

А. Л. ЦЕРКЛЕВИЧ, Э. М. ЕВСЕЕВА

О ВЗАИМОСВЯЗИ АНОМАЛЬНОГО

ГРАВИТАЦИОННОГО ПОЛЯ И ТОПОГРАФИИ ПЛАНЕТЫ

(Земля, Марс, Луна)

Проблема связи аномалий силы тяжести с рельефом дневной поверхности Земли не нова, но по мере расширения наших знаний о недрах собственной планеты, а также с появлением данных о гравитационном поле и топографии Марса и Луны она приобретает новый смысл и значение. Из общих космогонических и тектонических гипотез известно, что в процессе эволюции планеты происходят крупные перемещения поверхностных и глубинных масс, приводящие к изменению во времени структуры гравитационного поля и облика планеты. Современное же гравитационное поле и рельеф планет отражает в известной мере весь предыдущий путь их геологического развития. Это обстоятельство свидетельствует о необходимости проведения анализа гравитационного поля и топографии планет с единых

планетологических позиций, что дает возможность установить в глобальном масштабе не только их общие и отличительные закономерности, но и глубже понять характер и направленность тех динамических процессов, которые сформировали современную структуру Земли, Марса и Луны. Конечно, при проведении такого анализа возникают известные трудности, связанные с несовместимостью по размерам и массе этих планет. Однако в наиболее общих характеристиках между ними, по-видимому, должна обнаруживаться большая аналогия. Поэтому далее обращается в основном внимание на весьма крупные (по площади) особенности рельефа и гравитационного поля Земли, Марса и Луны, соответствующие разложению их топографии и гравитационного поля по сферическим функциям до 16-го, 8-го и 4-го порядков соответственно или же линейным размерам 1000...1500 км.

Общеизвестно, что для Земли изостатическое равновесие хорошо осуществляется лишь в региональном масштабе. Условие выполнения изостатического равновесия в общем случае требует равенства нулю значений изостатических аномалий. Хотя для Земли зональные аномалии силы тяжести небольшие (порядка 20...40 мГал) [2, 7], отличие их от нуля ставит вопрос о природе источников таких аномалий. Учитывая их планетарный характер, можно допустить, что они связаны либо с аномальными массами, расположенными достаточно глубоко в мантии планеты, либо с интегральным эффектом аномальных неоднородностей в коре и верхней мантии.

В настоящее время большинство исследователей [9] считают, что негидростатические низкочастотные гармоники гравитационного поля Земли не являются результатом совместного эффекта топографии и ее изостатической компенсации и, следовательно, они связаны с плотностными неоднородностями мантийных горизонтов планеты.

Возникает вопрос — можно ли региональные особенности гравитационных полей Марса и Луны объяснить таким же образом?

Результаты исследований гравитационного поля и топографии Луны приводят к выводу о том, что в планетарном масштабе ее топография, за исключением огромных цирковых бассейнов (морские участки), изостатически скомпенсирована [5, 8, 17].

Недавние же предварительные исследования изостатического состояния топографии Марса [10, 19] показали, что на планете существуют обширные регионы, для которых наблюдаются значительные нарушения изостазии.

В настоящей статье предпринята попытка осмыслить проблему интерпретации крупномасштабных особенностей гравитационного поля планет, основываясь на сравнительном анализе взаимных связей между аномалиями силы тяжести и топографией планет, разложенных в ряд по сферическим функциям.

