

УДК 523.33

О точности фотографических наблюдений Луны на фоне звезд

Р. Л. Семеренко

Рассмотрены ошибки метода мгновенных экспозиций: влияние атмосферной турбулентности, часового ведения телескопа, неравномерности экспозиции различных зон изображения Луны. Показано, что эти погрешности не превышают точности измерений $0.2''$. Определены оптимальное количество пластинок, получаемых за один вечер наблюдений, и максимально допустимая величина экспозиции Луны при методе мгновенных экспозиций.

Из сравнения опорных звездных каталогов SAO и AGK3 сделан вывод, что определяющая ошибка метода обусловлена опорным каталогом.

ON THE ACCURACY OF PHOTOGRAPHIC OBSERVATIONS OF THE MOON IN STAR BACKGROUND, by Semerenko R. L.— The errors of the method of snap exposures (effect of atmospheric turbulence, guiding of the telescope and non-uniformity of the images of different lunar zones) have been considered. These errors do not exceed the measurement accuracy ($0.2''$). It has been determined the optimum number of plates for one observational night and maximum acceptable value of the exposure in the method. Comparison of SAO and AGK3 catalogues shows that main error of the method is due to the reference catalogue.

В Главной астрономической обсерватории АН УССР на двойном длиннофокусном астрографе (ДДА) ($D=40$ см, $F=5.5$ м) с 1978 г. ведутся регулярные фотографические наблюдения Луны на фоне звезд.

Наблюдения Луны одновременно со звездами достаточно трудны из-за различия в яркости опорных звезд и Луны, а также её заметного собственного движения относительно звезд. На практике применяются различные приспособления для фотографирования Луны, в которых реализуется метод мгновенных или длительных экспозиций. Сущность метода, применяемого в ГАО АН УССР, а также методика обработки фотографий Луны на фоне звезд описаны в [2]. Луна фотографируется с помощью специального затвора-вертушки, представляющего собой два жестко соединенных круглых экрана (рис. 1).

Экраны, находясь на одной оси, закрывают Луну во время звездной экспозиции, а потом, поворачиваясь на 180° , позволяют получить в центре пластинки изображение Луны. В практике фотографических наблюдений Луны применяется затвор типа следующих друг за другом экранов [3, 6], чтобы не вносить ошибки из-за неравномерности экспозиции Луны. Однако на длиннофокусном инструменте технически сложнее применять этот способ; кроме того, возможно дрожание телескопа в направлении, перпендикулярном к оптической оси телескопа из-за срабатывания такого типа затвора. Срабатывание затвора-вертушки происходит в плоскости, параллельной оптической оси инструмента, что не вносит заметных искажений в построение изображения Луны.

Рассмотрим некоторые ошибки, влияющие на точность получаемых результатов.

Измерения. Полученные фотопластинки измерялись на приборе «Аскорекорд» в четырех положениях, с поворотом реверсионной призмы каждый раз на 90° . Средний диаметр измеряемых кратеров составляет 12—13 км, или, в масштабе ДДА, 200 мкм. При экспозиции 30 с основная масса опорных звезд — восьмой звездной величины. На пластинках ДДА их диаметр составляет тоже около 200 мкм.

Из всего массива наблюдений произвольно выбраны десять пластинок, на которых для каждой звезды и каждого кратера определялась средняя квадратичная ошибка одного измерения. В целом, точность измерений можно характеризовать одной величиной ± 5.3 мкм (или $\pm 0.2''$), что согласуется, в частности, с данными [8]. Тот

факт, что точность измерения кратеров практически не отличается от точности измерения звезд, объясняется специальным подбором небольших по диаметру (первый список МАС [9] с дополнениями) кратеров, в силу чего последние представляют собой звездообразные объекты.

Атмосфера. Второй источник ошибок в методе мгновенных экспозиций — влияние атмосферной турбулентности, вследствие которой изображение Луны или ее отдельных частей может оказаться смещенным относительно опорных звезд. Амплитуда случайных атмосферных дрожаний составляет $0.5''$ [1, 3, 4], а периоды дрожаний — величину порядка $0.1-0.2$ с. [4], что близко к времени экспозиции Луны.

