

УДК 521.1

АНАЛИЗ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ И ПОСТРОЕНИЕ ЦИФРОВОЙ МОДЕЛИ ЛУННОЙ ЛИБРАЦИОННОЙ ЗОНЫ

© 2021 г. К. О. Чуркин¹, Ю. А. Нефедьев^{1,*}, А. О. Андреев^{1,2,3},
Н. Ю. Демина¹, Е. В. Кронрод⁴

¹ Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань, Россия

² Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

³ Казанский государственный энергетический университет, Казань, Россия

⁴ Институт геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского РАН, Москва, Россия

*E-mail: star1955@yandex.ru

Поступила в редакцию 23.12.2019 г.

После доработки 18.03.2021 г.

Принята к публикации 31.03.2021 г.

Одной из актуальных задач современной астрономии является наблюдение и исследование быстро протекающих небесных процессов. Это можно сказать и о наблюдениях покрытий звезд Луной фотоэлектрическим методом. Такие измерения представляют собой уникальный и важный материал как для определения диаметров звезд на основе анализа дифракционной кривой изменения блеска покрываемой звезды, так и для построения модели либрационной зоны Луны. Данная работа сфокусирована на построении цифровой модели изогипс (DMI), характеризующих положение 40 тысяч селеноцентрических радиус-векторов в зависимости от положения лунного лимба.

Ключевые слова: селенодезические исследования, цифровая база фотоэлектрических покрытий, модель либрационной зоны Луны, селеноцентрическая система координат

DOI: 10.31857/S000462992108003X

1. ВВЕДЕНИЕ

В процессе наблюдения покрытия звезд Луной фотоэлектрическим методом изменение яркости покрываемой звезды в среднем происходит за 30 мс. Данное явление применяется для построения дифракционной кривой, на основе которой определяется угловой диаметр у звезды, покрываемой краем Луны [1]. Чтобы динамическая модель покрытия имела необходимое для решения данной задачи разрешение, используется специализированное высокоточное оборудование. В нашем случае необходим сам момент покрытия, точность фиксации которого для фотоэлектрических покрытий может достигать 1 мс, что в идеальном случае наличия точных эфемерид и карт краевой зоны Луны позволило бы выполнять измерения линейных размеров объектов в области лунного края до нескольких метров. Однако в настоящее время данные точности пока не достижимы по упомянутым выше причинам. Моменты времени фотоэлектрических покрытий построенной цифровой базы приводятся с усредненной точностью 0.01 с, что соответствует существующим реалиям. Более предметно следует сказать следующее. Рассматривая вопрос точности наблюдений покрытий, Моррисон [2] обозначил

стандартную невязку Δ_s как разницу между положением на небесной сфере наблюдаемой точки краевой зоны Луны, в которой происходит покрытие, и координатным положением покрываемой звезды. Данные значения определяются на момент покрытия. Моррисон [3] на основе анализа покрытий Плеяд показал, что невязки Δ_s включают следующие ошибки, приведенные в табл. 1 (столбец 3).

Для ошибки лунной эфемериды (№ 3) $j = 2$ означает, что используется эфемерида движения Луны Брауна, а EPM — Ephemeris of Planets and Moon [4].

Столбец 4 в табл. 1 содержит ошибки для идеального случая редукции наблюдений с учетом расчетных точностей современных эфемерид и теорий. Для фотоэлектрических покрытий ошибка № 1 может составлять $\pm 0.001^s$. Но здесь необходимо отметить, что данная точность соответствует внутренней фиксации процесса покрытия, а не точность привязки полученных отсчетов к эталонной временной шкале, поэтому мы ввели ошибку № 6. Далее будем считать ошибку определения звездных положений № 2 с учетом планируемых результатов миссии GAIA, равной поряд-

Таблица 1. Перечень ошибок в невязках Δs

№	Перечень ошибок	Morrison [2]	Today
1	Ошибка отсчета времени покрытия	$\pm 0.20^s$	$\pm 0.001^s$
2	Ошибка положения звезды	$\pm 0.26''$	$\pm 0.001''$
3	Ошибка лунной эфемериды	$\pm 0.16''^*$	$\pm 0.001''^{***}$
4	Ошибка за неровности лунного края	$\pm 0.20''$	$\pm 0.010''$
5	Ошибка положения наблюдателя	$\pm 0.10''$	$\pm 0.001''$
6	Привязка к эталонной временной шкале	$\pm 0.01^s$	$\pm 0.010^s$

Примечание. * $j = 2$; ** EPM.

