

УДК 520.2, 520.34

## Модель поверхности Луны

*Ю.А. Нefeldьев<sup>1</sup>, С.Г. Валеев<sup>2</sup>, К.М. Самохвалов<sup>2</sup>, И.М. Шарafутдинов<sup>2</sup>,  
М.В. Кутленков<sup>1</sup>, Н.Ю. Вараксина<sup>1</sup>*

<sup>1</sup> Астрономическая обсерватория им. В.П. Энгельгардта, 422526, Россия, Татарстан  
*star1955@mail.ru*

<sup>2</sup> Ульяновский государственный технический университет, УРО АН РТ, 432027, Ульяновск, Россия  
*sgv@ulstu.ru*

Поступила в редакцию 15 октября 2008 г.

**Аннотация.** В настоящей работе на основе космических и наземных наблюдений построено и проанализировано пять моделей видимой стороны Луны. Получена хорошая сходимость между сечениями моделей, построенных на основе данных миссии “Clementine” и каталога Казань-1162.

MODEL OF LUNAR SURFACE, *by Yu.A. Nefedjev, S.G. Valeev, K.M. Samohvalov, I.M. Sharafutdinov, M.V. Kutlenkov, N.Yu. Varaksina.*

**Ключевые слова:** астрономические обсерватории, наблюдения, научные связи

---

## 1 Введение

Задача построения модели макрофигуры Луны, отнесенной к ее центру масс и осям инерции, до сих пор не получила своего окончательного решения. В настоящем исследовании делается попытка создания модели видимой стороны Луны на основе космических и наземных наблюдений. Методы получения наблюдений предполагали привязку лунных объектов к звездам, то есть к небесной системе координат. В качестве таких наблюдений были использованы крупномасштабные снимки Луны со звездами и данные миссии “Clementine”. Было построено пять моделей на программно-аналитическом комплексе Ульяновского государственного технического университета.

## 2 Гипсометрический анализ с привлечением данных миссии Clementine и наземных наблюдений

Представляло интерес сравнить гипсометрический уровень, задаваемый независимыми селеноцентрическими системами координат каталога “Казань” (далее по тексту KZ-1) (Хабибуллин, Ризванов, 1984) и Казань-1162 (далее по тексту KZ-2), полученными по фотографиям Луны со звездами, с рельефом, формируемым совокупностью высот, полученным в рамках миссии “Clementine” (далее по тексту CL) (Смиз, 1997). При этом общепринятый средний гипсометрический уровень будет задаваться каталогом “Голосеево” (далее по тексту KV) (Гаврилов и др., 1977). Идея и математическое

обеспечение для сравнения трех источников данных о рельефе следующие. Учитывая, что геометрические сечения видимой полусферы Луны можно построить, используя разложения функции высоты  $h$  в ряд по сферическим функциям в виде

$$h(\varphi, \lambda) = \sum_{n=0}^N \sum_{m=0}^n (\bar{C}_{nm} \cos m\lambda + \bar{S}_{nm} \sin m\lambda) \bar{P}_{nm}(\cos \varphi) + \mathcal{E} \quad (1)$$

( $\varphi, \lambda$  – известные координаты лунных объектов;  $\bar{C}_{nm}, \bar{S}_{nm}$  – нормированные коэффициенты сферических гармоник;  $\bar{P}_{nm}$  – нормированные присоединенные функции Лежандра), получим три варианта набора сечений. Их анализ позволяет сделать определенные суждения о степени близости гипсометрической информации, задаваемой каталогами KZ-1 и KV, KZ-2 к рельефу миссии CL.

### 2.1 Описание данных

В настоящее время наиболее подробной моделью мегарельефа Луны, полученной по данным миссии CL, является модель 70-го порядка разложения по сферическим функциям, построенная в JPL USA. Для описания рельефа в УЛГТУ была рассчитана предварительно модель 40-го порядка разложения, достаточно точно описывающая глобальные особенности лунной фигуры (Валеев, Дьяков, 1999; Валеев, 1984).

### 2.2 Наблюдательный материал

Исходная информация в JPL была представлена в виде координатной сети  $2^0 \times 2^0$ , охватывающей зону между  $75^0$  северной и южной широты и средним радиусом 1738 км. При обработке использовался массив данных, состоящий из 72548 высот.

