

К-14038

П306372

ВЕСТНИК

ХАРЬКОВСКОГО
УНИВЕРСИТЕТА

№ 247

АСТРОНОМИЯ СОЛНЕЧНОЙ СИСТЕМЫ

1983

85 к.



Вестн. Харьк. ун-та, 1983, № 247, 1—81.

V.N. Karazin Kharkiv National University



00256906

8

СОДЕРЖАНИЕ

Лупишко Д. Ф. Оценка и анализ величины фотометрической неоднородности поверхностей астероидов	3
Волченко А. П., Омельченко В. И. Об оценках несферичности Солнца и плотности межпланетной среды	7
Опанасенко Н. В., Шкуратов Ю. Г., Акимов Л. А., Латынина И. И. Спектрофотометрический каталог участков лунной поверхности	18
Ильинский А. В., Опанасенко Н. В., Шкуратов Ю. Г., Корниенко Ю. В., Станкевич Д. Г., Тюфлин Ю. С., Кадничанский С. А. Некоторые результаты цифровой обработки орбитальных панорам, полученных АМС «Луна-22»	29
Павленко П. П., Павленко Л. С. Позиционные фотографические наблюдения избранных малых планет в 1979 г. в АО ХГУ	32
Литкевич Н. Г., Туренко В. И. Результаты определения всемирного времени в АО ХГУ и ХГНИИМ за 1978—1982 гг.	35
Туренко В. И. Неравномерность вращения Земли и некоторая геофизическая интерпретация ее	38
Уваров В. Н. Оптический апертурный синтез: сравнительная эффективность анализатора светового поля	41
Захожай В. А. Установка для моделирования спекл-интерферометрии	44
Тихонов Н. А., Шабанов М. Ф. Ореолы звезд в первичном фокусе 6-метрового телескопа	50
Егоров А. Д., Еленская Л. И., Скуратовский И. Г. Регистрирующий фотометр	55
Каныгин С. А., Шарый В. Д. Устройство вывода из ЭВМ цветных и черно-белых изображений	60
Егоров Ю. А. Шестиканальный спектрофотометр с двухкоординатным пространственным сканированием	65
Александров Ю. В., Тишковец В. П. Расчет матрицы рассеяния света почти сферическими частицами	73

ВЕСТНИК ХАРЬКОВСКОГО УНИВЕРСИТЕТА

№ 247

АСТРОНОМИЯ СОЛНЕЧНОЙ СИСТЕМЫ

Редактор А. П. Гужва
Художественный редактор В. Е. Петренко
Технический редактор Л. Т. Ена
Корректор Н. А. Парфенова

Сдано в набор 08.01.83. Подп. в печать 17.11.83.
БЦ 09466. Формат 60×90/16. Бумага типогр. № 3.
Лит. гарн. Выс. печать 5 печ. л., 5,25 кр.-отт., 6 уч.-изд. л.
Тираж 500 экз. Изд. № 1157. Зак. 1309. Цена 85 к.

Издательство при Харьковском государственном университете издательского объединения «Вища школа»
310003, Харьков-3, ул. Университетская, 16

Харьковская городская типография № 16
310003, Харьков-3, ул. Университетская, 16

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО
СПЕЦИАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ УССР

ВЕСТНИК ХАРЬКОВСКОГО УНИВЕРСИТЕТА

№ 247

АСТРОНОМИЯ СОЛНЕЧНОЙ СИСТЕМЫ

Основан в 1965 г.

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

1983

Астрономия Солнечной системы.— Вестн. Харьк. ун-та, № 247. — Харьков: Вища школа. Изд-во при Харьк. ун-те, 1983. — 81 с.

Рассматриваются результаты расчета матрицы рассеяния света несферическими аэрозольными частицами, оценки несферичности Солнца и плотности межпланетной среды, фотометрии астероидов, исследования лунной поверхности наземными и космическими методами, а также определения всемирного времени и исследования неравномерности вращения Земли. Описываются методы и аппаратура для аналоговой и цифровой обработки изображений планет и других астрономических объектов.

Нормативные материалы приведены по состоянию на 1 января 1982 г.

Для научных работников и специалистов.

Редакционная коллегия: Ю. В. Александров (отв. ред.), К. Н. Деркач (отв. секр.), Л. А. Акимов, Д. Ф. Лупишко

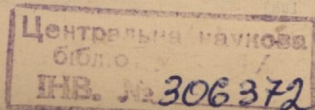
Печатается по решению редакционной коллегии Астрономической обсерватории Харьковского государственного университета (протокол № 7/82 от 22 ноября 1982 г.).

Адрес редакционной коллегии: 310022, Харьков-22, ул. Сумская, 35, Астрономическая обсерватория Харьковского государственного университета, тел. 43-24-38

Редакция естественнонаучной литературы

В 1705050000—090
М226(04)—83

© Харьковский
государственный
университет,
1983



Д. Ф. ЛУПИШКО

ОЦЕНКА И АНАЛИЗ ВЕЛИЧИНЫ ФОТОМЕТРИЧЕСКОЙ НЕОДНОРОДНОСТИ ПОВЕРХНОСТЕЙ АСТЕРОИДОВ

В работе [1] предложен метод оценки фотометрической неоднородности поверхностей астероидов, основанный на предположении о том, что поверхности астероидов являются предельно шероховатыми и, следовательно, по относительному распре-

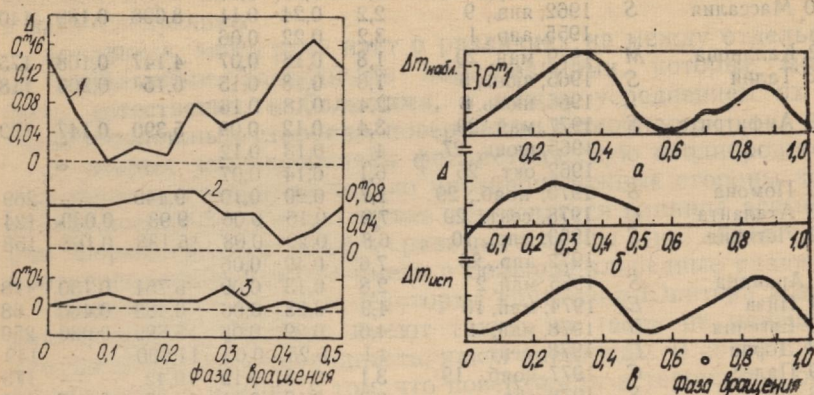


Рис. 1. Кривые разности блеска противоположных сторон астероидов 4 Веста (2), 304 Ольга (1) и 790 Претория (3)

Рис. 2. Пример разделения вклада альбедных неоднородностей и формы в кривую блеска астероида 16 Психея (14 августа 1979 г.):

а — наблюдаемая кривая блеска [6]; б — кривая разности блеска противоположных сторон, обусловленная альбедными неоднородностями; в — кривая блеска фотометрически однородного астероида, обусловленная его формой

делению яркости аналогичны лунному реголиту. В этом случае, если поверхность астероида фотометрически однородна, то в противостояние (угол фазы $\alpha=0^\circ$) при любой форме астероида разности блеска противоположных сторон его должны быть равны нулю. Оценки при углах фазы $\alpha \neq 0^\circ$ показали, что, например, в случае $\alpha=5^\circ$ и неправильности формы астероида, характеризующей амплитудой кривой блеска $\Delta m=0^m,20-0^m,45$, разность должна быть $\Delta \leq 0^m,05$. Поэтому метод сводится к определению разности Δ по кривой блеска астероида, полученной вблизи противостояния.

В целях реализации метода построены наблюдаемые кривые изменения разности Δ в пределах периода вращения для 37

Астероид	Тип	Дата наблюдений	α°	Δm	Δ_{\max}	P_h	P_V	D км
4 Веста	<i>U</i>	1959, янв., 28	2,0	0,10	0,10	5,342	0,255	555
		1971, июль, 29	4,0	0,18	0,18			
		1952, март, 7	4,3	0,12	0,10			
6 Геба	<i>S</i>	1959, февр., 17	1,3	0,06	0,03	7,274	0,162	206
7 Ирис	<i>S</i>	1952, янв., 28	5,1	0,22	0,08	7,135	0,196	222
9 Метидя	<i>S</i>	1949, нояб., 2	2,7	0,11	0,09	5,064	0,118	168
		1954, янв., 3	2,9	0,26	0,07			
		1958, фев., 15	5,1	0,09	0,06			
		1974, июнь, 23	8,5	0,28	0,08			
15 Эвномия	<i>S</i>	1964, дек., 31	4,5	0,43	0,08	6,081	0,163	261
16 Психея	<i>M</i>	1974, авг., 11	4	0,30	0,17	4,196	0,094	249
		1979, авг., 14	4,6	0,32	0,17			
19 Фортуна	<i>C</i>	1965, март, 21	1,6	0,29	0,07	7,46	0,037	226
		1965, март, 22	2,1	0,27	0,06			
20 Массалия	<i>S</i>	1962, янв., 9	2,2	0,24	0,11	8,098	0,189	140
		1955, апр., 1	3,2	0,22	0,06			
22 Каллиопа	<i>M</i>	1979, май, 29	1,8	0,16	0,07	4,147	0,108	175
23 Талия	<i>S</i>	1965, июнь, 6	1,6	0,18	0,15	6,15	0,200	118
		1965, июнь, 8	2,4	0,18	0,16			
29 Амфитрита	<i>S</i>	1977, май, 29	3,4	0,12	0,09	5,390	0,147	199
		1965, июнь, 27	4	0,13	0,12			
		1962, окт., 25	6,1	0,14	0,07			
32 Помона	<i>S</i>	1975, нояб., 29	1,7	0,20	0,10	9,443	—	269
36 Аталанта	<i>C</i>	1978, сент., 29	7,9	0,15	0,06	9,93	0,039	124
39 Летиция	<i>S</i>	1953, апр., 10	6,8	0,22	0,08	5,138	0,168	158
		1972, апр., 23	7,6	0,49	0,06			
43 Ариадна	<i>S</i>	1965, май, 2	2,8	0,13	0,09	5,751	0,130	78
44 Низа	<i>E</i>	1974, май, 16	4,9	0,28	0,06	6,483	0,480	68
45 Евгения	<i>U</i>	1978, май, 4	4,6	0,29	0,08	5,699	0,030	250
48 Дорис	<i>U</i>	1978, сент.	4,1	0,25	0,09	11,900	—	149
49 Палес	<i>C</i>	1977, нояб., 19	3,1	0,18	0,12	10,42	—	175
68 Лето	<i>S</i>	1978, авг.,	6,3	0,19	0,11	14,85	0,147	128
88 Фисба	<i>C</i>	1977, сент., 23	5,2	0,16	0,08	6,042	0,045	214
92 Ундина	<i>U</i>	1977, дек., 15	1,9	0,17	0,04	15,94	—	184
110 Лидия	<i>U</i>	1958, окт., 18	3,24	0,18	0,08	10,927	0,182	156
118 Пейто	—	1977, дек., 3	4,0	0,33	0,05	7,78	—	—
128 Немезида	<i>CEU</i>	1977, дек.	3,9	0,10	0,05	39	—	191
139 Джуева	<i>C</i>	1974, март	1,	0,20	>0,14	20,9	0,034	165
161 Атор	<i>CMEU</i>	1979, май	10,	0,27	0,14	7,288	—	100
216 Клеопатра	<i>CMEU</i>	1977, янв., 15	8,1	0,40	0,06	5,394	—	236
218 Бианка	<i>S</i>	1975, март, 24	4,6	0,20	0,04	6,432	—	59
304 Ольга	<i>CMEU</i>	1978, авг., сент.	3,0	0,20	0,16	18,36	—	68
313 Халдея	<i>C</i>	1981, март, 11	3,3	0,17	0,08	12,67	0,033	108
337 Девоза	<i>C</i>	1977, дек., 16	7,8	0,19	0,15	4,610	—	107
349 Дембовска	<i>R</i>	1962, май, 21	3,1	0,33	0,08	4,702	0,278	145
		1962, дек., 8	3,5	0,25	0,08			
471 Папагена	<i>S</i>	1976, нояб., 27	3,8	0,11	0,10	7,113	0,163	145
511 Давида	<i>C</i>	1952, янв., 26	5,0	0,06	0,04	5,17	0,040	335
		1953, апр., 8	6,6	0,25	0,04	6,483	0,480	68
624 Гектор	<i>U</i>	1968, май, 1	4,1	1,10	0,03	6,922	0,025	234
790 Претория	<i>C</i>	1978, нояб.	4,9	0,16	0,03	10,37	0,026	178

астероидов (всего 51 кривая) с надежно измеренными кривыми блеска при малых значениях угла фазы α (рис. 1). В таблице приведены максимальные значения этой разности Δ_{\max} для каждого из астероидов, а также взятые из системы данных TRIAD [2] композиционный тип астероида, значения амплитуды кривой блеска Δm , периода вращения P , геометрического альбедо p_v и диаметра D . Большинство ссылок на используемые источники по кривым блеска содержатся в работе [3].

Максимальная разность в блеске противоположных сторон некоторых астероидов, как видно из таблицы, достигает $0^m,15$ — $0^m,18$. С учетом того, что некоторая доля этой величины может быть обусловлена асимметрией формы астероида (значения α малы, но не равны 0°), можно заключить, что фотометрическая неоднородность поверхностей астероидов достигает значения $0^m,15$. Иными словами, блеск двух сторон (полусфер) астероида только из-за разницы в среднем альбедо может отличаться по крайней мере на $0^m,15$ или 15%. При этом необходимо иметь в виду следующее:

во-первых, здесь речь идет о различиях не между отдельными локальными альбедными образованиями, которые могут быть, естественно, и большими, а между усреднением их по противоположным сторонам поверхности астероидов;

во-вторых, мы определяем фотометрическую неоднородность поверхности, сравнивая только противоположные стороны астероида, поскольку в этом случае исключается влияние асимметрии формы, однако просто разные стороны (не обязательно противоположные) могут иметь и большие альбедные различия.

Поверхности Марса и некоторых спутников Юпитера в визуальной области спектра имеют такую же (если не меньшую) фотометрическую однородность, как и астероиды. В связи с этим общепринятое мнение о том, что поверхности астероидов в большинстве своем фотометрически однородны, следует считать ошибочным.

Наиболее фотометрически однородными из астероидов, представленных в таблице, по-видимому, являются астероиды 6 Геба, 92 Ундина, 218 Бианка, 511 Давида, 624 Гектор, 790 Претория, для которых $\Delta_{\max} = 0^m,03$ — $0^m,04$. Однако значение Δ_{\max} для них определено только по одной кривой блеска и не исключено, что наблюдения этих астероидов при других значениях аспекта (угла между осью вращения и направлением луча зрения) могут дать большие значения разности Δ . С другой стороны, поверхности астероидов 4 Веста, 16 Психея, 23 Таллия, 139 Джуева, 304 Ольга, 337 Девоза фотометрически наиболее неоднородны ($\Delta_{\max} = 0^m,14$ — $0^m,18$) при условии, что их периоды вращения измерены достаточно надежно.

Для некоторых форм астероидов измеренные периоды вращения могут быть в два раза больше или в два раза меньше истинных [4]. В первом из этих двух случаев разности блеска

противоположных сторон (т. е. разности кривой блеска на полу-периоде вращения) будут вычисляться на самом деле как разности на периоде вращения и, следовательно, будут близкими к нулю.

Во втором случае, когда измеренный период в 2 раза меньше истинного, разности блеска Δ будут в действительности определяться на четверти периода вращения и значение Δ_{\max} будет близким к значению амплитуды кривой блеска Δm , поскольку именно на $1/4$ периода разнесены между собой минимумы и максимумы кривых блеска большинства астероидов. Поэтому для заключения о степени фотометрической неоднородности поверхности астероидов, у которых Δ_{\max} близко к нулю или к значению амплитуды Δm , необходимо быть уверенным в правильности их периодов вращения. Такой уверенности нет, в частности, в отношении периодов вращения астероидов 23 Талия [5] и 139 Джуева (измеренная кривая блеска этого астероида имеет один широкий максимум и один узкий минимум). Кроме того, кривая изменения разности Δ в пределах периода вращения и значение Δ_{\max} астероида 49 Палес усиливают подозрение [4] относительно того, что измеренный период его составляет половину истинного. По-видимому, нельзя сомневаться в правильности периода 16 Психеи [6, 7], поэтому альбедные неоднородности этого астероида следует считать реальными. У астероида 4 Веста Δ_{\max} и амплитуда кривой блеска совпадают, что при условии правильности периода вращения согласуется с данными [8] о почти сферической форме Весты, кривая блеска которой обусловлена только альбедными вариациями. Можно считать надежными величинами альбедные вариации астероидов 8 Метиды и 29 Амфитрита, поскольку они определены по наблюдательным данным в несколько оппозиций (см. таблицу).

При наличии кривой изменения разности Δ в пределах периода вращения (рис. 1) можно разделить вклад альбедных неоднородностей и формы астероида в его кривую блеска и построить кривую блеска фотометрически однородного астероида, т. е. обусловленную только неправильностью формы. На рис. 2 показан пример такого разделения для астероида 16 Психея. Нижняя кривая ϵ соответствует фотометрически однородному астероиду. Она обусловлена неправильностью его формы и получена путем выравнивания блеска противоположных сторон астероида на величину $\Delta/2$ с соответствующим знаком. Амплитуда блеска этой кривой отличается от амплитуды наблюдаемой кривой блеска на значение $\frac{1}{2}\Delta_{\max}$. Определять соотношения

осей фигуры астероидов необходимо именно по таким кривым блеска, а не по наблюдаемым, как это делалось ранее [6, 9], поскольку наблюдаемая кривая блеска может быть во многом обусловлена вариациями альбеда. Пользуясь кривой ϵ и дан-

ными наблюдений [6, 10], можно определить новое соотношение осей фигуры Психея, аппроксимируя ее трехосным эллипсоидом вращения. Оно составляет 1 : 1,3 : 1,6 вместо 1 : 1,3 : 1,7, полученного без учета альбедных неоднородностей поверхности [10].

Подытоживая сказанное, можно заключить следующее:

1. При использовании значений амплитуды кривых блеска в качестве характеристики формы астероидов или, тем более, для определения их фигуры необходимо учитывать «альбедную» составляющую кривой блеска, которая, как показано выше, может достигать значения $0^m,15$.

2. Кривые изменения разности блеска противоположных сторон в пределах периода вращения могут быть использованы в качестве дополнительной информации о возможной погрешности в измеренных значениях периодов астероидов, поскольку параметр Δ является чувствительным к значению периода вращения.

3. Периоды вращения астероидов 4 Веста, 23 Талия, 49 Палес, 139 Джувена нуждаются в дальнейшем уточнении.

4. Для измерений вариаций цвета и степени поляризации света с вращением астероида вокруг оси наиболее подходящими являются астероиды с большими альбедными вариациями, т. е. с большими значениями Δ_{\max} (см. таблицу).