Введем следующие системы сферических гармоник:

$T_{nm} = [\bar{C}_{nm}^t, \bar{S}_{nm}^t]$ — нормированные коэффициенты разложения топографии планеты;

$G_{nm} = [\bar{C}_{nm}^g, \bar{S}_{nm}^g]$ — коэффициенты разложения потенциала притяжения;

$I_{nm} = [\bar{C}_{nm}^i, \bar{S}_{nm}^i]$ — коэффициенты разложения потенциала, возбуждаемого топографическими и компенсационными массами;

Таблица 1

Численные данные, использованные для вычисления коэффициентов J_{nm}, E_{nm}

	Земля [6]	Луна [15]	Марс [10]
Средняя плотность коры δ_k	$2,67 \cdot 10^3$ кг/м ³	$2,95 \cdot 10^3$ кг/м ³	$3,0 \cdot 10^3$ кг/м ³
Средняя плотность планеты δ_{cp}	$5,52 \cdot 10^3$ кг/м ³	$3,34 \cdot 10^3$ кг/м ³	$3,94 \cdot 10^3$ кг/м ³
Нормальная толщина коры d	30 км	60 км	30 км
Средний радиус планеты R	6371 км	1738 км	3390 км
Среднее ускорение силы тяжести g	980 Гал	163 Гал	372 Гал

$E_{nm} = [\bar{C}_{nm}^e, \bar{S}_{nm}^e]$ — коэффициенты разложения потенциала, обусловленного частью топографии, находящейся в напряженном состоянии.

Первые две системы коэффициентов задаются как исходные параметры. Для Луны соответствующие коэффициенты взяты из работ [14, 17], для Марса — из [16, 23] и для Земли — из [6]. Две другие системы коэффициентов можно найти на основании представления топографических и компенсационных масс в виде простого слоя разложенных в ряд по сферическим функциям [6]:

$$I_{nm} = \frac{3n}{2n+1} \frac{\sigma_k}{\delta_{cp}} \frac{d}{R} T_{nm}; \quad (1) \quad E_{nm} = \frac{2}{3} (n-1) \frac{\delta_k}{\delta_{cp}} (G_{nm} - I_{nm}). \quad (2)$$

Для определения численных значений этих коэффициентов использовались данные, приведенные в табл. 1.

По найденным для Земли, Марса и Луны коэффициентам T_{nm}, G_{nm}, I_{nm}^* были рассчитаны значения порядковых дисперсий топографии, аномалий в свободном воздухе и гравитационного эффекта, обусловленного топографическими и компенсационными массами, а также порядковые коэффициенты корреляции между аномалиями силы тяжести и топографией (табл. 2).

Сравнение порядковых дисперсий для этих планет показывает, что гравитационное поле и топография Марса заметно нерегулярнее таковых для Земли и Луны. Однако для порядковых корреляций выполняются иные соотношения. Так, для Земли оказывается, что между сферическими гармониками в разложении аномалий силы тяжести и топографии для низких гармоник $N \leq 6$ отсутствует закономерная линейная зависимость, в то время как для Луны и Марса наблюдается в основном тесная корреляционная зависимость для тех же порядков сфери-

Таблица 2

Порядковые дисперсии и коэффициенты порядковых корреляций

Порядок <i>n</i>	Земля				Марс				Луна			
	$\sigma_n^2 (T)$	$\sigma_n^2 (G)$	$\sigma_n^2 (I)$	$r_n (I, T)$	$\sigma_n^2 (T)$	$\sigma_n^2 (G)$	$\sigma_n^2 (I)$	$r_n (I, T)$	$\sigma_n^2 (T)$	$\sigma_n^2 (G)$	$\sigma_n^2 (I)$	$r_n (I, T)$
	км ²	м Гал ²	м Гал ²		км ²	м Гал ²	м Гал ²		км ²	м Гал ²	м Гал ²	
2	0,307	30	0,3	0,06	1,210	1296	1,7	0,79	0,209	256	2,5	0,46
3	0,556	34	1,6	0,03	1,006	1764	4,4	0,50	0,258	169	13,6	0,72
4	0,469	25	2,6	0,54	0,498	400	2,2	0,13	0,120	196	15,2	0,52
5	0,328	24	3,0	-0,38	0,704	324	3,4	0,55	0,063	441	16,8	-0,28
6	0,157	22	2,0	0,38	0,598	256	10,2	0,53	0,078	1296	30,2	-0,31
7	0,065	21	1,2	0,31	0,603	289	14,4	0,13	0,261	1600	148,8	-0,54
8	0,093	16	2,2	0,62	0,528	225	14,4	-0,31	0,216	576	171,6	-0,37
<i>N-8</i>				0,03				0,50				-0,34