В рамках этого же вопроса получены две серии (11 пластинок) звездных следов скопления Плеяд. Нас интересовала не природа выбросов на звездных следах,

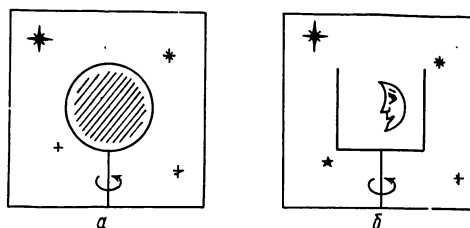


Рис. 1. Схема действия затвора типа вертушки: а) затвор закрыт; б) затвор открыт

а суммарный эффект влияния атмосферы (мерцания, дрожания, аномалии рефракции), независимо от того, являются именно явление ответственно за появление выбросов.

Следы измерялись на координатометре «Аскорекорд» (табл. 1). На каждой пластинке измерялось до 30 звездных следов. В этой таблице приведены: номер пластинки по журналу наблюдений, дата и момент наблюдений по всемирному времени, зенитное расстояние. Остальные данные поясняются в примечании к табл. 1. Вероятность появления выброса V определяется как

$$V = (SD/L) \cdot 100. \quad (1)$$

При дрожании изображение смещается как единое целое, поэтому можно предположить, что размер изопланатической области световой волны, идущей от звезды к телескопу, сравним с диаметром его объектива [5].

С другой стороны, время экспозиции Луны составляет всего $V' = 0.3\%$ от величины экспозиции опорных звезд. Если эту величину понимать также, как вероятность появления выброса на звездных следах, становится очевидным, что результирующая вероятность появления выброса (или смещения изображения Луны как целого) в момент экспозиции Луны будет представлять собой произведение вероятностей V и V'

Таблица 1. Результаты измерений пластинок со звездными следами

Номер пластинки	ДАТА UT	z	КОВ	КГ	SD, мм	AR, мм	L, мм	V, %
274	1982.02.10.16 ^h 57 ^m	35°	—	—	—	—	—	—
275	1982.02.10.17 09	37	1	0	0.30	0.16	163	0.2
276	1982.02.10.17 21	38	2	2	1.60	0.05	183	0.9
277	1982.02.10.17 44	42	1	0	0.30	0.15	188	0.2
278	1982.02.10.17 55	43	2	0	0.60	0.08	176	0.3
291	1982.03.10.18 06	49	0	1	2.02	—	157	1.3
292	1982.03.10.18 18	51	1	1	0.95	0.14	170	0.6
293	1982.03.10.18 27	53	1	0	0.36	0.06	138	0.3
294	1982.03.10.18 44	55	—	—	—	—	—	—
295	1982.03.10.18 53	57	2	2	1.43	0.13	133	1.1
296	1982.03.10.19 04	59	—	—	—	—	—	—
Среднее по 8 пластинкам			1.25	0.75	0.95	0.10	164	0.6
Среднее по 11 пластинкам			0.91	0.60	0.76	0.08	164	0.5

Примечание: КОВ — количество одиночных выбросов, КГ — количество групп выбросов, SD — суммарная длина выбросов на следе, AR — амплитуда выбросов, понимаемая как максимальный размах, L — длина следа, V — вероятность появления выброса.

и составит около 0.15 %. Такую величину можно не принимать во внимание. Всё же следует указать на то, что в течение вечера мы получаем не одну, а несколько пластинок с целью исключения или уменьшения влияния атмосферных флуктуаций. Как это следует из табл. 1, на пластинках № 274, 294, 296 вообще не обнаружено заметного искажения звездных следов.

