

## **СТАНДАРТИЗИРАНА ЛУННА КООРДИНАТНА СИСТЕМА – ОБЗОР**

**Искрен Иванов, Лъчезар Филчев**

*Институт за космически изследвания и технологии – Българска академия на науките*  
*e-mail: iso.ivanov@space.bas.bg, lachezarhf@space.bas.bg*

**Ключови думи:** *Лунна координатна система, референтна повърхност, контролна точка, начална точка*

**Резюме:** *Лунната координатна система (ЛКС) е от съществено значение за определяне точното местоположение на обекти, намиращи се на повърхността на Луната и тяхното картографиране. Този обзорен доклад се фокусира върху изследване и внасяне на повече яснота по темата за лунните координатни системи използвани в дистанционните изследвания на лунната повърхност, картография, топография и географски информационни системи (ГИС). Изложена е теоретичната основа на съвременната ЛКС Усреднена Земя/Полярна ос Mean Earth/Polar axis (ME), препоръчана от Международния астрономически съюз (IAU) и прилагана за картографиране на лунната повърхност, като е представена и алтернативната система Главна ос Principal axis (PA). Изтъква се всеобхватното значение и ползи на ЛКС.*

## **STANDARDIZED LUNAR COORDINATE SYSTEM – OVERVIEW**

**Iskren Ivanov, Lachezar Filchev**

*Space Research and Technology Institute – Bulgarian Academy of Sciences*

**Keywords:** *Lunar coordinate system, reference surface, control point, starting point*

**Abstract:** *The Lunar Coordinate System (LCS) is essential for accurately determining the location of objects on the Moon's surface and for mapping them. This review paper focuses on exploring and clarifying the topic of lunar coordinate systems used in remote sensing of the lunar surface, cartography, topography, and geographic information systems (GIS). The theoretical foundation of the modern Mean Earth/Polar Axis (ME) LCS, recommended by the International Astronomical Union (IAU) and applied for mapping the lunar surface, is presented, along with the alternative Principal Axis (PA) system. The comprehensive significance and benefits of the LCS are highlighted.*

### **Въведение**

Стандартизираната ЛКС позволява на учени от различни области да използват обща отправна рамка при изучаване на лунната повърхност, която гарантира последователност и точност при нейното изучаване, проучване и картографиране [1, 2]. От жизнена важност е за успешно планиране и изпълнение на изследователски и научни мисии. Наличието на стандартизирана ЛКС улеснява ясната и ефективна комуникация, предотвратява обърквания и грешки при едновременното развитие на лунни мисии на различни агенции и нации. Прави възможно интегрирането на данни регистрирани с апарати от различни мисии и тяхното надеждно архивиране. От съществено значение е за извършване на точни пространствени анализи и създаване на ГИС продукти. ЛКС е в основата на лунните изследвания.

### **История и развитие на лунната картография и контролни мрежи**

За пионер в картографирането на лунната повърхност се приема Галилео Галилей, който през 1610 г., публикува първата лунна карта в своя труд "Sidereus Nuncius". За нейното създаване използва телескоп, изработен от самия него. В днешно време, първенството на Галилей се оспорва, въз основа на запазени документи, от които става ясно, че през 1609 г.

Томас Хариот прави серия от скици на лунната повърхност [3]. През същия век Йоханес Хевелий създава своята подробна карта на лунната повърхност, наречена "Selenographia", с която въвежда система за наименуване на образуванията (обектите) на лунната повърхност (номенклатура). Неговата номенклатура през 1651 г., бива заменена от номенклатурата на Джовани Батиста Ричоли, чието приложение е актуално и към наши дни. През 18-ти век Тобиас Майер започва систематично да записва координати на обекти от лунната повърхност, използвайки телескоп с вградено микрометрично устройство. Той разполага наблюдаваните от него обекти в координатна система чиито център е кратера Манилий (Manilius). По-късно, през 1839 г., Бесел и Шлютер провеждат своите измервания чрез наблюдения на лунната повърхност центрирани върху кратера Мьостинг А (Mösting A). Около 1890 г., Йохан Франц картографира лунната повърхност, като създава мрежа от контролни точки (състоящи се от малки кратери). За точно определяне на тяхното местоположение използва измервателен инструмент (хелиометър) и фотографски способности. Първоначално, лунните контролни мрежи са създадени чрез внимателни наблюдения на обекти от лунната повърхност по изображения, направени при различни фази на Луната, за да се отчетат измененията в гледната точка на наблюдателя произтичащи от Лунната либрация [4].