ческих гармоник. Это обстоятельство, как правило, объясняется скомпенсированностью основных региональных неоднородностей рельефа для Земли на небольших глубинах ($d=30$ км), а для Луны и Марса — на глубинах, значительно превышающих имеющуюся в случае принятой нормальной толщины коры.

Таким образом, можно предварительно заключить, что изостатическая компенсация глобальных топографических структур Луны и Марса, в противоположность Земле, осуществляется на достаточно больших глубинах — в мантии планет. Следовательно, для Земли выполняется очень точная компенсация длинноволновых форм рельефа, в то время как для Луны и Марса длинноволновые формы рельефа некомпенсированы и, значит, можно допустить, что для этих планет в классическом понимании изостазия не осуществляется.

Действительно, если полагать, что изостатические аномалии силы тяжести, вычисленные по формуле

$$\Delta g_i = \frac{fM}{r^2} \sum_{n=2}^N (n-1) \left(\frac{R}{r}\right)^n \sum_{m=0}^n I_{nm}^* \Lambda_{nm}, \quad (3)$$

полностью обусловлены распределением масс на границе корамантии, то можно вычислить вариации мощности аномальной толщины коры ΔM , которая находится в напряженном состоянии, т. е. изостатически не уравновешена:

$$\Delta M = R \sum_{n=2}^N \sum_{m=0}^n E_{nm}^* \Lambda_{nm}, \quad (4)$$

где $\Lambda_{nm} = P_{nm}(\sin \varphi) \begin{cases} \cos m\lambda \\ \sin m\lambda \end{cases}$; I_{nm}^* , E_{nm}^* — означает, что в данной системе коэффициентов зональные гармоники 2-го порядка соответствуют референцной системе отсчета.

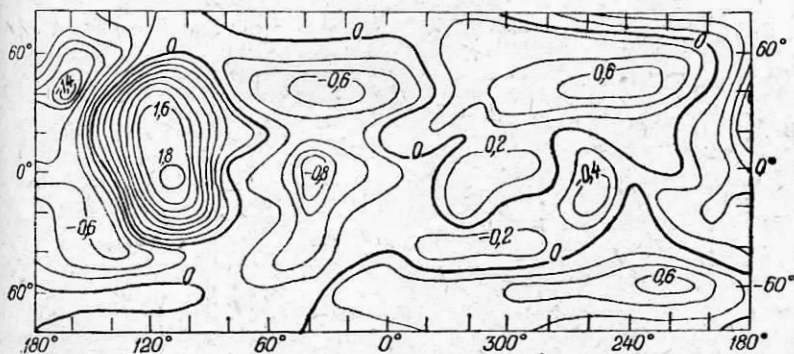


Рис. 1. Аномальная толщина марсианской коры, построенная с учетом сферических гармоник до 8-го порядка. Изолинии проведены через 0,2 км.

Найденные значения ΔM для Луны и Марса представлены в виде карт соответственно на рис. 1 и 2.

Покажем теперь, к каким разностям упругих напряжений приводят вычисленные аномальные толщи коры для Луны и Марса. Оказывается, что для Луны характерны напряжения, сравнимые с земными, если учитывать гармоники низкого порядка; для масконов напряжения могут достигать величины $\sim 5-7,5 \cdot 10^6$ Па. Для Марса разность напряжений в регионе Тарсис составляет $\sim 20 \cdot 10^6$ Па. В других регионах напряжения колеблются преимущественно в пределах $2 \cdot 10^6 \dots 10 \cdot 10^6$ Па. Среднее квадратическое отклонение касательных напряжений по всей поверхности планеты, вычисляемое по формуле

$$\sigma(\sigma_{rr}) = \delta_k g R [(\bar{C}_{nm}^e)^2 + (\bar{S}_{nm}^e)^2]^{1/2}, \quad (5)$$

составляет для Луны $3,5 \cdot 10^6$ Па, для Марса $5,8 \cdot 10^6$ Па и Земли $3,3 \cdot 10^6$ Па. На рис. 3 представлены спектральные кривые разностей напряжений в коре этих планет.

