

тура звукопровода стабилизировалась и не менялась в течение нескольких часов непрерывной работы ячейки. Разрешение при этом ухудшалось по сравнению с предыдущим случаем на  $5 \div 7\%$ . При  $P > 750$  мВт даже кратковременное воздействие высокочастотной мощности на ячейку приводило к ухудшению рабочих параметров дефлектора. Таким образом, в качестве предельного управляющего сигнала может быть принята величина  $P \approx 500$  мВт. Это значение в несколько раз превосходит мощность накачки при сканировании первого дифракционного максимума. При сканировании с использованием двукратного рассеяния управляющий сигнал также не превосходит величины мощности, предельно допустимой для данной ячейки.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

[1] Uchida N., Niizeki N. Proc. IEEE, 1973, 61, N 8, p. 1073. [2] Мустель Е. Р., Парыгин В. Н. Методы модуляции и сканирования света. М.: Наука, 1970. [3] Магдич Л. Н., Молчанов В. Я. Акустооптические устройства и их применение. М.: Сов. радио, 1978. [4] Волошинов В. Б., Парыгин В. Н., Чирков Л. Е. Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон., 1976, 17, № 3, с. 305.

Поступила в редакцию  
27.04.83

ВЕСТН. МОСК. УН-ТА. СЕР. 3. ФИЗИКА. АСТРОНОМИЯ, 1984, т. 25, № 1

УДК 523.31

#### О РАСПРЕДЕЛЕНИИ СИЛЫ ТЯЖЕСТИ И УКЛОНЕНИЙ ОТВЕСА НА ПОВЕРХНОСТИ МАРСА

Т. Г. Максимова, Н. А. Чуйкова  
(ГАИШ)

При планировании исследований планет Солнечной системы очень важно иметь априорные данные о характере и диапазоне изменения параметров гравитационного поля на их поверхностях. Кроме того, нужно выбрать поверхность относимости, к которой наиболее целесообразно приводить все будущие измерения на физических поверхностях планет. Для Земли, поскольку ее центр масс и центр фигуры практически совпадают, а уровенная поверхность в 70 процентах совпадает с физической, такой естественной поверхностью относимости является геоид.

У Марса уже одно смещение центра фигуры относительно центра масс (к юго-востоку примерно на 2,3 км), вызывающее систематическую разницу в силе тяжести в 900 мГал, не позволяет использовать в качестве поверхности относимости ни сферу с центром в центре масс, ни уровенный эллипсоид, ни ареоид. Кроме того, на Марсе нет естественных уровней поверхности отсчета, как это имеет место на Земле.

Если обратиться к разложению по сферическим функциям непосредственно самой физической поверхности, то в нем сложно выделить какую-либо правильную нормальную составляющую. Так, вклад в рельеф, вносимый гармоникой  $c_{20}$  (эллипсоидальный член), примерно того же порядка малости, что и вклад от остальных гармоник. Поэтому нецелесообразно выделять эллипсоид в качестве поверхности относимости.

Наконец, следует обратить внимание на тот факт, что при редуцировании аномалий силы тяжести с физической поверхности на по-

верхность относимости вследствие незнания внутреннего строения планеты используется только нормальное значение вертикальной составляющей градиента силы тяжести. Пренебрежение аномальной частью градиента приводит к искажению редуцированных значений аномалий силы тяжести. В силу этого соображения, справедливого для всех планет, в том числе и для Земли, желательно в качестве поверхности относимости брать поверхность, как можно более близкую к физической (в идеале — физическую).

На основании всего изложенного выше мы предлагаем использовать в качестве поверхности относимости сглаженную физическую поверхность Марса, представленную разложением по нормированным сферическим функциям до 16-й степени [1].

Моделью гравитационного поля может служить нормализованное разложение потенциала притяжения Марса до 12-й степени, полученное из обработки доплеровских измерений с 10 пунктов сети слежения за дальним космосом во время полетов станций «Маринер-9», «Викинг-1» и «Викинг-2» [2]. При предположении, что плотность поверхностных масс Марса является аналитической функцией координат, данное разложение потенциала и его производных сходится всюду на сглаженной физической поверхности [3].

