

Э. М. ЕВСЕЕВА, А. Л. ЦЕРКЛЕВИЧ

ИЗОСТАТИЧЕСКИЙ АРЕОИД И НЕКОТОРЫЕ ВОПРОСЫ ИНТЕРПРЕТАЦИИ АНОМАЛЬНОГО ГРАВИТАЦИОННОГО ПОЛЯ МАРСА

Исследователи планеты Марс (см., напр., [8]) отмечают, что ее гравитационное поле и топография значительно «грубее», чем у Земли. Действительно, большие перепады высот поверхности (около 14 км в экваториальной области планеты) и значительные аномалии силы тяжести (до 150... 250 мгл, приуроченные к огромным по площади регионам) свидетельствуют о сильных нарушениях равновесия марсианской коры.

Некоторые результаты изучения изостатического состояния корового слоя Марса отражены в работе [5], где рассмотрены вопросы вычисления изостатических аномалий силы тяжести и их интерпретация. Анализ полученных данных позволил прийти к заключению о близости коры Марса в целом к изостатическому равновесию. Вместе с тем были обнаружены регионы, где наблюдается отклонение от равновесного состояния.

В настоящей статье мы попытались определить влияние топографических и компенсационных масс на уровенную поверхность Марса (ареоид), а также выяснить вопрос о возможных глубинах расположения аномальных масс, создающих столь интенсивные наблюдаемые вариации ондуляций эквипотенциальной поверхности.

В основу вычислений деформаций уровенной поверхности положена схема компенсации масс по Эри со следующими параметрами: нормальной толщиной коры $T_0=30$ км, средней плотностью коры $\delta_T=3,0$ г/см³, плотностью подстилающего слоя $\delta_{II}=3,5$ г/см³, радиусом региональности $r=167$ км, которые наилучшим образом (в смысле наименьшей зависимости аномалий от высот дневной поверхности) удовлетворяют гипотезе о региональной изостазии марсианской коры [5]. Методика вычислений предусматривала разбиение поверхности Марса на 104 равновеликие 20°-ные трапеции [5]. В данной разграфке выделено три зоны, влияние масс которых учтено на центр каждой 20°-ной площадки: 1) ближайшая зона радиусом 167 км — выделена в центре каждой площадки; 2) близкая зона — оставшаяся часть 20°-ной площадки, разделенная на четыре равные части; 3) дальняя зона — представляет собой совокупность оставшихся 103 20°-ных трапеций.

Смещение уровенной поверхности, вызванное влиянием топографических и компенсационных масс, можно вычислить по известному соотношению

$$N = V/g_{cp}, \quad (1)$$

где V — возмущающий потенциал, развиваемый теми массами (топографическими и компенсационными), влияние которых необходимо учесть; g_{cp} — среднее значение силы тяжести на Марсе, определяемое по формуле $g_{cp} = 4/3\pi/\delta_{cp} R_0$, где $\delta_{cp} = 3,94$ г/см³, $R_0 = 3390$ км.

Используя далее тот же принцип вывода формул, что и при расчете гравитационных эффектов от топографических и компенсационных масс [5], получаем следующие выражения для вычисления смещений уровня ареоида:

1. Смещение уровенной поверхности, вызванное влиянием топографических и компенсационных масс ближайшей зоны [6, 7]

$$N_T^{пл.} = -\frac{3}{4} \frac{\delta_T}{\delta_{cp}} \frac{1}{R_0} \left[h \sqrt{h^2 + r_M^2} - h^2 + r_M^2 \ln \frac{h + \sqrt{h^2 + r_M^2}}{r_M} \right]; \quad (2)$$

$$N_C^{пл.} = \frac{3}{4} \frac{\delta_{II} - \delta_T}{\delta_{cp}} \frac{1}{R_0} \left[(T_0 + t) \sqrt{(T_0 + t)^2 + r_M^2} - T_0 \sqrt{T_0^2 + r_M^2} - \right. \\ \left. - 2T_0 t - t^2 + r_M^2 \ln \frac{(T_0 + t) + \sqrt{(T_0 + t)^2 + r_M^2}}{T_0 + \sqrt{T_0^2 + r_M^2}} \right], \quad (3)$$

где $t = \frac{\delta_T}{\delta_{II} - \delta_T} \cdot h$.

