

ИССЛЕДОВАНИЯ ГРАВИТАЦИОННОГО ПОЛЯ ЛУНЫ КОСМИЧЕСКИМИ ЗОНДАМИ GRAIL

THE STUDY OF THE GRAVITATIONAL FIELD OF THE MOON, SPACE PROBES TO GRAIL

S. Pugacheva

Annotation

The source of gravity anomalies of the Moon are large mascons with a high mass concentration at a depth of volcanic plains of the lunar Maria. Formation of mascons is connected with intensive development of basaltic volcanism on the Moon in the early periods of its existence. New data on the gravitational field of the Moon were obtained from two American probes 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 and chemical composition of lunar soil. It can be assumed that mascons include rich KREEP rocks with a high content of thorium and iron oxide.

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

*Пугачева Светлана Георгиевна
Государственный Астрономический
институт имени П.К. Штернберга
Московского Государственного
Университета им. М.В. Ломоносова*

Аннотация

Источником гравитационных аномалий на Луне являются масконы с высокой концентрацией массы вещества на глубине вулканических равнин лунных морей. Формирование масконов связано с интенсивным развитием базальтового вулканизма в ранние периоды формирования Луны. Новые исследования гравитационного поля Луны проведены двумя американскими зондами космического аппарата Grail. В статье представлены данные физико-механических свойств поверхностного слоя грунта масконов и химический состав верхнего слоя почвы. С помощью числовых моделей вычислены параметры неоднородности макрорельефа в районах лунных масконов. Сравнительный анализ неоднородности поверхности и химического состава грунта лунных масконов позволяет предположить, что грунт лунных морей содержит KREEP породы с высоким содержанием тория и окиси железа.

Ключевые слова:

Луна, аномалии силы тяжести, масконы, макрорельеф, химический состав.

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 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, извиляющиеся потоки лавы, конусы, купола и разрушенные впадины. Множество вулканических структур 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.

Первые исследования гравитационного 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 доказывала, что высота поверхностного уровня над шаром в сторону Земли составляет 400 метров и 300 метров – с обратной стороны Луны.

В 1968 году 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

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: полином Лежандра, гравитационная постоянная, масса Луны, долгота и широта местности.

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

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} – присоединенные 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,

$GM_{\oplus} = 1,327\,124\,40 \times 10^{11} \text{ (км}^3 \text{ с}^{-2}\text{)}$.

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 "Lunar Prospector" (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 км – 430 км и по массе не превышает 4% от общей массы лунного шара [15].

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 года, 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. 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. По данным миссии GRAIL составлена уникальная карта гравитационного поля Луны (рис.1).

На полях карты гравитационного поля Луны приведены латинские названия лунных морей. В табл. 1 даны селенографические координаты, диаметры, гравитационный потенциал и названия лунных морей в русской транскрипции.

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. Ско-

Рис.1. Гравитационная карта Луны, построенная NASA по результатам измерений космических аппаратов миссии Grail.

