ГРАВИТАЦИОННЫЕ АНОМАЛИИ НА ЛУНЕ

С.Г. Пугачева, В.В. Шевченко**

**Государственный Астрономический Институт им. Штернберга
Московского Государственного Университета им. М.В. Ломоносова
Москва, Россия, pugach@msu.ru*

GRAVITY ANOMALIES OF THE MOON

S.G. Pugacheva, V.V. Shevchenko**

**Sternberg Astronomical Institute Moscow University
Moscow, Russia, pugach@msu.ru*

Abstract. The source of gravity anomalies of the Moon are large mascons with a high mass concentration at a depth of volcanic plains and lunar Maria. New data on the gravitational field of the Moon were obtained from two Grail spacecrafts. The article presents the data of physical and mechanical properties of the surface soil layer of the lunar Maria and gives an assessment of the chemical composition of the soil. There have been calculated heterogeneity parameters of the surface macro-relief of the lunar Maria: albedo, soil density, average grain diameter of the particles forming the surface layer and the volume fraction occupied by particles. It can be assumed that mascons include rich KREEP rocks with a high content of thorium and iron oxide. Formation of mascons is connected with intensive development of basaltic volcanism on the Moon in the early periods of its existence.

Keywords: Moon, gravity anomalies, macro-relief, heterogeneity parameters, chemical composition.

Введение. В статье представлены результаты изучения лунной поверхности в районах гравитационных аномалий. Источником гравитационных аномалий Луны являются масконы с локальной концентрацией масс на глубине в грунте вулканических плато и лунных морей. Формирование масконов связано с интенсивным развитием базальтового вулканизма на ранней стадии существования Луны [6].

Фотографии с орбитальных спутников Луны показывают лунные моря, покрытые вулканической лавой, извивающиеся потоки лавы, конусы, купола и разрушенные впадины. Множество вулканических структур было обнаружено космическими аппаратами Grail. Это тектонические структуры, бассейны ударных кратеров, древние линейные гравитационные аномалии. В статье мы приводим данные физико-механических свойств поверхностного слоя грунта лунных масконов и даем оценку химического состава грунта. Все измерения выполнены согласно теоретическим моделям рассеяния света на основе съемки поверхности Луны орбитальными космическими аппаратами и анализа образцов лунного грунта. Вычислены параметры неоднородности макрорельефа поверхности лунных морей: альbedo, плотность грунта, средние размеры зерен частиц слагающих поверхностный слой и доля объема занятого частицами.

Исследование гравитационное поля Луны. Исследованием гравитационного поля Луны занимались задолго до запуска первых искусственных спутников Луны. Сотрудники ГАИШ МГУ М.У. Сагитов и Н.П. Грушинский вычислили силу тяжести на лунном трехосном эллипсоиде, используя наземные астрометрические наблюдения [12]. Они предложили модель, согласно которой гравитационное поле Луны можно представить полем трехосного эллипсоида, полярная ось которого перпендикулярна эклиптике, а большая экваториальная ось лунного эллипсоида направлена в сторону Земли. Исследования показали, что сила тяжести на Луне увеличивается от полюсов к экватору примерно на 0,0004 ее полной величины. Гравитационное поле лунного трехосного эллипсоида изменяется по закону Лежандра.

Позднее гравитационное поле было определено по наблюдению искусственных спутников Луны. Наблюдения подтвердили вытянутость эллипсоида Луны в сторону Земли. Модель Феррари трехосного эллипсоида Луны показывает, что высота поверхностного уровня над шаром в сторону Земли составляет 400 м и 300 м – с обратной стороны Луны.

В 1968 г. американские ученые П. Мюллер и У. Сьегрен по результатам исследования лучевых ускорения ИСЛ Лунар Орбитер 5 обнаружили крупные *положительные* аномалии в море Дождей, море Ясности, море Кризисов. На высоте полета спутника (100 км) гравитационные аномалии достигали 200 мГал и более. В частности, в море Дождей гравитационная аномалия равна 250 мГал, в море Ясности – 220 мГал, в море Кризисов – 130 мГал. Гравитационная карта Луны, составленная по данным зонда КА LunarProspector в 1998–1999 гг. приведена на рисунке 1.

