

УДК 523.3-827

АНАЛИЗ ВЫСОТ РЕЛЬЕФА ЛУНЫ И КОРРЕЛЯЦИОННОЙ СВЯЗИ РЕЛЬЕФА С ГРАВИТАЦИОННЫМ ПОЛЕМ; ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЕ ВЫВОДЫ О ГЛОБАЛЬНЫХ ПЛОТНОСТНЫХ НЕОДНОРОДНОСТЯХ КОРЫ ЛУНЫ

© 2019 г. Н. А. Чуйкова^{а, *}, Ж. Ф. Родионова^а, Т. Г. Максимова^а, Е. А. Гришакина^б

^аГосударственный астрономический институт им. П. К. Штернберга, МГУ, Москва, 119234 Россия

^бИнститут геохимии и аналитической химии им. Вернадского, РАН, Москва, 119991 Россия

*e-mail: jeanna@sai.msu.ru

Поступила в редакцию 01.03.2018 г.

После доработки 20.09.2018 г.

Принята к публикации 04.10.2018 г.

На основе разработанной авторами методики проведен гармонический и статистический анализ высот рельефа Луны. Даны объяснения смещений центра фигуры Луны относительно центра масс и сдвига большой экваториальной оси относительно направления на Землю. Построены карты аномалий плотности для приповерхностных слоев Луны, соответствующие масконам (при отрицательной корреляции поля и рельефа в основном для $N = 10, 11$) и другим вариантам связи гравитационного поля и рельефа (при положительной корреляции поля и рельефа). Показано, что гармоники степеней $N = 5-9$ в основном соответствуют изостатической компенсации рельефа в приповерхностных слоях коры, низкие гармоники ($N < 5$) соответствуют изостатической компенсации рельефа в более глубоких слоях, а гармоники степеней $N > 11$ могут говорить о наличии напряжений в коре, создаваемых мелкими структурами рельефа. На основе построенных карт определены возможные места запасов летучих (в основном на обратной стороне Луны и в северной приполярной области) и других полезных ископаемых.

Ключевые слова: Луна, центр масс, центр фигуры, рельеф, гравитационное поле, корреляция, изостатическая компенсация, аномалии плотности коры, масконы

DOI: 10.1134/S0320930X19020026

ВВЕДЕНИЕ

В эпоху первых космических исследований Луны, завершившуюся в 1976 г., были получены предварительные данные о рельефе и гравитационном поле Луны, а также о химическом составе образцов грунта, взятых с мест посадок КК Apollo и КА Луна на видимой стороне. На втором этапе, начавшемся в 1989 г. запуском АМС Galileo и продолженным искусственными спутниками Луны, сведения о поверхности и строении Луны были детализированы и существенно дополнены аппаратами Clementina (1994), Lunar Prospector (1998), SMART-1 (2004), Kaguya (2007), Chang'e-1 (2007), Chandrayaan-1 (2008), LRO (2009), Chang'e-2 (2010), GRAIL (2011), LADEE (2013), Chang'e-3 (2013). Удалось выявить много крупных кольцевых структур на поверхности, которые не были обнаружены ранее (Neumann и др., 2015; Charraz и др., 2017; Smith и др., 2017), а также структур и лавовых труб под поверхностью (Sood и др., 2015; Kaku и др., 2017). Практически чистый лед был обнаружен радаром Mini-SAR(Chan-

drayaan-1), смесь кристаллов льда и грязи найдена в кратере Кабео (LCROSS), прибором M3 (Chandrayaan-1) выявлен тонкий слой льда, распространенный по всей поверхности Луны, концентрация которого меняется в зависимости от времени лунных суток (Shuai Li, Milliken, 2017; Starr и др., 2017; Litvak и др., 2012; Pieters и др., 2009). В настоящее время возобновился интерес к исследованию Луны не только с научными целями, но и с целью создания на ее поверхности обитаемой базы (Иванов и др., 2017). Для этого необходимо предварительно определить оптимальные и безопасные места для посадок космических аппаратов, а также места для проведения разведки на наличие воды и других полезных ископаемых. Наш вклад в решение поставленных задач заключался в детальном анализе высот рельефа Луны с использованием современной цифровой модели рельефа (Smith и др., 2010) и построенной нами Гипсометрической карты Луны (Гришакина и др., 2014). Для изучения плотностных аномалий в недрах Луны на основе разработанной нами ра-

нее методики решения обратной задачи гравиметрии (Чуйкова и др., 2011; 2012; 2014; Chujkova и др., 2014) необходимо исключить из гравитационного поля влияние приповерхностных слоев. Для этой цели был проведен гармонический и статистический анализ высот рельефа и исследована корреляционная связь рельефа с гравитационным полем. Чтобы получить предварительные результаты о местах наличия воды и других полезных ископаемых, было проведено сравнение плотностей простого слоя для гравитационного поля и рельефа Луны. Для решения поставленной нами задачи определения глобальных плотностных неоднородностей в коре Луны мы использовали разложение высот рельефа и аномалии гравитационного поля до гармоник 36 степени, хотя в настоящее время уже получено разложение до 900 степени (Wiezorek, 2015), что позволяет выделить плотностные неоднородности размером 0.2° .

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ И МЕТОДИКА РАСЧЕТОВ

Исходным материалом для решения поставленных задач был массив высот рельефа, осредненных нами по пятиградусным трапециям. Осреднение выполнено на основе цифровой модели рельефа, построенной по данным лазерного альтиметра (LOLA) космического аппарата Lunar Reconnaissance Orbiter (LRO) с точностью 64 пикселя на градус (0.5 км на пиксель) (Smith и др., 2010) в программе ArcGIS. По этим данным построены профили и Гипсометрическая карта Луны (Гришакина и др., 2014), которая использовалась в данном случае для контроля значений средних высот, когда возникали сомнения в правильности автоматически определенных величин.

Рельеф лунной поверхности подробно отображен на Гипсометрической карте с помощью изолиний, послойной окраски, отметок высот и полутоновой отмывкой.

Высоты на карте отсчитаны от сферы, средний радиус которой относительно центра масс составляет 1737.4 км. Этот уровень принят за нулевую отметку.

Профили, на (рис. 1) характеризуют как глобальные особенности рельефа лунной поверхности, так и локальный рельеф отдельных участков. Изрезанность поверхности вдоль экватора обратного полушария (рис. 1б) существенно больше, чем видимого (рис. 1а), и перепады высот отличаются в два раза. Так например, вдоль экватора видимой стороны высоты меняются от +2.5 км до –4 км (Море Смирта), а на обратной от +8.5 км (гребни бассейнов Королев и Герцшпрунг) до –4 км. По профилям, построенным вдоль центральных меридианов, видимого и обратного полушарий можно судить о перепадах высот в северной и юж-

ной областях (рис. 1в–1е). На графике 1д хорошо виден профиль бассейна Фрейндлих–Шаронов, расположенного в пределах широт 8° – 28° (название бассейна официально не принято МАС). Причем большая часть этого бассейна расположена выше среднего уровня 1737.4 км. Профиль гигантского бассейна Южный полюс–Эйткен диаметром 2 500 км (рис. 1е) показывает значительный перепад высот в направлении север–юг: от +6 км до –8 км.