2. Влияние топографических и компенсационных масс близкой зоны на ондуляции ареоида по аналогии с [1]

$$N_{\text{бл. з.}} = N_T^{\text{бл. з.}} + N_C^{\text{бл. з.}} = \sum_{j=1}^4 k_j h_j \left[\frac{1}{(1 + a_j^2 - 2a_j \cos \alpha)^{1/2}} - \frac{1}{(1 + b_j^2 - 2b_j \cos \alpha)^{1/2}} \right], \quad (4)$$

где

$$k_j = - \frac{3}{4} \frac{\delta_T}{\delta_{\text{ср}}} \frac{(R_0 + h_j)^2}{R_0^2} \frac{\Delta\sigma - \pi r_M^2}{4}; \quad \alpha = 7,2^\circ. \quad (5)$$

3. Значение деформации ареоида, обусловленной суммарным влиянием топографических и компенсационных масс 20°-ных площадок на центр одной из них,

$$N_{\text{дал. в.}} = N_T^{\text{дал. з.}} + N_C^{\text{дал. з.}} = \sum_{j=1}^{103} k_j h_j \left[\frac{1}{(1 + a_j^2 - 2a_j \cos \theta_{ij})^{1/2}} - \frac{1}{(1 + b_j^2 - 2b_j \cos \theta_{ij})^{1/2}} \right], \quad (6)$$

где $k_j = - \frac{3}{4} \frac{\delta_T}{\delta_{\text{ср}}} \cdot \Delta\sigma = \text{const.}$

Угол θ_{ij} определяем из известного выражения

$$\cos \theta_{ij} = \sin \varphi_i \sin \varphi_j + \cos \varphi_i \cos \varphi_j \cos (\lambda_j - \lambda_i) \quad (7)$$

через координаты φ_j , λ_j центров отдаленных трапеций и координаты точки, в которой вычисляется деформация ареоида.

Отметим, что поскольку топографические массы «срезаются», т. е. вводится топографическая редукция, уровень ареоида понижается (при положительных высотах), в формулах (2) — (6) топографическую составляющую следует брать со знаком «минус». Компенсационные массы, наоборот, всегда добавляются, и их влияние будет повышать уровень ареоида.

Полное значение деформации ареоида в центрах равновеликих 20°-ных площадок, обусловленное гравитационными эффектами топографических и компенсационных масс всех зон, определяем по формуле

$$N_{(20^\circ \times 20^\circ)} = N_{\text{дал. з.}} + N_{\text{бл. з.}} + N_T^{\text{пл.}} + N_C^{\text{пл.}}. \quad (8)$$

Полученные таким методом значения смещений уровня ареоида по данным о высотах физической поверхности Марса [5] представлены на рисунке. Знак «плюс» в приведенных значениях означает, что поверхность действительного ареоида смещается по направлению к отсчетной поверхности (сфероиду). Если значения полученных смещений вычесть из ондуляций действи-

тельного ареоида, то получим так называемый «компенсационный» ареоид».

Изостатический ареоид — поверхность, которая получается, если смещения отложить от поверхности сфероида. Поскольку значения смещений урвенной поверхности являются функцией высот рельефа, то изостатический ареоид расположен выше отсчетной поверхности при положительных высотах и ниже — при отрицательных значениях высот. Как видно из рисунка, ондуляции изостатического ареоида изменяются примерно от

80°	-27	-244	-24	-85	-31	-99	-26	87	-25	109	-20	-114
60°	-28	-25	-19	-14	-29	-30	-21	-22	-25	-27	-29	-27
	-509	30	305	29	-316	-314	-65	+289	436	376	109	-297
40°	-24	-27	-18	1	3	-16	-24	-23	-15	-10	-12	-11
	668	-343	618	854	427	-164	-544	-400	-141	157	363	408
20°												
	22	-22	22	32	28	14	-4	-15	-13	-5	7	-3
	637	-76	741	1122	741	97	-392	-611	-450	-170	109	299
0°												
	8	4	27	82	68	27	18	5	2	14	26	13
	542	-202	516	1008	672	46	-438	606	-417	-150	112	261
-20°												
	9	20	48	73	65	4	7	3	13	24	-32	-18
	436	-345	109	365	272	-184	-460	-278	108	74	114	172
-40°												
	10	4	12	4	-10	-12	-17	-13	-31	-10	-5	-7
	-188	-103	37	-75	-221	-145	11	100	166	230	94	-82
-60°												
	-24	11	-25	25	-23	10	-21	166	-22	268	-22	151
-80°												
180°												
		120°		60°		0°		300°		240°		180°