Рис. 1. Гравитационная карта Луны по данным зонда Lunar Prospector. На карте видимого полушария Луны выделено 5 самых значительных масконов, совпадающих с пятью лунными морями

Современная модель гравитационного потенциала Луны. Современная модель гравитационного потенциала Луны традиционно записывается как сумма трёх слагаемых: приливный потенциал, центробежный потенциал, потенциал притяжения. Потенциал притяжения обычно раскладывают по зональным, секторальным и тессеральным сферическим гармоникам [14, 15]. В формулу входят величины при- соединённый полином Лежандра, гравитационная постоянная, масса Луны, долгота и широта местности.

$$U = (Gm/r) [1 + \sum_{n=2}^{\infty} (a/r)^n \sum_{k=0}^n (C_{nk} \cos k\lambda + S_{nk} \sin k\lambda) P_{nk}(\sin \varphi)] \quad (1)$$

где G – гравитационная постоянная, m – масса планеты, a – экваториальный радиус планеты, r , φ , λ – сферические координаты частицы (обычно φ , λ – это широта и долгота, а r – радиус-вектор текущей точки пространства), P_{nk} – присоединённые функции Лежандра (при $k > 0$), P_n – полиномы Лежандра (при $k = 0$), $J_n = C_{n0}$ – коэффициенты зональных гармоник разложения потенциала, C_{nk} и S_{nk} – коэффициенты тессеральных гармоник разложения потенциала (в частности, при $n = k$ это коэффициенты секториальных гармоник разложения потенциала), $G = (6,6728 \pm 0,0016) \times 10^{-23} \text{ (км}^3 \text{ с}^{-2} \text{ г}^{-1}\text{)}$ – гравитационная постоянная, $GM_{\odot} = 1,327\,124\,40 \times 10^{11} \text{ (км}^3 \text{ с}^{-2}\text{)}$.

Физический смысл коэффициентов зональных, секторальных и тессеральных гармоник разложения потенциала состоит в следующем: J_0 определяет среднюю величину ускорения силы тяжести на поверхности планеты, $J_2 = C_{20}$ выражает степень сжатия планеты; C_{11} и S_{11} характеризуют эллипсоидальность планеты; C_{22} и S_{22} определяют эллиптичность экватора; J_3 – характеризуют асимметрию северного и южного полушарий; J_4 и J_6 определяют степень неоднородности распределения масс в недрах и вблизи поверхности планеты.

Результаты траекторных измерений движения первого ИСЛ «Луна-10» позволили определить значения 11 коэффициентов в разложении гравитационного поля Луны. Дальнейшие исследования позволили установить не только общую асимметрию распределения масс в теле спутника, но также выделить местные концентрации масс (масконы), расположенные в пределах верхней мантии в области круговых морей видимого полушария Луны. Согласно исследованиям, проведенным на ИСЛ «LunarProspector» (1998–1999 гг.) с разрешением на поверхности до 30 км, в разложении гравитационного поля Луны удалось выделить до 100 гармоник. Новая гравитационная модель позволила впервые оценить конкретные размеры жидкого металлического ядра Луны. По-видимому, радиус ядра Луны составляет находится в пределах 250–430 км и по массе не превышает 4% от общей массы лунного шара [14].

Исследование гравитационного поля Луны космическими аппаратами GRAIL. Новые данные о гравитационном поле Луны были получены с двух космических аппаратов Grail. Аппараты были запущены 10 сентября 2011 г., получившие названия отлив (Ebb) и прилив (Flow). Зонды летели по одной и той же орбите один за другим на высоте в 55 км над поверхностью Луны (рис. 2). Расстояние между аппаратами фиксировалось с микронной точностью и изменялось в зависимости от величины гравитационного поля при прохождении аппаратов над видимыми морфологическими объектами, к которым относятся горы, кратеры, а также массивные объекты, скрытые под поверхностью Луны.

Рис. 2. Комические аппараты миссии Grail (*Ebb и Flow*) исследуют гравитационное поле Луны

По данным миссии GRAIL составлена уникальная карта гравитационного поля Луны (рис. 3).

Рис. 3. Гравитационная карта Луны по результатам измерений космических аппаратов миссии Grail (карта NASA)

Гравитационное поле отражает историю бомбардировки Луны метеоритами, показывает наличие глубинных разломов, достигающих внутренних слоев коры и, возможно, мантии спутника [5, 11]. Зонды обнаружили существование длинных, в сотни километров, гравитационных аномалий, тут и там выходящих на поверхность. Скорее всего, они свидетельствуют о наличии под поверхностью длинных и вытянутых, узких «валов» давно застывшей плотной лавы. [9].

Как известно, гравитационное поле Луны сильно связано с ее рельефом — такой связи не наблюдается ни у Земли, ни у Марса, ни у Венеры. По данным LOLA PDS с разрешением $1/64^\circ$ построена топографическая модель Луны (рис. 4).