### 2.3 Алгоритмы обработки и программное обеспечение

Оценки параметров разложения находились из решения переопределенной системы 72548 линейных уравнений по одной из вычислительных схем МНК – схемы Гаусса-Жордана. На первом этапе рассматривались модели до сорокового порядка разложения из-за ограниченности ресурсов вычислительной техники. Соответствующие внутренние критерии определялись одновременно с гармоническими коэффициентами, характеризующими точность оценивания и статистическую значимость отдельных коэффициентов и всей модели в целом. Процедура пошаговой регрессии (метод включения с исключением) при уровне значимости  $\alpha = 0.05$  использовалась для формирования оптимальной структуры модели по  $t$ -критерию. Программное обеспечение в виде АСНИ версии 2.0 описано в работе (Валеев, Самохвалов, 2001).

### 2.4 Стандартная модель сорокового порядка

Было установлено (Валеев и др., 2003), что значения коэффициентов разложения по сферическим функциям рельефа видимой стороны Луны сорокового порядка ( $N = 40$ ) практически совпадают для соответствующих гармоник при  $N = 70$ . Это подтверждает корректность основных расчетов. Проверка соблюдения предположений регрессионного анализа (метода наименьших квадратов (РА-МНК)) привела к следующим заключениям: модель содержит около 30 % статистически незначимых слагаемых; парные коэффициенты корреляции  $r_{ij} < 0.3$ , что свидетельствует о практической ортогональности разложения; из анализа остатков делается вывод о некотором нарушении условия нормальности; критерий Дарбина-Уотсона равен 0.58, что означает наличие автокорреляции первого порядка.

### 2.5 Модели пятого порядка

Разложения по сферическим функциям при  $N = 5$  использовались для построений сечений по данным KV, KZ-1, CL и KZ-2.

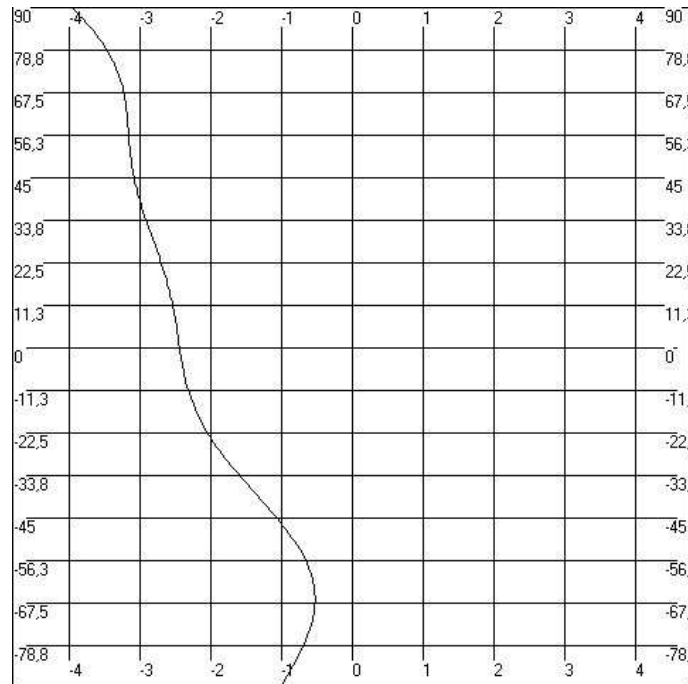


Рис. 1. Сечение  $\lambda = 40^{\circ}$  по массиву данных миссии Clementine

## 2.6 Гипсометрические сечения

На основе математических моделей при пятом порядке разложения и соответствующего графического модуля были получены сечения по пяти меридианам лунной сферы ( $\lambda = -40^{\circ}, -20^{\circ}, 0^{\circ}, 20^{\circ}, 40^{\circ}$ ) по обе стороны от экватора с шагом  $1^{\circ}$  по широте. На каждом графике на оси абсцисс откладывались высоты относительно нулевой отметки (1738 км), по оси ординат – широты.

На рисунках 1 и 2 изображены сечения для селенографической долготы  $\lambda = 40^{\circ}$  по массиву данных миссии CL и каталога KZ-2.

## 3 Модель макрофигуры Луны на основе данных каталога Казань-1162

Новые данные о рельефе видимой стороны лунной поверхности были получены при анализе радиусов-векторов (абсолютных высот) 1162 точек каталога KZ-2 (Валеев и др., 2004). Каталог построен “абсолютным” методом, то есть путем прямой привязки изображений кратеров к фундаментальной системе координат звезд. Положения объектов в каталоге реализуют динамическую систему координат, начало которой совпадает с эфемеридным положением центра масс Луны, а оси направлены вдоль главных осей ее инерции.

На рисунке 3 представлена модель рельефа поверхности видимой полусферы Луны, задаваемая данными каталога KZ-2.