ка 1 mas^1 . В реальности данная ошибка соответствует моменту наблюдения звезды системами GAIA, однако, учитывая, что собственные движения покрываемых звезд берутся из классических каталогов звездных положений, так как не могут быть определены на основе кратковременного наблюдательного периода космической миссии, мы получим точности, сопоставимые с точностью третьего столбца. Относительно ошибки № 3, как следует из [4], эфемерида EPM ориентируется в систему ICRF2 с точностью выше 0.2 mas , поэтому ошибку № 3 можно считать малой по сравнению, например, с № 4, но мы все-таки приняли ее равной 1 mas . Ошибку № 4 с учетом поправок Моррисона [5] можно считать равной $\pm 0.010''$. Будем считать, что и ошибка № 5 при использовании современных навигационных систем также на порядок меньше № 4. Ошибка № 6 точности привязки к эталонной временной шкале зависит от применяемого оборудования получения и хранения времени, и определить ее общее значение затруднительно, поэтому мы приняли ее значение равным $\pm 0.01^s$ как наиболее вероятное для большинства станций наблюдений, получающих сигналы точного времени по радиосетям, хотя в последнее время данная ошибка также в большинстве случаев может составлять незначительную величину. Таким образом, в идеальном случае суммарно мы имеем усредненную ошибку в невязках Δs , равную $\pm 0.013^s$, которая соответствовала бы ошибке временного отсчета момента покрытия $\pm 0.026^s$, плюс ошибка № 6, что, в свою очередь, соответствует ошибке в расстоянии $\pm 24 \text{ м}$ на поверхности Луны. Таким образом, точность 0.01 с для фотоэлектрических покрытий, принятая в мировых базах покрытий и используемая в настоящей работе, соответствует точности стан-

дартной ошибки невязки Δs . Данная точность достаточна для тех задач, которые решаются в данной работе.

Для создания DMI требуется именно момент самого покрытия звезды Луной, а не время прохождения звезды по апертуре телескопа первой зоны Френеля. Сравнительный анализ DMI с данными электронных пространственных моделей поверхности Луны LDS [6], созданных на основе оцифровки профилей лунного лимба [7], показал, что эти профили имеют разные поверхности отсчета данных и эллиптическую форму, а не сферическую. При этом цифровые профили системы DMI относятся к селеноцентрической сферической динамической системе координат. Хотя существуют точные теории движения Луны в динамической системе координат, основанные на лазерной локации Луны и космических исследованиях с точностью до нескольких миллисекунд, анализ различных моделей фигуры Луны остается сложной задачей [8, 9]. Причиной этого является то, что очень трудно определить систему координат физической поверхности Луны и оценить ее соответствие инерциальной системе. Особенно это касается либрационной зоны. Существует множество моделей лунной либрационной зоны, построенных разными методами, однако точность этих данных неоднозначна. Другими словами, лунный рельеф имеет очень сложную нелинейную структуру, и традиционные методы исследования в большинстве случаев неприемлемы [10, 11].

Разработка методов идентификации и анализа нелинейных сложных систем является предметом значительного интереса [12–14]. Для решения проблемы может быть применен метод, в котором используется привязка точек лунного лимба к звездам [15]. Такой подход можно осуществить с помощью редукции фотоэлектрических наблюдений покрытий звезд Луной. Применение этого метода требует проведения большого количества измерений и расчетов. Следует отметить, что анализ макроповерхностей небесных тел, основанный на фотоэлектрических покрытиях, ранее в мировой практике не проводился. Суть метода заключается в следующем: либрационная зона рассматривается в связи с тем, что существует множество моделей ее фигуры, и их изучение может служить апробацией фотоэлектрического метода для построения модели либрационной зоны в виде DMI, которую в дальнейшем можно будет оценить на достоверность с помощью фрактального метода [16, 17]. DMI содержит изогипсы, охватывающие область более 10° с обеих сторон среднего положения либрационной линии [18]. Для определения вариаций высоты вычисляются координаты, введенные Гайном [19]: позиционные углы P_n исследуемых точек (селеноцентрическая дол-

¹ mas – milli arc second – угловая миллисекунда дуги.

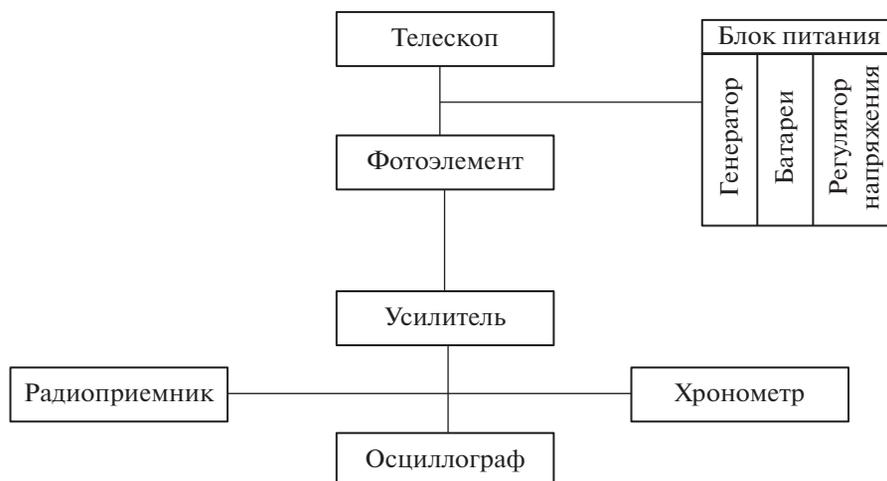


Рис. 1. Блок-схема модифицированного телескопа для наблюдения фотоэлектрических покрытий.

гота, которая измеряется вдоль средней либрационной линии от лунного северного полюса до текущего положения проекции радиуса-вектора), и D_n -координаты, представляющие широту Гайна, которая отсчитывается от либрационной линии и положительна для той части лунного диска, которая находится ближе к наблюдателю.

