

УДК 523.34

Профиль Луны по данным съемки КК «Аполлон-11»

А. С. Дума, В. С. Кислюк

С помощью реперных точек, высоты которых определены по селенодезическим данным видимого полушария Луны, и результатам лазерной альтиметрии, выполненной на КК «Аполлон-15, -16», проведена абсолютизация лунного профиля, полученного по фотографиям с КК «Аполлон-11». Получена первая информация о рельефе некоторых участков обратной стороны Луны.

PROFILE OF THE MOON FROM THE DATA OF «APOLLO-11» SPACECRAFT SURVEY, by Duma A. S., Kislyuk V. S.—Absolutisation of the Moon profile obtained by spacecraft «Apollo-11» is carried out by means of the bench mark points whose heights were determined from the selenodetic data of the nearside Moon hemisphere and the results of «Apollo-15» and «Apollo-16» laser altimetry. The first information about the relief of some regions was obtained for the farside of the Moon.

Для изучения фигуры лунной поверхности важно измерить профили видимых лимбов Луны. Наиболее детально исследованы профили так называемой краевой, или либрационной зоны, доступной для наблюдений с поверхности Земли. С применением космической съемки представилась возможность фотографировать Луну с разных сторон, в результате чего расширены границы либрационной зоны и получены первые сведения о рельефе обратной стороны Луны. Так, по измерениям фотографий, полученных в 1968 г. КА «Зонд-6», выявлена обширная топографическая депрессия [7], наличие которой подтверждено также КА «Зонд-8» [4, 8] доставившим в 1970 г. на Землю аналогичные снимки Луны. Оказалось, что эта депрессия совпадает с большой отрицательной аномалией силы тяжести [12].

С помощью АМС «Зонд-6, -8» сфотографировано западное полушарие Луны. Фотографии восточного полушария получены во время выполнения американской космической миссии «Аполлон». Некоторые из этих снимков послужили исходным материалом для определения селенографических координат точек либрационной зоны и обратной стороны Луны [10]. В настоящей работе приведены результаты изучения профилей Луны по данным измерений снимков, полученных с помощью КК «Аполлон-11».

Исходным материалом послужили контактные копии с трех оригинальных негативов, полученных КК «Аполлон-11». Этот материал любезно предоставили Государственному астрономическому институту им. П. К. Штернберга (ГАИШ) Лоу и Шерер (см. [2]). На снимках (подаппаратная точка находилась юго-восточнее Моря Кризисов) изображена восточная часть видимого с Земли полушария и обратной стороны Луны. Со стороны видимого полушария линия горизонта искажена фазой.

Измерения точек профиля (через 3° по позиционному углу) и кратеров видимого полушария Луны выполнены на измерительном приборе «Аскорекорд» относительно центральной марки, нанесившейся вблизи центра изображения Луны. Точность измерений отдельных профилей характеризуется величиной ± 5 мкм, что соответствует с учетом масштаба снимков $\pm (0.3—0.4)$ км на лунной поверхности. Используя измерения опорных кратеров видимого полушария определялись элементы ориентирования снимков. Для каждой опорной точки можно за-

писать два условных уравнения вида

$$a_1\delta u_s + a_2\delta v_s + a_3\delta w_s + a_4\delta\mu + a_5\delta\nu + a_6\delta\pi + a_7\delta f + a_8\delta x = x_0 - x_c, \quad (1)$$

$$b_1\delta u_s + b_2\delta v_s + b_3\delta w_s + b_4\delta\mu + b_5\delta\nu + b_6\delta\pi + b_7\delta f + b_8\delta y = y_0 - y_c,$$

где x_0, y_0 и x_c, y_c — соответственно измеренные и вычисленные плоские координаты кратеров; $\delta u_s, \delta v_s, \delta w_s$ — поправки к координатам центра проектирования в местной (связанной с направлением на КК) селенодезической координатной системе; $\delta\mu, \delta\nu, \delta\pi, \delta f, \delta x, \delta y$ — поправки соответственно к принятым трем углам ориентировки камеры, ее фокусно-му расстоянию, а также к положению оптического центра на снимке. Коэффициенты $a_{1...8}, b_{1...8}$ — функции измеренных координат, селеноцентрического расстояния КК и фокусного расстояния съемочной камеры. Их выражения даны в работе [5].