Осреднение по 5-градусным площадкам позволяет получить разложение высот рельефа h_i по сферическим функциям до степени $N_k = 180^\circ/5^\circ = 36$. Нами была разработана методика и создана теория (Чуйкова, Максимова, 1996), которая позволяет получить для каждой степени $N = 1 - N_k$ наиболее хорошо обусловленное решение для коэффициентов разложения высот рельефа по сферическим функциям, не дающее при большой степени N накопления ошибок вычислений. Так как система сферических функций является ортогональной на сфере, то коэффициенты каждой последующей степени N определяются независимо путем последовательного решения N_k систем условных уравнений вида

$$\sqrt{\cos \varphi_i} \sum_{m=0}^N S_{nm}^i = \sqrt{\cos \varphi_i} \left(h_i - \sum_{n=0}^{N-1} \sum_{m=0}^n S_{nm}^i \right),$$

где $\sqrt{\cos \varphi_i}$ – веса пятиградусных площадок, $I = 1 - 2592$.

$$S_{nm}^i = (\overline{A_{nm}} \cos m\lambda_i + \overline{B_{nm}} \sin m\lambda_i) \overline{P_{nm}}(\sin \varphi_i),$$

$\overline{P_{nm}}$ – нормированные по Каула присоединенные полиномы Лежандра:

$$\overline{P_{nm}}(z) = k_{nm} P_{nm}(z), \text{ где } k_{nm} = \sqrt{\frac{\epsilon_m (2n+1)(n-m)!}{(n+m)!}};$$

$$\epsilon_0 = 1; \quad \epsilon_{m>0} = 2; \quad z = \sin \varphi.$$

Коэффициенты разложения первой степени ($\overline{A_{10}} = 137.5$ м, $\overline{A_{11}} = -1024.2$ м, $\overline{B_{11}} = -421.8$ м) позволили определить смещения центра фигуры Луны относительно центра масс:

$$\begin{aligned} \text{смещение от Земли } (\lambda = \pm 180^\circ) \quad \Delta x &= \sqrt{3} \overline{A_{11}} \cos 180^\circ = 1773.95 \text{ м} \\ \text{смещение к западу } (\lambda = 270^\circ(-90^\circ)) \quad \Delta y &= \sqrt{3} \overline{B_{11}} \sin 270^\circ = 730.65 \text{ м} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{смещение к северу } (\varphi = 90^\circ) \quad \Delta z &= \sqrt{3} \overline{A_{10}} \sin 90^\circ = 238.09 \text{ м} \end{aligned}$$

$$\text{общее смещение } \Delta r = \sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2 + \Delta z^2} = 1933.24 \text{ м}$$

$$\text{при } \operatorname{tg} \varphi = \frac{\Delta z}{\sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2}} = \frac{238.09}{1918.53} = 0.124, \quad \varphi = 7.1^\circ$$

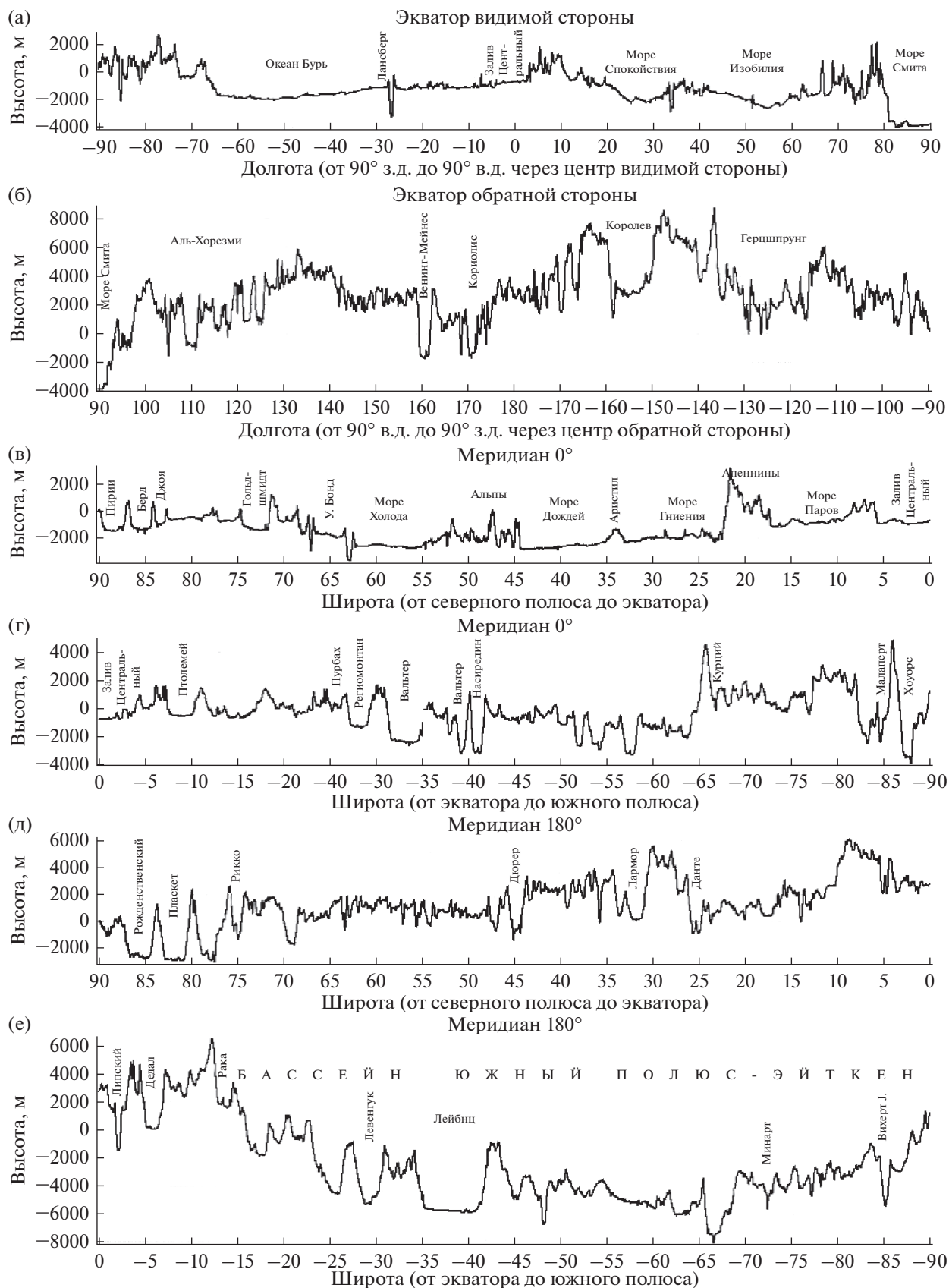


Рис. 1. Профили высот рельефа Луны, построенные по цифровой модели (Smith и др., 2010) вдоль экватора (а), (б) и меридианов 0° (в, г) и 180° (д, е).

$$\operatorname{tg} \lambda = \frac{\Delta y}{\Delta x} = 0.412, \quad \lambda = 202.5^\circ (-158.5^\circ \text{ з.д.})$$

Впервые смещение этих двух центров было обнаружено по данным астрометрии еще в 1971 г., а с появлением новых данных, полученных с космических аппаратов, постоянно уточнялось. Подробный обзор полученных результатов за 1971–2011 гг. дан в (Кондратьев, 2017). Последние данные о смещениях (Barker и др., 2016) отличаются от полученных нами значений всего на 1–2 м.

Объяснение таких смещений можно найти в ранней истории Луны, когда она была гораздо ближе к Земле. Приливные силы, вызванные притяжением Земли, были гораздо сильнее на видимом полушарии (сейчас они практически одинаковы на обоих полушариях) и потому вызывали движение тяжелых масс в сторону Земли (из-за ослабления процесса гравитационной дифференциации на видимой стороне Луны приливным влиянием Земли). Поэтому и центр масс Луны сместился в сторону Земли, и на видимом полушарии преобладают положительные масконы (моря, заполненные лавовыми потоками из более глубоких слоев), а на обратной – отрицательные (возвышенные участки с отрицательными аномалиями плотности). Смещение к востоку и югу центра масс относительно центра фигуры можно объяснить ударами крупных астероидных или кометных тел о поверхность Луны, передающими момент импульса Луне. Так, смещение к югу можно объяснить ударом астероида, образовавшим бассейн Южный полюс–Эйткен, а смещение к востоку – ударами астероидов, приведшими к образованию крупнейших положительных масконов в восточной части видимого полушария (моря Смита, Кризисов, Ясности, Спокойствия, Гумбольдта, Нектара). Все эти удары стимулировали движение магмы из внутренних слоев в юго-восточное полушарие. В работе (Кондратьев, 2017) дается другое объяснение смещению центра масс Луны к югу – явлением квазипрецессии (неизвестным ранее дополнительным движением оси вращения Луны по конусу с малым углом раствора).