К настоящему моменту карты Уоттса [6] являются наиболее подробной моделью лунной либрационной зоны, но тем не менее система координат данной модели не совпадает с динамической селеноцентрической системой. Поэтому основными задачами настоящей работы являлись работы по созданию цифровой базы покрытий звезд Луной, полученных фотоэлектрическим методом, и построению цифровой модели либрационной зоны Луны (DMI), содержащей 40 тыс. опорных точек.

Для оценки достоверности DMI был выполнен сравнительный анализ построенной модели с цифровой моделью карт Уоттса [7]. Данное исследование также предполагало построение согласно либрациям диаграмм-изогипс параметрических связей сравниваемых моделей. В дальнейшем с использованием DIM можно определить параметры центра масс Луны относительно геометрического центра фигуры Луны и отличия физической лунной сферы относительно идеальной геометрической сферы.

2. ПОСТРОЕНИЕ БАЗЫ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ

Покрытием звезд Луной является явление, при котором Луна закрывает своим диском другое светило, в данном случае — звезду. Среди данного типа явлений можно выделить следующие: покрытие темной стороной диска, идентификация в

нашей базе представлена аббревиатурой $-DD$, открытие из-за темной стороны диска $-RD$, покрытие светлой стороной диска $-DB$, а также открытие из-за светлой стороны диска $-RB$. В свою очередь существуют и касательные покрытия. При редукции наблюдений любого из перечисленных выше явлений имеется ряд проблем, одной из которых является учет за неровности лунного края. Наиболее точным из существующих в настоящий момент является метод фотоэлектрической фиксации явления покрытия, при котором момент времени покрытия регистрируется с использованием данных службы точного времени, синхронизированных с эталонным атомным временем. Как отмечалось выше, точность таких наблюдений может составлять 0.001^s , что на два порядка превосходит визуальный метод. Поэтому самым главным минусом визуальных или оптических методов является слишком низкая точность по сравнению с фотоэлектрическим. На рис. 1 представлена концептуальная блок-схема установки для метода фотоэлектрической фиксации покрытий. Сигнал о всплеске или падении интенсивности потока светового излучения фиксируется через телескоп фотоэлементом, после чего происходит усиление сигнала и визуализация его на осциллографе. Далее с помощью хронометрического оборудования регистрируется точное время покрытия.

Для построения базы фотоэлектрических покрытий в качестве первоисточников использовались: а) данные за период 1940–1980 гг., составленные как единый каталог [20]; б) данные наблюдений 1980–1995 гг., собранные и оцифрованные ручным способом; в) данные наблюдений, выполненные за период 1995–2005 гг. и каталогизированные ILOC (International Lunar Occultation Center) (см. рис. 2, 3).

Исходный вариант каталога

Date	Time (UTC)			Age	Mag	Star	PH	STN	TEL	OBS	REC	O-C	WH	K-R	K	USNO	SAO	DM			
1	1	1	28	37.4	6.3	146729	DD	SFL1	1	1	1	0.19	1.29	358.4	67.5	×	31616	146729	-10		
1	1	1	2	49	37.81	146738	DD	TB16	1	1	1	0.50	-0.82	323.2	32.1	×	31629	146738	-9		
1	1	9	10	39.83	6.7	8.8	31849	DD	TOL.A4	1	1	1	0.37	0.52	316.9	25.5	×	31849	146857	-8	
1	1	9	19	52.5	6.7	8.8	146857	DD	TOGA5	5	1	1	0.43	0.22	315.7	24.2	×	31849	146857	-8	
1	1	9	20	3.5	6.7	8.8	146857	DD	TOGA5	1	1	1	0.16	0.41	315.2	23.8	×	31849	146857	-8	
1	1	9	27	30.6	6.7	8.8	8	6175	DD	TO198	2	1	0	0.37	-0.50	323.5	32.0	×	31849	146857	-8
1	1	9	29	57.90	6.7	8.8	146857	DD	SOZ94	6	1	1	-0.14	-0.15	322.2	30.8	×	31849	146857	-8	
1	1	10	4	56.5	6.7	8.7	146869	DD	TOGB1	5	1	1	0.36	-0.23	301.8	10.3	×	31863	146869	-8	
1	1	10	5	13.0	6.7	8.7	146869	DD	TOGA5	1	1	1	0.06	0.21	301.8	9.8	×	31863	146869	-8	
1	1	10	9	40.8	6.7	8.7	8	6179	DD	TO198	2	1	0	0.33	0.55	309.9	18.4	×	31863	146869	-8
1	1	10	12	9.10	6.7	8.7	146869	DD	SO294	6	1	1	0.23	0.28	307.9	16.4	×	31863	146869	-8	
1	1	16	40	17.1	7.0	8.8	146991	DD	SZ573	38	15	15	0.05	0.11	296.1	4.3	×	32109	146991	-7	
1	1	18	28	45.8	7.0	6.7	32163	DD	SZ156	21	1	1	0.40	-0.36	304.9	12.9	×	32163	147017	-6	
1	1	18	28	48.0	7.0	6.7	32163	DD	SZ156	23	36	36	-0.17	-0.37	304.9	13.0	×	32163	147017	-6	
1	1	18	32	8.6	7.0	6.7	3529	DD	SZ556	4	1	1	0.50	-0.24	300.9	8.9	×	32163	147017	-6	
1	1	18	34	45.7	7.1	6.7	3529	DD	SZ570	1	1	1	0.38	0.11	296.5	4.5	×	32163	147017	-6	
1	1	18	36	26.8	7.1	6.7	3529	DD	SZ552	7	1	1	0.74	-0.75	287.6	35.5	×	32163	147017	-6	
1	1	18	36	45.4	7.1	6.7	3529	DD	SZ587	1	5	5	0.27	-0.70	287.0	35.5	×	32163	147017	-6	
1	1	18	37	44.8	7.1	8.1	32192	DD	TI964	2	1	1	0.16	0.92	330.4	38.5	×	32192	147033	-6	
1	1	18	41	48.6	7.1	8.1	32190	DD	TI964	2	1	1	0.50	0.74	319.6	27.7	×	32190	147032	-6	
1	1	18	59	40.0	7.1	4.6	147042	DD	TI964	2	1	1	0.22	-0.03	25.1	93.2	×	32209	147042	-6	
1	1	19	3	34.1	7.1	8.1	147033	DD	SZ584	12	1	1	1.38	-0.98	341.7	49.7	×	32192	147033	-6	
1	1	19	3	58.3	7.1	8.1	32192	DD	SZ156	21	1	1	0.92	-0.44	346.7	54.8	×	32192	147033	-6	
1	1	19	5	2.1	7.1	8.1	147033	DD	SZ556	4	1	1	0.59	0.29	343.6	51.6	×	32192	147033	-6	
1	1	19	5	35.6	7.1	8.1	32190	DD	SZ156	21	1	1	0.63	-0.43	336.6	44.6	×	32190	147032	-6	
1	1	19	7	1.2	7.1	8.1	147032	DD	SZ556	4	1	1	0.66	-0.53	333.3	41.3	×	32190	147032	-6	
1	1	19	21	3.1	7.1	4.6	32209	DD	SZ6TB	3	1	0	0.50	0.14	39.5	107.	×	32209	147042	-6	
1	1	19	24	33.8	7.1	4.6	3536	DD	SZ587	1	5	5	0.44	1.09	29.1	97.2	×	32209	147042	-6	

