—1267. 12. Псарев В. А. Построение численной модели лунной индикатрисы. — Депон. в ВИНТИ, 25 сент., 1980, № 4222—80. — 32 с. 13. Boyce I. M., Johnson D. A. Ages of flow units in the far lastern maria and implications for basin-filling history. — Proc. 9th lunar and planetary science conference. Houston, Texas, 1978, 3, p. 3275—3283. 14. Soderblom L. A., Lebofsky L. A. A technigue for rapid determination of reletive agesof lunar areas from orbital photography. — Journ. Geophys. Res., 1972, 77, N 2, p. 279—297. 15. Лаврова Н. П., Псарев В. А. Фотометрическое картирование Луны по материалам АМС «Зонд-6» и «Зонд-8». — Депон. ВИНТИ, № 1655—81, 13 апреля. 16. Псарев В. А. Лунная фотометрическая функция при малых углах фазы. II. Астроном. циркуляр АН СССР, 1979, № 1067, с. 5—7.

Поступила в редколлегию 25.05.81.

УДК 523.4

Ю. В. АЛЕКСАНДРОВ, В. П. ТИШКОВЕЦ

ОЦЕНКА РАЗМЕРОВ ЧАСТИЦ ГЛОБАЛЬНОЙ ПЫЛЕВОЙ БУРИ НА МАРСЕ В 1971 г. С УЧЕТОМ НЕСФЕРИЧНОСТИ ЧАСТИЦ

Определение физических характеристик атмосферы Марса в периоды глобальных пылевых бурь весьма важно для изучения динамики атмосферы планеты. Кроме того, информация о размерах частиц пылевой бури, их составе дает возможность получить характеристики поверхности Марса. В настоящее время из-за отсутствия удовлетворительной теории рассеяния света на несферических частицах задачи теории переноса излучения в подавляющем большинстве случаев решаются в рамках теории Ми. Насколько нам известно, несферичность частиц при определении их размеров по оптическим характеристикам атмосферы Марса в периоды пылевых бурь не учитывалась. В то же время, как показывают экспериментальные данные, оптические свойства несферических частиц существенно отличаются от свойств сферических частиц [8, 9, 11, 12], что может приводить к значительным ошибкам при решении обратных задач.

Остановимся на некоторых результатах исследований глобальной пылевой бури на Марсе в 1971 г., полученных различными методами (подробный обзор работ см. в [4, 6]).

Из анализа изменения контрастов во время бури в работе [5] был получен интервал изменения альбеда однократного рассеяния частиц ω примерно $0,6 \div 0,95$ при изменении длины