Судя по рисунку, по каталогу KZ-2 фигура Луны представляет собой полусферу со средним радиусом 1736.34 км 1.20 км с выступом в центральной части высотой порядка 0.9 км. К северу от параллели  $10^{\circ}$  рельеф поверхности постепенно понижается, в зоне широт  $30^{\circ} - 70^{\circ}$  радиус-векторы в среднем на 0.9 км меньше полученного нами среднего радиуса.

Был произведен анализ рельефа поверхности видимой стороны Луны (Валеев и др., 2003). Основным методом было сравнение гипсометрических данных каталога KZ-1 с данными координатных систем KV, “Apollo” (Шимерман, 1976). Также использовались координаты точек посадок

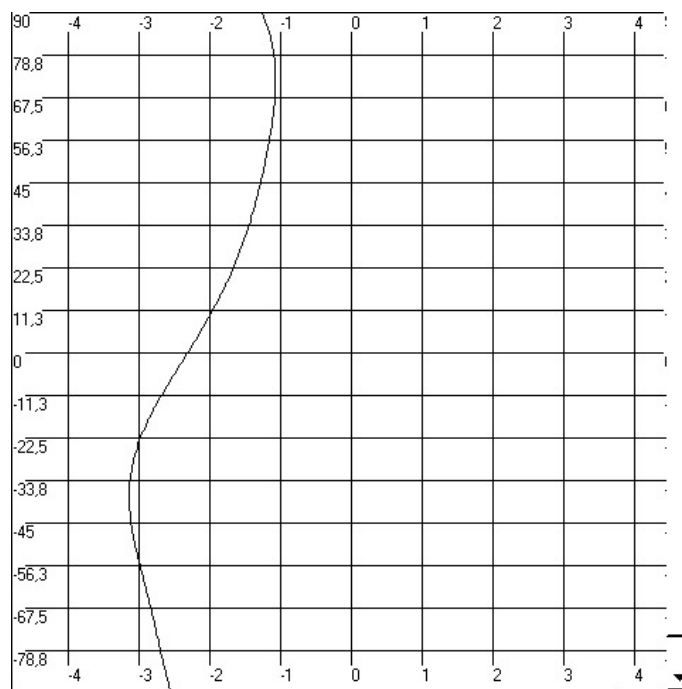


Рис. 2. Сечение  $\lambda = 40^0$  по массиву данных каталога Казань-1162

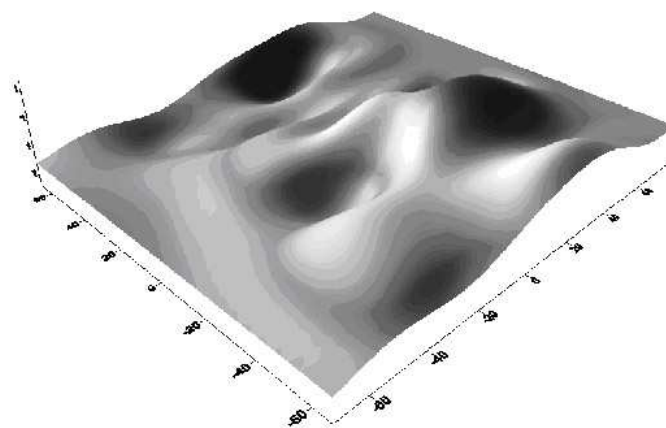


Рис. 3. Модель видимой полусферы Луны, построенная на основе данных каталога Казань-1162

КА “Луна-21” и КК “Аполлон”, где были установлены уголкового отражатели и радиопередатчики, входящие в снаряжение системы ALSEP. Считается, что ошибки радиус-векторов этих точек от центра масс Луны не превышают 30 м (Абалакин, 1978). Кроме того, для независимой проверки существования низменности в северном полушарии Луны использованы результаты обработки фотографии Луны, полученной с КА “Зонд-8” 23/24 октября 1970 г. (снимок № 6) (Родионов и др., 1976).

## 4 Заключение

Из анализа каталогов KV и KZ-1 можно сделать следующие выводы (Валеев и др., 2004) по исследованию сечений для долгот  $\lambda = -40^0, -20^0, 0^0, 20^0, 40^0$ :

1. Понижение рельефа в северном полушарии Луны по данным каталога KZ-1 глубже, чем по данным миссии CL, на 2–3 км. Но формы гипсометрических кривых в обоих источниках в целом близки. Средний уровень южного полушария выше, чем северного. Различие по высоте между двумя системами в этом полушарии заметно меньше (порядка 0.5–1.0 км).
2. Понижение рельефа для северных широт в диапазоне  $30^0 - 45^0$  по данным каталога KV такого же порядка, как и для данных миссии CL. Однако далее высоты из KV возрастают до широт  $70^0 - 80^0$ . Это приводит к заметному различию форм гипсометрических кривых.
3. Сравнение пяти гипсометрических кривых для каталогов KZ-1, KV подтверждает ранее сделанные выводы о понижении среднего уровня рельефа по данным KZ-1 по сравнению с данными KV в северном полушарии Луны. Общее понижение складывается из понижения в северной части гипсометрического сечения KZ-1 относительно сечения CL и повышения части сечения KV.