Рис. 2. Фрагмент оригинального каталога покрытий ILOC, содержащий и визуальные, и фотоэлектрические наблюдения.

Имея цифровую базу данных наблюдений фотоэлектрических покрытий, с использованием специализированного программного пакета возможно выполнение различных сервисных действий, в частности, сопоставление кодов телескопов и наблюдательных станций, на которых выполнялись измерения, с данными цифровых таблиц для замены этих кодов на конкретные значения геоцентрических положений наблюдателя.

На данный момент имеется заключительный вариант цифрового каталога фотоэлектрических покрытий за промежуток времени с 1960 по 2005 г. (см. рис. 4, 5).

Статистика данных наблюдений по международному каталогу ILOC демонстрирует значительный спад числа наблюдений уже к началу 2000-х годов, после 2005 г. наблюдения покрытий практически не производились. В 2009 г. данный центр наблюдений был закрыт, а развитие методов лазерной локации позволяет проводить работы по созданию лунных эфемерид и построению теорий физической либрации Луны. Здесь следует отметить, что, как отмечено выше, Международный центр лунных покрытий ILOC прекратил свою деятельность в 2009 г., однако аналогичные работы проводятся и координируются International Occultation Timing Association (IOTA), которая представляет собой волонтерскую организацию, цель деятельности которой – прогнозирование, сбор, анализ и публикация наблюдений покрытий. Сайт IOTA² содержит информацию по

² <https://occultations.org>

методам наблюдений и предварительной редукации покрытий как лунных, так и покрытий звезд астероидами, что может быть использовано при исследованиях как профессиональными астрономами, так и любителями. Авторы настоящей статьи планируют в своей дальнейшей работе расширить построенную базу фотоэлектрических покрытий с включением данных IOTA, но это потребует выполнения достаточно серьезного дополнительного анализа.

Редукация фотоэлектрических покрытий предполагает идентификацию покрываемых звезд. Чтобы выполнить такую процедуру, следует изначально иметь информацию о номере покрытой звезды по CZ или SAO-каталогу, и затем уже программным способом осуществляется перевод к заданному каталогу звездных положений, например, в систему HCRF (Hipparcos Celestial Reference Frame). Соответственно, при редукации фотоэлектрических наблюдений необходимо учитывать поправки времени, так как аргументом динамических эфемерид является равномерная временная шкала. Но при этом существует определенная проблема, связанная с корреляцией эфемеридного времени с динамической теорией Луны. Для решения данной задачи производятся соответствующие аппроксимации и адаптации. Динамическое земное время TDT и барицентрическое время TDB являются аргументами в современных лунно-планетных эфемеридах. Соответственно, аргументом эфемериды DE421 [21] служит TDB. Значения TDB позволяют проводить интерполяцию эфемеридных элементов с