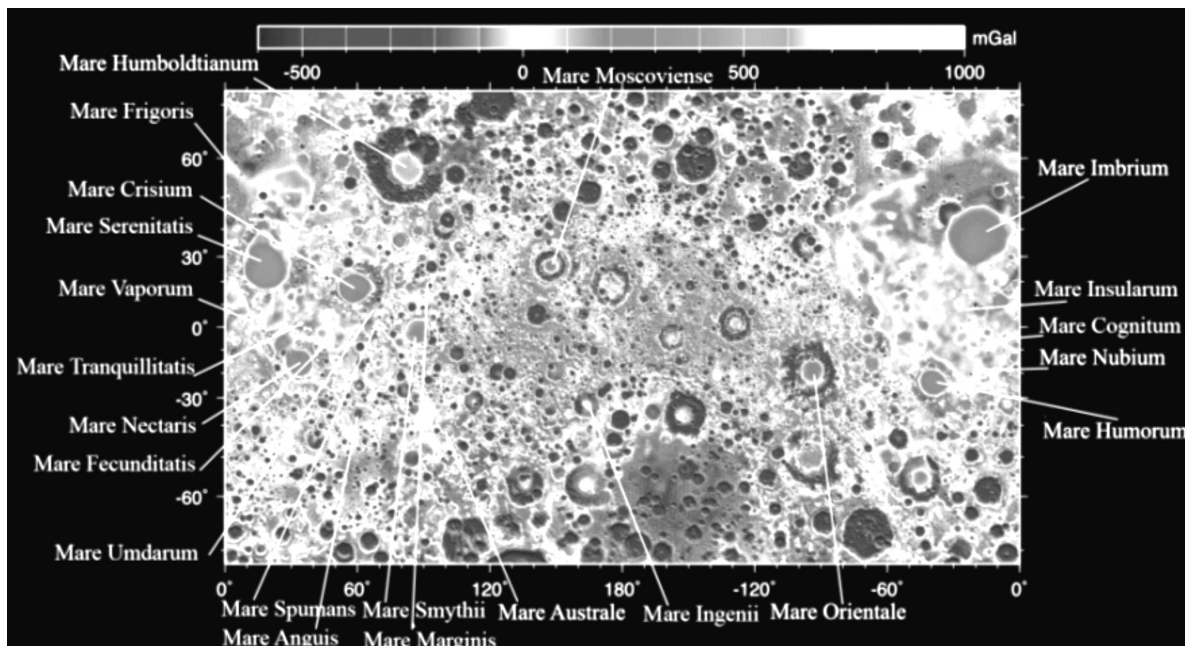


Таблица 1.

Селенографические координаты, диаметры, величина гравитационного поля морей на Луне.

| N | Латинское Название морей | Русское название морей | Широта град. | Долгота град. | Диаметр км | Масконы mGal H=55км |
|-----|--------------------------|------------------------|--------------|---------------|------------|---------------------|
| 1. | Serenitatis | Ясности | 28,0 | 17,5 | 707 | 550 |
| 2. | Imbrium | Дождей | 32,8 | -15,6 | 1123 | 500 |
| 3. | Humorum | Влажности | -24,4 | -38,6 | 389 | 500 |
| 4. | Cognitum | Познания | -10,0 | -23,1 | 376 | 500 |
| 5. | Nectaris | Нектара | -15,2 | 35,5 | 333 | 500 |
| 6. | Anguis | Змеи | 22,6 | 67,7 | 150 | 500 |
| 7. | Crisium | Кризисов | 17,0 | 59,1 | 418 | 400 |
| 8. | Smythii | Смита | 1,3 | 87,5 | 373 | 400 |
| 9. | Tranquillitatis | Спокойствия | 8,5 | 31,4 | 873 | 300 |
| 10. | Orientale | Восточное | -19,4 | -92,8 | 327 | 300 |
| 11. | Moscoviense | Москвы | 27,3 | 147,9 | 277 | 300 |
| 12. | Humboldtianum | Гумбольта | 56,8 | 81,5 | 273 | 200 |
| 13. | Nubium | Облаков | -21,3 | -16,6 | 715 | 100 |
| 14. | Insularum | Островов | 7,5 | -30,9 | 513 | 100 |
| 15. | Fecunditatis | Изобилия | -7,8 | 51,3 | 909 | 50 |
| 16. | Australe | Южное | -38,9 | 93,0 | 603 | 50 |
| 17. | Ingenii | Мечты | -33,7 | 163,5 | 318 | -50 |
| 18. | Marginis | Краевое | 13,3 | 86,1 | 420 | -100 |
| 19. | Vaporum | Паров | 13,3 | 3,6 | 245 | -100 |
| 20. | Undarum | Волн | 6,8 | 68,4 | 243 | -100 |
| 21. | Spumans | Пены | 1,1 | 65,1 | 139 | -100 |
| 22. | Frigoris | Холода | 56,0 | 1,4 | 1596 | -150 |