На основе коэффициентов второй степени $\overline{A}_{20} = -664.36$ м, $\overline{A}_{21} = -1768.14$ м, $\overline{B}_{21} = -17.16$ м, $\overline{A}_{22} = 108.70$ м, $\overline{B}_{22} = 382.19$ м можно определить полярное и экваториальное сжатия трехосного эллипсоида для рельефа Луны и углы поворота его центральных осей относительно принятой системы координат xyz . Используя для этого формулы для преобразования гармонических коэффициентов при повороте системы координат (Чуйкова, 1983), получим следующие результаты:

$\varphi_a = 22.5^\circ$, $\lambda_a = 207.5^\circ$ – координаты (в северо-западном направлении) большой экваториальной полуоси, где $a = R + 1986.5$ м;

$\varphi_a = -22.5^\circ$, $\lambda_a = 27.5^\circ$ – координаты в юго-восточном направлении;

$\varphi_b = 17.5^\circ$, $\lambda_b = 112.5^\circ$ и $\varphi_b = -17.5^\circ$, $\lambda_b = 292.5^\circ$ – координаты малых экваториальных полуосей, где $b = R + 238.3$ м;

$\varphi_c = 62.5^\circ$, $\lambda_c = 347.5^\circ$ и $\varphi_c = -62.5^\circ$, $\lambda_c = 167.5^\circ$ – координаты полярных осей, где $c = R - 2227.7$ м.

Отсюда для полярного сжатия имеем $\frac{a_0 - c}{a_0} = 1.90 \times 10^{-3}$, где $a_0 = \frac{1}{2}(a + b) = R + 1112.4$ м. Для экваториального сжатия получим $\frac{a - b}{a_0} = 0.97 \times 10^{-3}$.

Полученное отклонение большой экваториальной оси в северо-западном направлении соответствует смещению центра фигуры Луны относительно центра масс в том же направлении. Таким образом, тем же обстоятельством, что и для смещения центра фигуры относительно центра масс, можно объяснить наличие и сдвиг полярного и экваториального сжатий, которые не обусловлены сейчас никакими физическими причинами. Значительное отличие большой экваториальной оси от среднего радиуса Луны также свидетельствует о больших приливных силах в ранней истории Луны. Тогда Луна была повернута к Земле полушарием, центр которого примерно соответствует современной широте $\varphi = -22.5^\circ$ и долготе $\lambda = 27.5^\circ$, и недра Луны были в расплавленном состоянии. После удаления Луны от Земли и отвердевания ее поверхности это состояние, по-видимому, было зафиксировано в ее рельефе и изменилось под воздействием ударов астероидов.

В качестве исходных данных для коэффициентов гравитационного поля была использована современная модель, полученная по данным слежения системы спутник–спутник (GRAILmission) (Zuber и др., 2013). С целью дальнейшего анализа мы представили аномалии рельефа и гравитационного поля Луны в виде распределения плотности простого слоя, отнесенного к среднему радиусу. На рис. 2 показаны степенные дисперсии D_n^r и D_n^g (в 10^6 кг/м²) для аномалий гравитационного поля и рельефа, представленных в виде разложения по сферическим функциям плотности простого слоя, отнесенного к среднему радиусу R :

$$D_n^r = \sqrt{\sum_{m=0}^n (\overline{A}_{1nm}^2 + \overline{B}_{1nm}^2)},$$

$$D_n^g = \sqrt{\sum_{m=0}^n (\overline{C}_{1nm}^2 + \overline{D}_{1nm}^2)}.$$

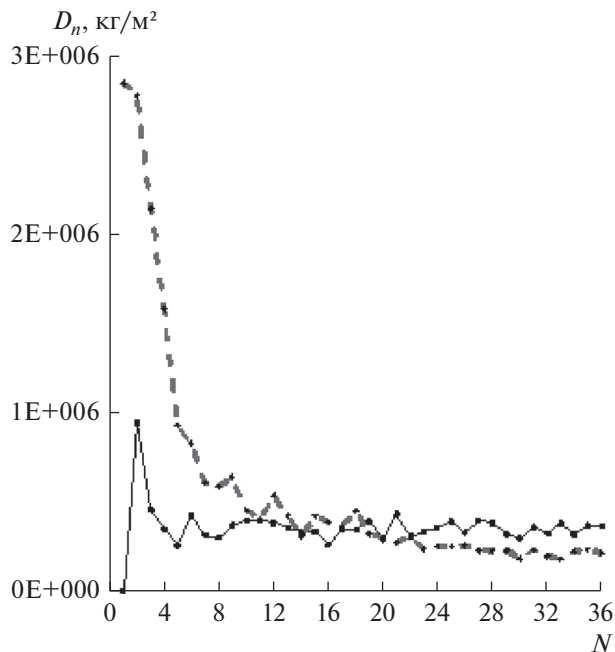


Рис. 2. Степенные дисперсии для плотности простого слоя (в 10^6 кг/м²) для гравитационного поля D_n^g (сплошная линия) и для рельефа D_n^r (пунктирная линия).

Коэффициенты разложения для простого слоя следующим образом выражаются через исходные коэффициенты (Дубошин, 1961):

$$\begin{aligned} \text{для рельефа } \left\{ \frac{A_{nm}}{B_{nm}} \right\} &= \sigma_r \left\{ \frac{A_{nm}}{B_{nm}} \right\}, \\ \text{для поля } \left\{ \frac{C_{1nm}}{D_{1nm}} \right\} &= \frac{2n+1}{3} \left(\frac{a_0}{R} \right)^n \sigma_0 R \left\{ \frac{C_{nm}}{D_{nm}} \right\}, \end{aligned}$$

где $a_0 = 1738.5$ км, $R = 1737.4$ км, $\sigma_0 = 3344$ кг/м³ — средняя плотность Луны, $\sigma_r = 2550$ кг/м³ — средняя плотность коры, $\overline{C_{nm}}$, $\overline{D_{nm}}$ — безразмерные коэффициенты разложения потенциала Луны (Zuber и др., 2013), $\overline{A_{nm}}$, $\overline{B_{nm}}$ — коэффициенты разложения высот рельефа (в метрах).

Из рис. 2 видно, что при $N < 10$ уровень дисперсии для рельефа превышает уровень дисперсии для поля, что может свидетельствовать о наличии изостатической компенсации рельефа. При $11 < N < 20$ их уровни практически совпадают, что говорит об отсутствии такой компенсации и о наличии напряжений в коре. Превышение уровня поля для высоких гармоник ($N > 20$) может говорить о превышении плотности мелких структур рельефа Луны относительно средней плотности коры.

На рис. 3 приведен график корреляции между коэффициентами разложения рельефа и гравитационного поля для различных степеней разложения. Видна отрицательная корреляция для гармоник степени $N = 10-11$, что соответствует горизонтальным размерам масконов $\Delta = 18-16^\circ$. Данные об отрицательной корреляции для гармоник степени $N = 10-11$ подтверждаются результатами других авторов, в том числе и (Wiezorek, 2015). Сравнительный анализ карт распределения плотности простого слоя для поля и рельефа позволяет выделить места отрицательной корреляции, т.е. возможное распределение масконов. Наш последующий анализ внутреннего строения по методике, разработанной нами ранее для Земли и Марса (Чуйкова и др., 2011–2014), позволит найти связь масконов с аномалиями плотности в недрах Луны.