Рис. 4. Топографическая модель Луны, построенная NASA по данным LOLAPDS, соответствует сферической гармонической модели лунного геоида с учетом гравитационного поля

Селенографическая координатная сетка сферической модели лунного геоида рассчитана по формулам сферических гармоник 2600 степени [17].

Химическая композиция грунта в районах лунных масконов. В статье мы приводим данные физико-механических свойств поверхностного слоя грунта лунных «морей» и даем оценку химического состава грунта. Все измерения выполнены согласно теоретическим моделям рассеяния света на основе съемки поверхности Луны орбитальными космическими аппаратами и анализа образцов лунного грунта. Вычислены параметры неоднородности макрорельефа поверхности лунных морей: альbedo, плотность грунта, средние размеры зерен частиц слагающих поверхностный слой и доля объема занятого частицами.

Химический состав грунта лунных масконов был определен в каталогах элементного химического состава поверхностных пород Луны LP GRS NASA. Каталоги обобщают сведения результатов измерений гамма-спектрометром КА Lunar Prospector [7] процентного содержания 10 химических элементов в поверхностном слое Луны: тория (Th), кремний (Si), калий (K), алюминий (Al), уран (U), кальций (Кал.), железо (Fe), магний (Mg.), кислород (O), титан (Ti). Глобальное распределение элементного содержания окиси железа, железа и тория в поверхностном слое Луны показано на картах NASA [3]. На картах выделены области с максимальным содержанием в поверхностном слое Луны перечисленных химических элементов. Максимальное содержание окиси железа 20 wt.%, тория 12 ppm, железа 0–18 wt. % зарегистрировано в районах расположения гравитационных аномалий и лунных морей (табл. 1).

Таблица 1

Процентное содержание железа и тория в районах лунных гравитационных аномалий

Mare Latin name	Latitude degree	Longitude degree	Diameter km	Gravity Anomalies mgal H - 55 km	Chemical composition		
					Thorium ppm (max)	Iron wt% (max)	FeO wt% (max)
Frigoris	56,0	1,4	1596	-150	5,1389	9,0100	14,4570
Imbrium	32,8	-15,6	1123	500	4,9317	1,3671	21,8330
Fecunditatis	-7,8	51,3	909	50	3,0125	10,9910	17,1490
Tranquillitatis	8,5	31,4	873	300	2,8770	13,6030	17,9800
Nubium	-21,3	-16,6	715	100	6,6729	10,4880	18,8850
Serenitatis	28,0	17,5	707	550	2,5475	12,6630	19,1600
Australe	-38,9	93,0	603	50	1,6886	5,6499	9,4480
Insularum	7,5	-30,9	513	100	9,2249	13,8330	16,4990

Marginis	13,3	86,1	420	-100	1,8784	8,7426	13,1860
Crisium	17,0	59,1	418	400	2,3439	20,2840	16,3160
Humorum	-24,4	-38,6	389	500	2,9814	11,6290	19,9440
Cognitum	-10,0	-23,1	376	500	6,0428	14,1450	17,2160
Smythil	1,3	87,5	373	400	2,2096	7,6565	13,0180
Nectaris	-15,2	35,5	333	500	2,7012	7,9968	14,3270
Oriente	-19,4	-92,8	327	300	1,5046	4,2351	10,7610
Ingenii	-33,7	163,5	318	-50	2,4299	6,0284	10,6160
Moscoviense	27,3	147,9	277	300	1,7539	5,8142	9,7030
Humboldtianum	56,8	81,5	273	200	1,8494	3,9886	9,7047
Vaporum	13,3	3,6	245	-100	5,0098	9,9862	16,7510
Undarum	6,8	68,4	243	-100	1,8078	6,6982	9,7361
Anguis	22,6	67,7	150	500	1,5970	7,0656	7,3916
Spumans	1,1	65,1	139	-100	2,4312	10,4280	10,4280

Высокая гравитационная аномалия в районе Моря Дождей (Mare Imbrium) и аномалия в заливе Радуга на северо-западе от Моря Дождей (Sinus Iridum) приведены на рисунке 5 [16].

Рис. 5. Гравитационная аномалия в море Дождей

Карта содержания окиси железа в поверхностном слое грунта в районе Моря Дождей показана на рисунке 6 [16].