Часовое ведение телескопа. Для исключения или сведения к минимуму ошибки часового ведения на двойном длиннофокусном астрографе ГАО АН УССР установлен часовой механизм, работающий от шагового двигателя ШД-4М-УЗ с задающим высокостабильным кварцевым генератором частоты. Достоинством шагового двигателя является отсутствие зависимости скорости вращения его выходного вала от нагрузки на

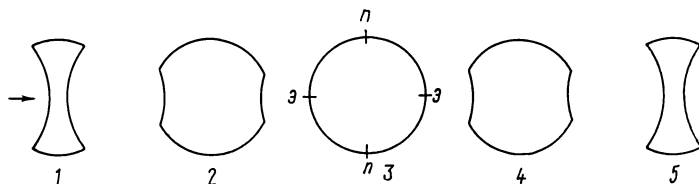


Рис. 2. Схема построения изображения Луны: 1, 5 — начало и конец экспозиции; 2, 4 — промежуточные моменты; 3 — момент полностью открытого затвора

валу, что служило раньше источником ошибок часового ведения. Получено несколько пробных пластинок при различных значениях часового угла и склонения без гидирования. Согласно протоколу испытаний часового механизма, «наблюдаемый объект находился на кресте нитей гида 30 минут», на пластинке за это время случайные атмосферные аномалии усредняются, и изображения звезд остаются практически круглыми, что может служить достаточно надежной характеристикой часовой ведения телескопа.

Неравномерность экспозиции. При фотографировании Луны с помощью затвора-вертушки (рис. 1) появляется неравномерность экспозиции различных зон изображения Луны. Последовательность фаз построения изображения Луны представлена на рис. 2. Из рисунка видно, что полярные области изображения (ПП) экспонируются с большей длительностью, чем экваториальные (ЭЭ), что вносит деформации в изображение Луны, так как Луна имеет значительное собственное движение среди звезд (0.5"/с.). Следует отметить, что области ПП и ЭЭ не есть собственно полярные или экваториальные зоны Луны, так как позиционный угол лунной оси меняется в достаточно широких пределах ($\pm 24^\circ$).

Построена математическая модель затвора-вертушки и поэтапно прослежен процесс построения изображения Луны. Математически задача сводится к определению координат точек пересечения эллипса (проекция края экрана вертушки в плоскости пластинки) и круга (лунного изображения). В действительности эллипс будет с изменяющимися во времени параметрами: от круга (предельный случай полностью закрытого затвора-вертушки) до прямой линии (предельный случай полностью открытого затвора), но надежные результаты получаются и в случае более простой модели.

Принимая максимальную для наблюдений величину экспозиции Луны 0.1 с находим, что $t_{\text{Э}} = 0.012$ с, а $t_{\text{П}} = 0.088$ с, где $t_{\text{Э}}$, $t_{\text{П}}$ — величины экспозиций соответственно для экваториальной и полярной областей изображения Луны. Максимальная разность продолжительностей экспозиции полярных и экваториальных областей составляет $t_{\text{max}} = 0.076$ с. Принимая во внимание величину средней видимой угловой скорости движения Луны среди звезд $V_{\text{ц}} \sim 0.5''/\text{с}$, находим, что относительная ошибка положений полярных и экваториальных объектов изображения составит:

$$\sigma_{\text{Э}}^{\text{П}} = V_{\text{ц}} t_{\text{max}} = 0.038'' \quad (2)$$

или (в масштабе пластинки) 1.0 мкм.

Абсолютная величина этой ошибки зависит от максимальной величины экспозиции полярных областей и, следовательно, составит $\sigma_{\text{Abs}} = 0.044''$ (1.2 мкм), что находится ниже точности измерений. Максимально допустимая величина экспозиции Луны, когда деформации изображения еще не превышают точности измерений 0.2'' (5.3 мкм), составляет 0.45 с.

Следует отметить, что при использовании затвора-вертушки имеет место изменение фотографической плотности по поверхности изображения Луны. Плотность почернения изображений полярных и экваториальных объектов различна. Различие достигает 76 %. Вопрос о том, как это различие влияет на качество изображений кратеров и, следовательно, на их положения, требует специального исследования.