Промежуточный вариант каталога

1	1	2	49	37.81	S	146738	DD	TB116	1
1	1	9	10	39.83	×	31849	DD	TOLA4	1
1	1	9	29	57.90	S	146857	DD	S0294	6
1	1	10	12	9.10	S	146869	DD	S0294	6
1	2	9	41	28.90	×	569	DD	TONLO	1
1	2	9	45	43.30	S	128787	DD	S0294	6
1	2	10	43	42.50	S	128800	DD	S0294	6
1	2	10	49	27.60	S	128803	DD	S0294	6
1	3	2	9	51.57	S	109612	DD	TB116	1
1	3	9	58	28.80	×	1775	DD	TONLO	1
1	3	10	2	50.10	S	109783	DD	S0294	6
1	3	10	3	27.70	×	1782	DD	TONLO	1
1	3	10	6	27.10	S	109787	DD	S0294	6
1	3	11	20	44.80	S	109799	B	S0294	6
1	3	12	25	44.80	S	109815	DD	S0294	6
1	3	18	22	46.20	×	2191	DD	SU302	5
1	3	19	53	46.06	×	2233	DD	SU302	5
1	3	21	2	12.90	×	2274	DD	SU302	5
1	4	1	58	28.67	S	110151	DD	TB116	1
1	4	2	39	40.77	S	110150	DD	TB116	1
1	4	3	56	24.35	S	110172	DD	TB116	1
1	4	5	7	50.29	S	110200	DD	TB116	1
1	4	9	54	38.26	S	110332	DD	S0178	56
1	4	10	2	56.400	S	110334	DD	S0294	6
1	4	10	8	42.90	S	110332	DD	S0294	6
1	4	11	8	24.93	S	110349	DD	S0178	56
1	4	11	15	2.26	S	110349	DD	S0179	31
1	4	11	21	5.50	S	110349	DD	S0294	6
1	4	11	28	8.38	×	2925	DD	S0178	56
1	4	11	33	6.75	S	110361	DD	S0178	56
1	4	11	38	51.10	×	2925	DD	S0294	6
1	4	11	48	7.30	S	110361	DD	S0294	6
1	4	12	0	38.06	S	110367	DD	S0178	56
1	4	12	11	18.85	S	110367	DD	S0179	31
1	4	12	13	23.60	S	110367	DD	S0294	6
1	4	13	29	10.40	S	110386	DD	S0178	56
1	5	2	30	29.52	S	93050	DD	TB116	1
1	5	3	28	7.32	S	93059	DD	TB116	1

Рис. 3. Фрагмент выборки фотоэлектрических наблюдений из каталога ILOC.

точностью, достаточной для вычисления позиционного угла точки покрытия, необходимого для проведения дальнейших исследований.

3. МОДЕЛЬ ЛИБРАЦИОННОЙ ЗОНЫ DMI

С использованием базы данных покрытий звезд Луной была построена модель либрационной зоны Луны (DMI), обладающая селеноцентрическими динамическими свойствами [22]. Важно отметить, что модель DMI была построена

с помощью принципиально нового метода, где ориентация системы координат, ее масштаб и начало отсчета были определены “абсолютным способом”. Все данные точек покрытий вносились в общий каталог положений точек лимба согласно их координатам P_n и D_n . В целях уменьшения числа возможных ошибок производилась двойная проверка: выявлялись соответствия данных, включаемых в базу, с гайновскими координатами (P_n, D_n, H_n) , и сравнивались значения высот построенных карт с данными карт Уоттса. Процеду-

Фрагмент базы за 1983 г.

1	20	11	18	58.04	s	128889	dd	S0149	21
1	20	11	25	44.60	s	128889	dd	S0177	1
1	20	11	47	23.50	s	128889	dd	S0177	1
1	20	12	12	23.26	s	128901	dd	S0177	1
1	20	18	54	51.16	s	129029	dd	Su524	1
1	20	20	16	38.58	s	109552	dd	Su524	1
1	21	9	7	13.70	s	109870	dd	S0177	1
1	21	9	14	45.20	s	109870	dd	S0179	21
1	21	9	21	29.40	s	109875	dd	S0149	21
1	21	9	26	54.07	s	109975	dd	S0177	1
1	21	9	33	59.15	s	109875	dd	S0179	2

Фрагмент базы телескопов и их координат, с которых производились наблюдения

SO177	1	E	135	56	22.69	N	33	34	26.97	63.1	SIMOSATO	OBS.JAPAN	62	1000	CED
SO177	2	E	135	56	22.69	N	33	34	26.97	63.1	SIMOSATO	OBS.JAPAN	15	225	RED
SO178	56	E	133	34	27.16	N	34	40	35.98	516	BISEI	OBS.JAPAN	60	942	CED

Рис. 4. Фрагменты цифровой базы, содержащей даты фотоэлектрических покрытий и коды телескопов, и базы соответствия кодов телескопов их геоцентрическим координатам.