През 20-ти век с помощта на развиващата се електронна изчислителна техника е съставен референтен списък с обекти и тяхното местоположение, който служи за основа на по-късните лунни контролни мрежи. В средата на 20-ти век, в подготовка за първия космически полет до Луната, по програма Аполо, различни звена на американската администрация, съставят каталози с координатите на обекти от лунната повърхност. По-нататъшно разширяване и сливане на контролните мрежи е извършено от различни научни екипи от Съветския съюз, Обединеното кралство и други нации в духа на първата „Лунна надпревара“. Тези мрежи разчитат на снимки, направени от наземни телескопи, по време на различни фази на Луната. Мисиите "Аполо" позволяват на астронавтите да измерват позициите на специфични ориентирни с помощта на секстант. Поставени са лазерни отражатели, част от експеримента Лазерен далекомерен ретрорефлекторен експеримент (LRRR) от пакета Комплект за лунни повърхностни експерименти на Аполо (ALSEP) на местата на Луноход 2, Аполо 11, 14 и 15, както и радиопредаватели от мисиите Аполо 15, 16 и 17 част от ALSEP, чиито местоположения на лунната повърхност са точно определени [5]. Тези постоянни контролни точки, позволяват извършване на тяхното наземно високоточно измерване, чрез лазерна локализация и радиоинтерферометрия. Лунар орбитър IV предоставя изображения с висока пространствена разделителна способност.

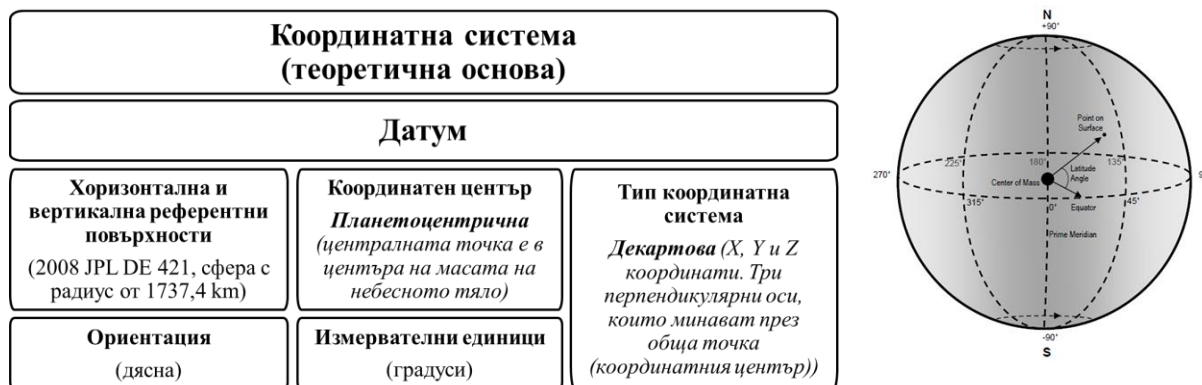
Пътят към изработване на Лунна координатна система продължава с Единната лунна контролна мрежа (ULCN 1987) изградена по данни от мисиите "Аполо", наземни телескопи и изображения заснети от автоматичния космически апарат Маринър 10. Следва ULCN 1994 състояща се от преизчислени и разширени данни на ULCN 1987 плюс точки с местоположение на далечната страна на Луната от изображения заснети от автоматичния космически апарат Галилео. През 1997 г. системата ULCN обхваща Луната глобално, инкорпорирайки данни от мисията Клементин. Със следващата ULCN 2005 се преустановява практиката за контролни точки на лунната повърхност да се ползват обекти. Предприема се нов подход и лунните контролни точки вече са пикселни местоположения върху специфични изображения заснети по време на мисията Клементин. Системата ULCN 2005 през октомври 2010 г. е официално приета от Планетарния регистър на Международния астрономически съюз (IAU) за определяне координатите на обекти на лунната повърхност [6]. През юни 2012 г. Планетарният регистър на Международния астрономически съюз актуализира координатите, използвани за определяне на местоположението на обекти на лунната повърхност с данни регистрирани от апарата Лунен орбитален лазерен алтиметър (LOLA) част от научната апаратура на борда на лунния орбитален космически апарат Лунар Риконъсънс Орбитър (LRO).