Показано [5], что из-за неоптимального распределения опорных кратеров редуцирование профилей с помощью найденных по формулам (1) элементов ориентирования снимков выполняется недостаточно строго. В связи с этим опорные точки использованы только для уточнения пространственных координат КК и фокусного расстояния съемочной камеры. В качестве исходных данных брались значения селенографических координат КК, снятые с Полной карты Луны, а также значения оптимального фокусного расстояния $F_0 = 80$ мм. Координаты кратеров взяты из Сводного селенодезического каталога [1].

Таблица 1. Характеристика снимков

Параметр	Номер снимка		
	6663	6664	6665
n	92	102	115
F , мм	78.551	78.478	78.081
β_s	5.767°	5.657°	5.607°
λ_s	66.672°	63.976°	61.253°
D_s , км	5442	5963	6561
m , км/мм	66.051	72.682	80.541
e , мм	0.101	0.054	0.072
P_0	197°	216°	259°
σ , мм	0.022	0.018	0.015

Таблица 2. Селенографические координаты точек профиля

P	λ	β	P	λ	β
42°	8° W	47° N	260°	136° E	8° S
40	8 W	50 N	240	131 E	27 S
20	9 E	69 N	220	123 E	45 S
0	64 E	79 N	200	102 E	60 S
340	123 E	67 N	180	64 E	67 S
320	134 E	49 N	160	26 E	61 S
300	137 E	30 N	140	5 E	44 S
280	137 E	11 N	129	1 W	34 S

Примечание: n — количество измеренных опорных кратеров; F — фокусное расстояние съемочной камеры; селенографические координаты КК в момент съемки: β_s — широта, λ_s — долгота и D_s — радиус-вектор, m — масштаб каждого из снимков. Номера снимков указаны в соответствии с обозначениями на оригинальных негативах.

По данным табл. 1 находилось положение измеренного профиля на лунной поверхности, используя следующее выражение для линии горизонта:

$$\sin \beta \sin \beta_s + \cos \beta \cos \beta_s \cos (\lambda_s - \lambda) = \cos \theta, \quad (2)$$

где λ, β — текущие селенографические координаты точек профиля, θ —

селеноцентрический угол между направлениями на КК и точку лунного горизонта. В табл. 2 приведены селенографические координаты λ и β отдельных точек для среднего профиля (снимок № 6664). Позиционный угол P отсчитывается от северного направления изображения оси вращения Луны в плоскости снимка в направлении против часовой стрелки.

Дальнейшая абсолютизация (редуцирование к сфере радиуса 1738 км) измеренных профилей проводилась методом реперных точек [4]. В основе метода — предположение о том, что Луна — шар, а видимая эллиптичность изображения обусловлена отклонением оптической

оси аппарата от местной вертикали. В связи с этим, в первом приближении измеренный профиль представлялся эллипсом:

$$u_0 \sin P_i + v_0 \cos P_i + e \cos^2(P_i - P_0) + \Delta r_0 = h_i, \quad (3)$$

где u_0 , v_0 — координаты центра эллипса относительно центральной марки; e — эксцентриситет эллипса; P_0 — позиционный угол большой