Потенциал силы тяжести в некоторой точке на поверхности Марса складывается из потенциала притяжения  $V$  и центробежного потенциала  $\Omega$ :

$$W(r, \varphi, \lambda) = \frac{GM}{r} \left[ 1 + \sum_{n=2}^{12} \sum_{m=0}^n \left( \frac{R}{r} \right)^n V_{nm}(\varphi, \lambda) \right] + q \frac{GM r^2 \cos^2 \varphi}{2R_0^3}, \quad (1)$$

где

$$V_{nm}(\varphi, \lambda) = (\bar{C}_{nm} \cos m\lambda + \bar{S}_{nm} \sin m\lambda) \bar{P}_{nm}(\sin \varphi),$$

$$|r| = r(\varphi, \lambda) = R_0 \left[ 1 + \sum_{k=1}^{16} \sum_{l=0}^k (\bar{a}_{kl} \cos l\lambda + \bar{b}_{kl} \sin l\lambda) \bar{P}_{kl}(\sin \varphi) \right], \quad (2)$$

$GM = 42\,828,44 \text{ км}^3/\text{с}^2$  — агеоцентрическая гравитационная постоянная;  $R = 3394 \text{ км}$  — радиус относимости принятой модели потенциала;  $R_0 = 3389,92 \text{ км}$  — средний радиус Марса;  $\bar{P}_{nm}(\sin \varphi)$  — нормированные по Каула полиномы Лежандра:

$$\bar{P}_{nm}(\sin \varphi) = \sqrt{\frac{\varepsilon_m (2n+1)(n-m)!}{(n+m)!}} P_{nm}(\sin \varphi)$$

при  $\varepsilon_{m=0} = 1$ ,  $\varepsilon_{m>0} = 2$ ;  
 $q = \omega^2 R_0^3 / (GM) = 0,457 \cdot 10^{-2}$  — отношение центробежного ускорения на экваторе к гравитационному ускорению;  $\omega = 2\pi / 88\,642,655 \text{ 1/с}$  — средняя угловая скорость вращения Марса.

Дифференцируя  $W$  по радиус-вектору  $r$  и по горизонтальным осям  $r d\varphi$  и  $r \cos \varphi d\lambda$ , найдем компоненты силы тяжести:

$$W_r = -\frac{\partial W}{\partial r} = \frac{GM}{r^2} \left[ 1 + \sum_{n=2}^{12} \sum_{m=0}^n (n+1) \left( \frac{R}{r} \right)^n V_{nm}(\varphi, \lambda) \right] - q \frac{GM r \cos^2 \varphi}{R_0^3};$$

$$W_\varphi = \frac{\partial W}{r \partial \varphi} = \frac{GM}{r^2} \sum_{n=2}^{12} \sum_{m=0}^n \left( \frac{R}{r} \right)^n \frac{dV_{nm}(\varphi, \lambda)}{d\varphi} - q \frac{GM r \sin 2\varphi}{2R_0^3}.$$

где

$$\frac{dV_{nm}(\varphi, \lambda)}{d\varphi} = (\bar{C}_{nm} \cos m\lambda + \bar{S}_{nm} m\lambda) \times$$

$$\times \left[ \sqrt{\frac{\varepsilon_m}{\varepsilon_{m+1}} (n-m)(n+m+1) \bar{P}_{n,m+1}(\sin \varphi) - m \operatorname{tg} \varphi \bar{P}_{nm}(\sin \varphi)} \right];$$

$$W_\lambda = \frac{\partial W}{r \cos \varphi d\lambda} = \frac{GM}{r^2 \cos \varphi} \sum_{n=2}^{12} \sum_{m=0}^n \left( \frac{R}{r} \right)^n \frac{dV_{nm}(\varphi, \lambda)}{d\lambda},$$

где

$$\frac{dV_{nm}(\varphi, \lambda)}{d\lambda} = m (\bar{S}_{nm} \cos m\lambda - \bar{C}_{nm} \sin m\lambda) \bar{P}_{nm}(\sin \varphi).$$

Сила тяжести есть производная потенциала по нормали к уровенной поверхности. С точностью до квадратичных членов получим

$$W_n = \sqrt{W_r^2 + W_\varphi^2 + W_\lambda^2} \approx W_r + \frac{W_\varphi^2 + W_\lambda^2}{2W_r}.$$

На рис. 1—3 представлены карты вариаций (отклонений) силы тяжести относительно  $g_0 = GM/R_0^2 = 372,69$  Гал и уклонений отвеса  $W_s = 206\,265' \sqrt{W_\varphi^2 + W_\lambda^2} / W_n$  на сглаженной физической поверхности Марса, представленной разложением (2).