Полученные оценки разностей упругих напряжений найдены в предположении, что нагрузка на поверхности, вызванная ано-

мальной толщиной поверхностного слоя коры, поддерживается только за счет ее прочности. Хотя, как известно [3], предел прочности литосферы Земли находится на уровне 10^8 Па, все же она не может выдерживать без соответствующих перемещений и возникновения разломов длительную нагрузку, превышающую по порядку 10^6 Па, если она сосредоточена в области характерного размера 1000 км и более. Поэтому считается, что нескомпенсированные нагрузки большого горизонтального масштаба не могут существовать в течение длительного времени в земных условиях.

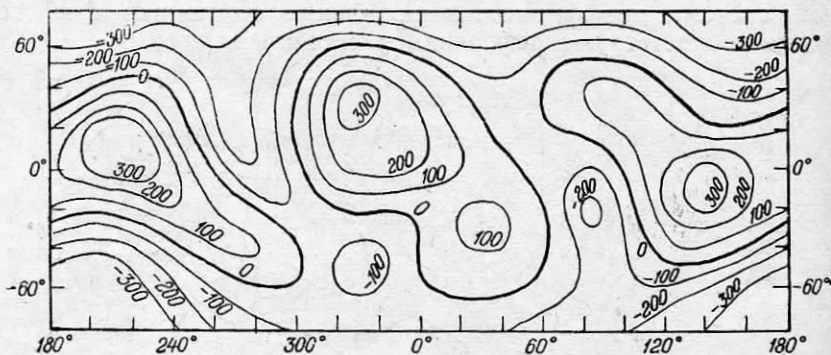


Рис. 2. Аномальная толща лунной коры, построенная с учетом сферических гармоник до 4-го порядка. Изолинии проведены через 100 м.

Большинство исследователей [4, 5, 8, 11, 15] считают, что для Луны масконы изостатически не уравновешены и, следовательно, их интерпретация предполагает либо большую твердость внешних частей Луны, способных довольно долго выдерживать напряжения, либо значительную вязкость вещества, приводящую к тому, что время, прошедшее с момента образования масконов, недостаточно для их выравнивания.

Таким образом, по-видимому, Луна может выдерживать нагрузки намного бóльшие, чем Земля, хотя в глобальном масштабе напряжения в ее коре, как и для Земли, не превышают $\sim 10^6$ Па.

Для Марса также предполагаем, что его кора выдерживает длительные нагрузки не более $1 \cdot 10^6 \dots 2 \cdot 10^6$ Па. Выполненные расчеты [19] в противном случае свидетельствуют, что если время релаксации принять равным $\sim 10^9$ лет, то согласующаяся с нескомпенсированными нагрузками вязкость вещества составляет $\sim 10^{26}$ Па·с, что, по мнению некоторых исследователей [12, 13], вряд ли реально. Кроме того, если допустить, что напряжения, вычисленные для Марса, сконцентрированы только в коре, то они должны приводить марсианскую кору к состоянию постоянных марсотрясений. Однако наличие на Марсе сети разломов планетарного масштаба [18], а также его асейсмич-

ность [12] подтверждают отсутствие в настоящее время в коре планеты таких больших нескомпенсированных нагузков. Напряжения, вероятно, вызваны и поддерживаются нарушениями гидростатического состояния на больших глубинах.