Рис. 6. Процентное содержание окиси железа в районе моря дождей

Физико-механические характеристики поверхности лунных морей. В предыдущих статьях нами была установлена корреляционная зависимость химического состава пород с макроструктурой лунной поверхности. Макроструктура поверхности оценивалась путем сравнения локальной фазовой функции с лунной пространственной индикатрисой рассеяния. Разность фазовых функций при фазе 18 градусов (параметр фотометрической неоднородности ΔI) хорошо согласуется с химическим составом поверхностного слоя грунта, в частности с содержанием тория и окисью железа. На рисунке 9 приведен график зависимости параметра фотометрической неоднородности и количество частиц различных фракций образцов лунного грунта. Величина фотометрического параметра взаимосвязана со степенью шероховатости поверхности и содержанием тория в поверхностном грунте (рис. 7).

Рис. 7. График зависимости параметра фотометрической неоднородности от шероховатости поверхности [1–3, 8]

Неоднородность поверхности лунных масконов оценивалась по следующим параметрам альбедо поверхности, плотность грунта, среднее количество зерен в образцах. Перечисленные параметры вычислены с помощью фотометрической модели Нарке, двунаправленного отражения света поверхностью [4]. С помощью этой модели были вычислены параметры тонкой структуры грунта в масштабе сантиметровых неровностей [15].

Физико-механические параметры поверхности лунных морей

Mare Latin Name	Gravity Anomalies mGal Height - 55 km	Number of particles N per 10 ⁴ m ²	Albedo	Soit density	Average grain mm	Crustal Thickness km
Frigoris	-150	1,5304	50,00	0,4469	0,063	60
Imbrium	500	1,6551	44,45	0,4926	0,041	50
Fecunditatis	50	2,8105	44,45	0,6372	0,041	40
Tranquillitatis	300	2,8920	38,79	0,3479	0,018	40
Nubium	100	0,6069	83,38	0,7067	0,197	70
Serenitatis	550	3,0904	38,79	0,5537	0,018	60
Australe	50	3,6075	71,67	0,3201	0,150	50
Insularum	100	0,2746	55,56	0,2600	0,085	70
Marginis	-100	3,4932	57,03	0,4600	0,091	50
Crisium	400	3,2130	50,00	0,4767	0,063	60
Humorum	500	2,8292	55,56	0,3292	0,085	90
Cognitum	500	0,9862	38,79	0,4944	0,018	90
Smythil	400	3,2938	71,67	0,4804	0,150	50
Nectaris	500	2,9979	35,34	0,8706	0,004	80
Orientale	300	3,7 ¹ 82	68,01	0,3004	0,135	40
Ingenii	-50	3,1612	71,67	0,4174	0,150	70
Moscoviense	300	3,5682	57,03	0,5040	0,091	10
Humboldtianum	200	3,5106	57,03	0,4618	0,091	40
Vaporum	-100	1,6081	42,79	0,4677	0,034	80
Undarum	-100	3,5357	38,79	0,4808	0,018	30
Anguis	500	3,6626	66,67	0,4611	0,130	60
Spumans	-100	3,1604	55,56	0,4806	0,085	30

Исследования гравитационных аномалий КА GRAIL позволили оценить структуру внутреннего строения Луны. Толщина лунной коры колеблется в пределах от 10 до 60 км, в районах кратеров обратной стороны Луны толщина коры может составлять 10 км, тогда как в районах горных массивов толщина коры достигает более 50 км. Районы высокой гравитации (масконы) расположены на видимой стороне Луны под лунными морями. На обратной стороне Луны преобладают отрицательные аномалии, связанные с полостями в толщине коры. На основании новых гравитационных данных геофизики Массачусетского технологического института USA дали оценку пористости лунной коры. Средняя пористость коры составляет 12% на глубине в несколько км, а средняя плотность лунных возвышенностей составила 250 кг/м³. Одним из основных открытий при изучении гравитационного поля является обнаружение новых тектонических структур, бесчисленных мелких кратеров, низин и валов линейных гравитационных аномалий застывшей плотной лавы. Линейные гравитационные аномалии не видны на топографических картах рельефа, т.к. это очень древние структуры, расположенные в верхней коре Луны. Происхождение глубинных лавовых валов, возможно, связано с ранней вулканической активностью Луны, растрескиванием коры от ударов космических тел, а также с деформацией лунного геоида в связи с особенностями вращения и движения Луны на орбите в ранний период её формирования.

Космическая миссия космических аппаратов Ebb и Flow была завершена 17 декабря 2012 г. Космические аппараты постепенно были переведены на низкую орбиту высотой 23 км и упали в районе северного полюса видимой стороны Луны вблизи кратера Гольдшмидт.