### **Местоположението на Луната в космоса DE 421 и ICRF3**

Местоположението на Луната в космическото пространство се определя благодарение на Планетарните и лунни ефемериди 2008 JPL DE 421 ориентирани спрямо Международната небесна референтна система 3 (ICRF3) фиксирана в барицентъра на Слънчевата система [7-9]. Лунната орбита в DE 421 е изчислена въз основа на комбиниране на Лунно лазерно локализиране (LLR) и др. измервания със забележителната точност от под 1 метър. Измерванията извършвани посредством лазерно локализиране на лазерните отражатели на Луната (LLR) и радиоинтерферометрията (VLBI) предоставят информация за нейната отдалеченост и ъгъл на изместване. Радиоинтерферометричните измервания VLBI на обекти от лунната повърхност са интегрируеми в ICRF3, която е базирана на VLBI измервания на квазари.

## Лунна координатна система (ЛКС)

Всяка координатна система има своята теоретична конструкция и нейното практическо реализиране [10]. В следствие на горепосоченото в настоящия доклад терминът „система“ се употребява за посочване на теоретична система и нейния набор от правила и определения за това как да се дефинира и осъществи практически една координатна система. Така всяка реализирана практически координатна система се състои от теоретична основа, специфична терминология, референтна повърхност, референтна мрежа от точки, начална точка, тип координатна система, ориентация и измервателни единици, които формират конструкцията за определяне местоположението на точка върху конкретно небесно тяло (Фиг. 1) [11].



Фиг. 1. Схема на съставните елементи на координатна система и визуализация на планетоцентрични координати

По препоръка на Работна група по картографски координати и елементи на въртене (WGCCRE) на Международния астрономически съюз (IAU) [12]. за вертикална референтна повърхност за Луната се прилага сфера с радиус 1737.4 km. Всяко измерване, чиято стойност надвишава 1737.4 km е положителна височина, реципрочно всяка височина със стойност под 1737.4 km е отрицателна височина. За хоризонтална референтна повърхност се прилагат данните на планетарни и лунни ефемериди 2008 JPL DE 421 плюс контролни точки на лунната повърхност (координатите на лазерни отражатели и радиопредаватели).

ЛКС е планетоцентрична координатна система (за Луната селеноцентрична), чиито координати се изразяват като десни координати (посока изток) с координатен център, точка намираща се в центъра на масата на конкретното небесно тяло с измервателни единици в градуси [13, 14]. Методът по който се посочват координатите в ЛКС се определя от прилаганата триизмерна декартова координатна система изградена от три взаимно перпендикулярни координатни оси (X, Y, Z) с пресечна и начална точка в координатния център (0, 0, 0). Всяка точка се представя с помощта на числени стойности по осите X, Y и Z. Оста Z е усреднената ос на въртене на Луната, оста X е пресечната точка на еkvатора и началния меридиан (нормала към оста Z), а оста Y е ортогонална на осите X и Z. Лунните координати са по същата номенклатура като тези за Земята. Планетоцентричната ширина измерва разстоянието на север или юг от планетния екватор, измервана от 0° до 90° на всеки полюс, положителна в северното полукълбо и отрицателна в южното полукълбо по оста на въртене (Z). Планетоцентричният север е в полукълбото на север от плоскостта на Лаплас на слънчевата система. Географската дължина се измерва надясно (изток) в посока на въртене за прогресивно тяло (небесно тяло, чиято посока на въртене около неговата ос е в посоката на въртене на неговата орбита), от главния меридиан (0° дължина) до 360°.