Нагрузка же в 10^6 Па может создаваться аномальным топографическим слоем мощностью ~ 40 м для Земли, ~ 100 м для Марса и ~ 200 м для Луны. Отметим, что именно такие оценки мощностей аномального поверхностного слоя соответствуют максимальным значениям вариаций ондуляций изостатического геоида [1], ареоида и селеноида. На рис. 4 и 5 представлены

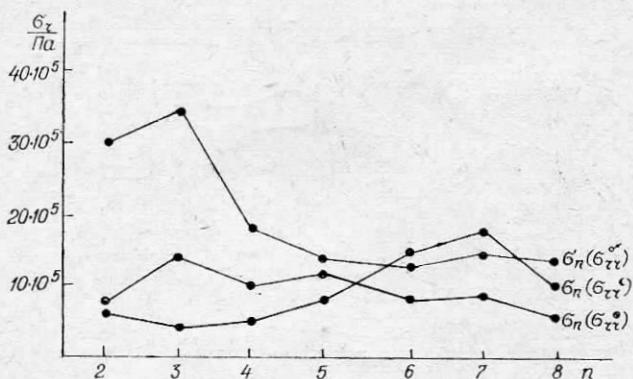


Рис. 3. Спектральные кривые касательных напряжений для Земли $\sigma_n(\sigma_{\tau\tau}^e)$, Марса $\sigma_n(\sigma_{\tau\tau}^m)$ и Луны $\sigma_n(\sigma_{\tau\tau}^l)$.

распределения ондуляций изостатического ареоида и селеноида, вычисленные по формуле

$$\Delta r_l = R \sum_{n=1}^N \sum_{m=0}^n I_{nm} \Lambda_{nm}. \quad (6)$$

Сопоставление значений этих ондуляций с ондуляциями действительного ареоида или селеноида [17, 23] показывает, что между ними в количественном отношении мало сходства. Следовательно, даже столь большие топографические массы и их компенсация не являются причиной наличия крупных (до 1 км) ондуляций действительного ареоида или селеноида*. Поэтому предполагаем, что остаточные ондуляции (разности ондуляций действительного и изостатического ареоида или селеноида) вызваны либо влиянием значительных нерегулярностей топографии планеты, находящихся в напряженном состоянии, либо же существованием аномалий плотности в глубоких слоях недр Марса и Луны.

Первое предположение основывается на допущении о том, что остывание литосферы этих планет наступило еще до изо-

* Амплитуда ондуляций действительного селеноида с учетом сферических гармоник до 4-го порядка достигает по абсолютному значению ~ 400 м.

статистического равновесия. С этих позиций можно качественно объяснить структуру гравитационного поля Луны, считая, что в догеологический период ее эволюции произошел разогрев недр до высоких температур, допускающих их расплавление и дифференциацию по плотности, в процессе которой образовалась первичная лунная кора [8]. Начавшееся затем остывание верхних слоев литосферы привело к общему изостатическому равновесию длинноволновых форм рельефа. Наблюдающиеся планетарные аномалии силы тяжести небольшие и они в основном, очевидно, связаны с плотностными неоднородностями, оказав-

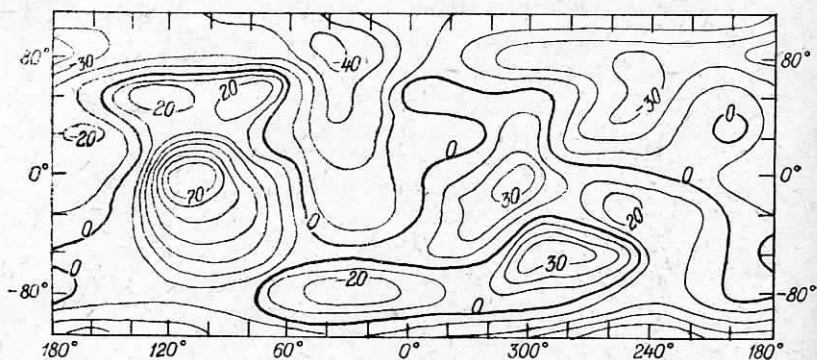


Рис. 4. Ондюляции изостатического ареоида, построенные с учетом сферических гармоник до 8-го порядка. Изолинии проведены через 10 м.