Однако можно попытаться оценить влияние различной плотности почернения в разных зонах изображения Луны на положение кратеров по средним квадратичным ошибкам их измерения. Для этого Луна была разделена на четыре основные зоны аналогично тому, как строится ее изображение (рис. 2). Для каждой зоны находились средние квадратичные ошибки измерений кратеров, которые затем усреднялись. Полученные результаты находятся в пределах 4.5—5.1 мкм, независимо от плотности почернения в зоне, и говорят о незначительных различиях в точности определения положений кратеров в этих зонах.

Сравнение каталогов SAO и AGK3. Координаты опорных звезд берутся из звездного каталога SAO, так как при наблюдениях Луны не всегда можно использовать каталог AGK3. Тем не менее, была предпринята попытка заменить координаты и собственные движения звезд из каталога SAO на координаты из AGK3 для тех наблюдений, которые позволяют его использовать ($\delta > -2^\circ$), с целью оценить различия в конечных результатах — поправках к координатам Луны. В табл. 2 приведены разности R_α и R_δ (вида $\Delta\alpha \cos\delta$ и $\Delta\delta$) в поправках к координатам Луны. В первом и третьем столбцах соответственно — номер серии и номер пластинки по журналу наблюдений.

Обращает на себя внимание значительное различие результатов в серии № 4 (по склонению) и в серии № 5 (по прямому восхождению). В табл. 3 даются непосредственные разности R_α и R_δ (вида $\Delta\alpha \cos\delta$ и $\Delta\delta$) между координатами α и δ опорных звезд для серий № 4 и № 5. Разности даны на эпоху 1950.0 и на эпоху наблюдений

Таблица 2. Разности поправок координат Луны

Номер серии	Дата UT	Номер пластинки	SAO—AGK3		δ
			R_α	R_δ	
1	1978.09.18.22 ^h 32 ^m	50	0.70"	—0.23"	6°58'
	22 48	52	0.80	—0.25	7 00
	23 03	53	0.44	—0.16	7.03
	23 33	54	—0.14	—0.84	7 08
	23 38	55	—0.15	—0.86	7 08
Среднее			0.33	—0.47	
2	1979.02.10 20 34	56	0.16	—0.60	15 03
	20 44	57	0.34	—0.52	15 02
	20 50	58	0.59	—0.15	15 01
	21 41	62	0.49	0.07	14 56
Среднее			0.40	—0.30	
3	1979.02.11 20 59	65	0.07	—0.04	12 31
	21 09	66	0.58	—0.07	12 30
	21 18	68	0.44	—0.04	12 29
	21 25	69	0.60	—0.04	12 28
Среднее			0.42	—0.05	
4	1979.10.07 23 32	91	0.98	2.52	11 27
	23 38	92	0.31	2.27	11 28
	23 42	93	—0.25	1.12	11 29
	23 49	94	—0.43	0.76	11 30
	23 54	95	—0.37	0.85	11 31
Среднее			0.05	1.50	
5	1979.10.08 23 47	97	2.06	—0.05	14 45
	23 53	98	1.74	—0.05	14 45
	00 00	99	1.31	—0.11	14 46
	00 06	100	1.77	—0.19	14 47
	00 10	101	1.35	—0.05	14 47
	00 16	102	1.36	—0.04	14 48
	01 10	107	0.13	—0.31	14 54
Среднее			1.39	—0.11	

1979.8. Из этой таблицы следует, что различия между координатами большинства опорных звезд возрастают с течением времени, превышая в отдельных случаях 1".

Согласно [7], система координат, реализуемая каталогом AGK3, воспроизводит систему фундаментального каталога FK4, но не каталога SAO. Кроме того, суммарная ошибка каталога SAO на эпоху 1980.0 может превышать $\pm 0.7''$, а каталога AGK3 — величину $\pm 0.3''$, что находится в соответствии с приведенными результатами.