В изследванията на Луната приложение намират две координатни системи. Системата Усреднена Земя/Полярна ос Mean Earth/Polar axis (ME) и системата на Главната ос Principal axis (PA). Любопитен факт е, че автор на координатните системи на повечето небесни тела в Слънчевата система е Мъртън Е. Дейвис от Корпорация Ранд (Rand Corporation).

Координатната система на Луната може да бъде намерена в ArcGIS в категория "Географски координатни системи", под-категория "Слънчева система".

Параметрите на координатната система са [15]:

104903 GCS\_Moon\_2000

GEOGCS["GCS\_Moon\_2000",DATUM["D\_Moon\_2000",SPHEROID["Moon\_2000\_IAU\_IAG",1737400,0,0,0]],PRIMEM["Reference\_Meridian",0,0],UNIT["Degree",0.0174532925199433]]

Geographic Coordinate System	Moon 2000
WKID	104903
Authority	Esri
Angular Unit	Degree (0.0174532925199433)
Prime Meridian	Reference Meridian (0.0)
Datum	D Moon 2000
Spheroid	Moon 2000 IAU IAG
Semimajor Axis	1737400.0
Semiminor Axis	1737400.0
Inverse Flattening	0.0
Area of Use	Body
Top	90.0°
Left	-180.0°
Right	180.0°
Bottom	-90.0°

### **Система Усреднена Земя/Полярна ос Mean Earth/Polar axis (ME) [16]**

Системата Усреднена Земя/Полярна ос Mean Earth/Polar axis (ME) се използва от 18-ти век за картографиране на лунната повърхност [17]. Нейното прилагане се препоръчва от IAU WGCCRE, Работната група за лунни данни (LDWG) и Работната група за лунни геодезически координати (LGCWG) на НАСА [18]. Огромно количество съвременни карти на лунната повърхност и бази данни от нейното дистанционно изследване се основават на системата ME. При тази система оста Z е усреднената стойност на лунната ротационна ос преминаваща през полюсите. По нея се определя лунния екватор, намиращ се в равнина перпендикулярна на оста Z, разположена на равни разстояния от двата полюса. Главният меридиан (0° дължина) е линия преминаваща от северния до южния полюс по повърхността на референтната сфера на Луната директно обърната към Земята. Нулевият меридиан и екваторът се пресичат в „усреднена подземна точка“, която е точка от лунната повърхност обърната директно към Земята. Тази точка не съвпада с никой кратер или друг обект на лунната повърхност. Усреднената подземна точка е усреднено местоположение поради лунната либрация, която причинява промени в перспективата при наблюдение на Луната от Земята причинявани от орбиталната и ротационна динамика на Луната. Тази лунна геометрична либрация по дължина и ширина води до това, че всъщност от Земята се виждат 60% от лунната повърхност [19]. Затова за подравняване на главният меридиан (0° дължина) в ЛКС се прилага „усреднената подземна точка“. Това подравняване гарантира, че главният меридиан е ориентиран спрямо Земята, осигурявайки стабилна отправна точка за картографиране и навигация. В „усреднената подземна точка“ се намира началото на лунната координатна мрежа (0° ширина, 0° дължина) [13].