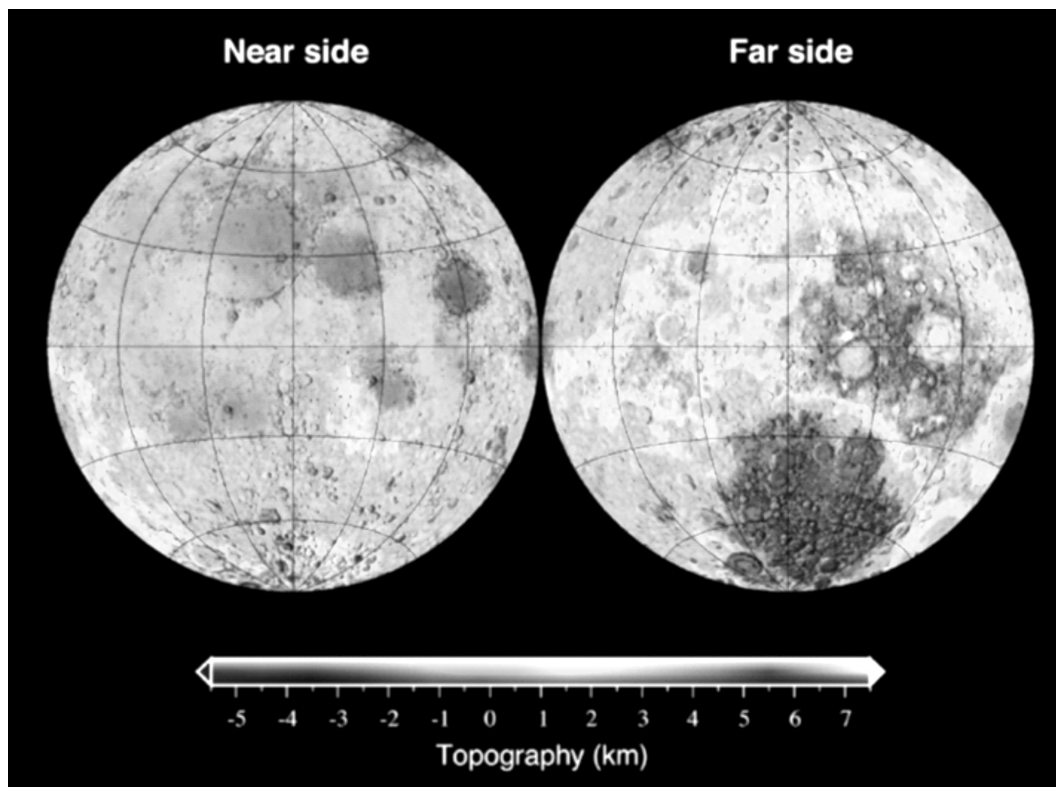


Рис.2. Топографическая модель Луны, построенная NASA по данным LOLA PDS, соответствует сферической гармонической модели лунного геоида с учетом гравитационного поля.

рее 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 1/64о построена топографическая модель Луны (рис.2).

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. Химический состав грунта лунных масконов был определен по каталогах элементного химического состава поверхностных пород Луны LP GRS NASA. Каталоги обобщают сведения результатов измерений гамма-спектрометром КА Lunar Prospector [6, 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). В районах гравитационных аномалий зарегистрировано максимальное содержание тория, железа, окиси железа (табл. 2).

Последовательность расположения лунных морей в таблице 2. соответствует номеру и названию моря таблицы 1.

Положительная гравитационная аномалия в районе Моря Дождей (Mare Imbrium) и отрицательная аномалия в заливе Радуга (Sinus Iridum), расположенная на северо-западе от Моря Дождей, приведены на рис. 3 [16]. Карта содержания окиси железа в поверхностном слое грунта в районе Моря Дождей приведена на рис. 4 [16].

Физико-механические характеристики поверхности лунных морей. В предыдущих работах Пугачевой, Шевченко [13, 14] была установлена корреляционная зависимость химического состава пород и макроструктуры лунной поверхности. Макроструктура поверхности определялась путем сравнения локальной фазовой функции относительной яркости участка поверхности с расчетной яркостью модели лунной пространственной индикатрисы

Таблица 2.

Селенографические координаты, диаметры, величина гравитационного поля морей на Луне.