Список литературы: 1. Акимов Л. А., Луишко Д. Ф., Бельская И. Н. О фотометрической неоднородности поверхностей астероидов.— Астрон. журн., 1982, 60, вып. 5, с. 999—1004. 2. *Asteroids*/ed. T. Gehrels.— Univ. of Arizona Press.— Tucson, 1979—1170 p. 3. Tedesco E. F. Lightcurve parameters of asteroids.— In *Asteroids*, ed. T. Gehrels.— Univ. of Arizona Press, Tucson, 1979, p. 1098—1107. 4. Zappala V. Peculiar shapes of asteroids: implication for light curves and periods of rotation.— *Moon and Planets*, 1980, 23, N 3, p. 345—353. 5. Van Houten-Groeneveld I., van Houten C. J., Zappala V. Photoelectric photometry of seven asteroids.— *Astron. Astrophys. Suppl.*, 1979, 35, p. 223—232. 6. Луишко Д. Ф., Бельская И. Н., Тунеева, Ф. А. UBV-фотометрия астероидов М-типа 16 Психея и 22 Каллиопа.— Астрон. вестн., 1982, 16, N 2, с. 101—108. 7. Zhou Xing-hai, Yang Xiu-yi The rotation of asteroid (16) Psyche.— *Chin. Astron. and Astrophys.*, 1982, 6, N 1, p. 57—59. 8. Blanco G., Catalano S. UBV-photometry of Vesta.— *Icarus*, 1979, 40, p. 359—363. 9. Scaltriti F., Zappala V. Lightcurves, phase function and pole of the asteroid 22 Kalliope.— *Icarus*, 1978, 34, p. 93—98. 10. Луишко Д. Ф., Киселев Н. Н., Чернова Г. П. и др. Оппозиционный эффект и структура поверхности астероида 16 Психея.— Письма в Астрон. журн., 1980, 6, N 3, с. 184—188.

Поступила в редколлегию 20.09.82.

УДК 523.24:521.1/3

А. П. ВОЛЧЕНКО, В. И. ОМЕЛЬЧЕНКО

ОБ ОЦЕНКАХ НЕСФЕРИЧНОСТИ СОЛНЦА И ПЛОТНОСТИ МЕЖПЛАНЕТНОЙ СРЕДЫ

Развернувшееся в последние годы изучение таких явлений, как негравитационные эффекты в движении комет, делает актуальным вопрос о распределении межпланетной среды в Солнечной системе и об установлении оценок ее плотности. Существующие оценки плотности межпланетной среды и ее суммарной массы весьма противоречивы. Так, по одним оценкам [1] в Солнце сосредоточено ~99,866% массы всей Солнечной системы и, таким образом, на долю межпланетной среды и всех

планет приходится $\sim 0,134\%$ ее массы. По другим [1] — только масса одной составляющей межпланетной среды, космической пыли достигает массы Солнца ($2 \cdot 10^{33}$ г) или даже превышает ее.

Опишем попытку получить оценки несферичности Солнца и плотности межпланетной среды по их влиянию на движение четырех внутренних планет. При этом используем разность наблюдаемых и обусловленных общей теорией относительно-ности (ОТО) и большими планетами расчетных движений перигелиев внутренних планет, которая здесь объясняется несферичностью Солнца и наличием межпланетной среды. Предполагается, что среда оказывает гравитационное воздействие на помещенный в нее объект и сопротивление его движению.

Впервые, как известно [2], аномальное движение перигелия Меркурия ($38,3''$ за 100 лет), не объяснявшееся влиянием прочих планет, отметил еще Леверрье в 1856 г. Затем эту невязку уточняли Ньюком ($41,2'' \pm 2,1''$), Чеботарев ($42,65'' \pm 0,6''$), Клеменс ($42,56'' \pm 0,94''$), Дюкомбе [3] ($43,11'' \pm 0,45''$), Шапиро с сотрудниками [4] ($43,25'' \pm 0,86''$). Многочисленные попытки объяснения этой невязки в рамках классической механики к успеху не привели, хотя при этом и была показана возможность объяснения таким путем, по крайней мере, части этой невязки.

Объяснение аномального движения перигелия Меркурия, так же как и аномальных движений других внутренних планет, данное ОТО, считалось исчерпывающим вплоть до экспериментов Дикке и Голдберга [3], в результате которых ими была отмечена несферичность Солнца, выражавшаяся разностью в ~ 35 км между экваториальным и полярным его радиусами, что для отношения этой разности к радиусу Солнца дает $4,5 \cdot 10^{-5}$. Учет несферичности Солнца примерно на 10% ухудшает соответствие теоретического и экспериментального результатов (табл. 1), что, собственно, и составило экспериментальную основу скалярно-тензорной теории (СТТ) Бранса — Дикке [3].

Сравнение результатов, предсказываемых ОТО и СТТ, было продолжено в ряде работ, среди которых следует отметить наблюдения Шапиро с сотрудниками [5, 6]. В работе [5] регистрировалось запаздывание сигналов от «Маринера-6» и «Маринера-7». В работе [6] был установлен факт движения перигелия малой планеты 1566 Икар на основании обработки 413 фотографий планеты. Как в первом, так и во втором случае авторы сделали вывод не в пользу СТТ. Согласно [6] неопределенность полученных результатов составляет $\sim 20\%$. Таким образом, вопрос о справедливости ОТО и СТТ остается открытым и, очевидно, будет решаться по мере уточнения знаний о несферичности Солнца, о межпланетной среде и других факторах, вызывающих движение перигелиев планет.

Таблица 1

Планета	$\Delta\varphi_T$	$\Delta\varphi_H$	$\Delta\varphi_H - \Delta\varphi_T$ max	$\Delta\varphi_H - \Delta\varphi_T$ min	$\varepsilon (\gamma=0)$	$\gamma_{\max} (\varepsilon=0)$	γ_{\min}
Меркурий	$43,03'' \pm 0,03''$	$42,56'' \pm 0,94''$ [2] $43,11'' \pm 0,45''$ [3] $43,25'' \pm 0,86''$ [4]	$0,53''$ $0,58''$ $1,14''$	$-1,44''$ $-0,4''$ $-0,67''$	$0,54 \cdot 10^{-5}$ $0,59 \cdot 10^{-5}$ $1,16 \cdot 10^{-5}$	$5,98 \cdot 10^{-17}$ $6,55 \cdot 10^{-17}$ $1,29 \cdot 10^{-16}$	0 0 0
Венера	$8,6''$	$10,1'' \pm 2,9''$ [2] $8,4'' \pm 4,8''$ [3]	$4,4''$ $4,6''$	$-1,4''$ $-5,0''$	$4,41 \cdot 10^{-4}$ $4,61 \cdot 10^{-4}$	$3,89 \cdot 10^{-15}$ $4,07 \cdot 10^{-15}$	0 0
Земля	$3,84''$	$5,0'' \pm 1,2''$ [3] $4,6'' \pm 2,7''$ [10]	$2,36''$ $3,46''$	$-0,04''$ $-1,94''$	$7,02 \cdot 10^{-4}$ $1,03 \cdot 10^{-3}$	$3,91 \cdot 10^{-15}$ $5,73 \cdot 10^{-15}$	0 0
Марс	$1,35''$	$8,0'' \pm 3,7''$ [2]	$10,35''$	$2,95''$	$1,37 \cdot 10^{-2}$	$5,41 \cdot 10^{-15}$	$1,55 \cdot 10^{-15}$ ($\varepsilon = 1,16 \cdot 10^{-5}$)
Икар	$10,1''$	$10,05'' \pm 2''$ [6]	$1,95''$	$-2,05''$	—	$8,51 \cdot 10^{-19}$ ($\varepsilon = 1,16 \cdot 10^{-5}$)	—

$\Delta\varphi_T$ — следующее из ОТО смещение перигелия за сто лет; $\Delta\varphi_H$ — следующее из наблюдений смещение перигелия за сто лет; ε — верхняя оценка несферичности Солнца; $\gamma_{\max} (\text{г/см}^3)$ — верхняя оценка плотности межпланетной среды; $\gamma_{\min} (\text{г/см}^3)$ — нижняя оценка плотности межпланетной среды.

Более результативными оказались измерения, выполненные Хиллом и Стеббинсом [7] на специально построенном телескопе, показавшие, что, если сплюснутость Солнца и существует, то в размерах, меньших, чем $4,5 \cdot 10^{-5}$. Вопрос о несферичности Солнца важен и сам по себе, поскольку вращение внешних слоев Солнца с периодом в ~ 27 земных суток является хорошо установленным фактом [8]. Дело лишь в том, остается ли эта скорость постоянной для внутренних слоев, уменьшается или возрастает. В первом случае несферичность составила бы $0,8 \cdot 10^{-5}$ [3], во втором она была бы меньше, а в третьем — больше этой величины. Как во втором, так и в третьем случае возникают трудности при объяснении различия скоростей вращения наружных и внутренних слоев Солнца. Однако независимо от того, какой случай реализуется на самом деле, аргументом в пользу существования несферичности Солнца является еще и то, что одним из следствий вращения внутренних масс является уменьшение температур и давлений в центральной его части, что объясняет, по крайней мере, часть наблюдаемого нейтронного потока.

Считаем своим долгом выразить признательность Г. Г. Степаненко за участие в проведении вычислений.

Метод возмущений. В качестве уравнений невозмущенного движения используем уравнения Клеро—Лапласа:

$$\frac{d^2 u}{d\varphi'^2} + u - \frac{\mu}{M^2} (1 + s^2)^{-3/2} = 0, \quad \frac{dM}{d\varphi'} = 0, \quad \frac{d^2 s}{d\varphi'^2} + s = 0, \quad (1)$$

$$u = \frac{1}{\rho}, \quad s = \frac{z'}{\rho}; \quad \mu = km_c, \quad \bar{M} = M \cos i. \quad (2)$$

Здесь ρ , φ' , z' — цилиндрические координаты движущегося объекта, связанные с центральным телом, масса которого m_c ; k — гравитационная постоянная; i — угол, образованный осью z' и вектором \vec{M} момента импульса объекта, отнесенного к единице массы.

Для получения системы уравнений в возмущениях проварьируем левые части (1) и полученные выражения приравняем составляющим F_ρ , F_t , F_z возмущающей силы \vec{F} , умноженным соответственно на коэффициенты $-\frac{\rho^2}{mM^2}$, $\frac{\rho^3}{mM}$,

$$\frac{\rho^3}{m\bar{M}^2}, \text{ где } m \text{ — масса объекта. В результате, обозначая } \delta u, \delta \bar{M}, \delta s \text{ возмущения величин } u, \bar{M} \text{ и } s, \text{ получаем}$$

$$\frac{d^2 \delta u}{d\varphi'^2} + \delta u + \frac{2\mu}{M^2} \frac{\delta \bar{M}}{\bar{M}} (1 + s^2)^{-3/2} + \frac{3\mu}{M^2} (1 + s^2)^{-5/2} s \delta s = -\frac{\rho^2}{mM^2} F_\rho;$$

$$\frac{d}{d\varphi'} \frac{\delta \bar{M}}{\bar{M}} = \frac{\rho^3}{mM^2} F_t, \quad \frac{d^2}{d\varphi'^2} \delta s + \delta s = \frac{\rho^3}{mM^2} F_z. \quad (3)$$

В дальнейшем систему (3) удобно анализировать в системе координат (r, φ, z) , отнесенной к центральному точечному телу и к плоскости невозмущенной орбиты движущегося тела.

При этом $\bar{M} = M = r^2 \dot{\varphi} = \text{const}$, $z = 0$, $s = 0$ (4)

$$\frac{d^2 \delta u}{d\varphi^2} + \delta u + \frac{2\mu}{M^2} \frac{\delta M}{M} = -\frac{r^2}{mM^2} F_r, \quad \frac{d}{d\varphi} \frac{\delta M}{M} = \frac{r^3}{mM^2} F_t,$$

$$\frac{d^2 \delta s}{d\varphi^2} + \delta s = \frac{r^3}{mM^2} F_z. \quad (5)$$

Фигурирующие в (5) величины r, φ определяют координаты движущегося объекта при отсутствии возмущений. При этом, очевидно, имеем $r = p(1 + e \cos \varphi)^{-1}$, где p — фокальный параметр; e — эксцентриситет орбиты; φ отсчитывается от линии апсид. Если, кроме того, возмущающая сила \vec{F} удовлетворяет условию $\vec{F} = \vec{F}(\varphi)$, то (5) определяет систему трех обыкновенных линейных дифференциальных уравнений с постоянными коэффициентами относительно трех неизвестных $\delta u, \delta M, \delta s$, которая сводится к квадратурам при следующих начальных условиях:

$$\varphi = 0: \delta u = 0, \quad \frac{d\delta u}{d\varphi} = 0, \quad \delta M = 0, \quad \delta s = 0, \quad \frac{d\delta s}{d\varphi} = 0. \quad (6)$$

Результирующая возмущающая сила $\vec{F}(\varphi)$ может быть представлена суперпозицией возмущающих сил $\vec{F}_i(\varphi)$: $\vec{F}(\varphi) = \sum_i \vec{F}_i(\varphi)$, обусловленных различными причинами. Поэтому и в силу линейности (5) результирующее решение (5) может быть получено суперпозицией решений, обусловленных каждой возмущающей силой $\vec{F}_i(\varphi)$, взятой в отдельности.

Движение перигелия определяют величины $\delta z, \delta r, \delta \varphi$, которые должны быть подсчитаны за n оборотов, совершенных объектом в течение ста земных лет. Для их отыскания проварьируем величины s, u, M , пользуясь их определением (2), (4). Положив в полученных выражениях $z=0$ и соответственно $s=0$, находим

$$\delta z = r \delta s, \quad \delta r = -r^2 \delta u, \quad \frac{d\delta \varphi}{d\varphi} = 2 \frac{\delta u}{u} + \frac{\delta M}{M}. \quad (7)$$

Подставляя в эти выражения $\delta s, \delta u, \delta M$ из (5), (6), интегрируя последнее из равенств (7) при дополнительном условии $\delta \varphi|_{\varphi=0} = 0$, определяем интересующие нас величины.

Движение перигелия, обусловленное несферичностью Солнца. Считая, что несферичность Солнца обусловлена вращением

вокруг полярной оси, в разложении его гравитационного потенциала Φ по степеням r' удержим только первые два члена:

$$\Phi = \frac{\mu}{r'} + \frac{1}{5} \mu r_e^2 \varepsilon \frac{1-3\cos^2\Theta}{r'^3}. \quad (8)$$

Здесь r' , Θ — сферические координаты точки наблюдения, отсчитываемые от центра Солнца и его полярной оси; $\varepsilon = \frac{r_e - r_p}{r_e} \ll 1$, r_e — экваториальный, r_p — полярный радиусы Солнца.

Возмущающая сила $\vec{F} = m \nabla \Phi_b$ определяется вторым слагаемым в Φ , которое в цилиндрической системе координат (r , φ , z), отнесенной к центру Солнца и к плоскости невозмущенной орбиты объекта, имеет вид

$$\Phi_b = -\frac{A}{r'^3} \frac{3A}{r'^5} \cos^2\Theta_0 [z + r \operatorname{tg} \Theta_0 \sin(\varphi - \varphi_0)]^2; \quad r' = (r^2 + z^2)^{1/2},$$

$$A = \frac{1}{5} \mu r_e^2 \varepsilon. \quad (9)$$

Здесь Θ_0 — угол между плоскостями экватора Солнца и невозмущенной орбиты объекта; φ_0 — угол между линией пересечения этих плоскостей и линией аписид; φ — долгота, отсчитываемая от линии аписид.

Производные $\frac{\partial \Phi_b}{\partial r}$, $\frac{1}{r} \frac{\partial \Phi_b}{\partial \varphi}$, $\frac{\partial \Phi_b}{\partial z}$, определяющие $\nabla \Phi_b$, должны быть подсчитаны в плоскости орбиты ($z=0$). При этом составляющие возмущающей силы, обусловленной несферичностью Солнца, равны $F_r = -3A m r^{-4} (1 - 3 \sin^2 \Theta_0 \times \sin^2(\varphi - \varphi_0))$; $F_t = -3A m r^{-4} \sin^2 \Theta_0 \sin 2(\varphi - \varphi_0)$; $F_z = -3A m r^{-4} \times \sin 2\Theta_0 \sin(\varphi - \varphi_0)$ (10). Подставляя выражения (10) в (5) и используя (6) и (7), находим $\delta z(2\pi n)$, $\delta r(2\pi n)$, $\delta \varphi_c(2\pi n)$ — смещения δz , δr , $\delta \varphi$ за n оборотов объекта, движущегося вокруг Солнца:

$$\begin{aligned} \delta \varphi_c(2\pi n) = & -\frac{3A n \pi}{M^2 p} \left\{ 4 \left[\ln \frac{1+e_0}{2(1+e)} + \frac{(1+e)(1+e^2/3)}{e_0(1+e_0)} + \right. \right. \\ & \left. \left. + \frac{1 + \frac{2}{3} e^2}{1+e_0} \right] \left(1 - \frac{3}{2} \sin^2 \Theta_0 \right) + \frac{\pi n e^2}{e_0(1+e_0)} \sin^2 \Theta_0 \sin 2\varphi_0 + \right. \\ & \left. + \left[\ln \frac{1+e_0}{2(1+e)} - 1 - \frac{4}{3} e + \frac{8+14e}{e_0(1+e_0)} + \frac{e^2(52-74e-36e^2)}{15e_0(1+e_0)^2} + \right. \right. \\ & \left. \left. + \frac{e^2(131+12e)}{30(1+e_0)^2} \right] \sin^2 \Theta_0 \cos 2\varphi_0 \right\}, \end{aligned}$$

$$\delta z(2\pi n) = \frac{3.4n\pi}{M^2(1+e)} \sin 2\Theta_0 \cos \varphi_0, \quad \delta r(2\pi n) = 0; \quad e_0 = (1 - e^2)^{1/2}. \quad (11)$$

Движение перигелия, обусловленное гравитацией межпланетной среды. Рассматриваемая модель представляет собой центральное точечное тело с потенциалом μ/r , окруженное непрерывной средой со сферически-симметричным распределением плотности $\gamma = \gamma(r)$, заполняющей сферу неопределенного конечного радиуса R , в которой движется точечный объект с массой m . Гравитационный потенциал $\Phi = \Phi(r)$ среды в этом случае

$$\Phi(r) = k \int_0^{2\pi} \int_0^\pi \int_0^R \frac{\gamma(r') r'^2 \sin \Theta'}{|\vec{r} - \vec{r}'|} d\varphi' d\Theta' dr', \quad (12)$$

где $\vec{r} = (r, \Theta, \varphi)$ и $\vec{r}' = (r', \Theta', \varphi')$ — радиусы-векторы точки наблюдения и произвольной точки в среде соответственно. Интегрируя (12) по φ' и Θ' , получаем

$$\Phi(r) = 4\pi k \left(\int_0^r \gamma(r') r'^2 r^{-1} dr' + \int_r^R \gamma(r') r' r^{-1} dr' \right)$$

Тогда результирующая сила, действующая на рассматриваемое тело, движущееся в среде по траектории, расстояние до перигелия которой есть r_0 , может быть представлена в виде

$$-\left(\frac{\mu m}{r^2} + 4\pi k m \int_0^{r_0} \gamma(r') r'^2 r^{-2} dr' + 4\pi k m \int_{r_0}^r \gamma(r') r' r^{-2} dr' \right).$$

Здесь первые два слагаемых определяют силу, обусловленную суммарной массой центрального тела и среды, заполняющей сферу радиуса r_0 . Движение перигелия при этом вызывает лишь сила, определяемая третьим слагаемым, обусловленная массой среды, заключенной между двумя концентрическими сферами с постоянным радиусом r_0 и переменным r , определяющим, вместе с тем, координату r движущегося тела. Рассматривая эту силу в качестве возмущающей F , находим ее составляющие

$$F_r(\varphi) = -4\pi k m r^{-2} \int_{r_0}^r \gamma(r') r'^2 dr' = -\frac{4}{3} \pi k m \bar{\gamma}(r) (r^3 - r_0^3) r^{-2},$$

$$F_t = 0, \quad F_z = 0, \quad (13)$$

где $\bar{\gamma}(r)$ — средняя плотность среды в указанном сферическом слое.

