Создание каталога опорных объектов селенодезической либрационной зоны

© Ю.А. Колосов,[1] А.О. Андреев,[2] Ю.А. Нефедьев,[1] Н.Ю. Демина,[1] Э.А. Кошкарова (Хасаншина)[3]

[1] Казанский (Приволжский) федеральный университет,
420008 Казань, Россия
[2] Казанский государственный энергетический университет,
420066 Казань, Россия
[3] ООО „Литрес Инновации“,
Москва, Россия
e-mail: star1955@mail.ru

Поступило в Редакцию 4 мая 2026 г.
В окончательной редакции 15 августа 2026 г.
Принято к публикации 23 октября 2026 г.

Проведена разработка селеноцентрического каталога положений лунных объектов либрационной зоны Луны с целью создания буферной модели при трансформации лунных координатных систем видимой и обратной сторон нашего естественного спутника. Выполнена трансформация наблюдений опорных объектов либрационной зоны в селеноцентрическую динамическую систему координат, построен каталог опорных объектов либрационной зоны Луны в селеноцентрической динамической системе координат, и проведен его качественный анализ.

Ключевые слова: либрационная зона, трансформация координат, лунный рельеф, навигационное обеспечение, координатная привязка.

DOI: 10.61011/JTF.2026.12.64044.304-26

Введение

Одним из важных направлений современных селенодезических исследований является согласование селенографических сетей, относящихся к видимой стороне Луны, с координатными системами (КС), построенными по данным космических миссий для обратного полушария [1]. Согласование таких координатных систем может быть обеспечено за счет контрольной сети, сформированной в либрационной зоне Луны (ЛЗЛ) [2]. Создание данной сети затруднено естественными ограничениями исходных данных: наземные измерения не обеспечивают стереоскопического определения координат контрольных объектов в ЛЗЛ, а космические наблюдения осложняются неопределенной ориентацией поверхности отсчета. В рамках настоящего исследования разработан авторский подход к построению каталога опорных точек ЛЗЛ, позволивший определить их положения в динамической системе координат [3].

1. Построение каталога

Методика формирования опорного каталога объектов ЛЗЛ включает несколько шагов. На первом этапе применялись карты Watts, содержащие сведения о профиле лунного лимба, которые служили исходной основой для определения положения объектов в либрационной зоне. Для повышения точности исходные данные корректировались с использованием поправок Morrison, позволяющих уменьшить систематические ошибки положения элементов рельефа. Далее скорректированные данные переводились в систему карт „KSC-1162“, использовавшуюся в качестве единой картографической основы для последующей обработки, идентификации объектов и их трансформации в селеноцентрическую динамическую систему координат. На следующих этапах координаты уточнялись в системе Гайна с использованием динамических карт ЛЗЛ и программного комплекса MAPS.

На предварительном этапе положения объектов определялись на основе сопоставления объектов на картах ЛЗЛ с соответствующими элементами рельефа, представленными на топографических картах. После определения положения объекта на исходных картах его координаты $(D_{prelim}, P_{prelim}, r_{prelim})$ вычислялись по формуле:

$$\begin{pmatrix} r_{prelim}\sin D_{prelim} \\ -r_{prelim}\cos D_{prelim}\sin P_{prelim} \\ r_{prelim}\cos D_{prelim}\cos P_{prelim} \end{pmatrix} = R_c \begin{pmatrix} \sin\lambda\cos\beta \\ \sin\beta \\ \cos\lambda\cos\beta \end{pmatrix},$$

где r_{prelim} — предварительное значение селеноцентрического расстояния до точки на поверхности Луны; D_{prelim} и P_{prelim} — предварительные значения гайновских координат; R_c — радиус-вектор соответствующего отождествленного объекта, λ и β — его селенографические координаты.