| N | Химический состав грунта | | | Параметры неоднородности | | | |
|-----|--------------------------|----------------|-------------------|--------------------------|------------------|----------------------------|-------------------|
| | Thorium ppm (max) | Iron wt% (max) | FeO wt% wt% (max) | Альbedo поверхности | Плотность грунта | Средний размер частиц (мм) | Толщина коры (км) |
| 1. | 2,55 | 12,66 | 19,16 | 38,79 | 0,81 | 0,018 | 60 |
| 2. | 4,93 | 1,37 | 19,83 | 44,45 | 1,92 | 0,041 | 50 |
| 3. | 2,98 | 11,63 | 19,94 | 55,56 | 1,17 | 0,085 | 90 |
| 4. | 6,04 | 14,15 | 17,22 | 38,79 | 1,74 | 0,018 | 90 |
| 5. | 2,70 | 8,00 | 14,33 | 35,34 | 1,92 | 0,004 | 80 |
| 6. | 1,60 | 7,07 | 7,39 | 66,67 | 0,01 | 0,130 | 70 |
| 7. | 2,34 | 20,28 | 16,32 | 50,00 | 0,49 | 0,063 | 60 |
| 8. | 2,21 | 7,66 | 13,02 | 71,67 | 0,48 | 0,150 | 50 |
| 9. | 2,88 | 13,60 | 17,98 | 38,79 | 0,42 | 0,018 | 40 |
| 10. | 1,50 | 4,24 | 10,76 | 68,01 | 0,30 | 0,135 | 40 |
| 11. | 1,75 | 5,81 | 9,70 | 57,03 | 0,50 | 0,091 | 10 |
| 12. | 1,85 | 3,99 | 9,70 | 57,03 | 0,46 | 0,091 | 40 |
| 13. | 6,67 | 10,49 | 18,89 | 83,38 | 1,91 | 0,197 | 70 |
| 14. | 9,22 | 13,83 | 16,50 | 55,56 | 1,71 | 0,085 | 70 |
| 15. | 3,01 | 10,99 | 17,15 | 44,45 | 0,89 | 0,041 | 70 |
| 16. | 1,69 | 5,65 | 9,45 | 71,67 | 0,32 | 0,150 | 50 |
| 17. | 2,43 | 6,03 | 10,62 | 71,67 | 0,42 | 0,150 | 70 |
| 18. | 1,88 | 8,74 | 13,19 | 57,03 | 0,46 | 0,091 | 50 |
| 19. | 5,01 | 9,99 | 16,75 | 42,79 | 0,52 | 0,034 | 80 |
| 20. | 1,81 | 6,70 | 9,74 | 38,79 | 0,86 | 0,018 | 30 |
| 21. | 2,43 | 10,43 | 10,43 | 55,56 | 0,45 | 0,085 | 30 |
| 22. | 5,14 | 9,01 | 14,46 | 50,00 | 1,99 | 0,063 | 60 |

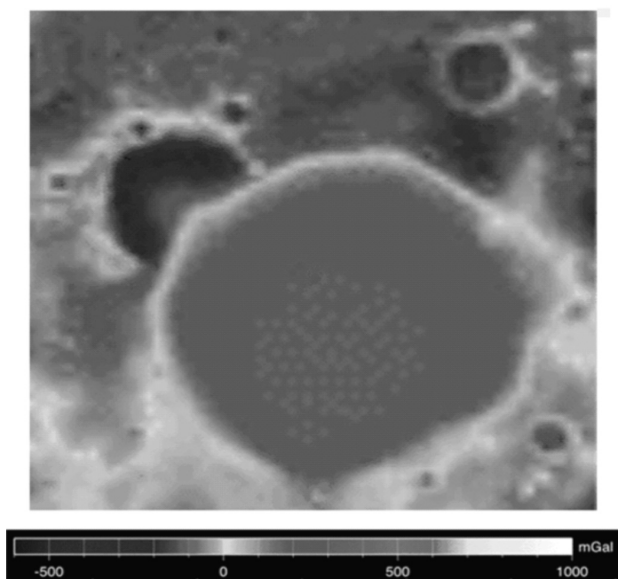


Рис.3. Гравитационная аномалия в море Дождей.

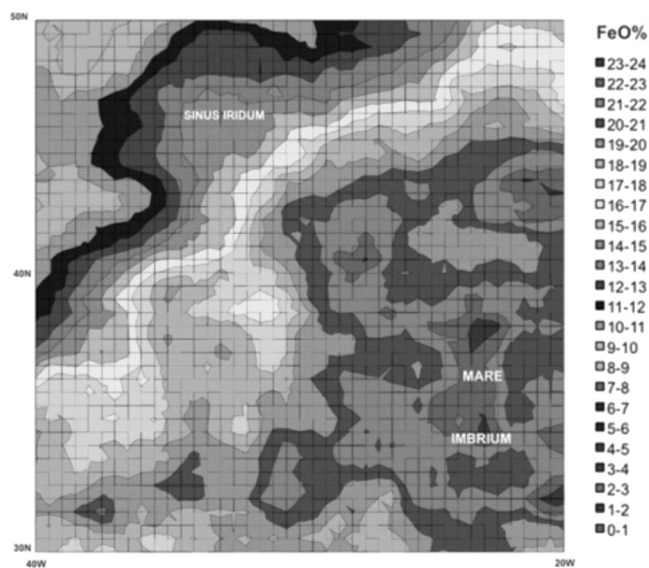


Рис.4. Процентное содержание окиси железа в районе моря Дождей.