Подставляя значения (13) в (5) и интегрируя с учетом (6), наложим на $\bar{\gamma}(r)$ дополнительное условие $\bar{\gamma} = \bar{\gamma}(r) = \text{const}$

в рассматриваемом слое. Это упрощение, очевидно, тем более оправдано, чем менее эллиптична невозмущенная траектория объекта ($e \ll 1$). При этом

$$\delta\varphi_g(2\pi n) = -\frac{8}{3} \frac{\pi^2 k a^4 \bar{\gamma}}{M^2} e_0^3 \left(2e - 7 + 3 \ln \frac{2(1-e)}{1+e_0} + \frac{e^2 - 8e + 7}{e_0} \right), \quad \delta z(2\pi n) = 0, \quad \delta r(2\pi n) = 0, \quad (14)$$

где a — большая полуось невозмущенной орбиты.

Движение перигелия, обусловленное сопротивлением межпланетной среды. Возмущающую силу \vec{F} в системе координат (r, φ, z) , обусловленную сопротивлением среды, определим выражением $F = -\frac{1}{2} c_f S \gamma v^2$, $v^2 = \dot{r}^2 + r^2 \dot{\varphi}^2$, где c_f — коэффициент сопротивления среды; γ — плотность среды на траектории тела; S — площадь поперечного сечения; v — скорость тела. Составляющие силы \vec{F} , очевидно, будут иметь вид $F_r = F \frac{\dot{r}}{v}$, $F_t = F \frac{r \dot{\varphi}}{v}$, $F_z = 0$. В случае малой эллиптичности невозмущенной траектории тела для этих составляющих имеем

$$F_r = -\frac{1}{2} c_f S \gamma \dot{r} \varphi r, \quad F_t = -\frac{1}{2} c_f S \gamma r^2 \dot{\varphi}, \quad F_z = 0. \quad (15)$$

Подставляя (15) в (5), положим, как и раньше, $\gamma = \gamma(r)$ и $\gamma = \text{const}$ на траектории тела. Тогда, интегрируя (5) с учетом (6) и (7), находим

$$\delta z(2\pi n) = 0, \quad \delta r(2\pi n) = -\frac{\pi c_f S \gamma a^2 n}{m} \frac{(1-e)^2}{e} \left(\frac{3-e}{1-e} e_0 - 3 \right);$$

$$\delta\varphi_f(2\pi n) = \frac{3c_f S \gamma a \pi^2 n^2}{m} \frac{e_0}{1+e_0} \left(2 + \frac{e^2}{1+e_0} \right). \quad (16)$$

Движение перигелия, обусловленное астероидами. Анализируя влияние астероидов на движение перигелия объекта, невозмущенная орбита которого является эллипсом, используем следующие упрощающие условия. Во-первых, усредняя поток астероидов, заменим его гравитирующим эллипсом с постоянной линейной плотностью σ . Во-вторых, считаем, что невозмущенная орбита рассматриваемого объекта лежит в плоскости усредненной орбиты астероидов и внутри этой орбиты. Тогда в систе-

ме координат (r, φ, z) потенциал, обусловленный астероидами в плоскости $z=0$, имеет вид

$$\Phi(r, \varphi) = k\sigma \oint \frac{dl}{|\vec{r}' - \vec{r}|}, \quad r' > r.$$

Здесь $\vec{r}' = (r', \varphi')$ и $\vec{r} = (r, \varphi)$ — радиусы-векторы точек астероидного эллипса и невозмущенной орбиты объекта соответственно. Далее, учитывая, что $|\vec{r}' - \vec{r}| = r' \left(1 - 2 \frac{r}{r'} \cos(\varphi' - \varphi) + \left(\frac{r}{r'} \right)^2 \right)^{1/2}$, $r' = p(1 + e \cos \varphi')^{-1}$, $dl = p(1 + e \cos \varphi')^{-2} \times (1 + 2e \cos \varphi' + e^2)^{1/2} d\varphi'$, где p — фокальный параметр; e — эксцентриситет астероидного эллипса, представим потенциал $\Phi(r, \varphi)$ разложением по полиномам Лежандра $P_k(\cos(\varphi' - \varphi))$:

$$\Phi(r, \varphi) = k\sigma \int_0^{2\pi} \left(\frac{1 + 2e \cos \varphi' + e^2}{1 + e \cos \varphi'} \right)^{1/2} \sum_{k=0}^{\infty} \left(\frac{r}{r'} \right)^k P_k(\cos(\varphi' - \varphi)) d\varphi'. \quad (17)$$

Оставляя в (17) под интегралом лишь слагаемые, содержащие e в степени не выше первой, получаем

$$\begin{aligned} \Phi(r, \varphi) = k\sigma \int_0^{2\pi} & \left[1 + \frac{r}{p} \cos(\varphi' - \varphi) + \frac{r}{p} e \cos(\varphi' - \varphi) \cos \varphi' + \right. \\ & + \left(\frac{r}{p} \right)^2 (1 + 2e \cos \varphi') \frac{3 \cos^2(\varphi' - \varphi) - 1}{2} d\varphi' = k\pi\sigma \times \\ & \times \left(2 + \frac{r}{p} e \cos \varphi + \frac{r^2}{2p^2} \right). \end{aligned}$$

Определяя $m \nabla \Phi(r, \varphi)$, находим составляющие возмущающей силы \vec{F} :

$$F_r = \frac{mk\pi\sigma}{p} \left(e \cos \varphi + \frac{r}{p} \right), \quad F_t = -\frac{mk\pi\sigma}{p} e \sin \varphi, \quad F_z = 0. \quad (18)$$

Подставляя (18) в (5) и интегрируя с учетом (6) и (7), получаем

$$\delta r(2\pi n) = 0, \quad \delta \varphi_a(2\pi n) = -\frac{2\pi k m_0 a^4 n}{p^3 M^2}, \quad (19)$$

где m_0 — масса астероидов; a, M — соответственно большая полуось орбиты и отнесенный к единице массы момент импульса объекта.

Таблица 2

Планета	Движение перигелия за сто лет, обусловленное					
	несферичностью Солнца		гравитационной среды	сопротивлением среды		астероидами
	$\delta\varphi_c''$	δz (см)		$\delta\varphi_f''$	δr (см)	
Меркурий	$0,979 \cdot 10^5 \epsilon$	$4,250 \cdot 10^{10} \epsilon$	$3,733 \cdot 10^{14} \gamma$	$8,481 \cdot 10^{15} \gamma$	$-6,889 \cdot 10^{19} \gamma$	$-1,439 \cdot 10^{-3}$
Венера	$0,998 \cdot 10^4 \epsilon$	$1,409 \cdot 10^{11} \epsilon \times \sin 2\theta_0 \cos \varphi_0$	$3,523 \cdot 10^{13} \gamma$	$1,095 \cdot 10^{15} \gamma$	$-7,208 \cdot 10^{19} \gamma$	$-3,622 \cdot 10^{-3}$
Земля	$0,336 \cdot 10^4 \epsilon$	$6,037 \cdot 10^{10} \epsilon \times \sin 2\theta_0 \cos \varphi_0$	$1,364 \cdot 10^{14} \gamma$	$4,673 \cdot 10^{14} \gamma$	$-6,911 \cdot 10^{19} \gamma$	$-5,730 \cdot 10^{-3}$
Марс	$0,758 \cdot 10^3 \epsilon$	$1,968 \cdot 10^{10} \epsilon \times \sin 2\theta_0 \cos \varphi_0$	$1,379 \cdot 10^{15} \gamma$	$5,327 \cdot 10^{14} \gamma$	$-1,991 \cdot 10^{20} \gamma$	$-1,158 \cdot 10^{-2}$
Икар	$-2,003 \cdot 10^5 \epsilon$	$8,768 \cdot 10^{10} \epsilon \times \sin 2\theta_0 \cos \varphi_0$	$4,571 \cdot 10^{15} \gamma$	$5,026 \cdot 10^{18} \gamma$	$-0,787 \cdot 10^{23} \gamma$	$-6,890 \cdot 10^{-3}$

Выводы. Расчеты по формулам (11), (14), (16) и (19) были проведены для четырех внутренних планет и малой планеты Икар. При этом были использованы исходные данные, приведенные в [8, 9], а значение коэффициента сопротивления межпланетной среды c_1 было взято согласно [10] равным 2,4. Результаты расчетов сведены в табл. 1 и 2.

Согласно полученным данным, движение перигелия вдоль оси z может быть обусловлено лишь несферичностью Солнца. Величины этих смещений для указанных в табл. 2 объектов малы и находятся вне пределов возможности наблюдения. Так, для Меркурия при $\epsilon < 4,5 \cdot 10^{-5}$ смещение $\Delta z < 0,068''$.

Движение перигелия к центру Солнца происходит лишь за счет сопротивления среды. Для Меркурия это смещение составляет $1,692 \times 10^{13} \gamma''$, что значительно меньше смещения его перигелия, обусловленного той же причиной, вдоль траектории ($8,481 \cdot 10^{13} \gamma''$) и, следовательно, указанное смещение также находится вне пределов наблюдения. Аналогичный вывод имеет место и для других рассматриваемых здесь планет.

Движение перигелиев вдоль орбиты обуславливается всеми четырьмя рассмотренными здесь причинами. Смещение, определяемое потоком астероидов, происходит в направлении, обратном движению планет и наибольшего значения достигает для Марса ($0,012''$). Если исходить из предположения, что на орбите $\bar{\gamma} \approx \gamma$, то можно заключить, что обусловленное межпланетной средой смещение вдоль орбиты перигелиев Икара, Меркурия и Венеры определяется в основном ее сопротивлением и лишь для Марса гравитацией. Для Земли эти воздействия одного порядка.

Влияние несферичности Солнца на движение перигелиев вдоль орбиты быстро уменьшается с удалением от Солнца. При $\epsilon = 4,5 \cdot 10^{-5}$ смещение перигелия Меркурия равно $4,4''$ (Р. Дикке получил $4,05''$). Уже для Венеры это смещение на порядок меньше. Наибольшее по абсолютной величине смещение имеет место для Икара.

Оценки несферичности Солнца ϵ и плотности межпланетной среды γ определялись из уравнений

$$0,979 \cdot 10^5 \epsilon + 8,854 \cdot 10^{15} \gamma = \Delta \varphi_n - \Delta \varphi_T + 1,439 \cdot 10^{-3};$$

$$0,998 \cdot 10^4 \epsilon + 1,130 \cdot 10^{15} \gamma = \Delta \varphi_n - \Delta \varphi_T + 3,622 \cdot 10^{-3};$$

$$0,336 \cdot 10^4 \epsilon + 6,037 \cdot 10^{14} \gamma = \Delta \varphi_n - \Delta \varphi_T + 5,730 \cdot 10^{-3};$$

$$0,758 \cdot 10^3 \epsilon + 1,912 \cdot 10^{15} \gamma = \Delta \varphi_n - \Delta \varphi_T + 1,158 \cdot 10^{-2};$$

$$-2,003 \cdot 10^5 \epsilon + 5,031 \cdot 10^{18} \gamma = \Delta \varphi_n - \Delta \varphi_T + 6,890 \cdot 10^{-3},$$

записанных соответственно для Меркурия, Венеры, Земли, Марса и Икара при дополнительном условии $\bar{\gamma} \approx \gamma$. Для того чтобы оценки ϵ и γ были верхними, выбирались максимальные значения разностей $\Delta \varphi_n - \Delta \varphi_T$. При этом использовалась неопределенность величин $\Delta \varphi_n$ (см. табл. 1). В силу положительности левых частей первых четырех уравнений разности $\Delta \varphi_n - \Delta \varphi_T$ должны быть неотрицательными. При этом верхняя оценка для ϵ получена из условия $\gamma = 0$, а верхняя оценка для γ — из условия $\epsilon = 0$. Наибольшая оценка для ϵ по Меркурию равна $1,16 \cdot 10^{-5}$. Оценки ϵ , следующие из других уравнений, существенно превышают не только $1,16 \cdot 10^{-5}$, но и $4,5 \cdot 10^{-5}$. Поэтому, исходя из справедливости ОТО, они должны быть отброшены, так как значение $\epsilon > 1,16 \cdot 10^{-5}$ приводит к появлению невязки в движении перигелия Меркурия. Следовательно, оценка несферичности Солнца определяется условием $\epsilon < 1,16 \cdot 10^{-5}$. Отсюда, в частности, вытекает, что скорость вращения внутренних слоев Солнца не может существенно превышать скорость внешних.

Верхние оценки плотности среды γ , следующие из первых четырех уравнений, на орбитах Меркурия, Венеры, Земли и Марса соответственно определяются условиями

$$\gamma < 1,29 \cdot 10^{-16} \text{ г/см}^3; \quad \gamma < 4,07 \cdot 10^{-15} \text{ г/см}^3; \quad \gamma < 5,73 \cdot 10^{-15} \text{ г/см}^3;$$

$$\gamma < 5,41 \cdot 10^{-15} \text{ г/см}^3.$$

На орбите Марса может быть указана и нижняя оценка плотности γ , как для Марса существует минимальная положительная разность $\Delta\varphi_n - \Delta\varphi_t$, равная $2,95''$. Подставив в четвертое уравнение это значение и $\varepsilon = 1,16 \cdot 10^{-5}$, получаем $\gamma > 1,55 \cdot 10^{-15}$ г/см³. Таким образом, на орбите Марса $1,55 \cdot 10^{-15} < \gamma < 5,41 \times 10^{-15}$. Этот результат, однако, нельзя считать точным, так как сомнительным является указанное в [2] для Марса значение $\Delta\varphi_n$.

Определяя верхнюю оценку γ из пятого уравнения, подставляем в него $\varepsilon = 1,16 \cdot 10^{-5}$ и получаем $\gamma < 8,51 \cdot 10^{-19}$ г/см³. Икар подходит к Солнцу ближе Меркурия и уходит от него дальше Марса, охватывая, таким образом, область пространства, включающую в себя орбиты всех внутренних планет. Можно поэтому верхней оценкой плотности межпланетной среды в указанной области считать значение $8,51 \cdot 10^{-19}$. Подчеркнем еще раз, что речь идет о верхней оценке плотности всей межпланетной среды, включая корпускулярную, молекулярную, пылевую, кометную, астероидную и другие ее составляющие.

Полагая радиус солнечной системы равным 40 а. е. (орбита Плутона) и считая, что плотность межпланетной среды во всей системе не превосходит $8,51 \cdot 10^{-19}$ г/см³, получаем верхнюю оценку массы межпланетной среды $m < 7,92 \cdot 10^{26}$ г, что на порядок меньше массы Земли.

Список литературы: 1. *Физический энциклопедический словарь*. — М.: Сов. энциклопедия, 1965. — Т. 4, с. 575—578. 2. *Субботин М. Ф.* Теория относительности и небесная механика. — *Астроном. журн.*, 1956, 33, вып. 2, с. 251—258. 3. *Дикке Р.* Гравитация и Вселенная. — М.: Мир, 1972. — 100 с. 4. *Shapiro I. I., Pettengill G. M., Ash M. E and all.* — *Phys. Rev. Letters*, 1972, 28, N 1594, p. 39—47. 5. *Shapiro I. I., Ash M. E., Sugalls R. P.* — Fourth test of general relativity: new radar result. — *Phys. Rev. Letters*, 1971, 26, № 18, p. 1132—1135. 6. *Shapiro I. I., Smith W. B., Ash M. E.* General relativity and the orbit of Icarus. — *Astron. J.*, 1971, 76, N 7, p. 588—606. 7. *Hill H. A., Stebbins R. T.* The intrinsic visual oblateness of the Sun. — *Astrophys J.*, 1975, 200, p. 471—483. 8. *Аллен К. У.* Астрофизические величины. — М.: Мир, 1977. — 446 с. 9. Эфемериды малых планет. — Л.: Наука, 1980. — 40 с. 10. *Баранцев Р. Г.* Взаимодействие разреженных газов с обтекаемыми поверхностями. — М.: Наука, 1975. — 59 с.

Поступила в редколлегию 15.10.82.

УДК 523.3

Н. В. ОПАНАСЕНКО, Ю. Г. ШКУРАТОВ,
Л. А. АКИМОВ, И. И. ЛАТЫНИНА

СПЕКТРОФОТОМЕТРИЧЕСКИЙ КАТАЛОГ УЧАСТКОВ ЛУННОЙ ПОВЕРХНОСТИ

Современный уровень исследований Луны требует создания достаточно представительных фотометрических, спектрофотометрических и поляриметрических каталогов участков поверхности. В настоящее время в АО ХГУ, в сотрудничестве с рядом учреждений, выполняются работы по созданию таких каталогов. Эти работы в Харькове имеют давние традиции. Еще в 1952 г. в трудах астрономической обсерватории ХГУ был опубликован ставший всемирно известным фотометрический каталог лунных деталей, составленный В. А. Федоренко под руководством Н. П. Барабашова. К сожалению, этот каталог уже не удовлетворяет современным требованиям на точность. Поэтому в отделе Физики Луны и планет АО ХГУ создается новый фотометрический каталог 256 избранных участков Луны. Частично этот каталог уже опубликован, однако его еще предполагается дополнить спектрофотометрическими и поляриметрическими данными.

Здесь представлен этап создания спектрофотометрического каталога, сведены в единую систему наиболее надежные результаты работ группы Т. Б. Маккорда и результаты спектрофотометрических измерений, выполненных нами в ШАО АН Аз ССР совместно с Е. П. Гольдбергом и С. З. Омаровым.