шимися «замороженными» в мощной литосфере (~ 1000 км). Интенсивные локальные аномалии силы тяжести возникли, по-видимому, в магматический период жизни Луны и обусловлены приповерхностными массами — масконами, которые изостатически некомпенсированы.

Для Марса есть основание предполагать, что процесс общей химической и гравитационной дифференциации проходил значительно медленнее, чем на Земле [18]. Однако модельное рассмотрение теплового состояния и эволюции планеты [21, 22] допускает, с учетом предположения о наличии воды, частичное расплавление вещества мантии на глубинах 200...300 км, т. е. на этих глубинах возможно существование астеносферного слоя. Двухсоткилометровая толщина литосферы согласуется также с расчетами, базирующимися на теории упругого колебания деформаций, вызванных поверхностной нагрузкой в районе Тарсис [20].

Таким образом, учитывая, что Земля и Марс имеют в пределах множителя две сходные физические характеристики (радиусы, среднюю плотность и силу тяжести, возможные средние толщины литосферы), вполне вероятно предположить, что марсианская литосфера выдерживает некомпенсированные поверхностные нагрузки, сосредоточенные в области $L \gtrsim 1000$ км,

порядка $1 \cdot 10^6 \dots 2 \cdot 10^6$ Па. В этом случае изостатическая структура коры планеты создает возмущения, которые в терминах ондуляций ареоида достигают амплитуды $\sim 100 \dots 200$ м. Следовательно, остаточные ондуляции ареоида, очевидно, можно объяснить влиянием аномалий плотности в мантии Марса.

Итак, на глобальные особенности гравитационного поля Луны и Марса преобладающее влияние оказывают так же, как для Земли, глубинные плотностные неоднородности. Это подтверждается еще и тем, что полученные методом засечек предельные глубины расположения центров аномальных масс под

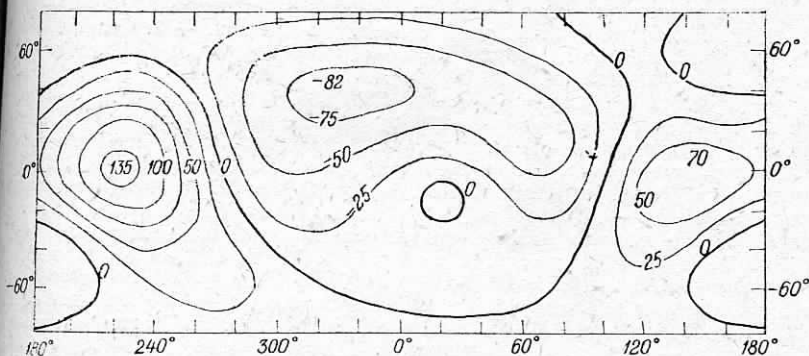


Рис. 5. Ондуляции изостатического селеноида, построенные с учетом сферических гармоник до 4-го порядка. Изолинии проведены через 25 м.

крупнейшими изолированными аномалиями силы тяжести изменяются для Луны в пределах $300 \dots 400$ км, а для Марса — в пределах $550 \dots 700$ км. Для Земли Ю. А. Тараканов и др. [9] оценивают глубины аномальных источников в пределах $700 \dots 900$ км. Качественная согласованность оценок глубин залегания источников крупнейших аномалий силы тяжести (допускается неопределенность с точностью до множителя 2) для различных по своим размерам планет дает основание полагать, что планетарные особенности гравитационного поля Земли, Марса и Луны обусловлены главным образом глубинными аномалиями плотности, возникающими в верхней мантии этих планет. Вместе с тем для Марса и Луны крупномасштабные топографические неоднородности более значительно влияют на аномальное гравитационное поле, нежели для Земли, для которой они полностью скомпенсированы.