Заключение. В статье приводятся результаты корреляционного анализа зависимости химического состава лунного базальта и макроструктуры поверхности. Рассмотрен новый метод оценки макроструктуры поверхности путем сравнения локальной фазовой функции с теоретической моделью пространственной индикатрисы рассеяния света [13]. Возможно, что в районах лунных масконов расположены KREEP породы с высоким содержанием тория и железа, а также редкоземельные металлы иридий, никель, платина. Не исключено, что KREEP породы в районах лунных морей расположены на небольшой глубине.

Эксперимент изучения гравитационного поля Луны космическими аппаратами Grial позволил лучше изучить внутреннюю структуру Луны, её состав, историю происхождения и формирования современной Луны.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК REFERENCES

1. Apollo 11 Preliminary Science Report, 1969, NASA SP-214, 47.
2. Apollo 12 Preliminary Science Report, 1970, NASA SP-235, 126.
3. Gillis J.J., Jolliff B.L., Korotev R.L. Lunar surface geochemistry: Global concentrations of Th, K, and FeO as derived from lunar prospector and Clementine data // *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2004, Volume 68, Issue 18, p. 3791–3805.
4. *Hapke B.* Theory of reflectance and emittance spectroscopy. Cambridge university press. 2005. 455 p.
5. *Harald H., Jauman R., Newkum G.* Ages of mare basalts on the lunar nearside // *Journal of geophysical research*, 2000, V. 105, No. E12, p. 239–275.
6. *Head J. W., Wilson L.* Lunar mare volcanism: Stratigraphy, eruption conditions and the evolution of secondary crusts // *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1992, Issue 14, Volume 56, p. 2155–2175.
7. *Lawrence D.J., Elphic R.C., Feldman W.C., Gasnault O., Hagerty J.J., Maurice S., Prettyman T.H.* The Lunar Prospector Gamma-Ray and Neutron Spectrometers: Overview of Lunar Global Composition Measurements // *Journal of Geophysical Research*, 105, 2005, No. E8, 20, 307–20, 331.
8. Мобильная лаборатория на Луне Лунаход-1 // 1987, Том 11, М., Наука, 121 с.
Mobile Laboratory on the Moon Lunakhod-1, 1978, Vol. II, М.: Nauka, 121 p. (in Russian).
9. *Melosh H.J., Freed A.M., Johnson B.C.* The Origin of Lunar Mascon Basins // *Science*, 2013, Volume 340, Issue 6140, pp. 1552–1555.
10. *Muller P.M., Sjogren W.I.* Lunar gravimetry and mascons. // *Appl. Mech. Revs.*, 1969, v.22, N 3, p. 955–959.
11. *Racca G.D., Foing B.H.* Geophysical Research Abstracts // 2002, 4, Abstract A-01152.
12. *Сагитов М.Н.* Лунная гравиметрия. М.: «Наука», 1979, 403 с.
Sagitov M.N. Lunargravimetry. М.: ‘Nauka’, 1979, 403 с. (in Russian).
13. *Шевченко В.В.* Современная селенография, М.: «Наука», 1980, 288 с.
Shevchenko V.V. The modern selenography, М.: ‘Nauka Press’, 1980, 288 p. (in Russian).
14. *Shevchenko V.V., Pinet P., Chevrel S., Pugacheva S.G., Daydou Y.* Lunar photometry and composition of ejecta terrains with AMIE/SMART-1 // *Proc. 38th Vernadsky-Brown Microsymp.*, М.: 2003, C.1112–1113.
15. *Шевченко В.В., Бусарев В.В., Сурдин В.Г.* Физические условия вблизи Луны и планет Солнечной системы // Сборник «Модель космоса», 2007, М.: «КДУ», том 3, С. 794–861.
Shevchenko V.V., Busarev V.V., Surdin B.G. The Physical conditions beside the Moon and planets of the Solar system // 2007, М.: “KDU”, Vol. 3, C. 794–861. (in Russian).
16. *Y. Lu, J. Ping, V. Shevchenko.* New Lunar Lander Site Selection // *The fourth Moscow Solar System Symposium (4M-S³)*, 2013, М.
17. *Wieczorek M.A., Huang S.A.* reanalysis of Apollo 15 and 17 surface and subsurface temperature series // 37th Annual Lunar and Planetary Conference, March 13–17, 2006, League City, Texas, abstract no. 1682.