Представленный сводный каталог, содержащий данные с различным спектральным разрешением для 58 лунных участков размером около $10''$, мы рекомендуем использовать как предварительный стандартный каталог при абсолютной точности не хуже 5–10%. Кроме того, дан краткий очерк возможных применений спектральных измерений.

Данные с высоким спектральным разрешением. Еще в прошлом столетии было известно, что детали спектра Луны (линии эмиссии и поглощения) повторяют спектральные особенности солнечного спектра. В середине шестидесятых годов нашего столетия, когда точность спектральных измерений существенно повысилась и расширился спектральный диапазон измерений, была открыта первая собственная абсорбционная полоса Луны в ближней инфракрасной части спектра. Ее интенсивность невелика (около 10%), а ширина оказалась заметно больше (от 0,7 до 1,2 мкм), чем характерная ширина фраунгоферовых линий.

Перед тем, как лунный грунт был доставлен в земные лаборатории, имелись сообщения об открытии других полос поглощения в видимой части спектра. Сейчас выяснено, что это было связано с недостаточной точностью телескопических измерений, а также с недостаточным знанием распределения энергии по спектру Солнца и звезд-стандартов. Это подтвердили лабораторные спектрофотометрические исследования лунного грунта. Однако на этом проблема обнаружения слабых полос не была закрыта. Те же лабораторные спектрофотометрические исследования указали на существование слабых абсорбционных структур, интенсивность и положение которых отличались от данных телескопических измерений.

Возникает вопрос: нельзя ли теперь, при современной точности телескопических измерений обнаружить эти полосы? Чтобы приблизиться к решению этой задачи, необходимы измерения со спектральным разрешением нескольких десятков ангстрем. Причем эти измерения площадок следует выполнять относительно некоторой стандартной площадки. Этим приемом исключаются ошибки, связанные с атмосферной экстинкцией и отсутствием информации о солнечном спектре в момент выполнения наблюдений.

Такие измерения Луны были выполнены в 1975 г. на телескопе АЗТ-8 ШАО АН Аз ССР, оснащенным автоматическим сканирующим спектрометром системы Сейз—Намиока. Измерения выполнялись в диапазоне спектра 0,32–0,75 мкм с разрешением 50 ангстрем. Некоторые результаты этих измерений, а также методика их выполнения опубликованы ранее в работе [1].

Таблица 1

Наименование	М. Ясности	М. Кризисов	Луна 16	Аполлон 11	Ле-монье	Аполлон 15	М. Холда	Аполлон 12	Аполлон 14	Аристарх
β	21°,4	55°,6	56°,2	23°,7	30,5	3,7	—15,3	23,4	—17,7	—47,5
λ	18°,7	15°,3	+0°,5	1°,0	26,3	26,0	55,9	—3,0	3,7	23,8
ρ_0	7,7	7,2	6,6	7,3	7,9	7,8	8,3	7,9	11,1	24,2
λ мкм α	22°	—7°	—8°	21°	—8°	21°	22°	22°	22°	20°
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
0,3225	0,4956	1,035a	1,058a	1,106в	1,0036	0,965в	0,908в	1,0206	0,926г	0,890г
0,3275	0,5106	1,0366	1,0646	1,115в	1,0006	0,970в	0,913г	1,0106	0,936в	0,881г
0,3325	0,5266	1,030a	1,049a	1,111в	0,9966	0,980в	0,915г	1,0066	0,939в	0,903в
0,3375	0,5426	1,0226	1,057a	1,105в	1,0006	0,980в	0,923г	1,013a	0,961в	0,940в
0,3425	0,557a	1,025a	1,054a	1,129a	0,9966	0,9956	0,919д	1,009a	0,955в	0,949в
0,3475	0,572a	1,025a	1,051a	1,133a	0,992a	1,0026	0,940г	1,009a	0,9506	0,955в
0,3525	0,588a	1,023a	1,050a	1,119a	1,002a	1,003в	0,939д	1,0226	0,968a	0,974в
0,3575	0,602a	1,016a	1,046a	1,124a	0,994a	1,0046	0,942г	1,0226	0,9706	0,979в
0,3625	0,613a	1,0086	1,038a	1,1266	0,991a	0,996a	0,937г	1,0256	0,9726	1,0066
0,3675	0,623a	1,0086	1,037a	1,124a	0,9806	0,9806	0,938в	1,020a	0,980a	1,0376
0,3725	0,6336	1,016a	1,030a	1,111a	0,9746	0,9746	0,935в	1,018a	0,996a	1,0656
0,3775	0,6446	1,020a	1,031a	1,1206	0,9786	0,9786	0,920в	1,014a	0,988a	1,0986
0,3825	0,6546	1,028a	1,028a	1,095a	0,9746	0,9746	0,920г	1,0096	0,994a	1,116в
0,3875	0,6646	1,024a	1,033a	1,100a	0,980a	0,980a	0,940в	1,012a	0,980a	1,110в
0,3925	0,6746	1,020a	1,037a	1,101a	0,984a	0,984a	0,945в	1,010a	0,984a	1,131в
0,3975	0,6856	1,021a	1,040a	1,080a	0,981a	0,981a	0,944a	1,012a	0,983a	1,134в
0,4025	0,694в	1,010a	1,036a	1,076a	0,9806	0,9856	0,950a	1,015a	0,977a	1,137в
0,4075	0,703a	1,010a	1,039a	1,084a	0,990a	0,9936	0,954a	1,014a	0,984a	1,126в
0,4125	0,712в	1,009a	1,039a	1,083a	0,990a	0,991a	0,951a	1,014a	0,983a	1,131в
0,4175	0,721в	1,008a	1,038a	1,076a	0,985a	0,991a	0,955a	1,017a	0,988a	1,134в
0,4225	0,730a	1,016a	1,038a	1,083a	0,990a	1,007в	0,9676	1,006a	1,0036	1,125в
0,4275	0,7396	1,016a	1,041a	1,080a	0,983a	1,000в	0,9726	1,008a	0,996a	1,1096
0,4325	0,748a	1,014a	1,043a	1,065a	0,981a	1,0106	0,9786	1,0066	0,985a	1,1156
0,4375	0,757a	1,006a	1,037a	1,070a	0,982a	0,9986	0,971a	1,014a	0,993a	1,123a
0,4425	0,767a	1,007a	1,040a	1,074a	0,983a	1,0026	0,9696	1,016a	0,992a	1,1196
0,4475	0,776a	1,007a	1,034a	1,067a	0,990a	0,9926	0,974a	1,0096	0,989a	1,0966
0,4525	0,786a	1,008a	1,035a	1,055a	0,984a	1,000a	0,973a	1,0046	0,9906	1,1016
0,4575	0,796a	1,014a	1,030a	1,047a	0,981a	0,994a	0,971a	1,007a	1,000a	1,1116
0,4625	0,8056	1,011a	1,035a	1,050a	0,991a	0,987a	0,975a	1,012a	1,002a	1,0806
0,4675	0,8146	1,010a	1,030a	1,044a	0,994a	0,996a	0,9706	1,017a	0,994a	1,0846
0,4725	0,8246	1,011a	1,027a	1,039a	0,991a	0,993a	0,972a	1,018a	0,996a	1,0786
0,4775	0,8336	1,001a	1,032a	1,035a	0,998a	0,990a	0,982a	1,0206	0,990a	1,0866
0,4825	0,843в	1,004a	1,030a	1,039a	0,996a	0,995a	0,981a	1,0196	0,9876	1,0856
0,4875	0,8556	1,008a	1,025a	1,041a	0,996a	0,998a	0,984a	1,009a	0,993a	1,0796
0,4925	0,8626	1,004a	1,027a	1,0376	0,998a	0,997a	0,986a	1,0196	0,990a	1,0776
0,4975	0,8716	1,007a	1,019a	1,034a	0,994a	0,999a	0,990a	1,007a	0,996a	1,0686
0,5025	0,881a	1,007a	1,024a	1,027a	0,990a	0,995a	0,988a	1,015a	0,992a	1,0636
0,5075	0,890a	1,003a	1,018a	1,024a	0,997a	0,994a	0,994a	1,016a	0,988a	1,051a
0,5125	0,900a	1,002a	1,019a	1,019a	0,994a	0,999a	0,989a	1,0116	0,998a	1,052a
0,5175	0,909a	1,000a	1,017a	1,017a	0,994a	0,983a	0,986a	1,014a	0,996a	1,053a
0,5225	0,919a	0,999a	1,024a	1,0166	0,999a	0,984a	0,984a	1,0166	1,002a	1,049a
0,5275	0,928a	0,996a	1,016a	1,018a	0,994a	0,988a	0,992a	1,008a	0,999a	1,034a
0,5325	0,938a	0,997a	1,012a	1,013a	0,998a	0,992a	0,987a	1,010a	0,997a	1,032a
0,5375	0,948a	1,000a	1,013a	1,014a	1,003a	0,988a	0,994a	1,006a	0,996a	1,028a
0,5425	0,957a	1,004a	1,006a	1,013a	0,999a	0,994a	0,998a	1,007a	0,988a	1,022a
0,5475	0,967a	1,008a	1,008a	1,008a	1,004a	0,997a	0,996a	1,000a	1,000a	1,017a

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
0,5525	0,977a	0,998a	1,001a	1,015a	1,002a	0,989a	1,000a	0,996a	1,003a	1,016a
0,5575	0,986a	1,003a	0,997a	1,000a	1,000a	0,996a	1,001a	0,997a	0,997a	1,010a
0,5625	0,996a	1,000a	1,003a	1,004a	0,998a	0,998a	1,000a	1,004a	0,997a	1,006a
0,5650	1,000a	1,000a	1,000a	1,000a	1,000a	1,000a	1,000a	1,000a	1,000a	1,000a
0,5675	1,004a	1,002a	0,997a	0,996a	1,002a	1,002a	1,000a	0,996a	1,003a	0,994a
0,5725	1,012a	1,009a	1,000a	1,014a	1,008a	1,006a	1,002a	1,003a	1,008a	0,999a
0,5775	1,020a	0,996a	1,001a	0,990a	1,002a	1,012a	0,996a	1,001a	1,006a	0,988a
0,5825	1,028a	0,993a	0,994a	1,002a	0,997a	0,996a	0,999a	0,992a	0,998a	0,981a
0,5875	1,037a	0,998a	0,996a	0,998a	0,992a	0,999a	1,008a	0,994a	0,994a	0,980a
0,5925	1,046a	0,990a	0,999a	0,992a	0,999a	1,018a	1,007a	1,000a	1,003a	0,968a
0,5975	1,053a	0,996a	1,002a	1,000a	0,992a	1,007a	1,002a	1,001a	1,002a	0,975a
0,6025	1,061a	0,988a	0,988a	0,994a	0,999a	1,007a	1,004a	0,990a	0,987a	0,966a
0,6075	1,068a	0,989a	0,984a	1,001a	0,995a	1,014a	0,996a	0,996a	0,989a	0,975a
0,6125	1,076a	0,991a	0,992a	1,006a	0,994a	1,003a	0,998a	0,998a	0,998a	0,978a
0,6175	1,083a	0,994a	0,995a	0,995a	0,997a	1,004a	0,995a	1,003a	1,003a	0,955a
0,6225	1,090a	0,997a	0,996a	0,999a	0,996a	1,015a	1,007a	1,007a	1,000a	0,948a
0,6275	1,098a	0,994a	0,994a	0,988a	0,994a	1,011a	1,004a	0,999a	0,992a	0,957a
0,6325	1,106a	0,998a	0,991a	0,987a	0,997a	0,998a	1,008a	0,995a	0,994a	0,939a
0,6375	1,114a	0,980a	0,996a	0,987a	0,997a	0,997a	0,999a	0,992a	1,002a	0,930a
0,6425	1,121a	0,982a	0,985a	0,992a	0,992a	1,024a	0,999a	0,988a	1,000a	0,922a
0,6475	1,129a	0,980a	0,988a	0,993a	0,996a	1,016a	1,002a	0,993a	0,992a	0,930a
0,6525	1,136a	0,978a	0,992a	0,985a	0,997a	1,014a	1,004a	1,000a	0,998a	0,990a
0,6575	1,143a	0,979a	0,990a	0,987a	0,999a	1,019a	1,006a	0,993a	0,996a	0,987a
0,6625	1,150a	0,982a	0,997a	0,992a	1,002a	1,008a	1,012a	0,984a	0,987a	0,990a
0,6675	1,158a	0,978a	0,994a	0,980a	1,005a	1,005a	1,000a	0,979a	0,993a	0,988a
0,6725	1,165a	0,974a	0,994a	0,977a	0,999a	1,001a	0,992a	0,982a	1,002a	0,969a
0,6775	1,172a	0,978a	0,988a	0,975a	1,003a	1,015a	1,010a	0,987a	1,000a	0,962a
0,6825	1,179a	0,977a	0,990a	0,978a	1,004a	1,007a	1,007a	0,984a	0,992a	0,968a
0,6875	1,187a	0,978a	0,989a	0,974a	1,009a	1,007a	1,009a	0,987a	0,987a	0,959a
0,6925	1,194a	0,976a	0,984a	0,980a	1,003a	1,000a	1,004a	0,980a	1,001a	0,971a
0,6975	1,203a	0,975a	0,986a	0,985a	0,999a	0,995a	0,999a	0,975a	1,003a	0,974a
0,7025	1,209a	0,980a	0,980a	0,991a	1,003a	0,984a	0,998a	0,987a	0,997a	0,966a
0,7075	1,215a	0,987a	0,985a	0,995a	1,006a	0,980a	0,999a	0,980a	0,993a	0,967a
0,7125	1,221a	0,974a	0,982a	0,999a	1,011a	0,999a	1,007a	0,986a	0,990a	0,969a
0,7125	1,229a	0,980a	0,988a	1,000a	1,003a	1,016a	1,012a	0,993a	0,996a	0,977a
0,7225	1,236a	0,988a	0,990a	0,968a	1,002a	1,010a	1,004a	0,992a	0,992a	0,980a
0,7275	1,243a	0,980a	0,982a	0,960a	1,008a	1,010a	1,010a	0,994a	0,978a	0,987a
0,7325	1,251a	0,977a	0,987a	0,984a	1,008a	1,016a	1,016a	0,990a	1,004a	0,954a
0,7375	1,260a	0,977a	0,984a	0,980a	1,007a	1,012a	1,017a	0,985a	1,016a	0,940a
0,7425	1,268a	0,972a	0,987a	0,980a	1,004a	1,009a	1,012a	0,990a	1,018a	0,972a
0,7475	1,276a	0,965a	0,980a	0,971a	1,010a	0,999a	1,018a	0,986a	1,016a	0,971a

В статье для десяти наиболее надежно исследованных площадок спектральные данные представлены в табл. 1 в уточненном виде с разрешением 50 ангстрем. В этой таблице указаны названия деталей, их селенографические координаты β , λ , определенные по «Полной карте Луны», составленной в ГАИШ в редакции 1979 г., фазовые углы α , соответствующие моменту наблюдения и значения альбедо ρ_0 для длины волны $\lambda = 0,63$ мкм при угле фазы 2° , 8, вычисленные с привлечением данных нового фотометрического каталога [2].

Для каждого значения длины волны λ для всех деталей, кроме первой, представлены значения отражательной способности, отнесенные к первой детали, а для первой (стандартной) представлены значения спектральной отражательной способности, нормированной на единицу на длине волны 0,565 мкм. Кроме того, для всех значений отражательной способности приведены величины погрешностей определения. Диапазон погрешностей для всех деталей, кроме первой, был разбит на 4 интервала: а — ($<1,0\%$); б — ($1,1\% - 2,0\%$); в — ($2,1\% - 3,0\%$); г — ($>3,0\%$). Для первой детали диапазон погрешностей естественно больше: а — ($<4,0\%$); б — ($4,1 - 8,0\%$); в — ($>8,0\%$). Спектральные данные для этой детали получены после редукций с учетом распределений энергии в спектрах Солнца и стандартных звезд, определенных А. В. Харитоновым и сотрудниками в АФИ АН КазССР. Исследования показывают, что эти данные близки к тем, которые использовал Т. Б. Маккорд при обработке своих наблюдений после 1973 г.

Данные с низким спектральным разрешением. Наиболее полные данные по спектральной отражательной способности участков видимого полушария Луны получены группой Т. Б. Маккорда с использованием фотометра с узкополосными фильтрами (200 ангстрем и более), перекрывающими диапазон длин волн от 0,3 до 1,1 мкм, а в последнее время до 2,5 мкм [3, 4]*. Измерения ведутся с 1968 г. На протяжении этого времени Т. Б. Маккорд несколько раз рассматривал используемые им распределения энергии в спектрах Солнца и звезд-стандартов. По этой причине измерения не имеют единой системы. Кроме того, в некоторых работах Т. Б. Маккорда приводятся координаты наблюдаемых участков без ссылки на карту, по которой они получены. Это затрудняет отождествление участков, поскольку координатные сетки различных топографических карт часто заметно отличаются. В других работах местоположение участков указывается на схемах очень грубо с помощью символов. К этому следует также добавить, что между данными отдельных работ существуют большие расхождения, вызванные, по-видимому, случайными опечатками.

Все это указывает на необходимость систематизации данных Т. Б. Маккорда. Приведению этих данных в единую систему способствовали наблюдения, приведенные в ШАО АН АзССР, а также специальные фотометрические измерения со светофильтрами, выполненные на телескопе АЗТ-8 АО ХГУ. Исследовались те участки лунной поверхности, характеристики и координаты которых, указанные в работах Т. Б. Маккорда, вызывали у нас сомнения. На рис. 1 для некоторых участков представлена зависимость значений колориндекса C (0,65 мкм/

* Т. Б. Маккордом опубликовано около ста работ по этой тематике. Поэтому мы, естественно, не можем дать исчерпывающее количество ссылок. В работах [3, 4] приведена более полная библиография.

10,43 мкм) по результатам наших измерений (C_2) и данных Т. Б. Маккорда (C_1). Как видно из рисунка, величина разброса точек в среднем не превышает 1—2%.