Фрагмент базы с координатами наблюдателей

1995	1	5	9	12	9.43	S146077	DD	E3427.16	N344035.98	516.0
1995	1	5	9	14	8.40	X30661	DD	E5622.69	N333426.97	63.1
1995	1	5	9	17	45.27	S146077	DD	E5920.39	N344246.65	172.1
1995	1	5	9	58	21.50	S146083	DD	E5236.10	N343624.80	3.0
1995	1	5	10	1	12.02	R3290	DD	E5622.69	N333426.97	63.1
1995	1	5	10	3	29.99	S146083	DD	E5920.39	N344246.65	172.1
1995	1	5	10	3	48.52	S146085	DD	E3427.16	N344035.98	516.0
1995	1	5	10	4	9.30	S146085	DD	E5236.10	N343624.80	3.0
1995	1	5	10	7	16.35	X30680	DD	E5622.69	N333426.97	63.1
1995	1	5	10	9	20.78	S146085	DD	E5920.39	N344246.65	172.1
1995	1	6	9	23	28.44	S146590	DD	E3427.16	N344035.98	516.0
1995	1	6	9	25	16.32	S146590	DD	E5236.10	N343624.80	3.0
1995	1	7	9	12	44.91	S108985	DD	E5920.39	N344246.65	172.1
1995	1	7	9	12	44.96	S108985	DD	E5920.39	N344246.65	172.1
1995	1	7	11	10	36.92	S109004	DD	E5920.39	N344246.65	172.1
1995	1	8	8	58	31.01	S109488	DD	E5920.39	N344246.65	172.1
1995	1	8	10	51	26.12	S109517	DD	E5236.10	N343624.80	3.0
1995	1	8	11	3	54.95	S109517	DD	E5920.39	N344246.65	172.1
1995	1	9	11	57	29.46	X2367	DD	E3427.16	N344035.98	516.0
1995	1	9	13	1	13.15	S92584	DD	E5920.39	N344246.65	172.1
1995	1	9	13	37	8.86	S92602	DD	E3427.16	N344035.98	516.0
1995	1	9	13	41	29.40	X2425	DD	E5622.69	N333426.97	63.1

Рис. 5. Пример фрагмента конечного варианта каталога фотоэлектрических покрытий за 1995 г.

ру построения базы данных для ДМІ можно представить в виде алгоритма, представленного на рис. 6.

На рис. 7 приведены фрагменты ДМІ в виде изогипс.

Для снятия высотных данных с ДМІ вычисляются гайновские координаты (P_n, D_n) искомой

точки на основе известных селенографических координат R_n, λ_n, β_n :

$$\begin{pmatrix} \rho_0 \sin D_n \\ -\rho_0 \cos D_n \sin P_n \\ \rho_0 \cos D_n \cos P_n \end{pmatrix} = R_n \begin{pmatrix} \sin \lambda_n \cos \beta_n \\ \sin \beta_n \\ \cos \lambda_n \cos \beta_n \end{pmatrix},$$



Рис. 6. Алгоритм построения базы данных для DMI.

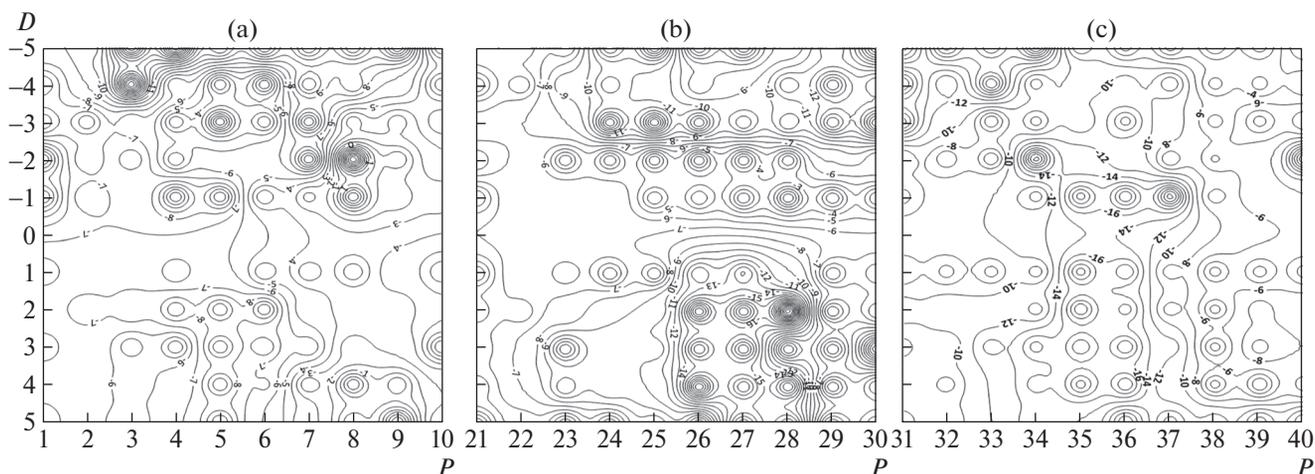


Рис. 7. Фрагменты DMI в виде изогипс: по оси абсцисс – координата Гайна P в градусах, по оси ординат – координата Гайна D в градусах.

где ρ_0 – усредненный селеноцентрический радиус-вектор лунной сферы; λ_n, β_n – селенографические долгота и широта и R_n – радиус-вектор искомой точки на лунной поверхности. Затем производится определение высоты искомой точки модели DMI путем интерполяции высотных параметров точек, расположенных вблизи искомой, согласно следующего выражения:

$$H_i = \sum_{k=1}^m \left(P_k \left(\frac{h_k}{d_k} \right) \right) / \sum \left(\frac{1}{d_k} \right),$$

где h_k – значения известных высот опорных точек, попадающих в интерполяционный круг; d_k – расстояние до данных точек от центра интерполяционного круга (центр круга совпадает с положением искомой точки); H_i – высота искомой точки, получаемая на основе интерполяции; k – количество опорных точек; P_k – вес k -й опорной точки, участвующей в интерполяционной процедуре.