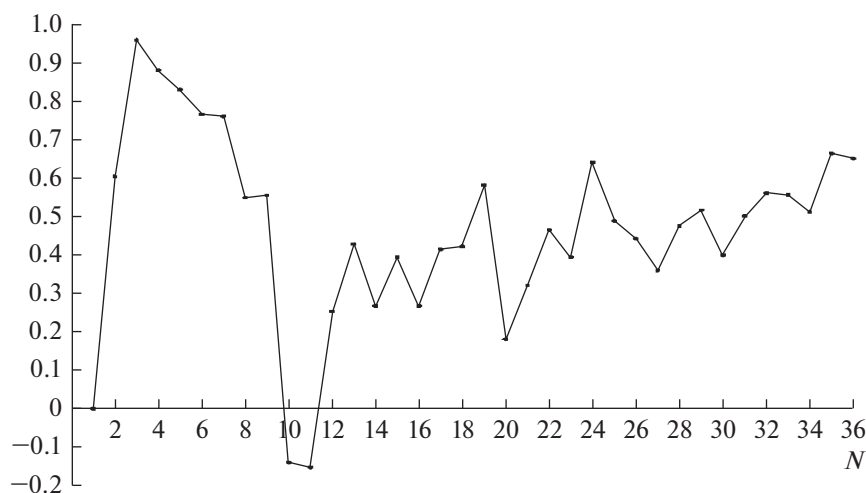


Рис. 3. Коэффициенты корреляции гармоник рельефа и гравитационного поля Луны для степеней $N = 1-36$.

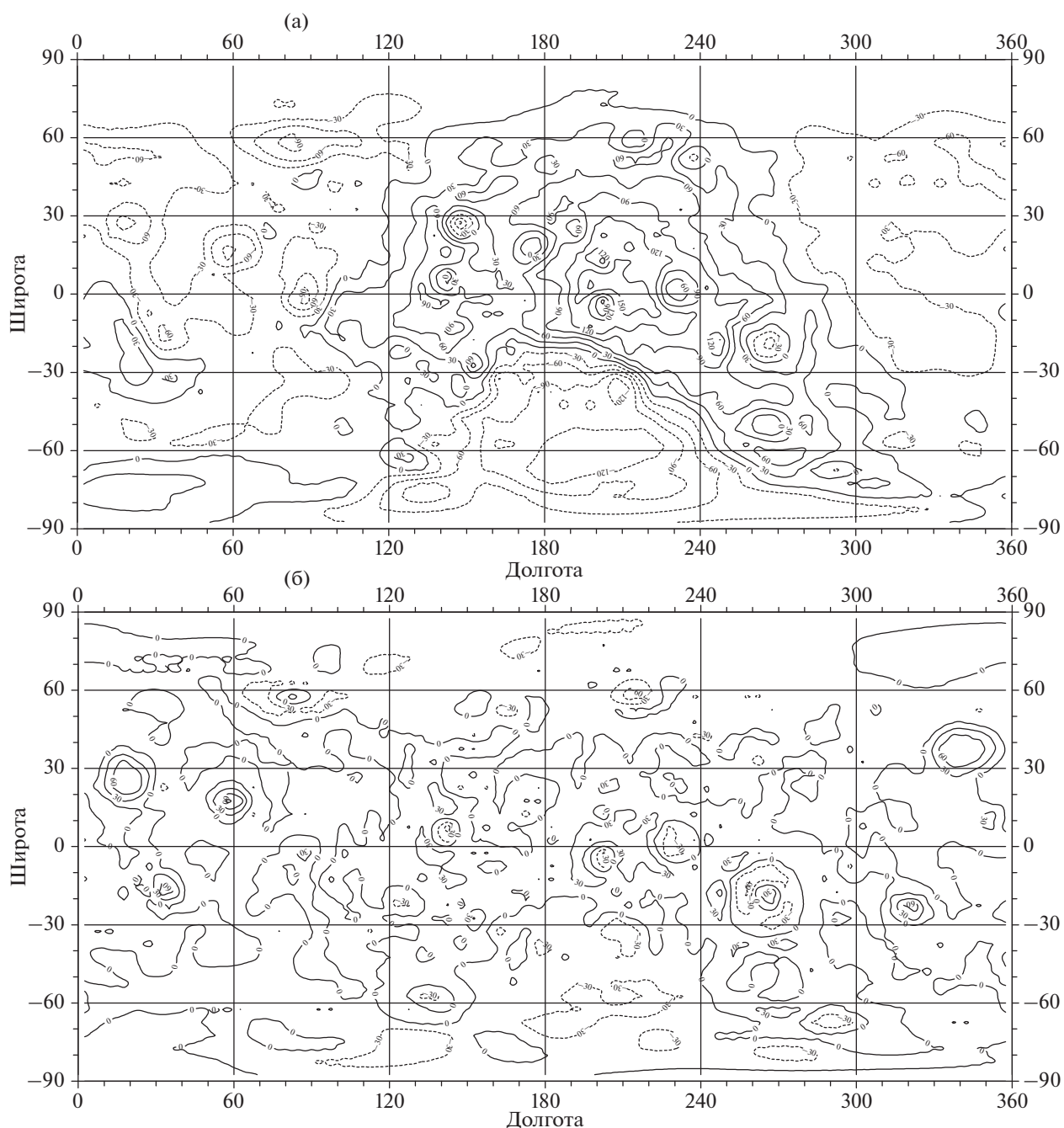


Рис. 4. (а) Аномалии плотности простого слоя (m_r) для рельефа Луны (в 10^5 кг/м^2) $\min = -139.15$ ($\varphi = -37.5^\circ$, $\lambda = 207.5^\circ$); $\max = 186.33$ ($\varphi = 2.5^\circ$, $\lambda = 197.5^\circ$), интервал между изолиниями $30 \times 10^5 \text{ кг/м}^2$, пунктирные линии – отрицательные значения, сплошные линии – положительные значения. (б) Аномалии плотности простого слоя (m_g) для гравитационного поля Луны (в 10^5 кг/м^2) $\min = -79.41$ ($\varphi = 57.5^\circ$, $\lambda = 212.5^\circ$); $\max = 98.53$ ($\varphi = 17.5^\circ$, $\lambda = 57.5^\circ$), интервал между изолиниями $30 \times 10^5 \text{ кг/м}^2$. (в) Возможное распределение аномальных масс ($m_g - m_r$) внутри Луны, отнесенное к среднему радиусу Луны (в 10^5 кг/м^2) $\min = -134.29$ ($\varphi = 2.5^\circ$, $\lambda = 222.5^\circ$); $\max = 195.04$ ($\varphi = 17.5^\circ$, $\lambda = 57.5^\circ$), интервал между изолиниями $30 \times 10^5 \text{ кг/м}^2$.

ПЛОТНОСТНЫЕ НЕОДНОРОДНОСТИ КОРЫ ЛУНЫ

Нами были построены карты распределения плотности простого слоя для гравитационного

поля (m_g) и для рельефа (m_r), соответствующие поверхности относимости радиуса R как для всей Луны, так и при различных вариантах корреляции поля и рельефа. Тогда в линейном приближе-