рассеяния [13]. Разность значений относительной яркости 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 5 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 поверхностном грунте (рис.5).

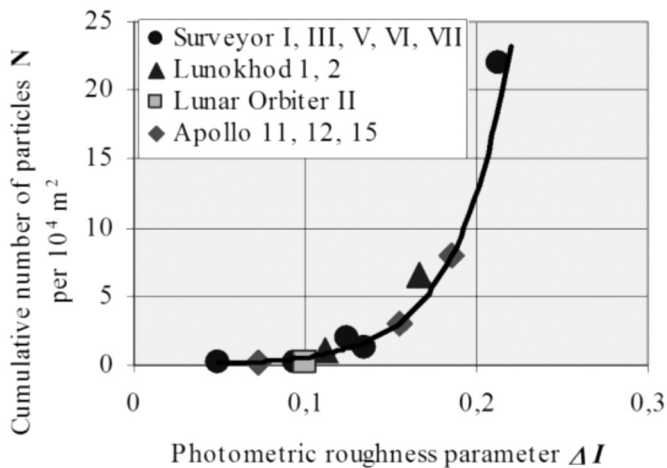


Рис.5. График зависимости параметра фотометрической неоднородности от шероховатости поверхности [1, 2, 8].

Неоднородность поверхности лунных масконов в масштабе сантиметровых неровностей оценивалась по следующим параметрам: альbedo поверхности, плотность грунта, средний размер зерен, толщина коры. Альbedo и средний размер зерен были вычислены по формулам фотометрической модели Нарке, двунаправленного отражения света поверхностью [4, 14]. Плотность грунта и мощность коры определены по данным зондов Grail.

Выводы

Исследования гравитационных аномалий КА GRail позволяют оценить структуру внутреннего строения Луны. Толщина лунной коры по данным космического аппарата Grail 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 2500 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 года. 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 лунных морей. 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. Корреляции микро-структуры поверхности с торием и окисью железа позволяет предположить, что KREEP породы в районах лунных морей расположены на небольшой глубине.

Эксперимент изучения гравитационного поля Луны космическими аппаратами Grail дает возможность расширить научные знания о внутренней структуре Луны, её составе, неоднородности недр, восстановить историю происхождения и формирования современной Луны.

ЛИТЕРАТУРА

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, Москва, Наука, 121 с.
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. Москва "Наука", 1979, 403 с.
13. Шевченко В.В. Современная селенография, Москва, "Наука", 1980, 288 с.
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., Moscow, 2003, с.1112–1113.
15. Шевченко В.В., Бусарев В.В., Сурдин В.Г. Физические условия вблизи Луны и планет Солнечной системы// Сборник "Модель космоса", 2007, Москва, "КДУ", том 3, с. 794–861.
16. Y. Lu, J. Ping, V. Shevchenko. New Lunar Lander Site Selection // The fourth Moscow Solar System Symposium (4M–S3), 2013, Moscow.
17. Wiczorek 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.

© С.Г. Пугачева, (sve-pugacheva@yandex.ru), Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики».





XIII СПЕЦИАЛИЗИРОВАННАЯ
• **ВЫСТАВКА** •
«**НЕФТЬ. ГАЗ.
ЭНЕРГО**»



17 - 19
ФЕВРАЛЯ

Оренбург

ООО «УралЭкспо»

тел./факс: (3532) **67-11-02, 67-11-05, 45-31-31**

e-mail: uralexpo@yandex.ru, www.URALEXPO.ru

- Добыча нефти и газа (технологии и оборудование)
- Геология, геофизика
- Сейсмическое оборудование и услуги
- Транспортировка, переработка и хранение нефти, нефтепродуктов и газа
- Трубы и трубопроводы, инструменты и др.