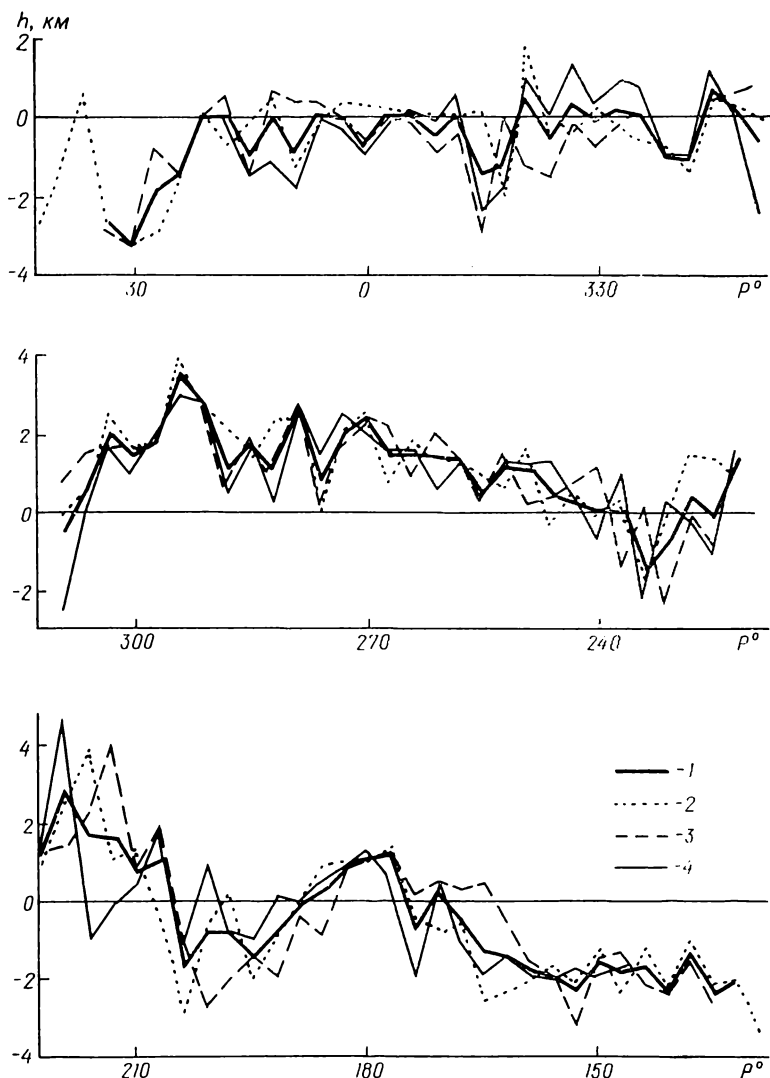


Рис. 1. Неровности профиля после абсолютизации по реперным точкам: 1 — осредненный профиль, 2, 3, 4 — профили, полученные соответственно по измерениям снимков № 6663, 6664, 6665

оси эллипса; P_i — позиционный угол точек края; Δr_0 — поправка к радиусу изображения; h_i — отклонения измеренных радиусов-векторов точек края от их среднего значения.

Результаты представления эллипсом (e , P_0), а также средние квадратичные ошибки единицы веса для каждого снимка (σ), приведены в последних трех строках табл. 1.

Редуцированные к эллипсу профили затем абсолютизировались по реперным точкам [4]. Если в некоторых местах профиля имеются участки с известными абсолютными высотами, то эти, так называемые «реперные» точки, позволяют провести абсолютизацию профилей, ис-

пользуя выражения для ряда Фурье

$$(h_p - h_n)_i = \Delta h_0 + c_1 \sin P_i + d_1 \cos P_i + c_2 \sin 2P_i + d_2 \cos 2P_i + \dots, \quad (4)$$

где $(h_p)_i$ — абсолютная высота реперной точки, $(h_n)_i$ — высота соответствующей точки профиля.

Выбор реперных точек проведен следующим образом. На севере и юге видимой стороны Луны измеренные профили пересекают области, обеспеченные опорной селенодезической сетью. Абсолютные высоты реперных точек здесь находились путем осреднения на участке $10^\circ \times 10^\circ$ значений высот точек, взятых из Сводного селенодезического каталога [1]. На каждый из таких участков попадало 10—30 точек. На обратной стороне измеренные профили пересекаются с центральными сечениями Луны, полученными путем лазерной альтиметрии с КК «Аполлон-15, -16, -17». В качестве реперных принимались