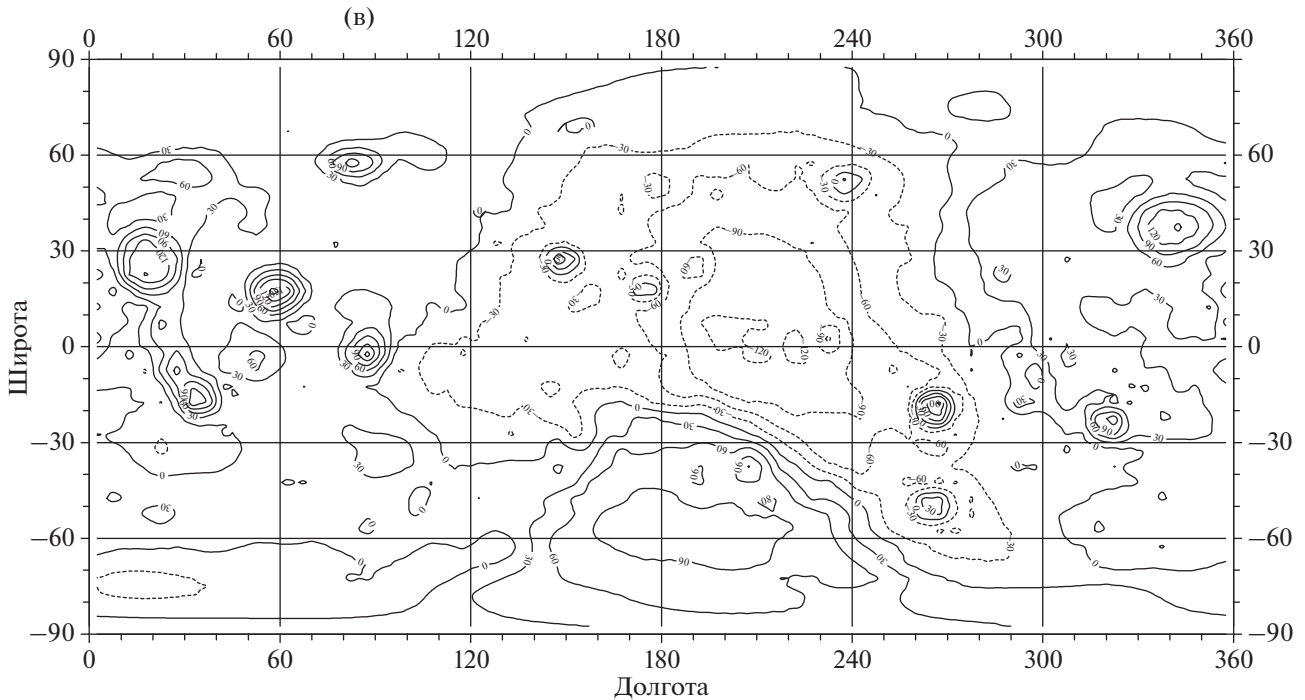


Рис. 4. Окончание.

нии карты разности $m_g - m_r$ будут соответствовать расположению аномалий плотности (т.е. расположению возможных запасов ископаемых в приповерхностных областях).

На представленных картах (рис. 4–7) видимая сторона Луны соответствует долготам $0-90^\circ$ Е (к востоку от нулевого меридиана) и долготам $360-270^\circ$, т.е. $0-90^\circ$ W (к западу от нулевого меридиана). Обратное полушарие соответствует долготам $90-270^\circ$, т.е. 90° Е– 90° W. На рис. 4б показаны распределения аномалий плотности простого слоя m_g для гравитационного поля Луны. Если сравнить эту карту с картой простого слоя (m_r) для разложения высот рельефа до 36 степени (рис. 4а), то видно, что положительные значения поля соответствуют лунным морям (т.е. положительным масконам), а отрицательные могут свидетельствовать о возможном наличии летучих элементов под возвышенными областями Луны, т.е. отрицательных масконов. На рис. 4в представлены возможные распределения аномальных масс внутри Луны, соответствующие разности $m_g - m_r$.

Здесь

$$m_g = m_g(\varphi, \lambda_i) = \sum_{n=0}^{N-1} \sum_{m=0}^n S_{nm}^i,$$

где $S_{nm}^i = (\overline{C1_{nm}} \cos m\lambda_i + \overline{D1_{nm}} \sin m\lambda_i) \overline{P_{nm}}(\sin \varphi_i)$,

$$m_r = m_r(\varphi, \lambda_i) = \sum_{n=0}^{N-1} \sum_{m=0}^n S_{nm}^i,$$

где $S_{nm}^i = (\overline{A1_{nm}} \cos m\lambda_i + \overline{B1_{nm}} \sin m\lambda_i) \overline{P_{nm}}(\sin \varphi_i)$.

Для более конкретного выделения возможных мест расположения аномальных масс в приповерхностных слоях Луны мы посчитали значение $m_g - m_r$ для различных вариантов: для масконов, т.е. при $m_g/m_r < 0$ (рис. 5), а также для $m_g/m_r > 1$ (рис. 6), т.е. при наличии летучих элементов под низменностями ($m_g < 0$, $m_r < 0$) и плотных горных пород под возвышенностями ($m_g > 0$, $m_r > 0$).

Также было подсчитано значение $m_g - m_r$ для $0 \leq m_g/m_r < 1$, что соответствует условию изостатической компенсации масс рельефа. Для этого была выделена часть, соответствующая изостатической компенсации глобальных неоднородностей ($\Delta\varphi, \Delta\lambda > 180^\circ/4 = 45^\circ$) рельефа (для $N \leq 4$) на глубинах 44–160 км (рис. 7а). После этого была построена карта (рис. 7б) для аномальных масс, которые компенсируются в приповерхностных слоях.

Сравнение карты масконов, составленной на основе данных LOLA и гравитационной модели GRGM900C (Neumann и др., 2015), с рис. 5 показало совпадение всех положительных масконов для видимой стороны Луны в морях: Дождей, Влажности, Кризисов, Смита, Гумбольдта, Нектара, Восточном, Ясности, Изобилия. На обратной стороне положительные масконы совпадают

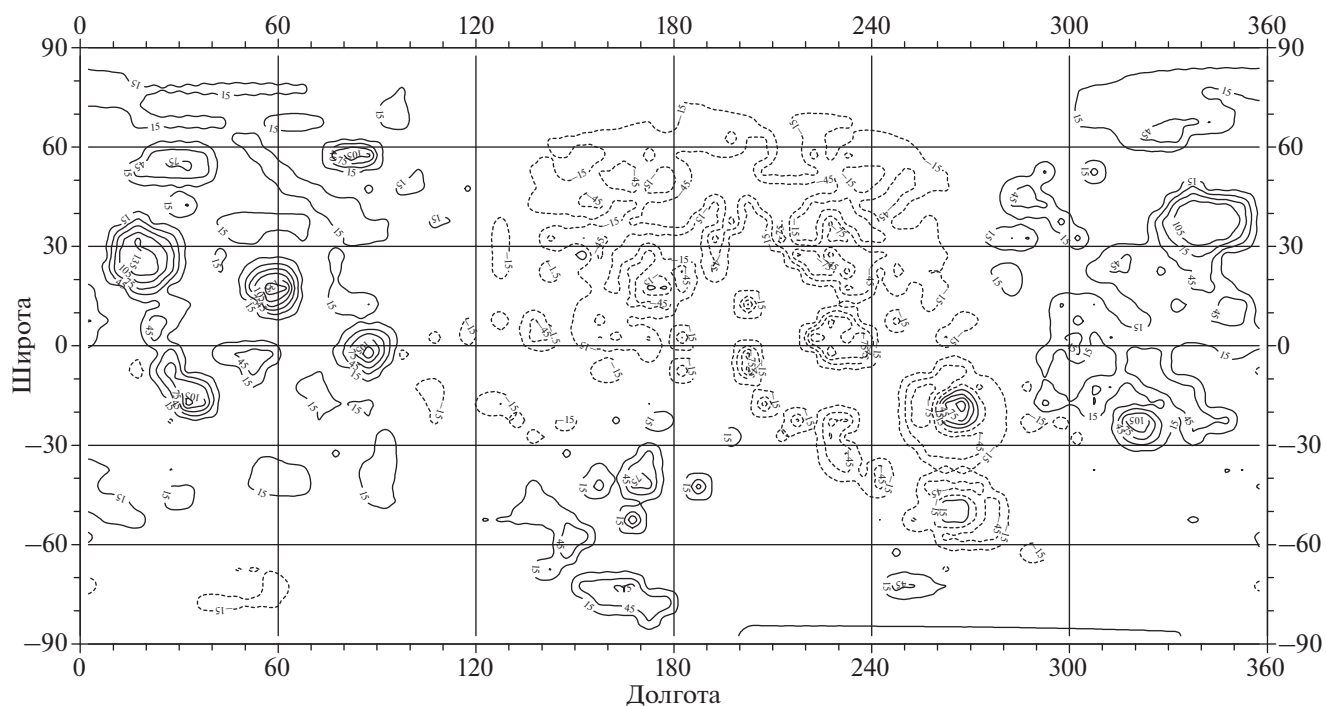


Рис. 5. Распределение аномальных масс ($m_g - m_r$) в приповерхностных слоях Луны, соответствующее масконам (т.е. при $m_g/m_r < 0$) (в 10^5 кг/м^2) $\min = -134.29$ ($\varphi = 2.5^\circ$, $\lambda = 222.5^\circ$); $\max = 195.04$ ($\varphi = 17.5^\circ$, $\lambda = 57.5^\circ$), интервал между изолиниями $30 \times 10^5 \text{ кг/м}^2$.