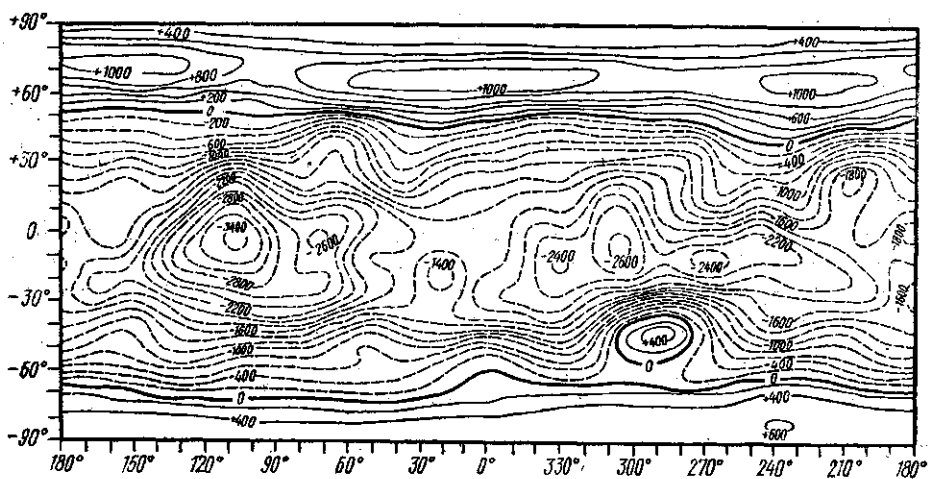


Рис. 1. Карта вариаций силы тяжести на физической поверхности Марса относительно  $g_0 = 372,69$  Гал. Изолинии проведены через 200 мГал

Карта высот физической поверхности Марса подтверждает асимметричное строение его поверхности. Оно выражается в том, что в северном полушарии слабо кратерированные равнины, имеющие отрицательные отметки высот, занимают большую площадь, чем в южном, где преобладают возвышенности. Эта асимметрия прослеживается и по плотности распределения кратеров на поверхности, и по перепадам высот: как видно из рис. 3, в северном полушарии нулевая изогипса имеет среднюю широту  $+25^\circ$ , в то время как в южном —  $-40^\circ$ .

И на гипсометрической, и на карте вариаций силы тяжести выделяются два обширных возвышенных участка поверхности с материковой корой, Фарсида и Япигия, окруженные с севера и юга обширными областями океанических прогибов.

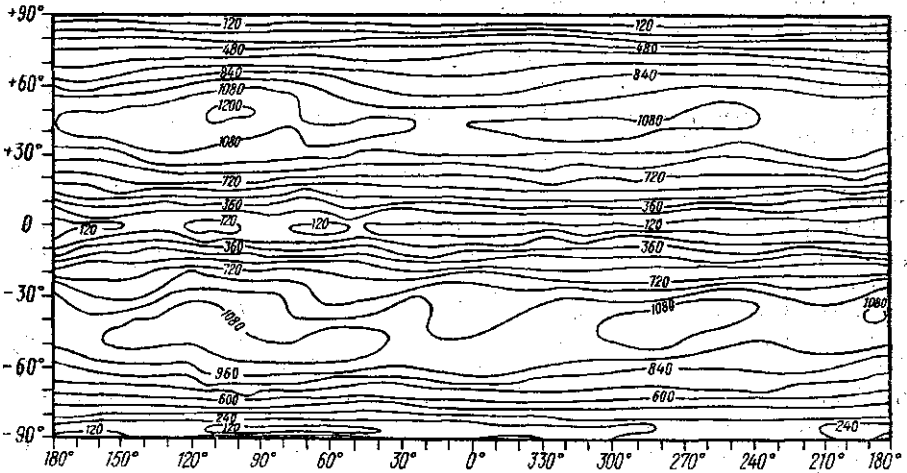


Рис. 2. Распределение уклонов отвесной линии на физической поверхности Марса. Изолинии проведены через 120"

Фарсида представляет собой гигантское купольно-вулканическое поднятие, занимающее около четверти поверхности Марса. Оно четко выражено в рельефе изометричной формой изогипс и в своей центральной части, где преобладают главным образом вулканические струк-

