

Ю. П. ДЕЙНЕКА, А. Л. ЦЕРКЛЕВИЧ

О НЕКОТОРЫХ РЕЗУЛЬТАТАХ ПОСТРОЕНИЯ ПЛОТНОСТНЫХ МОДЕЛЕЙ ВЕНЕРЫ

На основании моделирования и выявления различия состава Венеры и Земли [1] рассчитан ряд трехслойных моделей внутреннего строения Венеры, из которых выделены две вероятные модели с ядром из расплавленного железа и корой мощностью 70 км и средней плотностью 2,8 г/см³: модель А и модель Б. Для них найдено распределение вдоль радиуса основных параметров: плотность δ , давление P и сила тяжести g .

Отличие этих двух моделей проявляется в разных значениях безразмерного момента инерции I/MR^2 . Для модели А он равен 0,326, а для модели Б — 0,319. В обеих моделях выделены кора, мантия (верхняя и нижняя) и ядро. Глубины границ раздела этих слоев, кроме границы кора—мантия, различны. Так, в модели А граница нижней мантии проходит на глубине 823 км, а в модели Б — на глубине 901 км. Граница ядра этих моделей определена глубинами 2813 и 2656 км. Кроме того, в верхней мантии на глубинах 544 (модель А) и 617 км (модель Б) наблюдаются скачки плотности h соответственно 0,25 и 0,33 г/см³. Значения скачков плотности на основных границах раздела для моделей А и Б следующие: на границе кора—мантия 0,37 и 0,24 г/см³, на границе верхняя мантия—нижняя мантия 0,24 и 0,33 г/см³ и на границе мантия—ядро 5,06 и 5,14 г/см³. Плотность в центре Венеры по моделям А и Б равна 12,44 и 12,42 г/см³.

Относительно состава вещества недр Венеры полученные модели отличаются тем, что в мантии модели А железа приблизительно вдвое меньше, чем в мантии Земли, а в модели Б все железо содержится в ядре; суммарное содержание железа в обеих моделях больше, чем в Земле. Предпочтение отдается модели А.

При построении моделей Венеры использованы уравнения гидростатического равновесия, состояния вещества и условие сохранения массы.

Представляет определенный интерес построение таких моделей Венеры, которые удовлетворяли бы и данным о ее гравитационном

поле, тем более, что необходимая для этого информация уже имеется. Методика построения моделей [2, 3] предполагает знание, кроме массы и радиуса, еще и среднего момента инерции планеты, а также ее стоксовых постоянных. Последняя информация используется в качестве основной. Кроме того, для построения трехслойных моделей, состоящих из коры, мантии и ядра, необходимо задать значения глубин раздела слоев и скачки плотности.

При расчете моделей Венеры по методике [2, 3] использованы уточненные значения ее массы $M = 1,869 \cdot 10^{27}$ г и радиуса $R = 6052,3$ км [7]; им соответствует средняя плотность Венеры $\delta_{\text{ср}} = 5,249$ г/см³. Стоксовы постоянные до 4-го порядка взяты по модели гравитационного поля Венеры [7]. Значения глубин разделов и скачки плотности на них принимались для двух вариантов моделей такими же, как и в моделях А и Б.

Момент инерции для Венеры не поддается расчету в приближении гидростатической теории вследствие того, что параметр $g = \omega^2 R^3 / fM$ в сотни (450) раз меньше зональной гармоник J_2 , что говорит о значительном отклонении планеты от равновесия. В связи с этим значение момента инерции подбиралось таким образом, чтобы плотность коры в рассчитываемой модели была примерно равной 2,8 г/см³, считаемой сейчас наиболее вероятной.

Согласно [2, 3], построение плотностных трехмерных моделей осуществляем путем вычисления плотности в любой точке внутри планеты:

$$\delta_n(\rho, \varphi, \lambda) = \sum_{k=0}^n a_k \rho^k + \sum_{i=0}^k h_i \left(\sum_{k=0}^n b_k \right) \rho^k - \sum_{i=1}^k \Theta_i h_i, \quad (1)$$

где a_k, b_k — известные функции моментов плотности $I_{pqr}(\delta)$ [2], глубин скачков и угловых координат φ и λ ; Θ_i — стандартная разрывная функция [2]; n — степень полинома, определяемая порядком учитываемых стоксовых постоянных.