Результаты систематизации и уточнения избранных данных Т. Б. Маккорда приведены в этой работе в виде каталога (табл. 2). В этой таблице указаны названия деталей, их селенографические координаты β , λ по «Полной карте Луны», создан-

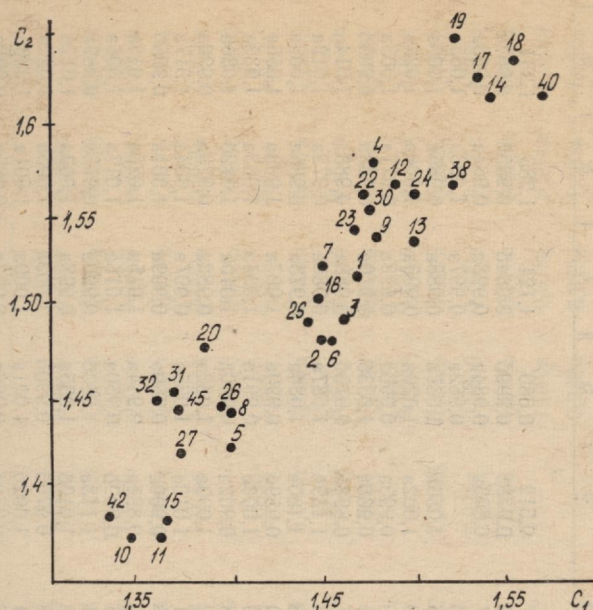


Рис. 1. Сопоставление измерений показателей цвета лунных деталей. Ось ординат — значения показателей цвета, измеренных нами; ось абсцисс — измеренных Маккордом. Номера точек соответствуют номерам участков лунной поверхности, представленных в табл. 2

ной в ГАИШ в 1979 г. значения альбеда ρ_0 для длины волны 0,63 мкм, полученные с привлечением данных нового фотометрического каталога [2]. Для первой стандартной площадки в Море Ясности, для семи значений длины волны приведены величины отражательной способности, нормированные на единицу на длине волны 0,565 мкм. Для всех остальных участков указаны значения отражательной способности, отнесенные к стандартной площадке, и величины погрешностей определения. Диапазон погрешностей и величина интервалов такая же, как и в табл. 1. Значения погрешностей для стандартной площадки нам неизвестны, но, по-видимому, они такого же порядка, что и в наших измерениях (см. табл. 1).

Некоторые применения спектральных данных. Спектральные измерения Луны необходимы для создания сети опорных

Таблица 2

Наименование	β	λ	λ мкм ρ_0	0,319	0,402	0,650	0,765	0,930	1,002	1,101
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
М. Ясности	18,7	21,4	7,7	0,512	0,680	1,124	1,285	1,354	1,423	1,600
М. Кризисов	11,2	60,1	7,5	0,9786	0,9996	0,9846	0,9856	0,967a	0,952в	0,9336
Кр. Прокл.	16,1	47,0	25,7	0,895a	0,984a	0,998a	0,964a	0,953a	0,941a	0,844a
Сон Болото	14,3	44,0	11,4	—	0,982a	0,997a	1,003a	1,065a	1,067a	1,042a
Луна 16	0,5	56,2	6,6	1,056a	1,037a	0,988a	0,985a	1,006a	1,005a	0,984a
М. Изобилия	— 9,7	46,3	7,9	1,002a	1,020a	0,996a	1,006a	1,022a	1,017a	1,027a
М. Нектара	—18,8	35,8	9,0	0,993a	0,996a	0,978a	0,971a	1,003a	1,004a	0,992a
Кр. Цензорин	—0,4	33,0	24,1	0,968в	1,0336	0,970a	0,938a	0,9056	0,8926	0,857в
Р-н Цензорина	1,2	33,1	12,7	0,8986	0,9706	0,988a	0,980a	1,014a	1,020a	0,9826
Аполлон 11	1,0	23,8	7,3	1,1396	1,087a	0,986a	0,972a	1,012a	1,000a	0,960a
М. Спокойствия	16,9	22,8	6,8	1,180в	1,084a	0,978a	0,965a	1,002a	0,996a	0,975a
Р-н Лемонье	27,8	31,2	11,0	0,9596	0,990a	1,007a	1,009a	1,056a	1,063a	1,033a
Лемонье	26,3	30,4	7,9	1,000a	0,991a	1,004a	1,003a	1,033a	1,034a	1,020a
Оз. Сновидений	38,2	37,2	8,3	0,902a	0,950a	1,010a	1,0126	1,030a	1,032a	1,030в
М. Ясности	17,6	28,1	7,2	1,090a	1,062a	0,982a	0,979a	0,990a	0,981a	—
М. Ясности	31,0	13,3	7,1	1,010a	1,035a	0,997a	1,004a	1,017a	1,0086	—
М. Холода	51,0	24,5	10,8	0,900a	0,950a	0,999a	1,001a	0,9956	0,992a	—
М. Холода	57,2	— 6,0	10,0	0,891a	0,944a	1,015a	1,020a	1,012a	1,012a	—
М. Дождей	47,0	—10,6	9,3	0,9096	0,950a	1,015a	1,017a	1,006a	1,007a	—
М. Дождей	38,8	—21,7	7,4	1,113a	1,0606	0,990a	0,973a	0,969a	0,964a	—
М. Дождей	42,5	—16,2	8,8	1,0106	1,035a	0,997a	1,003a	1,017a	1,008a	—
М. Дождей	29,0	— 7,6	8,8	0,9706	0,9906	1,003a	1,003a	1,022a	1,017a	1,012a
М. Дождей	22,0	— 5,5	8,1	1,0026	1,001a	1,000a	1,001a	1,030a	1,020a	1,015a
Кр. Архимед	29,0	— 4,1	9,3	0,9796	0,986a	0,997a	0,985a	0,998a	0,995a	0,977a
Апеннины	19,4	— 2,3	10,5	—	0,970a	1,005a	1,019a	1,075a	1,070a	1,068a
Темное пятно	11,9	— 3,8	6,5	1,190в	1,080a	0,992a	0,999г	1,063a	1,053a	1,060a
Темное пятно	9,5	7,5	6,6	1,1906	1,0756	0,995a	0,989a	1,038a	1,029a	1,008a
Залив Центральный	0,4	— 1,3	9,1	—	1,020a	0,995a	0,990a	0,994a	0,998a	0,995a
Кр. Пикерринг	— 2,8	7,2	21,6	0,996a	1,039a	0,976a	0,946a	0,927a	0,925a	0,912a

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Аполлон 16	— 9,1	15,5	13,9	0,955a	0,980a	0,992a	0,982a	—	1,937a	0,937a
Р-н Декарта	—10,7	16,0	22,5	0,970б	1,040б	0,962a	0,931a	0,930a	0,937a	0,906a
Дно кр. Тихо	—42,5	—10,5	19,9	0,926a	1,021a	0,962б	0,930a	0,890a	0,870a	0,845a
Альфонс	—13,7	— 3,8	12,6	0,920a	0,957a	1,010a	1,011a	1,073a	1,078a	1,030a
Дэви	—10,5	— 7,8	12,4	1,016a	1,031a	0,999a	0,983a	0,998a	0,999a	0,984a
Кр. Лаланд	— 4,4	— 8,8	15,9	—	1,011б	0,978a	0,965б	0,926б	0,910б	0,898б
Аполлон 12	— 3,3	—23,4	7,9	1,006б	1,016a	0,995a	0,995a	1,013a	1,011a	1,000a
Коперник дно	10,1	—19,8	16,5	0,964a	1,003a	1,008a	0,997a	1,023a	1,040a	1,003a
Залив Росы	48,7	—50,3	8,5	0,950a	0,956a	0,997a	0,997a	0,977a	0,965a	0,900б
Залив Росы	43,7	—49,7	8,1	1,028a	1,013a	0,998a	0,995a	0,998a	0,977a	0,940a
Залив Радуги	42,3	—34,3	9,1	—	0,953a	1,010a	1,027a	1,046a	1,052a	1,050a
Кр. Аристарх	23,8	—47,5	24,2	0,910б	1,130в	0,927a	0,833a	0,724a	0,705в	0,710б
Кр. Принц	25,5	—43,9	10,1	0,938a	0,980б	1,020a	1,006a	1,000a	0,966a	0,960a
Флемстид	— 2,2	—43,8	6,5	1,146a	1,077a	0,975a	0,976a	0,956a	0,945a	0,919a
Океан Бурь	— 3,0	—37,0	7,2	—	1,040a	0,978a	0,964a	0,966a	0,955a	0,945a
Гельмет	—16,5	—31,4	11,3	—	0,939a	0,998a	1,003a	1,022a	1,021a	0,970a
Р-н Влажности	—19,5	—30,8	11,3	0,930a	0,968a	1,004a	1,000a	1,060a	1,069a	1,016a
М. Влажности	—20,0	—39,0	6,9	1,083б	1,066a	0,982a	0,969a	0,968a	0,956a	0,953a
М. Влажности	—21,3	—37,5	7,3	1,059a	1,041a	0,993a	0,982a	0,980a	0,966a	0,963a

спектрофотометрических стандартов, а также для геолого-минералогических исследований. Возможности использования Луны как стандарта для спектрофотометрических привязок наблюдений планет и земной поверхности из космоса обсуждались нами ранее в работе [5]. Здесь мы рассмотрим некоторые возможные применения спектральных данных в задачах лунной геологии.

1. Свет, рассеянный лунным грунтом, несет информацию о поглощательных свойствах вещества, поскольку даже довольно крупные частицы грунта (100 мкм) полупрозрачны. Увеличение отражательной способности Луны от ближней ультрафиолетовой области к ближней инфракрасной обусловлено обратным пропорциональной зависимостью буггеровского коэффициента поглощения от длины волны и спектральными особенностями мнимой части коэффициента преломления вещества. Эти особенности коэффициента преломления у лунных силикатов обусловлены в основном двумя механизмами поглощения: переносом заряда типа $O^{2-} \rightarrow Fe^{2+}$, $O^{2-} \rightarrow Ti^{4+}$, $Fe^{2+} \rightarrow Ti^{4+}$ и расщеплением уровней, содержащихся в лунных пироксенах и оливинах, ионов Fe^{2+} в кристаллическом поле лигандов. Механизм переноса заряда типа кислород-металл и, возможно, металл-металл влияет на наклон спектральной кривой лунного грунта в коротковолновой части видимого диапазона спектра. Это объясняет существование известной эмпирической зависимости между показателем цвета C (0,56 мкм/0,40 мкм) и содержанием TiO_2 , используемой для прогнозирования минералогического состава зрелых морских грунтов [3, 4]. Расщепление энергетических уровней d -электронов иона Fe^{2+} в кристаллическом поле решетки пироксенов обуславливает существование упоминавшейся выше полосы поглощения вблизи 0,95 мкм. Этому же иону в оливинах соответствует полоса вблизи 1,0 мкм.

Какие же факторы могут привести к появлению дополнительных абсорбционных структур в спектре Луны? По содержанию, среди ионов переходных порообразующих элементов Fe^{2+} и Ti^{4+} занимают доминирующее положение. Поэтому в основном эти ионы контролируют оптические свойства грунта. Однако слабые полосы поглощения могут возникать и от малого присутствия каких-либо других ионов. Как показали исследования [6], благодаря большому восстановительному потенциалу поверхности Луны ионы Fe^{3+} в грунте отсутствуют. Ионов Ti^{3+} мало ($Ti^{3+}/Ti^{4+} \ll 1$), но их присутствие в лунных пироксенах дает полосу кристаллического поля вблизи 0,5 мкм, интенсивность которой у некоторых образцов достигает 5%. Трехвалентный титан может порождать полосу вблизи 0,65 мкм (интервалентный переход $Ti^{3+} \rightarrow Ti^{4+}$). В лунном грунте содержится до 0,5% Cr_2O_3 .

Согласно работе [7] слабая полоса в спектре образцов лунного грунта на 0,64 мкм коррелирует с содержанием Cr_2O_3 . Кроме этого, обратим внимание на еще один возможный меха-

низм возникновения слабых полос в спектре Луны. В поверхностных зонах лунного грунта обнаружены островковые пленки восстановленного железа, титана и кремния, образующиеся благодаря воздействию микрометеоритов и корпускул солнечного ветра. Типичный размер островков около 100 ангстрем. Из экспериментов с островковыми пленками благородных металлов известно, что благодаря резонансным эффектам при взаимо-

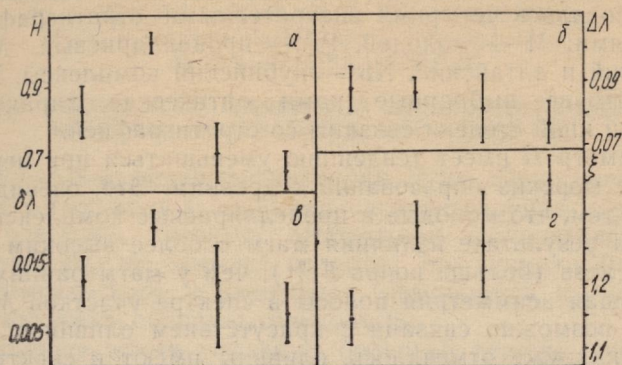


Рис. 2. Сопоставление оптических характеристик со стратиграфией: а — глубина полосы поглощения вблизи 0,95 мкм; б — полуширина; в — асимметрия той же полосы; г — параметр линейности спектральной кривой в диапазоне 0,40—0,56—0,75 мкм. Ось абсцисс — четыре стратиграфических периода; слева направо: $M(10)$; $Pr(26)$; $Md+Al(8)$; $Nb(13)$. Цифры указывают число точек, попавших в каждый период.

действию электромагнитной волны с островками в спектре образца появляются полосы, не свойственные сплошному образцу (эффект Максвелла — Гарнета). В принципе нечто подобное может наблюдаться и в спектре Луны.

Данных в табл. 1 еще недостаточно, чтобы делать уверенные выводы о существовании перечисленных слабых полос в спектре Луны, но у некоторых деталей определенно имеются слабые особенности спектра, которые требуют дальнейших исследований.

2. При составлении геологических карт Луны наряду с морфологическими признаками широко используется величина альбедо образований. Карты показателя цвета для этих целей применяются реже. Другие спектральные характеристики практически не используются. Тем не менее представляет интерес сопоставление этих характеристик с существующими геологическими картами с целью их дальнейшей разработки и усовершенствования.

Взаимосвязь глубины (H), полуширины ($\Delta\lambda$), асимметрии ($\delta\lambda$) полосы поглощения пироксенов вблизи 0,95 мкм и характеристики линейности спектральной кривой ($\xi = C(0,56 \text{ мкм}/$

/ (0,40 мкм) / C (0,70 мкм / 0,56 мкм) со стратиграфией представлена на рис. 2. Оптические параметры определены по данным Т. Б. Маккорда, а принадлежность к тому или иному стратиграфическому периоду — по геологическим картам А. Л. Суханова и В. Г. Трифонова. На рис. 2 показан разброс значений исследуемых оптических характеристик в каждом периоде. Цифры в каждом интервале означают число точек, попавших в данный стратиграфический период. Для представления результатов мы воспользовались четырьмя внекратерными стратиграфическими градациями: М — молодой, Рг — процелляриевый, Мd + Al — мидийский и алтайский, Nb — нубийский комплексы. Из рис. 2 видно, что все выбранные нами оптические характеристики в той или иной степени связаны со стратиграфией.

Параметр H имеет тенденцию уменьшаться при переходе от молодых морских образований к древним. Это, очевидно, обусловлено тем, что молодые и процелляриевые комплексы образовались в результате излияния магм с более высоким содержанием железа (больше ионов Fe^{2+}), чем у магм ранних эпох.

Большая асимметрия полосы в спектре участков М, Рг-комплексов возможно связана с присутствием оливинов. Действительно, как уже отмечалось, оливины имеют в спектре полосу поглощения на 1 мкм. В то же время пироксены имеют полосу, центрирующуюся вблизи 0,95 мкм, которая обычно значительно сильнее, чем у оливинов. Результирующая полоса в спектре смеси оливина и пироксена будет асимметрична, причем чем больший процент оливина содержится в смеси или чем более железистый этот оливин, тем более выражена будет асимметрия.

Параметр ξ (отношение показателей цвета) лучше других параметров коррелирует со стратиграфией. При этом, как показывают наши исследования, показатели цвета $C(0,56 \text{ мкм} / 0,40 \text{ мкм})$ и $C(0,70 \text{ мкм} / 0,56 \text{ мкм})$ такой корреляции не обнаруживают. Уместно отметить, что и между собой эти показатели цвета практически не коррелируют. Как показано в работе [8], по лабораторным исследованиям параметр ξ возможно характеризует степень переработки (зрелость) лунного грунта.

Список литературы: 1. Гольдберг Е. П., Шкуратов Ю. Г. Измерения спектральной отражательной способности некоторых участков Луны. — Циркуляр ШАО АН Аз СССР, 1978, № 61, с. 27—30. 2. Акимов Л. А., Латынина И. И., Стадникова Н. П. Опорный каталог оптических характеристик избранных участков Луны. — Вестн. Харьк. ун-та, № 232. Астрометрия и физика Солнечной системы, 1982, с. 70—80. 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. Basaltic volcanism study project. — In.: Basaltic volcanism on the terrestrial planets.: — Pergamon Press., 1981, № 4, p. 1200—1206. 5. Оптические исследования Луны и спектрофотометрические стандарты Л. А. Акимов, Е. П. Гольдберг, С. З. Омаров, Н. В. Опанасенко, В. А. Псарев, Ю. Г. Шкуратов. — Астрон. вестник, 1982, 3, с. 153—158. 6. Herzenberg C. L., Riley R. L. Mossbauer spectrometry of lunar samples. — Science, 1970, 167,

№ 3918, p. 683—686. 7. Hazen R. M., Bell P. M., Mao H. K. Effects of compositional variation on absorption spectra of lunar pyroxenes. — Proc. Lunar Sci., Conf. 9th, 1978, 3, p. 2919—2934. 8. Marguardt C. L., Cristcom D. L. On the spectral reflectance and maturation darkening of lunar soils. — The Moon, 1976, 15, № 1—2, p. 14—23.

Поступила в редколлегию 20.10.82.

УДК 520.82+523.3

А. В. ИЛЬИНСКИЙ, Н. В. ОПАНАСЕНКО,
Ю. Г. ШКУРАТОВ, Ю. В. КОРНИЕНКО,
Д. Г. СТАНКЕВИЧ, Ю. С. ТЮФЛИН,
С. А. КАДНИЧАНСКИЙ

НЕКОТОРЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ЦИФРОВОЙ ОБРАБОТКИ ОРБИТАЛЬНЫХ ПАНОРАМ, ПОЛУЧЕННЫХ АМС «ЛУНА-22»

В тематическом картографировании Луны давно назрела необходимость создания и широкого распространения карт, тематическая нагрузка которых отображена на топографической основе, например на отмычке рельефа. Это существенно повышает читаемость карт и расширяет возможность их использования в различных областях селенологии.

В настоящее время усилиями большой группы ученых по данным орбитальной съемки экспедиций Аполлон составлена большая серия тематических карт селенофизических и селенохимических характеристик Луны, отображенных на топографической основе [1]. Однако эти карты, из-за низкого пространственного разрешения исходных данных, носят обзорный характер. Детальные тематические карты такого рода пока отсутствуют. В частности, это относится к картам оптических характеристик (альbedo, цвет и т. д.).