### **Система Главна ос Principal axis (PA)**

Системата на Главната ос PRINCIPAL AXIS (PA) е другата лунна координатна система, която се прилага при динамични изследвания на лунното гравитационно поле, лазерно локализиране на лазерни отражатели (LLR) и специфични оперативни приложения. При нея осите са определени от главните инерционни моменти на Луната. Главните оси и усреднената ос на въртене на Луната спрямо Земята не съвпадат, поради това, че Луната не е идеален синхронно въртящ се триосен елипсоид. Съответно осите на системите PA и ME не съвпадат. Между тях има разлика възлизаща на около 1 km (<860 m) на лунната повърхност, т.е. местоположенията на обектите разположени на лунната повърхност се различават с около 1 km (<860 m) в двете координатни системи [21].

### **Обобщение**

Системата ME се използва от векове като координатна референтна система за картографиране на лунната повърхност. Референтната хоризонтална и вертикална повърхност за лунната координатна система е планетарните и лунни ефемериди DE 421 на JPL от 2008 г., завъртяни в системата ME, следвайки препоръките на LDWG и LGCWG (2008 г.) и по-късно приемането на IAU WGCCRE. Сферичен радиус от 1737.4 km служи за определяне на вертикална референтна повърхност, откакто е определен от IAU WGCCRE. Повечето съвременни картографски продукти и бази данни се основават на системата ME и тези

хоризонтални и вертикални референтни повърхности. За стандартна ЛКС за картографски цели, планиране и координиране на мисии и архивиране на данни ME е приета през 2006 г. специално за мисията Lunar Reconnaissance Orbiter. Постигнат е консенсус, че системата RA намира специфични оперативни приложения и данните регистрирани в тази система при архивиране ще бъдат конвертирани в системата ME. Впоследствие през 2008 г. е създадена Работна група по лунна геодезия и картография (LGCWG) към Международния астрономически съюз за поддържане, спазване и надзор на направените препоръки.

### Бъдещо развитие

Гравитационното поле на Луната, чиито модел GRGM1200B е създаден по данни от Gravity Recovery and Interior Laboratory (GRAIL) може да служи като основа за установяване на селеноид, позволяващ изчисления на вариациите на височината по екипотенциални повърхности на Луната. Наскоро актуализираната JPL DE 440 от 2021 г. може да замени 2008 JPL DE 421 при прилагането ѝ в система ME. JPL DE 440 представлява бъдещия избор на хоризонтална референтна повърхност за предстоящите мисии до Луната, като Артемида 3 на НАСА [22]. Поставянето на още лазерни отражатели за лазерно локализиране, като допълнение към вече съществуващите и включване на допълнителни радиопредаватели на лунната повърхност ще допринесе за подобряване и прецизиране на мрежата от референтни контролни точки. Част от подготовката за завръщане на човека на Луната е свързана и с полагане на усилия за предоставяне на Лунни глобални навигационни услуги, подобни на Глобалната навигационна сателитна система (GNSS) за точно пространствено позициониране. Централно място за всяка такава навигационна инфраструктура заема определянето и прилагането на единна лунна координатна система [23]. Примери за съществуващи предложения в тази насока са: LunarNet на НАСА, Moonlight на ЕКА и Lunar Navigation Satellite System на Японската космическа агенция (JAXA).