Значения ондуляций (в м) изостатического (верхний ряд цифр) и действительного (нижний ряд цифр) ареоидов относительно сфероида ($\alpha=1/192$, $a=3393,4$ км).

—30 м до +80 м. Наличие таких значений ондуляций в общем не противоречит известному положению [4] о том, что изостатический ареоид представляет треть приближение фигуры планеты, если первым считать шар, вторым — нормальный сфероид. Однако ондуляции изостатического ареоида в два-три раза превышают соответствующие ондуляции для Земли [3], что, очевидно, свидетельствует о сравнительно большом вкладе топографического слоя в гравитационное поле планеты. Вместе с тем такие значения ондуляций изостатического ареоида дают основание полагать, что существуют заметные отступления планеты от состояния гидростатического равновесия в глубоких горизонтах планеты.

Сравнение ондуляций изостатического ареоида (верхний ряд цифр на рисунке) с ондуляциями действительного ареоида* (нижний ряд цифр на рисунке) показывает, что между ними в количественном отношении мало сходства. Это указывает на то, что даже столь большие топографические массы и их компенсация не могут вызвать смещений урвенной поверхности,

* Значения этих ондуляций вычислены по модели гравитационного поля Марса [9] в узлах картографической сетки $10^\circ \times 10^\circ$, а затем были осреднены по равновеликим 20° -ным площадкам.

достигающих 1 км и более. Следовательно, должны существовать другие причины таких крупных ондуляций ареоида.

Можно предположить, что остаточные ондуляции, т. е. разности ондуляций действительного и изостатического ареоидов, могут быть вызваны, во-первых, сильными нарушениями равновесия, обусловленными, возможно, значительными нерегулярностями топографии, находящимися в напряженном состоянии; во-вторых, существованием аномалий плотности, т. е. отклонений от состояния гидростатического равновесия в более глубоких слоях Марса.

Как показали расчеты, в первом случае среднее квадратическое отклонение некомпенсированной нагрузки для всей поверхности Марса составляет ~ 150 кг/см². Несмотря на то, что предел прочности марсианской литосферы, по-видимому, находится на уровне 10^3 кг/см² и выше (по аналогии с Землей [2]), все же литосфера не может выдержать без соответствующих перемещений длительную нагрузку, превышающую по порядку 10 кг/см², если она сосредоточена в области с радиусом в несколько сотен километров и более. Кроме того, напряжения, вызванные изостатической неуравновешенностью, быстро релаксируют после сравнительно небольших горизонтальных смещений коры. Следовательно, мы приходим к выводу, что на Марсе не могут существовать сильные нарушения изостатического равновесия, которые являлись бы возможной причиной крупных ондуляций ареоида.

Для проверки второго предложения были выполнены расчеты по оценке глубин залегания тех аномальных масс, которые могли бы стать источниками трех крупнейших аномалий ареоида, представленного в работе [9]. Самая крупная аномалия, приуроченная к области Тарсис, с координатами эпицентра $\varphi = +12^\circ$, $\lambda = 110^\circ$ W характеризуется изолинией $\xi = +1,3$ км. Две другие аномалии имеют эпицентры также вблизи экватора планеты и представляют собой депрессии: первая из них охватывает регион с долинами Сумуд и Тиу ($\varphi = 0^\circ$; $\lambda = 30^\circ$ W), $\xi = -0,6$ км, вторая — равнину Амазония ($\varphi = 20^\circ$, $\lambda = 180^\circ$ W), $\xi = -0,7$ км. В основу вычислений положены идеи, описанные в работе [10]: аномалии ареоида, оконтуренные замкнутыми изолиниями, рассматривались как изолированные явления, создаваемые отдельными телами, представляющими собой точечную или сферическую массу постоянной плотности; силу тяжести трактовали как векторную величину. Расположение точечного источника аномалий ареоида определялось по гравиметрической информации в ряде симметрично расположенных относительно эпицентра точек на одном и том же меридиане. В качестве исходной информации использованы остаточные ондуляции ареоида, вертикальная и тангенциальная составляющие чистых аномалий силы тяжести, рассчитанные по модели гравитационного поля [9]. Результаты вычислений приведены в таблице. Они показывают, что глубины точечных источников