4. ИССЛЕДОВАНИЕ СИСТЕМЫ DMI

С целью исследования DMI проведено сравнение параметров DMI с существующими в настоящее время моделями карт либрационной зоны с использованием метода, описанного в [23]. Как

результат, получены данные, приведенные в табл. 2, где $\Delta R_{mod} = (R_{mod} - 932.58''$ – отклонение среднего радиуса модели краевой зоны Луны (LMZM – Lunar Marginal Zone Model) от стандартного; σ – среднеквадратическая ошибка R_{mod} , ΔL – отклонение долготы центра цифровой LMZM от лунного центра масс; $932.58''$ – стандартный средний угловой лунный радиус Луны. Обозначены: N – LMZM А. Нефедьева, W – LMZM Уоттса, Ch – LMZM И. Чугунова.

Согласно данным табл. 2 можно заключить, что среднее отклонение радиусов и долготы геометрических центров карт для модели DMI составляет минимальное значение по сравнению с другими моделями либрационной зоны. Что касается среднеквадратичных ошибок исследуемых карт, то они оказались практически одинаковыми, что подтверждает верность полученных расчетных данных. Здесь следует отметить, что σ характеризует не точность наблюдений, а точность построения изогипс цифровой модели лунной поверхности. Так как при построении моделей на основе наблюдений, выполненных разными методами, использовался один и тот же подход, а количество опорных точек для всех моделей было сопоставимым, величина σ оказалась практически идентичной. Но при этом для модели DMI минимальные значения ΔR_m и ΔL показывают,

Таблица 2. Сравнительные параметры моделей краевой зоны Луны

Model	ΔR_m	σ	ΔL
N	-0.282"	0.595	0.69"
W	-0.002"	0.560	0.59"
Ch	-0.180"	0.801	0.59"
DMI	-0.003"	0.584	0.09"

что геометрический центр данной модели наиболее близко расположен к центру масс Луны, т.е. карты являются селеноцентрическими. Для карт Уоттса наблюдается хорошее значение параметра ΔR_m , так как Уоттс пытался искусственно привести селенографические данные к селеноцентрическим [6], но в итоге все равно осталось отклонение по долготе ΔL [7].

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Лунные покрытия представляют собой уникальный материал в силу своей высокой периодичности и точности наблюдений [24]. В настоящей работе был выполнен анализ фотоэлектрических наблюдений покрытий звезд Луной. Координатные положения покрываемых звезд были идентифицированы с каталогом Hipparcos. В результате была создана цифровая модель краевой зоны Луны (DMI). Планируется использование DMI для трансформации систем координат видимой и обратной сторон Луны [25] в единую селеноцентрическую систему [26]. Координаты будут иметь динамическую привязку к осям инерции и центру масс [27]. Создание DMI было осуществлено на основе разработанного авторского метода редукции лунных покрытий [28], полученных фотоэлектрическим методом, при этом поправки за нервноности лунного края были учтены с высокой точностью. Расхождения между картами DMI и картами Уоттса объясняются на основе определенных начальных условий. Карты DMI построены в системе центра масс Луны и осей инерции [29], а карты Уоттса имеют свой центр отсчета данных и эллиптическую структуру самой поверхности отсчета высотных параметров [30]. Другими словами, радиусы-векторы цифровой модели Уоттса для различных либраций образуют не сферическую, а эллиптическую поверхность. При этом сфера и эллипсоид имеют относительный сдвиг своих центров. В случае модели DMI ее система координат соответствует динамической селеноцентрической системе.

Либрационная зона Луны до сих пор является малоизученной областью лунной поверхности. К настоящему моменту имеется большое количество данных наблюдений покрытий звезд Луной. Результаты, полученные путем обработки таких

наблюдений, являются очень ценным материалом для решения ряда значимых проблем астрономии и астрофизики. Это, в первую очередь, относится к задаче построения и анализа моделей либрационной зоны Луны [31], при этом существование различных селенодезических каталогов положений объектов, а также карт краевой зоны Луны, представляют собой необходимый научно-исследовательский материал [32]. До тех пор, пока изучение движения в пространстве центра масс Луны, построение селенодезических опорных сетей на всей лунной сфере и создание точных моделей лунного рельефа не потеряло своей значимости [33], анализ наблюдений покрытий звезд Луной с целью построения карт либрационной зоны будет являться актуальной задачей. Селеноцентрическая модель краевой зоны также с успехом может использоваться с целью координатной трансформации между видимой и обратной сторонами Луны [34]. В настоящее время проводятся работы по уточнению лунных параметров. В частности, в 2021 г. были опубликованы теории JPL Planetary and Lunar Ephemerides DE440 и DE441, которые имеют расчетную точность 0.2 mas [35].

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Настоящая работа поддержана грантом Российского научного фонда 20-12-00105 (согласно гранту разработан метод анализа данных и проведены численные расчеты). Работа частично выполнена за счет средств программы стратегического академического лидерства Казанского (Приволжского) федерального университета, госзадания ГЕОХИ РАН № 0137-2021-0004, гранта Российского фонда фундаментальных исследований № 19-32-90024 "Аспиранты" и Фонда развития теоретической физики и математики "БАЗИС".