При создании электронной модели карты данные исходных карт были систематизированы и внесены в цифровую базу с соответствующими гайновскими координатами. Для выявления и исключения точек с грубыми ошибками проводилась проверка полученных данных пу-

Таблица 1. Фрагмент построенной опорной сети

№	ξ	η	ζ	λ	φ
1	0.55	0.80	0.24	65.87	53.16
2	0.62	0.73	0.28	65.37	47.35
3	−0.63	0.73	−0.28	65.54	46.57
4	−0.63	0.74	−0.24	69.19	47.76
5	−0.03	0.72	0.69	−2.43	45.93
6	−0.08	0.73	0.68	−6.60	46.79
7	−0.13	0.61	0.78	−9.86	37.99
8	−0.16	0.61	0.77	−11.97	37.94
9	−0.09	0.58	0.81	−6.55	35.44
10	−0.05	−0.39	0.92	−3.19	−23.11

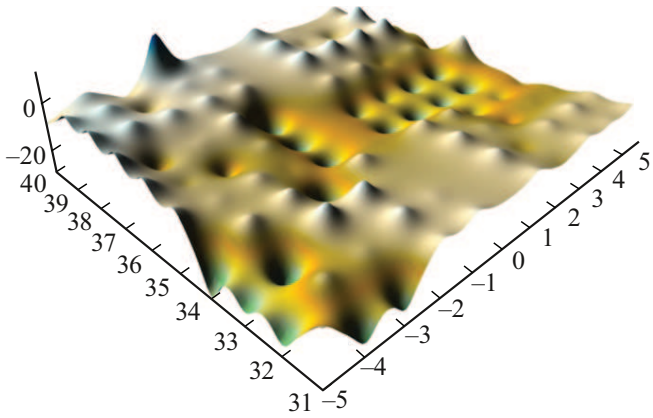


Рис. 1. Трехмерная цифровая модель рельефа для долготного интервала 31°–40°.

тем их сопоставления с высотами неровностей видимого лимба, представленными на картах Watts.

Для интерполяции данных электронных карт был разработан программный комплекс. На первом этапе его работы считываются сведения о точках неровностей лунного лимба [4], попадающих в границы расчетной области, центрированной относительно точки, для которой определяется высотная поправка. Размер данной области определяется плотностью объектов вокруг точки, для которой вычисляется альтиметрическая поправка. Область интерполяции разбивается на множество сегментов ($N = 24$), в каждом из 24 сегментов выбирается ближайшая к исследуемой точке опорная точка, которая затем используется при выполнении интерполяции. Такое разбиение позволяло учитывать информацию со всех направлений относительно исследуемой точки и предотвращало возникновение ситуации, при которой опорные объекты, расположенные в границах одного сектора, доминируют. Значение $N = 24$ было выбрано как компромисс между равномерностью распределения опорных точек и эффективностью используемого алгоритма.

Для некоторой точки карты задаются ее высота z_i и расстояние r_i до исследуемой точки. Эти значения, определенные для совокупности точек $i = 1, 2, \ldots, n$, требуются для вычисления высоты Z при выполнении процедуры интерполяции согласно выражению:

$$Z = \frac{\sum_{i=1}^{n} w_i \frac{z_i}{r_i}}{\sum_{i=1}^{n} \frac{1}{r_i}},$$

где n — число точек, отобранных в сегментах области интерполяции; w_i — весовой коэффициент, учитывающий удаленность i-й точки карты относительно исследуемой.

В рассматриваемом случае по картам „Казань“ требовалось предварительно определить координаты проекций центров объектов на картографическую плоскость. После этого для заданных точек определялись высоты, на основе которых затем вычислялись радиусы центров объектов. С этой целью был реализован алгоритм уточнения координат опорных объектов, в рамках которого формировалась модель выбранного участка ЛЗЛ, после идентификации искомого объекта на модели выполнялась аппроксимация его контура эллипсом. Параметры эллипса — положение и размеры — подбирались в интерактивном режиме таким образом, чтобы обеспечить наиболее точное визуальное соответствие границам объекта. После завершения аппроксимации центр эллипса рассматривался как уточненное положение кратера. Затем определялись его положение в системе Гайна и высота, а затем рассчитывались декартовы координаты. Созданная опорная сеть включает объекты ЛЗЛ, равномерно распределенные вдоль лунного лимба. Их положения определены в динамической системе координат. Фрагмент опорной сети представлен в табл. 1 (построенной на основе данных КД Н.Ю. Деминой „Создание навигационной опорной сети на поверхности луны в фундаментальной системе координат“).