Анализ сечений, приведенных в Приложении, для долгот  $\lambda = -40^0, -20^0, 0^0, 20^0, 40^0$  CL, KZ-1, KV и каталога KZ-2 дал следующие результаты:

1. Сравнение пяти гипсометрических кривых сечений моделей поверхности, определяемых данными CL и каталога KZ-2, показывает их очень хорошее согласие.
2. Рельеф модели макрофигуры каталога KZ-2 не дает ни заметных понижений, ни заметных повышений относительно данных космического эксперимента CL.
3. Сравнение гипсометрических кривых данных CL и каталогов KZ-1, KV с KZ-2 также подтверждает ранее сделанные выводы о понижении среднего уровня рельефа по данным KZ-1 по сравнению с данными KV в северном полушарии Луны, но общее понижение имеет гораздо менее выраженную форму, чем в каталоге KZ-1 и наиболее близко к величине понижения данных наблюдений космического эксперимента CL.

Результаты сравнения рельефа лунной поверхности по данным наземных и космических фотографий Луны и системы ALSEP следующие:

1. Различия абсолютных высот в каталогах KV, KZ-1 и (Шимерман, 1976) для северной части видимой стороны Луны носят систематический характер. В связи с этим была выдвинута гипотеза, альтернативная общепринятой (Гаврилов и др., 1977; Шимерман, 1976), относительно фигуры физической поверхности видимой стороны Луны.
2. Результаты анализа данных эксперимента ALSEP не отвергают предложенную новую гипотезу о понижении рельефа лунной поверхности к северу от параллели  $+10^0$  относительно общепринятого.
3. Данные редукиции снимка Луны с КА “Зонд-8” (Родионов и др., 1976) с элементами внешнего ориентирования аппарата в системе координат каталога KZ-1 подтверждают понижение рельефа лунной поверхности до 1.5 км в области  $-70^0 < \lambda < -30^0, -10^0 < \lambda < -63^0$  относительно общепринятого уровня (Гаврилов и др., 1977, 1981).

Работа поддержана грантом РФФИ 08-02-01214.

## Литература

- Абалакин В.К. // Труды ИТА АН СССР. 1978. Вып. 17. С. 82.  
 Валеев С.Г., Дьяков В.И. // Вестник УлГТУ. 1999. С. 90.  
 Валеев С.Г. // Астрон. вестник. 1984. Т. 18. №. 3. С. 208.

- Валеев С.Г., Ризванов Н.Г., Нефедьев Ю.А. // Известия вузов: Геодезия и Аэрофотосъемка. 2003. №. 4. С. 83.
- Валеев С.Г., Ризванов Н.Г., Нефедьев Ю.А. // Международная конференция “Основные направления развития астрономии в России”, 21–25 сентября 2004. Казань. 2004. С. 255.
- Валеев С.Г., Самохвалов К.М. // VI всероссийская научно-техническая конференции студентов, молодых ученых и специалистов. Новые информационные технологии в научных исследованиях и в образовании. Рязань. 2001. С. 99.
- Гаврилов И.В., Кислюк В.С., Дума А.С. // Сводная система селенодезических координат 4900 точек лунной поверхности. Киев: Наукова думка. 1977.
- Гаврилов И.В., Кислюк В.С., Карасев Л.А. // Астрон. вестник. 1981. Т. 15. №. 4. С. 211.
- Родионов Б.Н., Нефедьев А.А., Валеев С.Г., Шпекин М.И. // Космич. иссл. 1976. Т. 14. №. 4. С. 624.
- Смиз и др. (Smith D.E.) // J. Geophys. Res. 1997. Vol. 102. P. 1591.
- Хабибуллин, Ризванов (Habibullin Sh.T., Rizvanov N.G.) // Earth, Moon and Planets. 1984. Vol. 30. №. 1. P. 1.
- Шимерман (Schirmerman L.A.) // Presented at the 16th General Assembly of the IAU. Defense mapping agency aerospace center. St. Louis. Missouri. 1976. P. 16.