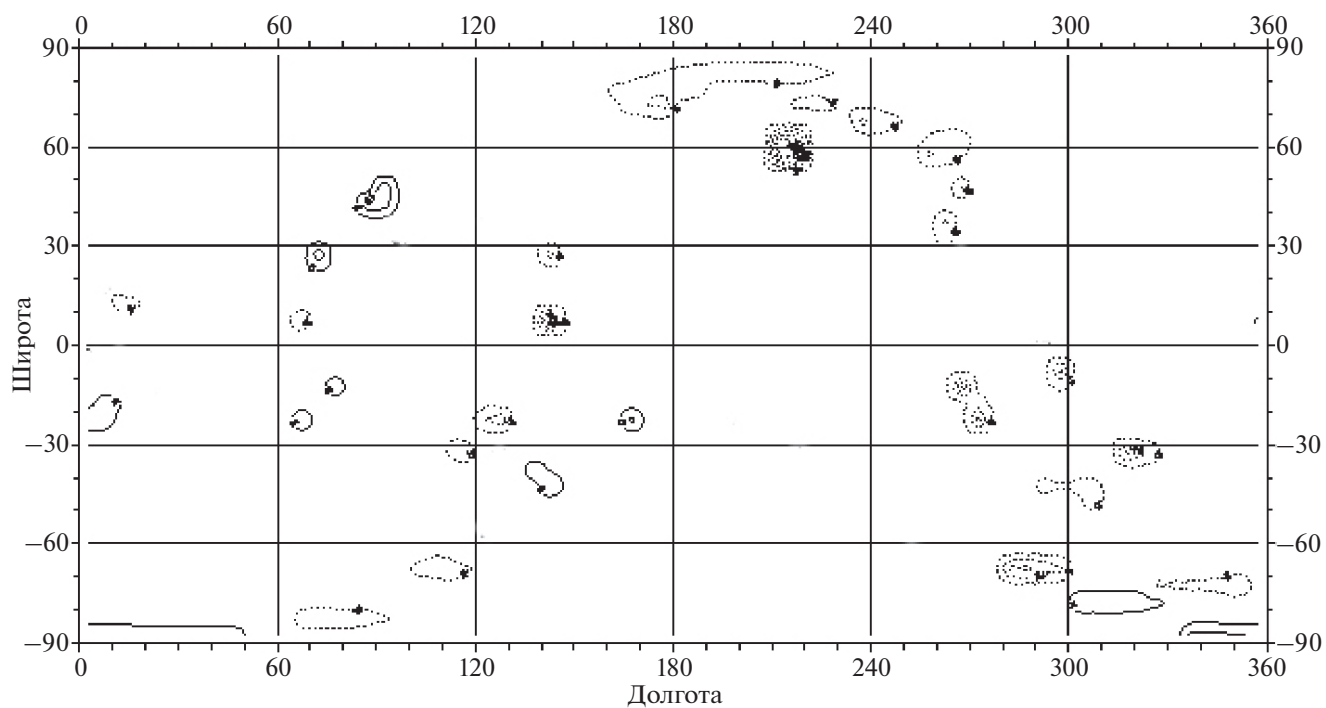


Рис. 6. Возможные места залеганий воды и прочих летучих элементов ($m_g - m_r$) под низменностями Луны (т.е. при $m_g/m_r > 1$, $m_g < 0$, $m_r < 0$) и плотных горных пород под возвышенностями (т.е. при $m_g/m_r > 1$, $m_g > 0$, $m_r > 0$) (в 10^5 кг/м^2): $\min = -59.68$ ($\varphi = 57.5^\circ$, $\lambda = 212.5^\circ$); $\max = 23.41$ ($\varphi = 47.5^\circ$, $\lambda = 92.5^\circ$), интервал между изолиниями $10 \times 10^5 \text{ кг/м}^2$.