В табл. 1 ξ, η, ζ — безразмерные нормированные селеноцентрические декартовы координаты объекта, вычисляемые как отношения координат X, Y, Z соответственно к среднему лунному радиусу; λ, φ — долгота и широта объекта, заданные в градусах.

Кроме того, для ряда участков ЛЗЛ были сформированы цифровые трехмерные модели рельефа. Каждая модель соответствует отдельному участку ЛЗЛ, ограниченному по долготе интервалом 10° и по широте диапазоном от −5° до +5°. Наряду с объемными моделями, были получены их плоские проекции и построены изогипсы, что повысило удобство координатной привязки объектов на поверхности. Примеры построенных моделей продемонстрированы на рис. 1 и 2, построенных на основе данных КР Э.А. Хасаншиной „Исследование физической поверхности луны методом гармонического анализа“.

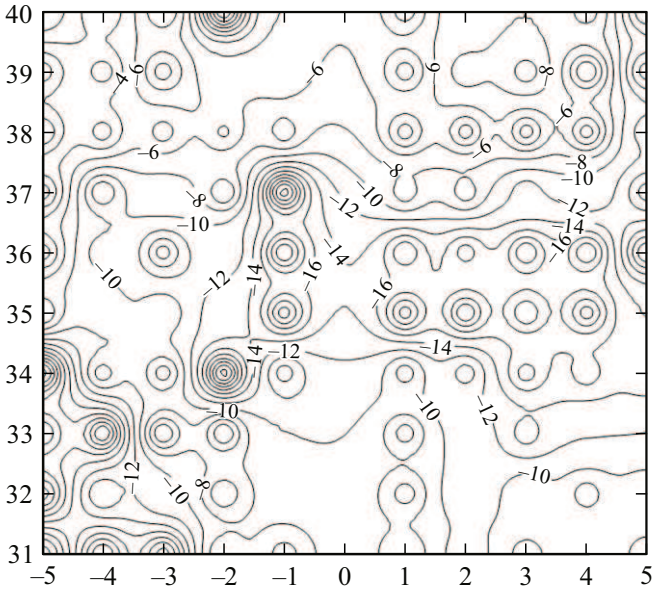


Рис. 2. Карта изогипс для долготного интервала 31°–40°.

Таблица 2. Результаты анализа моделей для долготного интервала 31°–40°

Максимальные значения высот		
№ области	Широта и долгота центра области	Высота, km
1	−2°, 40°	12
2	−5°, 38°	2
3	−5°, 37°	1
Минимальные значения высот		
№ области	Широта и долгота центра области	Высота, km
1	−2°, 34°	−27
2	−4°, 33°	−26
3	2°, 35°	−24

Следует отметить, что построенные цифровые модели рельефа использовались исключительно для анализа морфологических характеристик исследуемых участков и оценки условий посадки космических аппаратов.

2. Полученные результаты

По результатам анализа установлено, что область, соответствующая долготному интервалу 31°–40°, расположена на относительно низком гипсометрическом уровне. Рельеф участка осложнен большим количеством глубоких кратеров, поэтому в его пределах не выявлены участки, пригодные для безопасной посадки космического аппарата [5–7].

Результаты анализа диаграмм приведены в табл. 2 (построенной на основе данных КР Э.А. Хасаншиной „Исследование физической поверхности луны методом гармонического анализа“)

По результатам анализа всех моделей установлено, что наиболее высокая точка исследованных участков расположена в области, координаты центра которой (−2°; 40°), ее высота составляет 12 km. Самая низкая точка находится в области, координаты центра которой (2°; 28°), и имеет отметку −28 km. Следовательно, максимальная амплитуда высот в пределах рассмотренных моделей достигает 40 km.