Дальнейшее изучение гравиметрической структуры и геологических свойств недр планет позволит на основе совместного анализа перейти к количественной интерпретации особенностей их гравитационных полей и топографии.

Список литературы: 1. Арнольд К. Методы спутниковой геодезии. — М.: Недра, 1973. 2. Артемьев М. Е. Структура гравитационного поля. — В кн.: Гравитационная модель коры и верхней мантии Земли. — Киев: Нау-

- кова думка, 1979. 3. *Артюшков Е. В.* Геодинамика. — М.: Наука, 1979.
4. *Бодри Б.* Влияние вязкости и нагрузок на распределение напряжений в Луне. — *Annales Univ. sci. Budapest*, 1975, 19. 5. *Галкин И. Н.* Сейсмотектоника Луны. — Изв. АН СССР. Геотектоника, 1978, № 4. 6. *Каан М. А. К* вопросу определения аномалий силы тяжести по наблюдениям спутников. — В кн.: Использование искусственных спутников для геодезии. М.: Мир.
7. *Козленко В. Г., Старостенко В. И., Субботин С. И.* Строение коры и верхней мантии по гравиметрическим данным. — В кн.: Тектоносфера Земли. М.: Наука, 1978. 8. *Сагитов М. У.* Лунная гравиметрия. — М.: Наука, 1979.
9. *Тараканов Ю. А., Черевко Т. Н.* Интерпретация крупнейших гравитационных аномалий Земли. — Изв. АН СССР. Физика Земли, 1979, № 4. 10. *Церклевич А. Л.* Об изостазии марсианской коры. — Геодезия, картография и аэрофотосъемка, 1978, вып. 29. 11. *Юри Г. С., Макдональд Г. Дж. Ф.* Возникновение и история Луны. — В кн.: Физика и астрономия Луны. — М.: Мир, 1978. 12. *Anderson D. L. et al.* Seismology on Mars. — *J. Geophys. Res.*, 1977, 82, N 28. 13. *Arkani-Hamed J.* Geophysical implications of the martian gravity field. — *Icarus*, 1975, 26, N 2. 14. *Bills B. G., Ferrari A. J.* A harmonic analysis of lunar topography. — *Icarus*, 1977, 31, N 2. 15. *Bills B. G., Ferrari A. J.* A lunar density model consistent with topographic, gravitational, librational and seismic data. — *J. Geophys. Res.*, 1977, 82, N 8. 16. *Christensen E. J.* Martian topography derived from occultation, radar, spectral and optical measurements. — *J. Geophys. Res.*, 1975, 80, N 20. 17. *Ferrari A. J.* Lunar gravity; garmonic analysis. — *J. Geophys. Res.*, 1977, 20, N 20. 18. *Mutch T. A., Saunders R. S.* The geologie development of Mars: a review. — *Space Sci Rev.*, 1976, 19, N 1. 19. *Phillips R. J., Saundrs R. S.* The isostatic state of martian topography. — *J. Geophys. Res.*, 1975, 80, N 20. 20. *Thurber C. H., Togsöz M. N.* Martian lithospheric thickness from elastic flexure theory. — *Ceophys. Res. Lett.*, 1978, 5, N 11. 21. *Toksöz M. N., Hsui A. T., Johnston D. H.* Thermal evolutions of the terres. — *trial planets. — Moon and planets*, 1978, 18, N 3. 22. *Toksöz M. N., Hsui A. T.* Thermal history and evolution of Mars. — *Icarus*, 1978, 34, N 3. 23. *Sjogren W. L. et. al.* Mars gravity field based on a short-arc technique. — *J. Geophys. Res.*, 1975, 80, N 20.