всех трех аномалий ареоида расположены вблизи 1000 км и получены с ошибками $\pm 100 \dots 150$ км. Следует отметить, что примененный способ расчета глубин залегания аномальных масс не дает однозначного результата, учитывающего распределение их по глубине. Однако, согласно работе [10], можно считать, что полученные глубины залегания источников аномалий ареоида являются надежной оценкой снизу. Ввиду того, что недра Марса в настоящее время изучены недостаточно хорошо, о природе аномальных масс, вызывающих крупнейшие аномалии ареоида, пока ничего определенного сказать нельзя.

Результаты вычисления глубин источников крупнейших аномалий ареоида

Аномалия	λ°	φ°	ξ , км	g_R , мгЛ	g_S , мгЛ	H , км	$H_{\text{ср}}$, км
Тарсис	10	+10	+1,15	+440	+ 80	950	810 \pm 150
		+20	+1,05	+405	+ 85	920	
		+30	+0,90	+340	+160	780	
		-10	+1,10	+410	+120	880	
		-20	+0,85	+330	+155	780	
		-30	+0,40	+170	+130	540	
Долины Сумуд и Тиу	30	+10	-0,58	-200	+ 50	1020	1000 \pm 100
		+20	-0,58	-160	+ 99	1200	
		+30	-0,52	-180	+ 80	920	
		-10	-0,58	-200	+ 50	1020	
		-20	-0,58	-200	+ 60	1020	
		-30	-0,44	-150	+ 70	880	
Равнина Амазония	180	40	-0,7	-280	+180	650	860 \pm 150
		30	-0,7	-285	+130	750	
		10	-0,7	-260	+ 60	950	
		0	-0,7	-240	+ 40	1100	

Тем не менее выполненные расчеты приводят к весьма вероятному выводу, что источники этих аномалий расположены в мантии планеты.

Таким образом, принимая во внимание сказанное, есть все основания полагать, что именно глубинные плотностные неоднородности и создают в основном столь «грубое» аномальное гравитационное поле Марса, проявляющееся в значительных вариациях ондуляций действительного ареоида.

Список литературы: 1. *Артемьев М. Е.* Изостазия территории СССР.— М.: Наука, 1975. 2. *Артемьев М. Е., Артюшков Е. В.* Изостазия и тектоника—Геотектоника, 1967, № 5. 3. *Арнольд К.* Методы спутниковой геодезии. — М.: Недра, 1973. 4. *Михайлов А. А.* Курс гравиметрии и теории фигуры Земли. — М.: Редбюро ГУГК при СНК СССР, 1939. 5. *Церклевиц А. Л.* Об изостазии марсианской коры. — Геодезия, картография и аэрофотосъемка, 1979, вып. 29. 6. *Шаталова Э. М.* О смещении уровенной поверхности (геоида) под влиянием топографической редукции. — Геодезия, картография и аэрофотосъемка, 1972, вып. 14. 7. *Шаталова Э. М.* К вопросу о деформации геоида.—Геодезия, картография и аэрофотосъемка, 1972, вып. 15. 8. *Jordan J. E., Lorell J.* Mariner 9: an instrument of dynamical science. Icarus, 1975, v. 25, N 1. 9. *Sjogren W. L., Lorell J., Wong L., Downs W.*

Mars gravity field based on a short-ars technique. — J. Geophys. Res., 1975, v. 80, N 20. 10. *Tarakanov Yu. A., Vinnik L. P., Chyikova N. A.* On the possible thermal nature of the largest undulations of the geoid. — Tectonophysics, 1977, N 41.

Работа поступила в редколлегию 17 января 1979 года. Рекомендована кафедрой теории математической обработки геодезических измерений Львовского политехнического института.