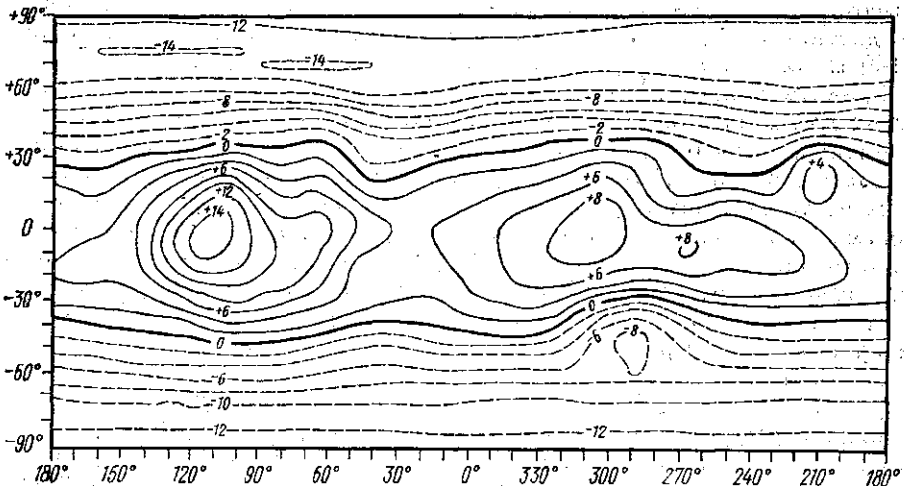


Рис. 3. Карта высот физической поверхности Марса относительно сферы  $R_0 = 3389,92$  км с центром в центре масс. Изогипсы проведены через 2 км

туры, достигает наибольшей для всей поверхности планеты высоты +15,3 км. К периферии отметки высот в целом понижаются, хотя юго-восточная часть возвышенности, включающая в себя горстовую систему Кларитас—Тавмасия, оказывается приподнятой в среднем на 6—8 км, что придает поднятию субмеридиональную вытянутость.

Морфологическим структурам Фарсиды соответствуют наиболее интенсивные вариации силы тяжести, величины которых к юго-востоку от горы Павлина достигают абсолютного для Марса минимума — 3460 мГал.

Япигия — это второй обширный возвышенный участок поверхности Марса. Его центральная часть поднята до 8—9 км, а тектоно-вулканическое поднятие Элизий возвышается на 4 км над окружающими его океаническими равнинами.

С рельефом региона хорошо коррелируют вариации силы тяжести. По своей интенсивности они несколько меньше, чем на Фарсиде. Средняя их величина — 1500 — 1700 мГал. Наименьшее значение отклонения (—2630 мГал) наблюдается в районе кратера Шрегер.

Из крупнейших ударных бассейнов в гравитационном поле значительными положительными отклонениями (+400 — +500 мГал) выделяется депрессия Эллада. Контуры изолиний силы тяжести хорошо согласуются с изогипсами поверхности.

В отличие от Эллады Аргир характеризуется отрицательными (—500 — —700 мГал) отклонениями и в гравитационном поле выражен слабо. Первое объясняется более возвышенным характером поверхности, второе — меньшими размерами талласонда.

К северу от 50° с. ш. расположена область океанических прогибов. Гравитационное поле отражает спокойный характер поверхности со средними высотами — 10 км. Изолинии силы тяжести имеют субширотное простираие, интенсивность ее вариаций постепенно увеличивается от +400 мГал у полюса до +1000 — +1100 мГал в отдельных районах Великой Северной равнины.

Оси трех четко выраженных максимумов практически совпадают с северной границей Великой Северной равнины. Этой границе соответствуют экстремальные значения как вариаций силы тяжести, так и высот рельефа. Именно здесь, к югу от каньона Северный, отклонения достигают наибольшей для всей поверхности Марса величины +1160 мГал, а высоты рельефа наименьшие — —14,1 км.

Гравитационное поле западной части провинции Южное море характеризуется знакопеременностью. Величины отклонения силы тяжести уменьшаются от +400 мГал у полюса до —300 — —400 мГал на границе с Землей Аонид. Высоты же возрастают от —12 до —6 км.

В восточной части региона отклонения положительные, но их интенсивность меньше, чем в северной депрессии. Наибольшая величина вариаций силы тяжести на Южном плато составляет +600 мГал на стыке Императорской ступени и ступени Прометея. На карте рельефа этот максимум никак не выражен: высоты, ему соответствующие, характерны для всего района Южное море — —12 км.