Фотометрические исследования Луны в основном проводятся наземными средствами. Пространственное разрешение при этом составляет в лучшем случае 500—1000 метров в центре диска. Для представления этой информации в виде кодированного семейства изолиний, изображенных на топографической основе, естественно, требуются фотографии рельефа Луны с более высоким пространственным разрешением. Этой цели могут служить только космические изображения.

В июне 1974 г. на селеноцентрическую орбиту была выведена советская автоматическая межпланетная станция «Луна-22». В программу исследований этой станции входило получение орбитальных панорам лунной поверхности с помощью однострочного сканирующего устройства. Съемка поверхности выполнялась с высоты приблизительно 30 км. Панорамы, полученные АМС «Луна-22», имеют пространственное разрешение в несколько раз более высокое, чем лучшие изображения с Земли (100—200 м), поэтому после некоторой обработки они могут быть использованы в качестве топографической основы для представления фотометрических данных.

В нашем сообщении описан один из этапов работы по созданию лунных карт альbedo, совмещенных с топографической основой. Это этап создания самой топографической основы по данным АМС «Луна-22».

Обработка изображений производилась с помощью системы цифровой обработки изображений, созданной в ИРЭ АН УССР,

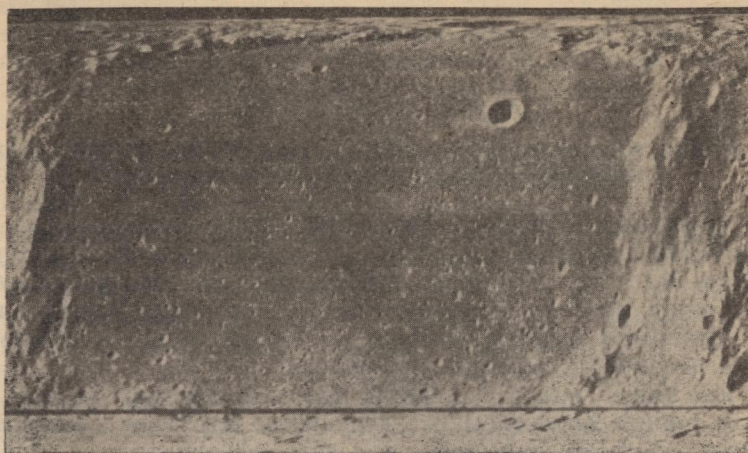


Рис. 1. Панорама района кратера Птолемей в исходной (аппаратной) проекции

которая используется для решения широкого класса научных и прикладных задач.

Исходный материал представляет собой последовательность космических изображений окрестности (от горизонта до горизонта) трассы аппарата на лунной поверхности. В основном исследовалась экваториальная зона видимого полушария Луны. Для обработки было выбрано изображение района кратера Птолемей, ограниченного на картах широтами -6° , -13° и долготами -5° , 2° . Кратер Птолемей (диаметр около 80 км) является типичным представителем крупных материковых кратеров с ровным дном, напоминающим морскую поверхность. Альbedo дна около 9% в визуальной части спектра. Оно заметно меньше, чем альbedo вала и прилегающих материковых областей. На космической панораме и наземных снимках прослеживаются вариации альbedo по дну кратера, что указывает на сложную геологическую историю формирования этого участка лунной поверхности. Изображение района в исходной (аппаратной) проекции представлено на рис. 1.

В задачу обработки входило повышение визуального качества космической панорамы (фильтрация помех) и ее трансформация из аппаратной проекции в картографическую.

Исходное изображение, записанное на фотопленку с периодическим растром (шаг 0,4 мм), вводилось в ЭВМ на механи-

ческом устройстве ввода [2] с шагом 0,2 мм и разложением примерно 500×1000 элементов. Сканирование изображения во время ввода выполнялось в направлении, перпендикулярном к исходному растру, благодаря чему удалось избежать появления муаровых структур. Затем осуществлялась привязка системы машинных координат к селенографическим. Для этого с помощью дисплея выбирались точки с известными машинными и селенографическими координатами, определенными по карте ЛТО [3] (масштаб 1 : 1000000).

Необходимость фильтрации панорамы вызвана рядом причин. В частности, необходимо было убрать периодическую структуру растра, след детали аппарата, попавшей в поле зрения сканера, и некоторые другие помехи. Растр исходного изображения устранялся режекторной фильтрацией фурье-спектра строки введенного изображения. Параметры режекторного фильтра подбирались исходя из оценки среднего шага между строками исходного изображения. Низкочастотной составляющей растра на отфильтрованном изображении не обнаружилось. Помехи, размеры которых составляли несколько десятков элементов разложения, находились визуальнo с помощью дисплея и устранялись путем линейной интерполяции яркости по ближайшей окрестности точек с достоверными значениями яркости.

Следующий этап обработки заключался в трансформировании исходного изображения из аппаратной проекции в меркаторскую со стандартной параллелью $0^{\circ}00'00''$. Методика выполнения такой трансформации применительно к орбитальным космическим изображениям, полученным с помощью однострочных сканирующих устройств, разработана в ЦНИИГАИК. Описание этой методики и формулы трансформации можно найти в работе [4].

Применение формул трансформации для вычислений в каждой точке панорамы требует значительных затрат машинного времени. По этой причине трансформирование изображения выполнялось следующим образом. Вначале производилась трансформация сетки, узлы которой в проекции выходного изображения расположены периодически (примерно 20×20 узлов). Затем в остальных точках выполнялась билинейная интерполяция по координатам и яркостям внутри ближайших четырех узлов. Расстояние между узлами сети было достаточно мало, чтобы геометрические искажения в масштабе выходного изображения не были заметны.

Результат трансформации космической панорамы района кратера Птолемей представлен на рис. 2 в меркаторской проекции с координатной сеткой. Трансформированное изображение хорошо согласуется с существующими топографическими картами района, что свидетельствует о достаточно корректном

выполнении процедуры трансформации. Некоторое ухудшение четкости изображения приблизительно по диагонали на юго-запад и на северо-восток естественно, так как этому направлению соответствует положение горизонта на панораме.

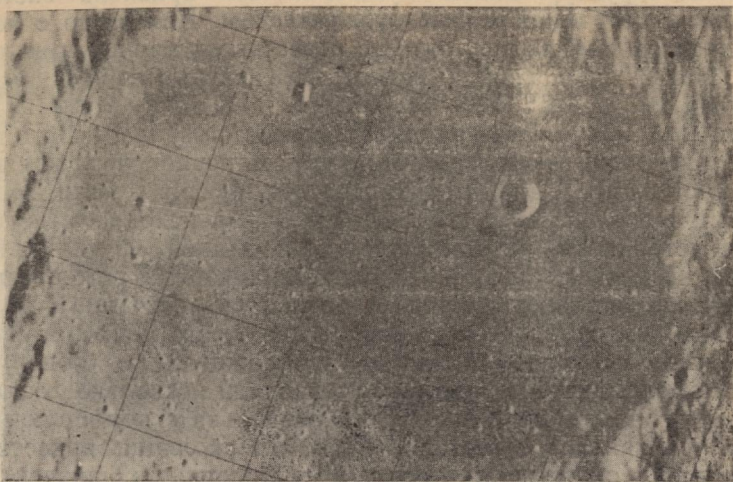


Рис. 2. Панорама района кратера Птолемей в проекции Меркатора

В таком виде космические изображения Луны предполагается согласовывать с фотометрическими данными, полученными наземными телескопами.

Список литературы: 1. *Frontispice*. Proc. Lunar Sci. Conf. 8th, 1978, 3, p. 18—24. 2. Система цифровой обработки изображений/А. Я. Усиков, А. А. Бабичев, А. Д. Егоров и др. — Вестн. АН УССР, 1977, № 10, с. 47—58. 3. *Lunar Topographic Orthophotomap*. — NASA, Washington, 1974. — 200 p. 4. Тюфлин Ю. С., Кадничанский С. А., Хижниченко В. И. Аналитическое преобразование орбитальных телевизионных панорам в картографическую проекцию. — Геодезия и картография, 1979, 4, с. 51—56.

Поступила в редколлегию 20.10.82.

УДК 521.932

П. П. ПАВЛЕНКО, Л. С. ПАВЛЕНКО

ПОЗИЦИОННЫЕ ФОТОГРАФИЧЕСКИЕ НАБЛЮДЕНИЯ ИЗБРАННЫХ МАЛЫХ ПЛАНЕТ В 1979 г. В АО ХГУ

Позиционные фотографические наблюдения малых планет в АО ХГУ ведутся с целью накопления материала для улучшения существующей фундаментальной системы координат (уточнения положения точки весеннего равноденствия и экватора). Координирующей организацией по этой работе, в которой участ-

Таблица 1

UT	$\alpha_{1950,0}$	$\delta_{1950,0}$	(O—C) _{α}	(O—C)
2 Паллада				
1979 09 13,84001	20 ^h 49 ^m 53,201 ^s	+06° 04' 27,71"	+0,048 ^s	+0,09"
1979 09 20,81406	20 47 25,166	+04 38 07,40	+0,008	+0,11
1979 09 21,77992	20 47 09,167	+04 26 17,47	—0,058	—0,19
1979 09 21,86777	20 47 07,739	+04 25 13,43	—0,016	+0,20
1979 09 23,75759	20 46 40,081	+04 02 13,74	—0,029	—0,24
1979 09 23,84621	20 46 38,818	+04 01 09,30	—0,023	—0,29
1979 09 29,81856	20 45 40,937	+02 50 10,64	—0,039	+0,15
1979 10 07,75564	20 45 32,816	+01 20 56,69	+0,014	+0,01
1979 10 07,79443	20 45 32,939	+01 20 31,72	+0,019	+0,20
1979 10 07,82576	20 45 32,988	+01 20 11,24	—0,032	+0,04
1979 10 09,76334	20 45 43,007	+00 59 29,01	+0,022	+0,04
1979 10 09,81549	20 45 43,285	+00 58 56,55	+0,009	+0,65
1979 10 11,74780	20 45 57,799	+00 38 45,20	—0,067	+0,14
1979 10 11,80602	20 45 58,282	+00 38 08,78	—0,048	—0,23
6 Геба				
1979 06 24,85798	15 46 27,052	+01 13 47,07	—0,028	—0,04
1979 06 25,85025	15 45 51,346	+01 09 11,64	—0,011	—0,31
1979 06 26,86254	15,45 16,259	+01 04 20,45	—0,026	+0,21
1979 06 29,85960	15 43 40,916	+00 48 54,15	+0,025	—0,16
1979 07 02,82826	15 42 19,209	+00 32 10,07	—0,014	+0,09
1979 07 02,86825	15 42 18,135	+00 31 55,82	—0,031	—0,07

вуют многие советские и зарубежные обсерватории, является ИТА АН СССР.

В 1979 г. наблюдения были проведены на исследованном короткофокусном астрографе Цейсса АО ХГУ ($D=160$ мм, $F=718$ мм). Прямоугольные координаты малых планет и опорных звезд на астронегативах измерены с помощью тщательно исследованных измерительных приборов УИМ-21 и КИМ-3, вычисления экваториальных топоцентрических координат малых планет — с помощью ЭВМ М-222 ХГУ методом Тернера — Шлезингера.

Во время фотографических наблюдений на каждом астронегативе получено по 5 экспозиций, со сдвигом фотокамеры по склонению в промежутках времени между экспозициями. По каждой экспозиции получены экваториальные координаты малых планет и соответствующие им моменты времени, которые затем усреднялись для каждого астронегатива, в результате чего одному негативу соответствует одно положение малой планеты.

Путем сравнения наблюденных положений с интерполированными эфемеридными положениями после учета поправок за параллакс получены О—С. Эфемеридные положения были взяты из ежедневных геоцентрических эфемерид избранных малых планет, полученных В. И. Орельской в ИТА АН СССР.

Таблица 2

№ звезды	α	δ	D
1	2	3	4
2 Паллада			
053051	42,739 ^s	08,14''	0,2108
053054	42,270	33,55	0,2541
062847	26,894	44,17	0,2513
062844	01,881	10,18	0,1619
062839	19,876	28,75	0,0950
062833	07,791	59,75	0,0270
042820	22,179	12,23	0,2060
042818	57,385	26,83	0,2270
053039	21,405	48,24	0,1859
042815	43,368	20,57	0,1795
042814	05,434	03,49	0,1119
042816	49,398	08,86	0,0896
042820	22,179	12,23	0,1746
042818	57,385	26,83	0,0954
053039	21,405	48,24	0,1081
042815	43,368	20,57	0,1303
042814	05,434	03,49	0,2163
042816	49,398	08,86	0,2754
042820	22,179	12,23	0,1716
042818	57,385	26,83	0,0834
053039	21,405	48,24	0,1011
042815	43,368	20,57	0,1260
042814	05,434	03,49	0,2258
042816	43,398	08,86	0,2921
042820	22,179	12,23	0,1287
032721	08,147	05,09	0,0906
042817	10,328	13,57	0,1853
032716	48,143	42,40	0,1527
042814	05,434	03,49	0,2532
0,32710	49,741	36,93	0,1896
042820	22,179	12,23	0,1414
032721	08,147	05,09	0,1344
042817	10,328	13,57	0,1702
032716	48,143	42,40	0,1654
042814	05,434	03,49	0,1933
032710	49,741	36,93	0,1952
032711	34,529	31,25	0,1787
022638	29,132	25,48	0,1226
022643	33,100	55,19	0,1481
022644	54,206	11,37	0,1296
022651	12,608	12,17	0,2180
032715	35,472	47,66	0,2029
002582	17,613	58,17	0,2006
012509	00,427	49,43	0,1780
012506	46,621	55,16	0,1600
012492	43,831	13,36	0,1491
022645	05,535	55,19	0,1432
012493	39,515	28,05	0,1692

1	2	3	4
012509	00,427	49,43	0,1785
012506	46,621	55,16	0,0801
012492	43,831	13,36	0,1773
022645	05,535 ^s	55,19''	0,0339
012493	39,515	28,05	0,2999
012508	51,764	35,57	0,2303
002582	17,613	58,17	0,1617
012509	00,427	49,43	0,1192
012506	46,621	55,16	0,1183
012492	43,831	13,36	0,1690
022645	05,535	55,19	0,1322
012493	39,515	28,05	0,1744
012508	51,764	35,57	0,1252
002582	17,613	58,17	0,3692
012509	00,427	49,43	0,1138
012506	46,621	55,16	0,0104
012492	43,831	13,36	0,1055
012493	39,515	28,05	0,2338
012508	51,764	35,57	0,1673
002582	17,613	58,17	0,3755
012509	00,427	49,43	0,1131
012506	46,621	55,16	0,0061
012492	43,831	13,36	0,1023
012493	39,515	28,05	0,2348
012508	51,764	35,57	0,1682
002591	45,974	51,15	0,1049
012501	05,453	40,26	0,2425
002580	58,427	05,18	0,2750
002579	27,120	12,44	0,1826
002585	02,911	33,03	0,1018
002586	09,731	19,81	0,0932
002591	45,974	51,15	0,1048
012501	05,453	40,26	0,2373
002580	58,427	05,18	0,2696
002579	27,120	12,44	0,1853
002585	02,911	33,03	0,1055
002586	09,731	19,81	0,0973
6 Геба			
011761	27,693	22,61	0,2080
011756	30,231	09,64	0,2279
001879	37,544	35,16	0,1787
001885	26,313	42,23	0,1232
001894	51,409	00,71	0,1231
011765	23,274	22,62	0,1390
011761	27,693	22,61	0,1611
011756	30,231	09,64	0,2505
001897	37,544	35,16	0,2395
001885	26,313	42,23	0,1689
001894	51,409	00,71	0,0944
011765	23,274	22,62	0,0856

1	2	3	4	1	2	3	4
011761	27,693	22,61	0,1609	011755	19,465	50,64	0,2315
011756	30,231	09,64	0,2580	001880	45,939	53,65	0,0866
001876	14,479	42,18	0,2702	001879	37,544	35,16	0,1743
001885	26,313	42,23	0,1586	902037	18,288	14,80	0,1644
001894	51,409	00,71	0,0798	001878	27,217	01,05	0,0665
011765	23,274	22,62	0,0724	001875	42,908	07,56	0,2766
011753	54,496	16,00	0,1542	011755	19,465	50,64	0,2308
011756	30,231	09,64	0,1678	001880	45,939	53,65	0,0853
001876	14,479	42,18	0,1420	001879	37,544	35,16	0,1733
001885	26,313	42,23	0,2364	902037	18,288	14,80	0,1675
001878	27,217	01,05	0,1699	001878	27,217	01,05	0,0656
001875	42,908	07,56	0,1296	001875	42,908	07,56	0,2775

В табл. 1 даны топоцентрические координаты избранных малых планет Паллада и Геба и соответствующие им моменты времени, а также $O-C$ по α и δ , в табл. 2 — сведения об опорных звездах и их весах («зависимостях»), с которыми эти звезды использованы при получении координат малых планет.

УДК 521.932

Н. Г. ЛИТКЕВИЧ, В. И. ТУРЕНКО

РЕЗУЛЬТАТЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВСЕМИРНОГО ВРЕМЕНИ В АО ХГУ И ХГНИИМ ЗА 1978—1982 гг.

Анализ результатов астрономических наблюдений всемирного времени за 1978—1982 гг. является продолжением исследования, выполненного по наблюдениям за 1972—1977 гг. [1]. Результаты наблюдений Харьковской службы времени на фоне атомной шкалы и сопоставление их с результатами Международного бюро времени в Париже [2] и Всемирным временем единой Службы времени СССР [3] позволяют изучать случайные и систематические погрешности службы, а также неравномерность вращения Земли.