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. В. Корнилов, А. Миронов, Е. Трунковский, Х. Халиуллин, А. Черепашук, *Астрон. журн.* **61**, 739 (1984).
2. L. V. Morrison, in *Highlights of Astronomy*, edited by C. De Jager (Dordrech: Springer, 1971), **2**, 589 (1971).
3. L. V. Morrison, *IAU Symp.* **47**, 395 (1972).
4. E. Pitjeva and N. Pitjev, *Celestial Mechanics and Dynamical Astronomy* **119**, 237 (2014).
5. L. Morrison and G. Appleby, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **196**, 1005 (1981).
6. C. Watts, XVII, *US Nautical Almanac Office* (DC: Washington, 1963).
7. L. Morrison and G. Appleby, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **196**, 1013 (1981).
8. Y. Nefedyev, S. Valeev, R. Mikeev, A. Andreev, and N. Varaksina, *Adv. Space Research* **50**, 1564 (2012).
9. N. Varaksina, Y. Nefedyev, K. Churkin, R. Zabbarova, and S. Demin, *J. Physics: Conference Series* **661**, 012014 (2015).

10. *D. L. Turcotte*, *J. Geophys. Res. Solid Earth* **92**, E597 (1987).
11. *N. G. Rizvanov*, *Y. A. Nefed'ev*, and *M. I. Kibardina*, *Solar System Res.* **41**, 140 (2007).
12. *S. Demin*, *O. Y. Panischev*, and *Y. A. Nefedyev*, *Kinematics Phys. Celest. Bodies* **30**, 63 (2014).
13. *S. Demin*, *O. Y. Panischev*, and *Y. A. Nefedyev*, *Nonlinear Phen. Complex Systems*, **18**, 63 (2015).
14. *S. Demin*, *O. Y. Panischev*, and *Y. A. Nefedyev*, *J. Physics: Conference Series* **661**, 012003 (2015).
15. *N. Rizvanov* and *J. Nefedjev*, *Astron. and Astrophys.* **444**, 625 (2005).
16. *T. Stepinski*, *M. Collier*, *P. McGovern*, and *S. Clifford*, *J. Geophys. Res. Planets* **109**, 2005 (2004).
17. *H.-O. Peitgen*, *H. Jürgens*, and *D. Saupe*, *Chaos and fractals: new frontiers of science* (Springer Science and Business Media, 2006).
18. *K. Churkin*, *A. Andreev*, *Y. A. Nefedyev*, *N. Petrova*, and *N. Y. Demina*, *Astron. Rep.* **62**, 1042 (2018).
19. *K. Churkin*, *A. Andreev*, *Y. Nefedyev*, *R. Mubarakshina*, and *V. Borovskih*, *J. Physics: Conference Series* **1400**, 022044 (2019).
20. *L. Morrison*, *Roy. Greenwich Observ. Bull.* **183**, 5 (1978).
21. *N. Petrova*, *Y. A. Nefedyev*, *A. Zagidullin*, and *A. Andreev*, *Astron. Rep.* **62**, 1021 (2018).
22. *Y. A. Nefedyev*, *A. Andreev*, *N. Petrova*, *N. Y. Demina*, and *A. Zagidullin*, *Astron. Rep.* **62**, 1016 (2018).
23. *Y. A. Nefedjev* and *N. Rizvanov*, *Astron. Nachricht.* **323**, 135 (2002).
24. *M. Sôma*, *Celestial Mechanics* **35**, 45 (1985).
25. *A. O. Андреев*, *Ю. А. Неведьев*, *Л. А. Неведьев*, *Е. Н. Ахмедшина*, *Н. Ю. Демина*, *А. А. Загидуллин*, *Ученые записки Казанского университета. Серия Физико-математические науки* **162**, 223 (2020).
26. *A. Zagidullin*, *V. Usanin*, *N. Petrova*, *Y. A. Nefedyev*, *A. Andreev*, and *T. Gudkova*, *Astron. Rep.* **64**, 1093 (2020).
27. *Ю. А. Неведьев*, *А. О. Андреев*, and *Н. Ю. Демина*, *Ученые записки Казанского университета. Серия Физико-математические науки* **162**, 481 (2020).
28. *A. Andreev*, *Y. Nefedyev*, *L. Nefediev*, *N. Demina*, *A. Bagrov*, *N. Petrova*, and *A. Zagidullin*, *J. Physics: Conference Series* **1697**, 012016 (2020).
29. *K. Churkin*, *A. Andreev*, *Y. Nefedyev*, *L. Nefediev*, *R. Hudc*, *A. Bagrov*, and *N. Demina*, *J. Physics: Conference Series* **1697**, 012024 (2020).
30. *A. Andreev*, *Y. A. Nefedyev*, *N. Y. Demina*, *L. Nefediev*, *N. Petrova*, and *A. Zagidullin*, *Astron. Rep.* **64**, 795 (2020).
31. *A. Zagidullin*, *V. Usanin*, *N. Petrova*, *Y. Nefedyev*, and *A. Andreev*, *J. Physics: Conference Series* **1697**, 012018 (2020).
32. *E. Kostina*, *A. Andreev*, *Y. Nefedyev*, and *N. Demina*, *J. Physics: Conference Series* **1697**, 012033 (2020).
33. *N. Petrova*, *Y. A. Nefedyev*, *A. Andreev*, and *A. Zagidullin*, *Astron. Rep.* **64**, 1078 (2020).
34. *K. Churkin*, *A. Andreev*, *Y. Nefedyev*, *R. Mubarakshina*, and *V. Borovskih*, *J. Physics: Conference Series* **1400**, 022044 (2019).
35. *R. S. Park*, *W. M. Folkner*, *J. G. Williams*, and *D. H. Boggs*, *Astron. J.* **161**, 105 (2021).