Современные орбитальные исследования, обеспечивающие детальное моделирование рельефа и распределения масс на Луне, пока не позволили окончательно решить задачу прецизионной селеноцентрической привязки. Причина заключается в том, что большинство лунных экспедиций базировалось на использовании квазидинамической системы отсчета, где определение положения автоматических станций осуществлялось главным образом через их орбитальные характеристики.

Заключение

Нами получены следующие новые научные результаты. На основе робастных статистических подходов исследована надежность координатной информации, предоставляемой актуальными системами координатно-временного обеспечения лунных объектов. Обоснован и реализован алгоритм преобразования селенографических координат с последующим созданием соответствующего программного обеспечения. Реализована экспериментальная проверка работоспособности созданного программного обеспечения при решении задач обработки навигационной информации и определения планетофизических характеристик. Обоснован и реализован механизм адаптивного регрессионного анализа, позволяющий выполнять трансформацию координатных представлений и осуществлять параметрическую и структурную идентификацию селеноцентрической системы (СС). Сформирован и реализован алгоритм многопараметрической идентификации опорной СС, обеспечивающий решение задач ее развития и анализа. Использование массива оптических данных, полученных лунными орбитальными программами Clementine, Kaguya, Lunar Reconnaissance Orbiter и Apollo, позволило сформировать глобальную динамическую СС. Итогом работы стало формирование цифровой модели имитационного типа, предназначенной для приведения оптических наблюдений элементов лунного рельефа, зарегистрированных звездными датчиками орбитального аппарата и лазерным интерферометром бортового комплекса, к СС координат. В ходе исследования сформирован каталог опорных объектов ЛЗЛ, разработаны методы уточнения

их координат и построены цифровые модели рельефа исследуемых участков. Полученные результаты могут быть использованы при разработке автономных навигационных систем космических аппаратов в окололунном пространстве, создании и ориентации селеноцентрических систем координат [8]. Кроме того, разработанные методы могут применяться при исследовании геометрических и пространственных характеристик поверхности Луны и других небесных тел [9].

Финансирование работы

Авторы выражают благодарность за поддержку выполненных работ Российскому научному фонду, грант 25-22-00930.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

[1] Z. Bo, K. Di, B. Liu, J. Wang, Z. Liu, X. Xin, Z. Cheng, J. Yin. Remote Sensing, **14** (6), 1442 (2022). DOI: 10.3390/rs14061442
[2] A. Richichi, K. Patel, L.E. Mendoza Zambrano, F. Criscola, R. Bevilacqua, S.S. Eikenberry, J.M. Gómez. Monthly Notices Royal Astronom. Society, **527** (3), 6616 (2024). DOI: 10.1093/mnras/stad3473
[3] I.I. Shapiro, J.F. Chandler, Th.W. Murphy, R.D. Reasenberg. J. Geophys. Res.: Planets, **126**, e2021JE006887 (2021). DOI: 10.1029/2021JE006887
[4] M.L. Khodachenko, O.V. Arkypov. Geophys. Res. Lett., **52** (8), e2024GL111606 (2025). DOI: 10.1029/2024GL111606
[5] J. Liu, X. Zeng, Ch. Li, X. Ren, W. Yan, X. Tan, X. Zhang, W. Chen, W. Zuo, Yu. Liu, B. Liu, D. Liu, Q. Zhou, Z. Ouyang. Space Sci. Rev., **217**, 6 (2021). DOI: 10.1007/s11214-020-00781-9
[6] S. Sathyan, P. Bhardwaj, A. Srivastava, A. Das, P. Chauhan. Icarus, **412**, 115988 (2024). DOI: 10.1016/j.icarus.2024.115988
[7] F. Zhao, P. Lu, T. Meng, Y. Dang, Y. Gao, Z. Xu, R. Wang, Y. Wu. Remote Sensing, **17** (7), 1121 (2025). DOI: 10.3390/rs17071121
[8] N. Rambaux, A. Fienga, K. Sośnica. Astronom. Astrophys., **705**, A88 (2026). DOI: 10.1051/0004-6361/202555962
[9] X. Li, S. Soldini, M. Ceriotti. Astronom. Astrophys., **659**, A176 (2022). DOI: 10.1051/0004-6361/202140709