### Литература:

1. [https://psdi.astrogeology.usgs.gov/moon/standards/data\\_standards/](https://psdi.astrogeology.usgs.gov/moon/standards/data_standards/) - достъпен на 16 септември 2024 г.
2. Rambaux, N., A. Fienga, A. Kaitheri. Lunar reference systems framework, Journées 2023: Temps et Relativité Générale (Time and General Relativity), 11th – 13th September 2023, Nice, sciencesconf.org:journées2023:489864.
3. Pumfrey, S. Harriot's maps of the moon: new interpretations, Notes and Records of the Royal Society of London, 2009, 63(2), 163–168. <http://www.jstor.org/stable/40647255>.
4. Schirmerman, L. Lunar Cartographic Dossier, MO: Defense Mapping Agency for NASA, St. Louis, 1973.
5. Davies, M., T. Colvin, D. Meyer. A Unified Lunar Control Network — The Near Side, RAND Corporation, CA, Santa Monica, 1987, <https://www.rand.org/pubs/notes/N2664.html>.
6. Archinal, B., M. Rosiek, R. Kirk, B. Redding, Unified Lunar Control Network 2005 and Topographic Model, USGS, 2006.
7. Folkner, W., J. Williams, D. Boggs, The Planetary and Lunar Ephemeris DE 421, IPN Progress Report, JPL, 2009, pp. 42–178.
8. Navigation and Ancillary Information Facility (NAIF), Ephemeris subsystem SPK, Focused on reading SPK files, JPL, 2023.
9. Charlot, P., C. Jacobs, D. Gordon, The third realization of the International Celestial Reference Frame by very long baseline interferometry, Astronomy and Astrophysics, 2020, 644, doi:10.1051/0004-6361/202038368.
10. Kovalevsky, J., I. Mueller, Comments on conventional terrestrial and quasi-inertial reference systems, Reference Coordinate Systems for Earth Dynamics, D. Reidel Publishing Co., Dordrecht, Holland, 1981, pp. 375–384.
11. Mueller, I., Reference Coordinate Systems for Earth Dynamics: A Preview, Astrophysics and Space Science Library, vol 86, Springer, Dordrecht, 1981, [https://doi.org/10.1007/978-94-009-8456-1\\_1](https://doi.org/10.1007/978-94-009-8456-1_1).
12. Davies, M., V. Abalakin, M. Bursa, G. Hunt, et al., Report of the IAU/IAG/COSPAR Working Group on Cartographic Coordinates and Rotational Elements of the Planets and Satellites, Cel. Mech. and Dyn. Ast., 1988, 46, pp. 187-204, <https://doi.org/10.1007/BF00053048>.
13. National Aeronautics and Space Administration (NASA), A standardized Lunar coordinate system for the Lunar reconnaissance orbiter and lunar datasets, LRO Project and LGCWG White Paper, Version 5, Goddard Space Flight Center, Greenbelt, Maryland, 2008.
14. Navigation and Ancillary Information Facility (NAIF), An Overview of Reference Frames and Coordinate Systems in the SPICE Context, JPL, 2023.
15. <https://developers.arcgis.com/javascript/3/jshelp/gcs.html> - достъпен на 13 септември 2024 г.
16. Archinal, B., C. Acton, M. A'Hearn, et al., Report of the IAU Working Group on Cartographic Coordinates and Rotational Elements, Celestial Mechanics and Dynamical Astronomy, Volume 130, Issue 3, article id. 22, 2018, 46 pp. <https://doi.org/10.1007/s10569-017-9805-5>.
17. Lunar Exploration Analysis Group (LEAG), Final report of the lunar critical data products specific action team, Mapping and Planetary Spatial Infrastructure Team (MAPSIT) Specific Action Team, 2021.

18. Archinal, B., C. Fassett, L. Gaddis, et al., Continued Use of the Mean Earth (ME) Coordinate System for the Moon, Lunar Exploration Analysis Group (LEAG), The Cartographic Lunar Reference Frame, Time and General Relativity meeting, 2023.
19. Hiesinger, H., R. Jaumann, Chapter 23 - The Moon, Encyclopedia of the Solar System, 2014, pp. 493–538, doi:10.1016/b978-0-12-415845-0.00023-2.
20. Roncoli, R., Lunar Constants and Models Document, Jet Propulsion Laboratory, California Institute of Technology, JPL D-32296, 2005.
21. Weber, R., S. Lawrence, B. Cohen, et al., The Artemis 3 science definition team report, NASA/SP-20205009602, 2021.
22. Critchley-Marrows, J., An Exploration of the Lunar Reference Frame, FIG Working Week 2023, Protecting Our World, Conquering New Frontiers, Orlando, Florida, USA, 2023.