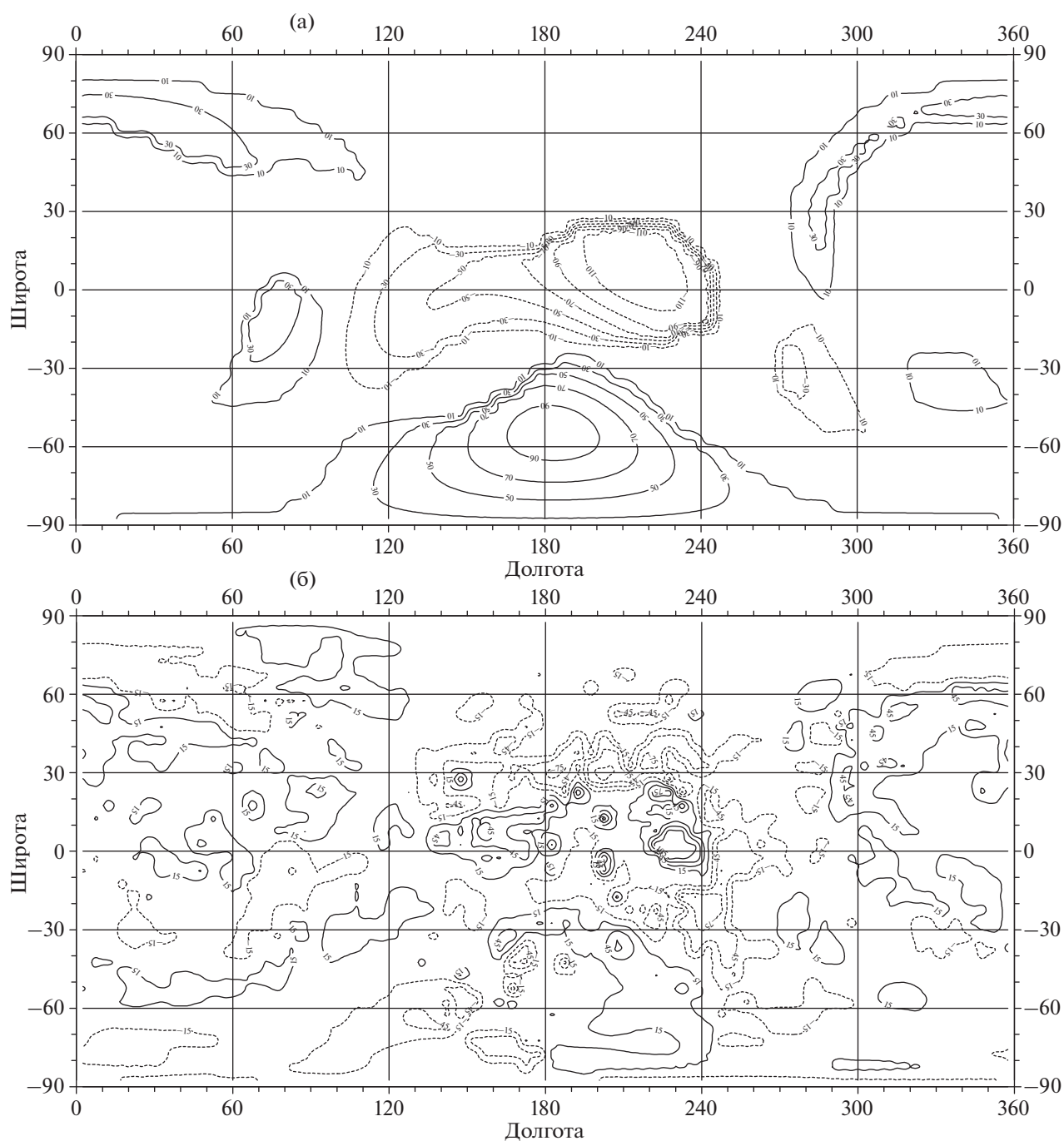


Рис. 7. (а) Распределение аномальных масс ($m_g - m_r$) внутри Луны, соответствующее изостатической компенсации глобальных неоднородностей рельефа на глубинах 44–160 км (в 10^5 кг/м^2): $\min = -127.73$ ($\varphi = -7.5^\circ$, $\lambda = 217.5^\circ$); $\max = 100.90$ ($\varphi = -52.5^\circ$, $\lambda = 182.5^\circ$), интервал между изолиниями $20 \times 10^5 \text{ кг/м}^2$. (б). Возможное распределение аномальных масс ($m_g - m_r$) в коре Луны, соответствующее изостатической компенсации в приповерхностных слоях (в 10^5 кг/м^2): $\min = -110.95$ ($\varphi = 27.5^\circ$, $\lambda = 202.5^\circ$); $\max = 125.22$ ($\varphi = 2.5^\circ$, $\lambda = 222.5^\circ$), интервал между изолиниями $30 \times 10^5 \text{ кг/м}^2$.

с Морем Мечты, бассейнами Шредингер, Планк, Пуанкаре. Маскон в Море Москвы проявляется на рис. 7б, соответствующем изостатической компенсации в приповерхностных слоях. Такие образования, как Герцшпрунг, Королев, Дирих-

лет–Джексон, не проявляются на рис. 5 как положительные масконы. Они определяются как отрицательные масконы и входят в состав более глобального образования, компенсирующегося на глубинах 44–160 км (рис. 7а).

Для Марса подобные эффекты выражены не так отчетливо. Такое неотчетливое проявление масконов объясняется тем, что масконы на Марсе не повсеместны, а являются единичными явлениями и различны по размерам. Так, на картах высот рельефа и аномалий плотности, приведенных в (Чуйкова и др., 2011), можно выделить только равнины Эллада, Утопия и Исида как положительные масконы, по размерам соответствующие гармоникам степени $N = 4$ (Эллада и Утопия) и $N = 8$ (Исида), а гору Арсия как отрицательный маскон, соответствующий $N = 9$. В (Arkani-Hamed, 2010) также отмечено единственное образование на Марсе (равнина Утопия), которое является масконом и может влиять на конвективные движения в ядре Марса. Возможно, такое нерегулярное проявление масконов на Марсе обусловлено крайней нерегулярностью поверхности Марса (Гудкова и др., 2017). В этой работе отмечен также значительный сдвиг центра масс относительно центра фигуры Марса на 3,3 км, что в отличие от Луны, по-видимому, обусловлено также нерегулярностью топографической поверхности, а не влиянием близкого массивного тела.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ корреляционных связей между рельефом и гравитационным полем показал, что лунные масконы соответствуют разложению по сферическим функциям при $N = 10-11$, т.е. размерам масконов $18-16^\circ$. Породы повышенной плотности, соответствующие положительным аномалиям поля, находятся в основном под лунными морями видимой стороны Луны (рис. 5), внутри некоторых возвышенностей, в основном в краевой зоне и на видимой стороне Луны (рис. 6) (возможно, являющимися проявлениями древнего вулканизма), а также соответствуют изостатической компенсации низменностей рельефа в коре (рис. 7б) и на глубинах 44–160 км (рис. 7а). Особенно большие положительные аномальные массы расположены под бассейном Южный полюс–Эйткен и в ряде областей в краевой зоне Луны (рис. 7а). Однако отдельные более молодые возвышенные области на поверхности бассейна компенсируются в приповерхностных слоях, создавая там отрицательные аномалии плотности (рис. 7б). На рис. 4а выделяется массивный слой положительной плотности, включающий в себя кратер Гершпрунг, который целиком компенсируется на глубине 44–160 км (рис. 7а), причем края кратера обладают повышенной плотностью по сравнению с центральной частью (рис. 4а). Из сравнения рис. 4в, 5, 6, 7 видно, что основные запасы летучих элементов могут быть на обратной стороне Луны в экваториальной области (рис. 5, 6, 7), в северном приполярном районе (рис. 6, 7б), наиболее значительные — под кратером Биркгофф. Согласно рис. 6 можно также ожидать на-

личие летучих элементов под Морем Восточным, Морем Москвы, кратерами Менделеев, Гримальди и Байи. Из сравнения рис. 4а и 4в видно, что нашим методом летучие могут быть обнаружены также на видимой стороне Луны к северо-востоку от кратера Богуславский в районе возвышенности при $\varphi = 70^\circ S - 85^\circ S$, $\lambda = 0^\circ E - 50^\circ E$. Что же касается результатов поиска водородосодержащих летучих с помощью нейтронного детектора LEND (Start и др., 2017), то они свидетельствуют о присутствии таких элементов в метровом слое реголита на дне некоторых кратеров. Авторы (Start и др., 2017) соотносят наличие таких летучих в кратерах с внешним воздействием солнечного ветра или ударами метеоритов или комет. Однако довольно компактное расположение таких кратеров, представленное этими авторами на рис. 5 при: $(\varphi = 30^\circ \pm 10^\circ, \lambda = 210^\circ \pm 20^\circ)$, $(\varphi = -50^\circ \pm 20^\circ, \lambda = 0^\circ \pm 20^\circ)$, $(\varphi = 5^\circ \pm 15^\circ, \lambda = 120^\circ \pm 10^\circ)$, может свидетельствовать о внутренних причинах (т.е. подъеме летучих из коры), что можно заметить и на нашем рис. 5. Разработанный нами метод аналогичен поиску аномалий плотности с помощью аномалий Буге (Neumann и др., 2015), но позволяет определить внутреннее плотностное строение коры Луны независимо от рельефа в рассматриваемой области. Так, представленный в (Sood и др., 2015) результат обнаружения скрытого под поверхностью кратера Эрхарт (к северо-востоку от моря Ясности в районе $\varphi = 40^\circ N - 44^\circ N$, $\lambda = 20^\circ E - 24^\circ E$) на основе гравитационного поля, виден и на наших картах, если сравнить рис. 4а и 4в. Впрочем, как наш результат, так и результат, представленный в (Sood и др., 2015), свидетельствует лишь о наличии аномалии плотности в приповерхностном слое.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Гришакина Е.А., Лазарев Е.Н., Родионова Ж.Ф., Шевченко В.В. Гипсометрическая карта Луны 1 : 13000000 . М.: ГАИШ, Географич.ф-т МГУ, 2014.
- Гудкова Т.В., Батов А.В., Жарков В.Н. Модельные оценки негидростатических напряжений в коре и мантии Марса: 1. Двухуровневая модель // Астрон. вестн. 2017. Т. 51. № 6. С. 490–511. (Gudkova T.V., Batov A.V., Zharkov V.N. Model estimates of non-hydrostatic stresses in the Martian crust and mantle: 1-two-level model // Sol. Syst. Res. 2017. V. 51. № 6. P. 457–478.)
- Дубошин Г.Н. Теория притяжения. М. 1961. С. 258–261.
- Иванов М.А., Базилевский А.Т., Бричева С.С., Гусева Е.Н., Демидов Н.Э., Захарова М., Красильников С.С. Фундаментальные проблемы изучения Луны, технические средства подходов к их решению и потенциальные регионы исследования // Астрон. вестн. 2017. Т. 51. № 6. С. 473–489.
- Кондратьев Б.П. К вопросу об отклонении главной оси эллипсоида инерции Луны от направления на Землю // Астрон. журн. 2017. Т. 94. № 8. С. 709–714.