Таблица 3. Разности координат опорных звезд

Номер звезды по SAO	SAO—AGK3 эпоха 1950.0		SAO—AGK3 эпоха 1979.8		Номер звезды по SAO	SAO—AGK3 эпоха 1950.0		SAO—AGK3 эпоха 1979.8	
	R_α	R_δ	R_α	R_δ		R_α	R_δ	R_α	R_δ
Серия 4					Серия 5				
093134	0.14"	0.34"	0.58"	0.58"	093590	0.12	-1.03	0.28	-1.65
093137	0.05	0.26	0.17	-0.43	093596	-0.15	0.09	-1.09	-0.18
093139	-0.17	0.00	-0.17	-0.18	093599	0.29	0.18	0.03	0.15
093150	-0.15	0.23	-0.46	0.11	093603	0.00	0.07	-0.04	0.04
093151	-0.34	0.22	-0.29	0.16	093605	0.49	-0.15	0.58	-0.78
093186	-0.11	0.94	0.29	1.21	093613	-0.05	-0.61	-0.92	-0.76
110859	-0.49	0.86	1.40	0.74	093614	-0.16	-0.23	-0.72	-0.41
093198	-0.91	-0.06	-1.68	-0.09	093617	-0.26	0.26	-0.42	-0.01
110862	-0.58	-0.47	-0.58	-0.68	093620	0.32	-0.54	0.89	-1.38
093200	-0.67	-0.02	-0.76	0.21	093648	0.60	0.07	0.95	-0.26
093202	0.20	0.26	0.90	0.40	093651	0.26	0.02	0.44	0.02
093204	-0.08	0.02	0.50	-0.42	093655	-0.08	-0.28	0.09	-0.31
					093657	0.09	-0.09	-0.39	-0.21
					093660	-0.25	-0.24	-0.55	-0.45
					093664	-0.51	0.03	-0.73	0.00

Заключение. На основании изложенного можно сделать следующие выводы:

1. Определяющей ошибкой метода мгновенных экспозиций является ошибка, обусловленная случайными атмосферными аномалиями, возмущениями фронта волны, и достигающая 0.5". Для того, чтобы влияние этой ошибки было сравнимо с точностью измерений (0.2"), необходимо за один вечер наблюдений получить ~6 пластинок, что вполне реально.

2. Точность определения положений Луны (безотносительно к используемому методу мгновенных или длительных экспозиций) лимитируется, главным образом, ошибками опорных звезд каталогов, которые, как показано, могут быть значительными.

1. Гаврилов И. В. Фигура и размеры Луны по астрономическим наблюдениям.— Киев: Наук. думка, 1969.—148 с.
2. Кислюк В. С., Василенко Н. А., Семеренко Р. Л., Колмох В. Б. Определение углов ориентировки селенодзической координатной системы по данным фотографических позиционных наблюдений Луны // Астрометрия и астрофизика.— 1983.— Вып. 48.— С. 78—84.
3. Козаренко Б. И. Фотографирование Луны среди звезд на широкоугольном астрографе АФР №—1 // Сообщ. Гос. астрон. ин-та им. П. К. Штернберга.—1962.— № 121.— С. 25—68.
4. Колчинский И. Г. Оптическая нестабильность земной атмосферы по наблюдениям звезд.— Киев: Наук. думка, 1967.—182 с.
5. Колчинский И. Г. Изопланатизм по углам прихода световых лучей в телескопах // Астрометрия и астрофизика.—1983.— Вып. 48.— С. 43—52.
6. Михайлов А. А., Поттер Х. И. Фотографические наблюдения Луны в Пулковке // Тр. 12-й астрометр. конф. СССР.— М., 1957.— С. 414—415.
7. Положенцев Д. Д., Поттер Х. И. Сравнение каталогов SAO и AGK3 // Астрон. циркуляр.—1983.— № 1299.— С. 7—8.
8. Хабибуллин Ш. Т., Ризванов Н. Г. Шестнадцатидюймовый астрограф астрономической обсерватории им. Энгельгардта // Тр. Казан. городской астрон. обсерватории.— 1976, № 41, 42.— С. 104—109.
9. Mouisoulas M., Kinsler D. C. Selenodetic control network // The Moon.— 1976.— 15.— P. 223—240.