Определение всемирного времени. Астрономические определения всемирного времени в Харьковской службе по-прежнему производили с помощью пассажного инструмента АПМ-1 № 540001 ($d=10$ см, $f=100$ см). Наблюдаемые поправки относили ко вторичному эталону ХГНИИМ — его атомной шкале. Краткая характеристика инструмента и описание методики

3*

Годы	Число ночей	Число поправок	E (мс)	
			за 1 ч	за ночь
1978	47	75	5,3	3,8
1979	93	159	4,7	3,3
1980	99	179	4,8	3,4
1981	104	192	4,5	3,2
1982	85	250	5,1	2,7

Таблица 1

Месяцы	Годы				
	1978	1979	1980	1981	1982
1	-16,4264	-17,4612	-18,3968	-19,2266	-20,0414
2	—	-17,5480	—	-19,2924	—
3	—	-17,6270	-18,5476	-19,3799	—
4	-16,7162	-17,7265	-18,6318	-19,4637	-20,2247
5	-16,8155	-17,8044	-18,7004	-19,5319	-20,2909
6	-16,8950	-17,8849	-18,7748	-19,6094	-20,3559
7	-16,9533	-17,9307	-18,8223	-19,6577	-20,4209
8	-17,0351	-18,0165	-18,8801	-19,7197	-20,4638
9	-17,0958	-18,0693	-18,9426	-19,7642	—
10	-17,1782	-18,1543	-19,0113	-19,8265	—
11	-17,2793	-19,2491	-19,0876	-19,8862	—
12	-17,3399	-18,3095	—	-19,9795	—

Таблица 2

Месяцы	Годы				
	1978	1979	1980	1981	1982
1	-9,7964	-9,7482	-9,5888	-9,3206	-9,0404
2	—	-9,7420	—	-9,2934	—
3	—	-9,7370	-9,5596	-9,2969	—
4	-9,8282	-9,7435	-9,5508	-9,2877	-8,9537
5	-9,8375	-9,7314	-9,5294	-9,2659	-8,9330
6	-9,8240	-9,7189	-9,5108	-9,2659	-8,9019
7	-9,7924	-9,6747	-9,4683	-9,2087	-8,8769
8	-9,7781	-9,6675	-9,4331	-9,1777	-8,8268
9	-9,7488	-9,6273	-9,4026	-9,1292	—
10	-9,7412	-9,6223	-9,3813	-9,1015	—
11	-9,7493	-9,6241	-9,3646	-9,0682	—
12	-9,7199	-9,5945	—	-9,0715	—

Таблица 3

Месяцы	Годы				
	1978	1979	1980	1981	1982
1	-9,7993	-9,7512	-9,5919	-9,3235	-9,0433
2	—	-9,7410	—	-9,2923	—
3	—	-9,7290	-9,5513	-9,2886	—
4	-9,8078	-9,7232	-9,5302	-9,2672	-8,9333
5	-9,8079	-9,7018	-9,4996	-9,2362	-8,9033
6	-9,7969	-9,6917	-9,4839	-9,2236	-8,8749
7	-9,7815	-9,6638	-9,4579	-9,1981	-8,8663
8	-9,7899	-9,6791	-9,4452	-9,1896	-8,8386
9	-9,7756	-9,6540	-9,4296	-9,1560	—
10	-9,7689	-9,6500	-9,4090	-9,1291	—
11	-9,7678	-9,6426	-9,3830	-9,0866	—
12	-9,7286	-9,6032	—	-9,0802	—

исследования дано в работах [1], [4]. В течение указанного интервала времени астрономами С. Р. Измайловым, Н. Г. Литкевич, В. И. Туренко, В. Д. Симоненко, Н. А. Поповской, Т. И. Сучковой было выполнено 855 определений времени.

Здесь E — средняя квадратическая погрешность определения времени (по внутренней сходимости).

Результаты анализа. Среднемесячные несплавленные значения всемирного времени $UT1$ (в секундах времени) относительно шкалы атомного времени, отнесенные к середине каждого месяца, приведены в табл. 1. Среднемесячные значения $UT1 - TA + 3$ мс/сут и $UT2 - TA + 3$ мс/сут, приведенные в табл. 2 и 3 и графически изображенные на рис. 1, дают представление об изменении скорости вращения Земли, которая в 1974 г. стала увеличиваться по сравнению с 1972—1973 гг. и к 1982 г. это увеличение скорости привело к уменьшению длительности суток \sim на 1 мс. Сличение шкалы всемирного времени Харьков-

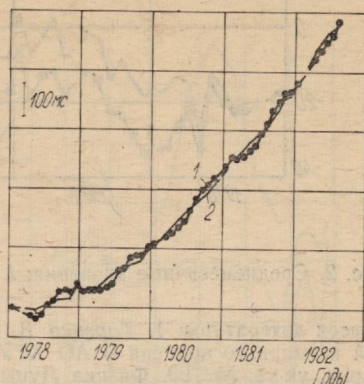


Рис. 1. Среднемесячные значения $UT1 - TA + 3$ мс/сут (1) и $UT2 - TA + 3$ мс/сут (2)

Таблица 4

Месяцы	$UT1(X) - UT1(BIH)$					$UT1(X) - UT1(SU)$				
	Годы									
	1978	1979	1980	1981	1982	1978	1979	1980	1981	1982
1	-19,6	-17,9	- 8,0	- 3,8	-22,4	-17,5	-33,4	-16,9	-10,3	-15,9
2	—	-13,8	—	+ 4,1	—	—	-28,0	—	—	6,8
3	—	- 8,8	- 8,8	- 9,6	—	—	-23,3	-17,4	-12,7	—
4	-20,1	-14,1	- 9,5	-10,4	- 5,7	-22,1	-22,5	-16,0	-13,4	—
5	-22,0	- 2,8	- 8,7	- 3,2	- 2,8	-22,1	-14,2	-14,7	- 6,8	—
6	-15,9	- 1,4	-15,2	-10,5	+ 6,0	-20,0	-12,2	-18,5	- 9,9	—
7	-11,7	—	- 8,8	-15,2	-12,9	-15,6	—	- 8,4	-18,2	—
8	-28,6	- 7,8	-14,5	-31,4	-13,7	-32,5	-18,2	-15,8	-25,8	—
9	-14,5	+ 2,5	-15,2	-22,0	—	-22,5	-11,7	-19,2	-26,6	—
10	-13,4	- 2,3	-11,1	-18,5	—	-25,9	-12,9	-17,0	-20,8	—
11	-16,5	- 7,4	—	-13,7	—	-31,9	-19,4	—	-11,6	—
12	—	+ 3,2	—	-26,3	—	—	- 6,0	—	-25,2	—

ской службы ($UT_1(X)$) со шкалами МБВ (BIN) и СССР (SU) приведено (в мс) в табл. 4 и на рис. 2. Систематическая ошибка наблюдений Харьковской службы времени относительно системы МБВ за исследуемый интервал находилась в пределах 5—15 мс.

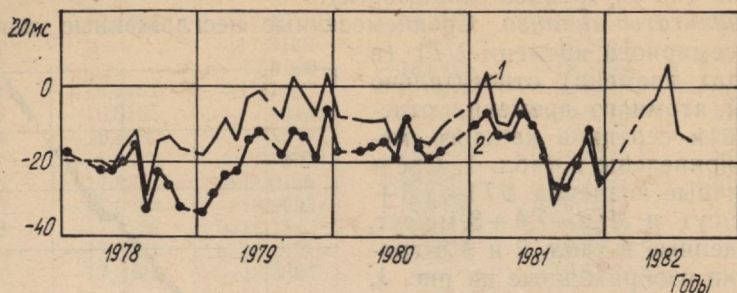


Рис. 2. Среднемесячные значения: 1 — $UT_1(X) - UT_1(BIN)$; 2 — $UT_1(X) - UT_1(SU)$

Список литературы: 1. Туренко В. И., Литкевич Н. Г. Результаты наблюдений всемирного времени в АО ХГУ и ХГНИИМ за 1972—1977 гг. — Вестн. Харьк. ун-та, № 190. Физика Луны и планет. Фундаментальная астрометрия, 1979, с. 3—7. 2. Циркуляры Д. BIN, 1978—1982, № 136—196. 3. Бюллетени Междуведомственной комиссии единой службы времени при государственном комитете СССР по стандартам, 1978—1982, № 13—32. 4. Туренко В. И., Ван-цан А. Ф., Литкевич Н. Г. Анализ результатов наблюдений службы времени АО ХГУ и ХГНИИМ за 1972—1974 гг. — Вестн. Харьк. ун-та, № 160. Физика Луны и планет. Фундаментальная астрометрия, 1977, с. 36—42.

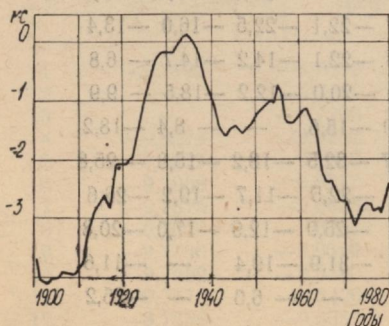
Поступила в редколлегию 30.11.82.

УДК 521—933

В. И. ТУРЕНКО

НЕРАВНОМЕРНОСТЬ ВРАЩЕНИЯ ЗЕМЛИ И НЕКОТОРАЯ ГЕОФИЗИЧЕСКАЯ ИНТЕРПРЕТАЦИЯ ЕЕ

Представленная нами впервые (в 1962 г.) кривая колебания длительности суток за 1951—1960 гг. [1] впоследствии дополнялась и к настоящему времени доведена до 1981 г. включительно.



Сглаженная скользящими годовыми средними за 1956—1980 гг., она представлена на рис. 1, где дано также колебание длительности суток с 1900 г. по 1955 г. по данным $\Delta T = ET - UT$. Этот участок использовался нами не для количественной харак-

Рис. 1. Изменение длительности суток за 1900—1981 гг.

теристики скорости вращения Земли, а для качественного представления общего вида ее кривой на возможно большем интервале времени.

На рис. 2 — участок кривой колебания длительности суток, выделенный специально для количественной оценки систематического замедления вращения Земли. Эти кривые колебания длительности суток свободны от короткопериодической, т. е. сезонной, неравномерности вращения Земли — на интервале

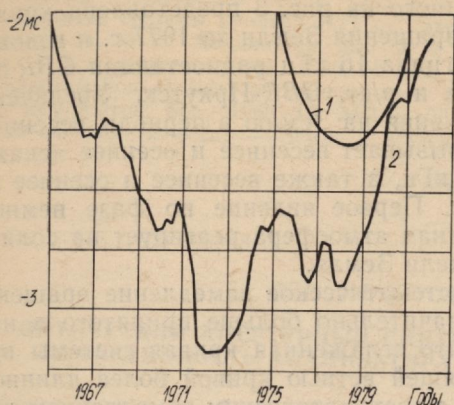
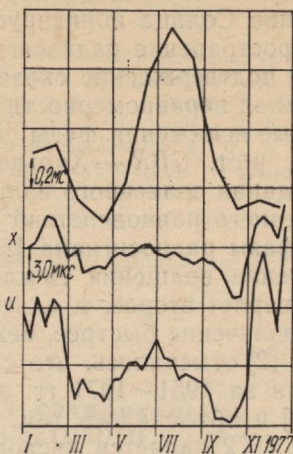


Рис. 2. Изменение длительности суток за 1965—1981 гг.

Рис. 3. Сезонное изменение длительности суток и фазы радиосигнала 16 кГц за 1977 г.



1900—1955 гг. благодаря природе используемого материала, и на интервале 1955—1980 гг. — благодаря методике, примененной для их определения. Все представленные здесь графики колебания длительности суток будут использованы нами для геофизической интерпретации неравномерности вращения Земли.

При рассмотрении этих вопросов можно идти двумя путями — от частного к общему, и наоборот. Нам представляется более выгодным и правильным путь второй по двум причинам: во-первых, кратковременное воздействие фактора, способного вызвать изменение скорости вращения Земли, может и не проявиться; во-вторых, влияние фактора, даже не кратковременное, может проявиться со сдвигом по времени, а следовательно, не всегда легко распознаваемое. Например, не доказано влияние солнечных вспышек на вращение Земли.

Сезонная неравномерность вращения Земли в настоящее время представляется суммой двух компонент: годовой и полугодовой, и многими исследователями объясняется сезонной циркуляцией атмосферы. Однако, по-видимому, это может относиться

только к годовой компоненте. Полугодовая же, по нашим представлениям, — следствие другого геофизического явления — попадания и воздействия на Землю солнечного излучения. Особенно благоприятные условия для этого создаются в весенний и осенний периоды. В это время Земля вследствие наклона плоскости ее орбиты к плоскости эклиптики удаляется от солнечного экватора на те гелиошироты, на которых преимущественно бывают активные области солнечного излучения, и которое распространяется в наиболее близком направлении на Землю. Излучение Солнца ионизирует земную атмосферу, что определяет распространение радиосигналов и вращение Земли.

В подтверждение сказанного на рис. 3 представлена кривая сезонной неравномерности вращения Земли за 1977 г. и годовые кривые искажения фазы сигнала 16 кГц радиостанции *GBR* для трасс р/ст. *GBR* — Харьков и р/ст. *GBR*-Иркутск. Увеличение попадания солнечного излучения на Землю в периоды весеннего и осеннего равноденствий вызывает весеннее и осеннее искажение фазы радиосигнала 16 кГц, а также весеннее и осеннее замедление вращения Земли. Первое явление по фазе немного предвещает второе, т. е. земная атмосфера реагирует на солнечное излучение быстрее, нежели Земля.

В [2] отмечалось, что систематическое замедление вращения Земли за 1951—1971 гг. значительно больше принятого в науке [3] и объяснялось тем, что сглаженная кривая системы времени *UT2* является нисходящей ветвью кривой более длинного периода, которое складывается с систематическим замедлением вращения Земли.

По материалам последних лет (кривая изменения длительности суток за 1965—1981 гг. — рис. 2) мы попытались выделить систематическое изменение длительности суток, вызванное трением приливов и отливов, из суммарной кривой изменения длительности суток.

Для этого мы предполагаем, что общее изменение длительности суток определяется в основном на данном интервале именно указанным фактором и вековым циклом солнечной активности, и воспользуемся фактом увеличения скорости вращения Земли, начиная с 1972—1973 гг.

Решение составленных нами 2-х уравнений:

$$7,5 \text{ лет } (\Delta_1 + \Delta_2) = -0,92 \text{ мс;}$$

$$8,5 \text{ лет } (\Delta_1 - \Delta_2) = +0,76 \text{ мс;}$$

где Δ_1 , Δ_2 — соответственно компоненты векового замедления, вызываемого трением приливов и отливов, и замедления, вызванного вековым циклом солнечной активности, дает нам $\Delta_1 = 0,0017$ мс за сто лет, что согласуется с [3] и [4].

По виду кривой (рис. 1) можно предварительно судить о ветви роста векового цикла солнечной активности, минимум

которого можно отнести к эпохе 30-х годов, максимум — 70—80-х годов. Здесь также повышению солнечной активности соответствует уменьшение скорости вращения Земли.

На рис. 2 (кривая 1) представлено заимствованное из [5] глобальное изменение силы тяжести во времени, возникновение которого по мнению Ю. Д. Буланже вероятнее всего можно объяснить неравномерностью вращения Земли. Все изложенное свидетельствует о существовании причинно-обусловленной связи неравномерности вращения Земли с солнечной активностью.

Список литературы: 1. Туренко В. И. Ходы часов и неравномерность вращения Земли. — Вращение Земли, 1962, с. 216—219. 2. Туренко В. И. Кривая уклонения системы времени ИТ1 от атомного и ее анализ. — Вестн. Харьк. ун-та, № 8. Астрономия, вып. 2, с. 54—57. 3. Андудайе. Вращение Земли. — Усп. астроном. наук, 1936, № 5, с. 3—20. 4. Newton R. R. A satellite determination of tidal parameters and earth deceleration. — Geophys. Gourn Roy Astron. Soc., 1968, 14, № 5, p. 505—539. 5. Буланже Ю. Л. Постоянна ли сила тяжести? — Земля и вселенная, 1981, № 4, с. 10—14.

Поступила в редколлегию 30.11.82.

УДК 522.1; 535.7; 621.391; 681.7

В. Н. УВАРОВ

ОПТИЧЕСКИЙ АПЕРТУРНЫЙ СИНТЕЗ: СРАВНИТЕЛЬНАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ АНАЛИЗАТОРА СВЕТОВОГО ПОЛЯ

Известно, что турбулентность атмосферы совместно с избыточностью апертуры приводят к потере информации в области высоких пространственных частот. А именно, при регистрации изображения с длительной экспозицией происходит полная потеря информации на частотах, превосходящих предельную частоту атмосферного пропускания [1]. При регистрации спектров мощности происходит подавление, пропорциональное избыточности апертуры [2, 3]. Для уменьшения помех, вызванных турбулентностью атмосферы, целесообразно в некоторых случаях уменьшать избыточность апертуры [4].

Однако при этом происходит неизбежная потеря светового потока из-за уменьшения площади приемной апертуры и, следовательно, ухудшение отношения сигнал — шум. Поэтому для получения приемлемых значений сигнал — шум следует прибегнуть к накоплению сигнала путем регистрации серии безыбыточных парциальных изображений, получаемых с мгновенными экспозициями. Параллельная регистрация системы парциальных изображений, согласованных по фазе так, что имеется возможность восстановить неискаженное изображение, может быть получена с помощью анализатора оптического поля [5—7].

Оценим эффективность регистрации с использованием анализатора по сравнению с методом спекл-интерферометрии. Для

этого воспользуемся понятием качества изображения κ , определяемого как отношение значения сигнал—шум с использованием анализатора к значению сигнал—шум без анализатора:

$$\kappa = [S_z/N_z]:[S_n/N_n]. \quad (1)$$

Здесь S_z , S_n — значения высокочастотного сигнала для случаев регистрации с анализатором и без него. N_z , N_n — соответствующие значения шума.

Определим высокочастотный сигнал изображения следующим образом:

$$S = \left[\int_{f_{\text{ат}}}^{f_{\text{диф}}} I(f) df \right]^{1/2}. \quad (2)$$

Интегрирование проводится по всей области пространственных частот от границ области пропускания атмосферы $f_{\text{ат}}$ до частот дифракционного ограничения $f_{\text{диф}}$. $I(f)$ — спектр мощности зарегистрированного изображения $I(f) = O(f) |t(f)|^2$, (3), где $t(f)$ — ОПФ изображающей системы; $O(f)$ — спектр мощности объекта.

Поскольку в обоих случаях предполагается регистрация всего светового потока, падающего на апертуру, а регистраторы идентичными, то значения шума в обоих случаях равны. Считая спектр мощности объекта постоянным (неразрешаемая звезда), для сигнала можно записать:

$$S = \left[O \int_{f_{\text{ат}}}^{f_{\text{диф}}} |t(f)|^2 df \right]^{1/2}. \quad (4)$$

Значение сигнала объекта, наблюдаемого через атмосферу без анализатора, получаем, учитывая (37) из [2]:

$$S_n = \left\{ \frac{O}{N_k} \int_{f_{\text{ат}}}^{f_{\text{диф}}} t_0(f/f_{\text{диф}}) [0,435 + 0,278 (f_{\text{ат}}/f)^{1/3} + 1] df \right\}^{1/2}. \quad (5)$$

Здесь $t_0(f/f_{\text{диф}})$ — ОПФ дифракционно-ограниченной апертуры; N_k — число корреляционных ячеек на апертуре.

Поскольку тот или иной вид ОПФ влияет только на числовой множитель, то для оценок вполне достаточно положить

$$t_0(\rho) = \begin{cases} 1 - \rho & \text{при } \rho < 1; \\ 0 & \text{при } \rho \leq 1. \end{cases} \quad (6)$$

Тогда с учетом (5), (6) путем интегрирования получаем для случая $f_{\text{диф}} \gg f_{\text{ат}}$ $S_n \approx [(2\pi/5)O\Delta f]^{1/2} N_k^{-1/2}$ (7).