- Чуйкова Н.А. О преобразованиях ряда Лапласа при преобразованиях систем координат // Вестн. МГУ. Сер. 3. Физика. Астрономия. 1983. Т. 24. № 6. С. 75–78.
- Чуйкова Н.А., Грушинский А.Н., Максимова Т.Г. Гармонический и статистический анализ эквивалентного рельефа Земли и его изостатическая компенсация // Тр. ГАИШ. 1996. Т. LXV. С. 51–85.
- Чуйкова Н.А., Максимова Т.Г. Гармонический и статистический анализ глубин поверхности Мохоровичича // Тр. ГАИШ. 1996. Т. LXV. С. 33–50.
- Чуйкова Н.А., Насонова Л.П., Максимова Т.Г. Аномальное строение коры и мантии Марса // Вестн. МГУ. Сер. 3. Физика. Астрономия. 2011. № 1. С. 63–69.
- Чуйкова Н.А., Насонова Л.П., Максимова Т.Г. Аномалии плотности, напряжений и гравитационного поля внутри Марса // Вестн. МГУ. Сер. 3. Физика. Астрономия. 2012. № 2. С. 70–77.
- Чуйкова Н.А., Насонова Л.П., Максимова Т.Г. Аномалии плотности, напряжений и гравитационного поля внутри Земли и Марса и возможные геодинамические следствия: сравнительный анализ // Физика Земли. 2014. № 3. С. 127–143.
- Arkani-Hamed J. Did giant impacts cripple core dynamos of terrestrial planets? // 12th Symp. SEDI, 2010. Santa Barbara, California, Poster Abstracts. P. 5.
- Barker M.K., Mazarico E., Neumann G.A., Zuber M.T., Haruyama J., Smith D.E. A new lunar digital elevation model from the Lunar Orbiter Laser Altimeter and SELENE Terrain Camera // Icarus. 2016. V. 273. P. 346–355.
- Chappaz L., Sood R., Melosh H.J., Howell K.C., Blair D.M., Milbury C., Zuber M.T. Evidence of large empty lava tubes on the Moon using GRAIL gravity // Geophys. Res. Lett. 2017. V. 44. P. 105–112. doi 10.1002/2016GL071588
- Chujkova N.A., Nasonova L.P., Maximova T.G. The new method to found the anomalous internal structure of terrestrial planets and its test on the Earth // IAG Symp. Ser. 2014. V. 144. № 195. P. 209–219. doi 10.1007/978-3-319-39820-410.1007/978-3-319-39820-4
- Kaku T., Haruyama J., Miyake W., Kumamoto A., Ishiyama K., Nishibori T., Yamamoto K., Crites Sarah T., Michikami T., Yokota Y., Sood R., Melosh H.J., Chappaz L., Howell K.C. Detection of intact lava tubes at Marius Hills on the Moon by SELENE (Kaguya) Lunar Radar Sounder // Geophys. Res. Lett. 2017. V. 44. Iss. 20. P. 10,155–10,161.
- Litvak M.L., Mitrofanov I.G., Sanin A.B., Golovin D.V., Malakhov A.V., Boynton W.V., Droege G.F., Harshman K., Starr R.D., Milikh G., Sagdeev R. LEND neutron data processing for the mapping of the Moon // J. Geophys. Res. Planets. 2012. V. 117. E00H32. http://dx.org/10.1029/2011JE004035.
- Neumann G.A., Zuber M.T., Wieczorek M.A., Head J.W., Baker D.M.H., Solomon S.C., Smith D.E., Lemoine F.G., Mazarico E., Sabaka T.J., Goossens S.J., Melosh H.J., Phillips R.J., Asmar S.W., Konopliv A.S., Williams J.G., Sori M.M., Soderblom J.M., Miljkovic K., Andrews-Hanna J.C., Nimmo F., Kiefer W.S. Lunar impact basins revealed by Gravity Recovery and Interior Laboratory measurements // Science Advances. 2015. V. 1. Iss. 9. 1:e1500852 30 October 2015. P. 1–10.
- Pieters C.M., Goswami J.N., Clark R.N., Annadurai M., Boardman J., Buratti B., Combe J.-P., Dyar M.D., Green R., Head J.W., Hibbitts C., Hicks M., Isaacson P., Klima R., Kramer G., Kumar S., Livo E., Lundeen S., Malaret E., McCord T., Mustard J., Nettles J., Petro N., Runyon C., Staid M., Sunshine J., Taylor L.A., Tompkins S., Varanasi P. Character and spatial distribution of OH/H₂O on the surface of the Moon seen by M3 on Chandrayaan-1 // Science. 2009. V. 326. P. 568–582. http://dx.org/10.1126/science.1178658.
- Smith D.E., Zuber M.T., Jackson G.B., Cavanaugh J.F., Neumann G.A., Riris H., Sun X., Zellar R.S., Coltharp C., Connelly J., Katz R.B., Kleyner I., Liiva P., Matuszkeski A., Mazarico E.M., McGarry, Jan F., Ott M.N., Peters C., Ramos-Izquierdo L.A., Ramsey L., Rowlands D.D., Schmidt S., Scot V.S., Shaw G.B., Smith J.C., Swinski J., Torrence M.H., Unger G., Yu A.W., Zagwodzk T.W. The lunar orbiter laser altimeter investigation on the lunar reconnaissance orbiter mission // Space Sci. Rev. 2010. V. 150. P. 209–241. doi: 10.1007/s11214-009-9512-y
- Smith D.E., Zuber M.T., Neumann G.A., Mazarico E., Lemoine F.G., Head J.W., Lucey P.G., Aharonson O., Robinson M.S., Sun X., Torrence M.H., Barker M.K., Oberst J., Duxbury T.C., Mao D., Barnouin O.S., Jha K., Rowlands D.D., Goossens S., Baker D., Bauer S., Gläser P., Lemelin M., Rosenburg M., Sori M.M., Whitten J., McClanahan T. 2017. Summary of the results from the lunar orbiter laser altimeter after seven years in lunar orbit // Icarus. 2017. V. 283. P. 70–91.
- Sood R., Chappaz L., Milbury C., Blair D.M., Melosh H.J., Howell K.C. Earhart: a large, previously unknown lunar nearside crater revealed by grail gradiometry // 46th Lunar and Planet. Sci. Conf. 2015. 1883.pdf.
- Starr R.D., Litvak M.L., Petro N.E., Mitrofanov I.G., Boynton W.V., Chin G., Livengood T.A., McClanahan T.P., Sanin A.B., Sagdeev R.Z., Su J.J. Crater age and hydrogen content in lunar regolith from LEND neutron data // Planet. and Sci. 2017. http://dx.org/10.1016/j.pss.2017.08.001.
- Shuai Li., Milliken R.E. Water on the surface of the Moon as seen by the Moon Mineralogy Mapper: Distribution, abundance, and origins // Science Advances. 2017. V. 3. № 9. e1701471.
- Wieczorek M.A. Treatise on Geophysics. 2015. V. 10. P. 153–193.
- Zuber M.T., Smith D.E., Watkins M.M., Asmar S.W., Konopliv A.S., Lemoine F.G., Melosh H.J., Neumann G.A., Phillips R.J., Solomon S.C., Wieczorek M.A., Williams J.G., Goossens S.J., Kruizinga G., Mazarico E., Park R.S., Yvan D.N. Gravity field of the Moon from the Gravity Recovery and Interior Laboratory (GRAIL) mission // Science. 2013. V. 339. № 6120. P. 668–671. doi 10.1126/science.1231507