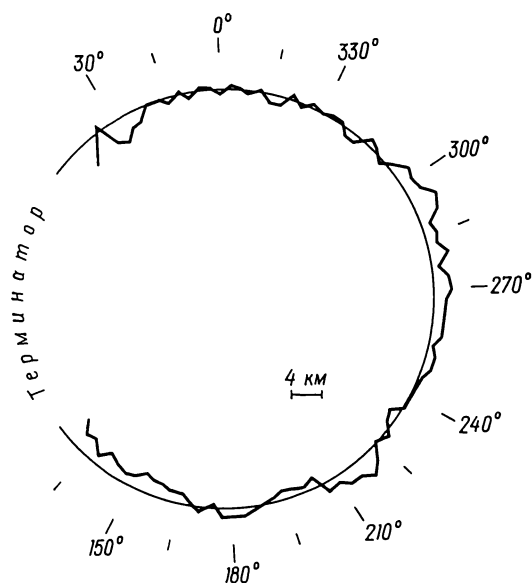


Рис. 2. Мегарельеф Луны вдоль среднего профиля

точки пересечения профилей, а их высоты определялись путем осреднения вдоль соответствующего профиля на расстоянии 5° от узловой точки. Для абсолютизации использовались профили по данным КК «Аполлон-15, -16». Основные характеристики реперных точек приведены в табл. 3.

Таблица 3. Характеристика реперных точек

Обозначение реперных точек	P	h_p , км	h_n , км
N-1	20°	-1.6	+0.8
N-2	35	-2.4	-0.7
S-1	145	-1.0	-0.1
S-2	170	-1.0	+0.2
A-15	249	+0.8	-0.4
A-16	274	+1.5	+0.5

Таблица 4. Сравнение профиля с независимыми данными

P	h_p , км	$h_{сравн}$, км	Примечание
352°	-0.1	-0.7	Краяевая зона
358	-0.2	0	То же
189	-0.3	-0.9	» »
258	+1.2	+2.0	«Аполлон-17»

Примечание: N-1, N-2—две точки северной части; S-1, S-2—аналогичные точки южной части видимого полушария Луны; A-15, A-16—точки пересечения измеренных профилей альтиметрическими профилями по данным «Аполлон-15» и «Аполлон-16» соответственно [13]; P —позиционный угол реперных точек; h_p —высота репера, h_n —высота соответствующей точки измеренного профиля.

квадратов выражений (4) показал, что практически для приведения профилей к системе каталога следует применять выражение (численные значения коэффициентов — в км)

$$(h_p)_i = (h_n)_i + (1.8 \pm 0.5) \sin P_i - (0.6 \pm 0.3). \quad (5)$$

Редуцированный таким образом осредненный профиль показан на рис. 1, 1. Кроме того, показаны профили, полученные по каждому снимку в отдельности. Более наглядно мегарельеф Луны вдоль осредненного профиля показан на рис. 2.

Полученный профиль сравнивался с некоторыми селенодезическими данными, которые не привлекались для абсолютизации. Это — высоты в краевой зоне Луны (на северо-востоке и юго-востоке профили пересекают краевую зону), а также альтиметрический профиль, полученный с КК «Аполлон-17». Высоты точек краевой зоны брались из каталога А. С. Думы [3] путем описанного выше осреднения. Альтимет-

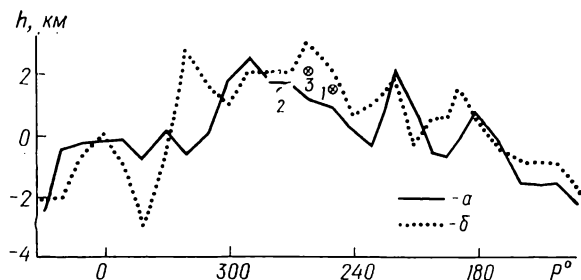


Рис. 3. Сравнение профилей Луны по данным Биллз, Феррари [11] (а) и нашим данным (б). Указаны отметки реперных точек по данным «Аполлон-15 (1), -16 (2), -17 (3)»

рический профиль «Аполлон-17» приведен в работе [11], а схема расположения его на лунной поверхности показана в книге М. У. Сагитова [9]. Результаты сравнения, приведенные в табл. 4, свидетельствуют об удовлетворительном согласии данных.