При вычислении высокочастотного сигнала анализатора учтем, что суммарный сигнал определяется простой суммой спектров мощности от разных окон пропускания разных масок:

$$I_{\Sigma} = O/N^2 \sum_1^R |t_0(f - f_i/\Delta)|^2.$$

Здесь R — общее количество высокочастотных окон;

$$R = M(M-1)L/2 \approx N^{\alpha+1}/2. \quad (9)$$

N — число субапертур анализатора; M — среднее число субапертур в одной маске; L — число масок анализатора. Для них справедливо соотношение $M = N^{\alpha}$ (10), где $0 < \alpha \leq 5/13$.

Интервал квадрата ОПФ вида (6) по одному высокочастотному окну

$$\int_{-\infty}^{\infty} |t_0(f)|^2 df = 2\pi/3. \quad (11)$$

Для сигнала анализатора с учетом (8), (9), (11) получаем

$$S_{\Sigma} \approx \sqrt{\pi O/3} N^{(\alpha-1)/2}. \quad (12)$$

Учитывая (7) и (12), находим параметр качества при использовании анализатора по сравнению с апертурой без анализатора: $\kappa \approx N^{\alpha/2} (N_k/N)^{1/2}$ (13).

Таким образом, использование анализатора позволяет получить выигрыш в мощности сигнала в области высоких пространственных частот. Причем этот выигрыш растет с увеличением апертуры телескопа как D^{α} , где D — диаметр апертуры. Дополнительно следует сказать, что метод спекл-интерферометрии обеспечивает получение автокорреляционной функции изображения. Получение же изображения по его автокорреляционной функции возможно лишь при наличии априорной информации. В то же время использование анализатора обеспечивает получение неискаженного изображения с точностью до координат барицентра яркости. Использование анализаторов на существующих телескопах позволит получать изображения небесных объектов на дифракционном пределе разрешения.

Список литературы: 1. Frid D. L. Optical resolution through a random inhomogeneous medium for very long and very short exposure. — J. Opt. Soc. Am., 1966, 56, № 10, p. 1372—1378. 2. Korf D. Analysis of method for obtaining near-diffraction — limited information in presence of atmospheric turbulence. — J. Opt. Soc. Am., 1973, 63, № 8, p. 971—980. 3. Aime C., Roddier F. Imaging through turbulence with telescope array. — Opt. commun., 1976, 19, № 1, p. 57—60. 4. Russel F. D., Goodman I. W. Nonredundant array and postdetection processing for aberration compensation in incoherent imaging. — J. Opt. Soc. Am., 1971, 61, № 2, p. 182—191. 5. Уваров В. Н. О возможности

получения изображений с дифракционным пределом при наблюдении сквозь неоднородную атмосферу. — Докл. АН УССР, 1979, 10, с. 839—841.
6. Уваров В. Н. Интерферометрический синтез изображений небесных объектов, наблюдаемых через турбулентную атмосферу. — Вестн. Харьк. ун-та, № 204. Физика Луны и планет. Фундаментальная астрономия, 1980, вып. 15, с. 34—40.
7. Уваров В. Н. Об использовании апертурного расщепителя для получения астрономических изображений через неоднородную атмосферу. — Вестн. Харьк. ун-та, № 223. Методы обработки астрономических и космических изображений, 1981, вып. 16, с. 55—59.

Поступила в редколлегию 15.09.82.

УДК 528.617

В. А. ЗАХОЖАИ

УСТАНОВКА ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ СПЕКЛ-ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ

Спекл-интерферометрия стала мощным астрофизическим методом исследования звезд и кратных систем, изучаемые угловые характеристики которых больше дифракционного разрешения применяемых для их исследований больших телескопов. Поэтому важным является вопрос, относящийся к изучению предельных возможностей метода: насколько можно рассчитывать на выявление информации об угловых характеристиках изучаемых объектов, значения которых меньше (или равны) дифракционного разрешения. Речь идет не о преодолении технических трудностей (повышение предельной чувствительности ЭОПов, их разрешающей способности и т. д.), а о выделении как можно большей информации, содержащейся в усредненном спектре мощности исследуемого космического объекта.

Поставленную задачу можно решать математическим моделированием, как это делалось, например, в [1], или же созданием специальных установок [2], где были бы достаточно точно промоделированы угловые характеристики изучаемого объекта, турбулентный слой атмосферы, телескоп (его апертура и светосила).

Рассмотрим вопрос об изучении спекл-интерферометрии на специально созданной некогерентной установке, моделирующей все этапы формирования спекловой структуры изображения в фокальной плоскости большого телескопа (при коротких экспозициях) и приведем некоторые результаты обсуждаемого моделирования.

Основные требования эксперимента и описание установки. В реальных условиях плоскопараллельный фронт волны от звезды, проходя через турбулентный слой атмосферы, дифрагирует на апертуре, а при малых экспозициях (меньше времени заморозки турбулентной атмосферы) и узком фильтре строит спекловое изображение в фокальной плоскости телескопа. Следовательно, можно сформулировать основные требования, предъявляемые к оптической установке и эксперименту, для

моделирования спекл-интерферометрии: необходимы источник света, освещающий модель; оптическая система, уносящая источник (модель) на бесконечность; оптическая система, моделирующая телескоп (нужное относительное отверстие); оптические параметры фазовой среды установки должны соответ-

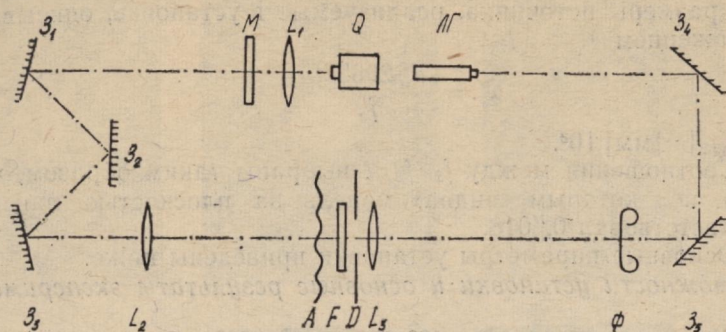


Рис. 1. Схема установки

ствовать характеристикам земной атмосферы; детектор установки должен быть аналогичным применяемому в естественных наблюдениях, обработка получаемых спекл-изображений должна полностью соответствовать реальному эксперименту.

В Астрономической обсерватории Харьковского университета была создана специальная установка, удовлетворяющая всем упомянутым требованиям. Установка (рис. 1) состоит из источника света Q , линзы L_1 , модели M , поворотных зеркал Z_1, Z_2, Z_3 , линзы L_2 , уносящей изображение модели M на бесконечность (т. е. строящей плоскопараллельный фронт волны), фазовой среды A , выполняющей роль турбулентного слоя, набора фильтров F , вырезающих нужный участок спектра излучения источника света, диафрагмы D , исполняющей роль апертуры телескопа, линзы L_3 , обеспечивающей необходимый масштаб в фокальной плоскости Φ . Юстировка обеспечивается гелий-неоновым лазером, луч которого посредством зеркал Z_4, Z_5 совмещен с оптической осью установки.

Источник света — кварцевая лампа, зеленая линия которой вырезается набором светофильтров. В качестве турбулентной среды используется полиэтилен.

В оптической схеме (рис. 1) связь между размерами модели, находящейся в плоскости M — d_m , и изображения, находящегося в плоскости Φ — l , следующая:

$$l = \frac{d_m f_3}{f_2^2}, \quad (1)$$

где f_2, f_3 — фокусные расстояния линз L_2, L_3 , соответственно.

Технически проще реализовать задачу, когда $d_m > l$. Тогда для фокусных расстояний необходимо выполнение условия $f_2 > f_3$. Поскольку в спекл-изображении среднестатистическая спекла соответствует дифракционному разрешению телескопа, то формула (1) описывает связь между линейными размерами модели и среднестатистической спеклой. Соответствующие угловые размеры источника, реализуемые в установке, описываются выражением

$$\alpha'' = \frac{d_m 206265}{f_2}, \quad 2)$$

где $[f_2] = [\text{мм}] 10^3$.

Соотношения между f_2 , f_3 , l выбраны таким образом, чтобы угол, под которым «видна» модель за плоскостью линзы L_2 , соответствовал $0,018$.

Основные параметры установки приведены ниже.

Возможности установки и основные результаты экспериментов.

Кварцевая лампа — Q — 139, мощность — 250 Вт, рабочее поле — 7 мм;
линза L_1 — фокусное расстояние $f_1 = 14$ см, диаметр $\varnothing_1 = 35$ мм;
линза L_2 — фокусное расстояние $f_2 = 533$ см, диаметр $\varnothing_2 = 55$ мм;
линза L_3 — фокусное расстояние $f_3 = 105$ см, диаметр $\varnothing_3 = 65$ мм;
зеркала $З_1$, $З_2$, $З_3$ — 8×8 см, $З_4$, $З_5$ — 4×4 см;

фазовая среда — полиэтилен, качество изображения — $\Delta\theta \approx 2''$, количество неоднородностей — $\approx 170 \text{ см}^{-1}$; рабочая длина волны — кварцевая лампа + + фильтры — $\lambda = 546$ нм, $\Delta\lambda \sim 10$ А; диафрагма D — $\varnothing \leq 5,0$ см; применяемая фотоэмульсия — изохром АС-1, чувствительность — 110 ед. ГОСТ.

Как видно из приведенных данных, установка позволяет моделировать телескопы с апертурой до 50 м. Ее можно применять также для моделирования интерферометров больших баз (меньше 50 м, параметры линзы L_2). Значения параметров моделируемого телескопа (апертура и фокусное расстояние) зависят от чувствительности применяемого фотоматериала в качестве детектора. Так, при получении спекловых изображений для телескопов со светосилой 1:175, $f_3 = 105$ см, $\lambda_{\text{эфф}} = 546$ нм, $\alpha'' = 0,018$ для аэрофотопленки изохром АС-1 время экспозиции $t_{\text{эксп}} = 6$ мин.

В первой серии экспериментов моделировался телескоп с апертурой 6,2 м и эквивалентным фокусным расстоянием $f = 1050$ м. Параметры моделей были следующими:

1-я модель: «двойная контактная система», каждый из компонентов — дифракционный предел телескопа;

2-я модель: «затменная система» с соотношением диаметров — 0,58, больший компонент соответствует дифракционному пределу телескопа;

3-я модель: равномерно светящийся диск, угловой диаметр которого соответствует дифракционному пределу телескопа.

Полученные спекловые картинки и их пространственные спектры удовлетворительно отражают наблюдательный мате-

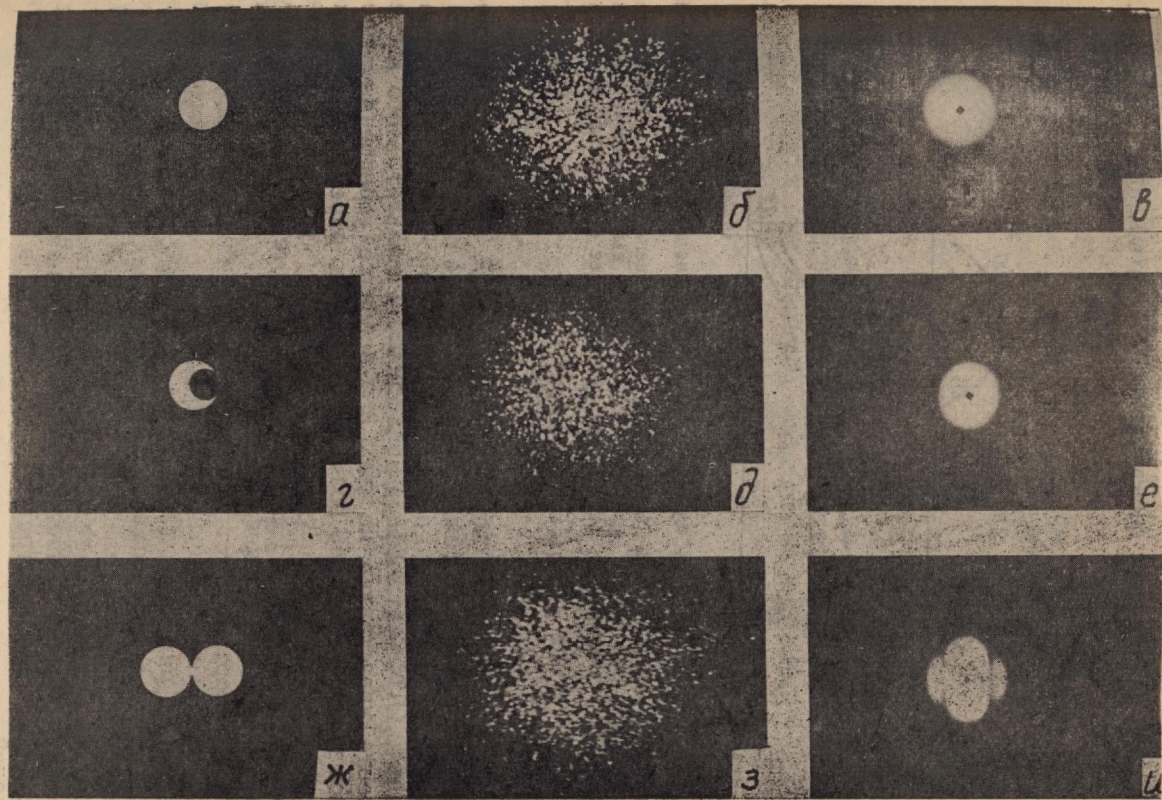


Рис. 2. Спекловые изображения (б, д, з) и пространственные спектры (в, е, и) моделей (а, г, ж) соответственно

риал, получаемый на больших телескопах с нулевой атмосферной дисперсией (рис. 2).

Зная достаточно уверенно распределение яркости по модели № 3, а значит и ее спектр мощности $m_3(\omega)$, имея простран-

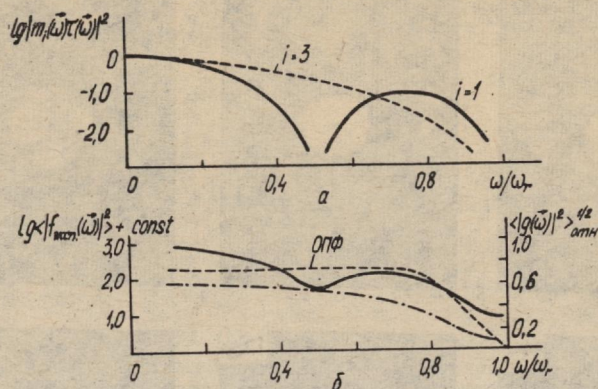


Рис. 3. Расчетные (а) и экспериментальные (б) радиальные разрезы моделей одиночной ($i=3$) и двойной ($i=1$) звезд соответственно; $\tau(\omega)$ — ОПФ телескопа. Штриховой линией показана относительная высокочастотная составляющая ОПФ «телескоп + атмосфера» установки (ее ось ординат на рисунке б — справа: $\langle |g(\omega)|^2 \rangle_{\text{отн}}^{1/2}$)

ственный спектр этой же модели $|f_{\text{эксп}}(\omega)|^2$, полученной на когерентной установке (было усреднено 32 радиальных промера), удалось восстановить информацию о высокочастотной составляющей ОПФ «атмосфера+телескоп». Результат этого эксперимента представлен на рис. 3. Сравнение усредненных промеров моделей № 1 и 3 позволило уверенно определить граничную частоту пространственных спектров (минимум в спектре мощности модели № 1 соответствует частоте $\omega=0,5$, поскольку угловое расстояние между компонентами «двойной контактной системы» соответствует дифракционному пределу телескопа). Сравнение теоретического распределения спектра мощности моделей и радиальных промеров пространственных спектров, полученных в эксперименте, позволило оценить уровень плато ОПФ «атмосфера+телескоп», он лежит в интервале 1—10% от уровня энергии центрального максимума. Точнее оценить уровень не представляется возможным из-за потери информации на нулевой пространственной частоте в спектре мощности моделей.

Результаты экспериментов позволили также количественно сравнить оптические параметры земной атмосферы с фазовой средой установки по параметру Фрида r_0 , который связан с уг-

ловыми размерами изображения спекловой картины $\Delta\theta$ выражением [3]

$$r_0 \approx \frac{\lambda}{0,455\Delta\theta}, \quad (3)$$

где λ — длина волны наблюдения.

В нашем случае $\lambda = 546$ нм, $\Delta\theta \approx 2''$, следовательно, $r_0 = 12,5$ см. Таким образом, мы нашли удовлетворительное согласие с параметром Фрида для земной атмосферы $((r_c)_0 = 10-14$ см [4]).

Вторая серия экспериментов относилась к моделированию 25-метрового телескопа с фокусным расстоянием 4000 м. В качестве модели из первой серии экспериментов взята модель № 2, яркий компонент которой имел $\alpha = 0'',018$. Как показывает анализ результатов моделирования, детали, угловые размеры которых $\sim 0,6\alpha''$, на звездных дисках с диаметрами $\alpha'' \sim 0'',02$ можно уже обнаружить на отдельных изображениях серии спекл-интерферометрических наблюдений, полученных с помощью 25-метрового телескопа.

Выводы. Применение обсуждаемой установки к исследованию метода спекл-интерферометрии оправдано прежде всего потому, что сравнительно легко получается спекловая картина интересующей модели в плоскости изображения Ф. В нашей установке имеется возможность моделирования спекловых картин моделей до граничной частоты интересующих больших телескопов. Как видно из проведенных экспериментов, получающийся пространственный спектр «затменной системы», когда «яркий компонент» соответствует дифракционному пределу телескопа, чувствителен к «темному спутнику» при отношении их диаметров $\geq 0,6$. Таким образом, представляется реальная возможность получения информации о размерах «затменных компонентов», находящихся за пределами дифракционного разрешения телескопов. Следует ожидать, что с созданием телескопов с апертурами диаметром ~ 25 м можно различать структуру изображения звезд с угловыми размерами $\geq 0'',01$.

Предлагаемая установка может быть применена для большого круга задач, где имеется необходимость получать ожидаемый «отклик» наземных или космических телескопов, при наблюдении конкретных астрономических объектов.

Список литературы: 1. Захожай В. А. Возможности спекл-интерферометрии при наблюдении затменных переменных систем (результаты машинного моделирования). — Вестн. Харьк. ун-та, 1981, № 223. Методы обработки астрономических и космических изображений, вып. 16, с. 60—63. 2. *Bonneau D. and Zabeysie A.* Speckle interferometry color dependent limb darkening evidenced on Alfa Orionis and Omicron Ceti. — *Astroph. Journ*, 1973, 181, L1—L4, p. 251—254. 3. *Korff D.* Analysis of method for obtaining near-diffraction-limited information in the presence of atmospheric turbulence. — *Journ. Opt. Soc. Am.*, 1973, 63, N 8, p. 971—980. 4. *Schneiderman A. M. and Koro D. P.* Measurement of r_0 with speckle interferometry. — *Journ. Opt. Soc. Am.*, 1978, 68, N 3, p. 348—351.

Поступила в редколлегию 11.10.82.