В целом можно отметить, что на карте вариаций силы тяжести, которая в сильной степени отражает топографические особенности поверхности, хорошо прослеживается нерегулярность характера поля: обширные приполярные области океанических прогибов, отмеченные положительными отклонениями силы тяжести, разорваны значительно более обширным поясом отрицательных отклонений, выявляющим более сложное строение поля экваториальной и умеренных областей, что обусловлено наличием в этом регионе гор и возвышенностей, разделенных неглубокими депрессиями; очертания аномальных зон самые разные, хотя в целом сохраняется генеральное направление поля — субширотное.

Диапазон изменений вариаций силы тяжести и высот для всей поверхности Марса составляет 4620 мГал и 29,4 км соответственно.

Субширотное простираание изолиний сохраняется и на карте уклонений отвеса.

Как в северном, так и в южном полушарии величины уклонений отвесной линии постепенно увеличиваются от приполярных областей, где они достигают  $120''$ , к областям умеренных поясов, возрастая до  $1080—1200''$ , причем обе максимальные зоны расположены почти строго симметрично относительно экватора и заключены между 40-й и 50-й параллелями.

По мере приближения к экватору величины уклонений отвесной линии уменьшаются и достигают на экваторе минимальных величин, аналогичных тем, что наблюдаются в полярных районах, —  $120''$ .

Наибольшая величина уклонения отвесной линии для Марса составляет  $1220''$  в северной части Фарсиды, в районе борозд Альбы, минимальная —  $1''$  в непосредственной близости от северного полюса.

В заключение следует отметить, что данные карты нецелесообразно использовать для интерпретации, поскольку исходная информация позволяет построить карты на более удобной для этой цели поверхности, например на целиком охватывающей планету сфере с центром в центре фигуры планеты. Однако сравнение таблиц коэффициентов поля ( $C_{nm}$ ,  $S_{nm}$ ) и рельефа ( $\bar{a}_{kl}$ ,  $\bar{b}_{kl}$ ) позволяет сделать некоторые предварительные выводы о внутреннем строении Марса:

1) величины коэффициентов  $\bar{a}_{10} = -0,376 \cdot 10^{-3}$ ,  $\bar{b}_{10} = -0,1998 \cdot 10^{-3}$ , свидетельствующие о сдвиге центра фигуры относительно центра масс ( $\Delta z = \sqrt{3} R_0 \bar{a}_{10} \approx 2$  км — к югу,  $\Delta y = \sqrt{3} R_0 \bar{b}_{10} \approx 1$  км — к востоку), говорят либо о смещении центрального ядра Марса (к юго-востоку), либо о большей мощности марсианской коры в северо-западной части;

2) отличие  $\bar{a}_{20} = -1,8239 \cdot 10^{-3}$  от гармоника силы тяжести  $\bar{C} = -1,557 \cdot 10^{-3}$ , свидетельствующее о соответствующих отличиях в сжатиях уровня и физического эллипсоидов, говорит либо о том, что некогда Марс вращался быстрее и именно тогда произошло затвердение его коры, либо о вытянутости внутреннего ядра планеты;

3) в целом большие по абсолютной величине значения коэффициентов разложения рельефа, чем поля, что находит отражение в больших перепадах высот рельефа по сравнению с высотами ареоида (примерно в 10 раз), свидетельствуют о сильной компенсации рельефа, причем с малой глубиной компенсации.

Однако следует напомнить, что реальные наблюдения непосредственно на физических поверхностях планет нельзя приводить к сфере или к эллипсоиду даже для целей интерпретации, поскольку, как мы уже говорили раньше, поле из-за такого приведения искажается.

Представленные карты можно считать вторым приближением к реальным (первое приближение — сфера и поле на сфере). Сравнивая взятые с карт значения с будущими измерениями силы тяжести и уклонений отвеса на поверхности Марса, можно уточнить те характеристики, которые легли в основу их построения (высоты рельефа и гармонические коэффициенты).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Bills B. G., Ferrari A. J. J. Geophys. Res., 1978, 83, N B7, p. 3497.
- [2] Christensen E. J., Balmino G. J. Geophys. Res., 1979, 84, N B14, p. 7943.
- [3] Чуйкова Н. А. Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон., 1983, 24, № 6, с. 75.

Поступила в редакцию  
17.05.83