Кроме того, было выполнено сравнение полученного профиля с результатами гармонического анализа лунной топографии, выполненного Биллзом и Феррари [11]. В этой работе приведена гипсометрическая карта всей Луны, построенная на основании разложения в ряд по сферическим функциям до 12-й степени и порядка большой совокупности данных о высотах точек лунной поверхности. Результаты сравнения приведены на рис. 3. В общем отмечается неплохое согласие этих данных. Наибольшие расхождения высот следующие: при $P=322^\circ$ — район кратера Вольтерра ($\Delta h > 3$ км) и при $P=342^\circ$ — район кратера Шварцшильд ($\Delta h > 2,5$ км). Эти участки лунной поверхности не обеспечены какими-либо селенодезическими данными. Поэтому для заполнения этих и других «пустых» мест Луны Биллз и Феррари [11] применили метод линейной автоковариационной техники. Этот метод эффективен, если вариации топографии статистически однородны и изотропны. На самом деле лунная топография характеризуется значительной неоднородностью, о чем свидетельствует большой вклад гармоник высокого порядка при гармоническом анализе рельефа. Следовательно, применение ковариационной функции при заполнении «пустых» мест на Луне может привести к ошибочным представлениям о неправильностях лунной фигуры, о чем свидетельствуют данные вышеуказанного сравнения (рис. 3). Аналогичная картина получена в работе [6], в которой дается сравнение профиля, полученного по данным «Зонд-8» [4] с результатами гармонического анализа [11].

Таким образом, получена первая информация о рельефе обратной стороны Луны на протяжении около 2000 км севернее и около 1500 км южнее от полосы, обеспеченной измерениями с КК серии «Аполлон». Привлечение профилей Луны, полученных с помощью КК серии «Аполлон», а также КА серии «Зонд» [4, 7, 8] может быть весьма эффективным при изучении фигуры Луны, и особенно неправильностей фигуры ее обратной стороны.

Авторы признательны отделу физики Луны и планет Государственного астрономического института им. П. К. Штенберга за предоставленные дубли-негативы снимков Луны.

1. Гаврилов И. В., Кислюк В. С., Дума А. С. Сводная система селенодезических координат 4900 точек лунной поверхности.— Киев: Наук. думка, 1977.—177 с.
2. Дехтярева К. И., Липский Ю. Н., Чикмачев В. И. Селенодезическая плановая основа на обратное полушарие Луны.— В кн.: Атлас обратной стороны Луны. М.: Наука, 1975, ч. III, с. 76—109.
3. Дума А. С. Абсолютные высоты краевой зоны Луны в системе селенодезических опорных точек.— Астрометрия и астрофизика, 1973, вып. 20, с. 55—68.
4. Кислюк В. С. Профиль обратной стороны Луны по данным съемки КА «Зонд-8».— Астрометрия и астрофизика, 1975, вып. 27, с. 31—36.
5. Кислюк В. С. Об уточнении координаты ζ кратеров видимого полушария Луны по данным съемки КА «Зонд-8».— Космич. исследования, 1975, 13, с. 415—422.
6. Кислюк В. С. Фигура Луны и вопросы планово-высотного обоснования лунных карт.— Изв. вузов. Геод. и аэрофотосъемка, 1983, № 1, с. 56—62.
7. Родионов Б. Н., Исавнина И. В., Авдеев Ю. Ф. и др. Новые данные о фигуре и рельефе Луны и результаты обработки фотографий, доставленных «Зонд-6».— Космич. исследования, 1971, 9, с. 450—455.
8. Родионов Б. Н., Нефедьев А. А., Шпекин С. Г. и др. Изучение рельефа обратной стороны Луны по фотографиям «Зонд-8».— Космич. исследования, 1976, 14, с. 624—629.
9. Сагитов М. У. Лунная гравиметрия.— М.: Наука, 1979.—432 с.
10. Arthur D. W. G. Selenography and selenodesy with Apollo whole-disk lunar photographs. I. Selenography.— Icarus, 1971, 14, p. 388—418.
11. Bills B. G., Ferrari A. J. A harmonic analysis of lunar topography.— Icarus, 1977, 31, p. 244—259.
12. Ferrari A. J. Lunar gravity: The first farside map.— Science, 1975, 188, p. 1297—1300.
13. Sjogren W. L., Wallenhaupt W. R. Lunar shape via the Apollo laser altimeter.— Science, 1973, 179, p. 2775—2781.

Главная астрономическая обсерватория АН УССР,
Киев

Поступила в редакцию
16.07.1984