Усреднение (1) по сфере позволяет получить одномерное распределение плотности $\delta_n(\rho)$, зависящее только от безразмерного радиуса ρ . В случае использования стоксовых постоянных до 4-го порядка включительно одномерный вариант формулы (1) в рабочем виде запишем как

$$\delta_4(\rho) = A + B\rho^2 + C\rho^4 - \sum_{i=1}^3 \Theta_i h_i, \quad (2)$$

где A, B, C — коэффициенты, вычисляемые по моментам плотности.

По распределению плотности δ внутри планеты можно вычислить распределение с глубиной силы тяжести g и давления P по формулам

$$g(\rho) = 4\pi f R \rho \left\{ \frac{A}{3} - \frac{1}{3} \sum_{i=1}^3 \Theta_i h_i \left[1 - \left(\frac{\rho_i}{\rho} \right)^3 \right] + \frac{B}{5} \rho^2 + \frac{C}{7} \rho^4 \right\}; \quad (3)$$

$$\begin{aligned}
P(\rho) = & 4\pi f R^2 \left\{ \frac{A^2}{6} (1 - \rho^2) + \frac{2AB}{15} (1 - \rho^4) + \left(\frac{5AC}{63} + \frac{B^2}{30} \right) (1 - \rho^6) + \right. \\
& + \frac{3BC}{70} (1 - \rho^8) + \frac{C^2}{70} (1 - \rho^{10}) - \sum_{i=1}^3 \frac{\Theta_i h_i}{3} \left[A(1 - \bar{\rho}_i^2) + \frac{2B}{5} (1 - \bar{\rho}_i^4) + \right. \\
& + \frac{5C}{21} (1 - \bar{\rho}_i^6) + A \rho_i^3 \left(1 - \frac{1}{\bar{\rho}_i} \right) - B \bar{\rho}_i^3 (1 - \bar{\rho}_i) - \frac{C \rho_i^3}{3} (1 - \bar{\rho}_i^3) \left. \right] + \\
& + \frac{1}{3} \sum_{i=1}^3 \Theta_i h_i \left[\left(\frac{1 - \bar{\rho}_i^2}{2} \right) + \rho_i^3 \left(1 - \frac{1}{\bar{\rho}_i} \right) \right] + \frac{1}{3} \sum_{i=1}^3 \Theta_i h_i \sum_{j=i+1}^3 \Theta_j h_j \times \\
& \times \left[(1 - \bar{\rho}_i^3) + (\rho_i^3 - \bar{\rho}_i^3) \left(1 - \frac{1}{\bar{\rho}_i} \right) \right] \left. \right\}, \quad (4)
\end{aligned}$$

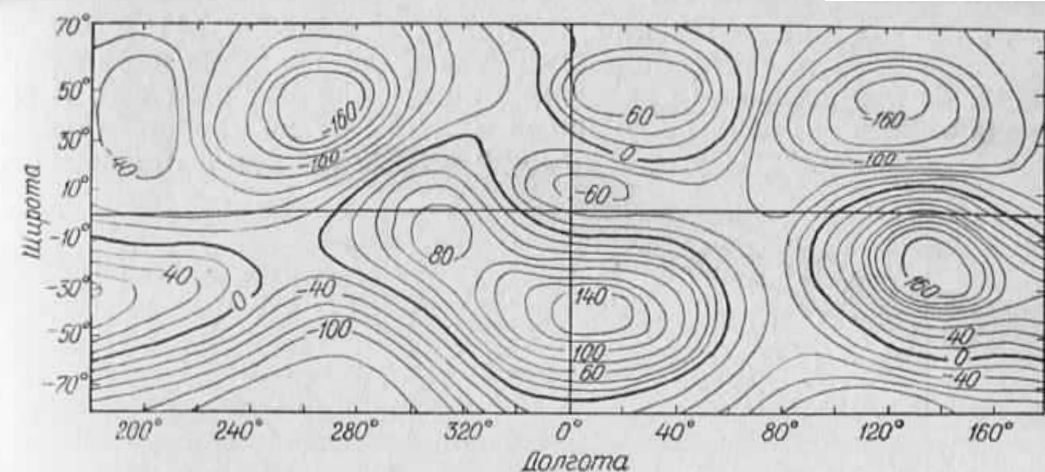
где $\bar{\rho}_i = \rho$, если $\rho > \rho_i$ и $\bar{\rho}_i = \rho_i$, если $\rho < \rho_i$.

В табл. 1 приведены вычисленные по (2), (3) и (4) распределения с глубиной δ , P , g для моделей М1 и М2 Венеры. Сопоставим представленные в табл. 1 значения δ с аналогичными для моделей А и Б.

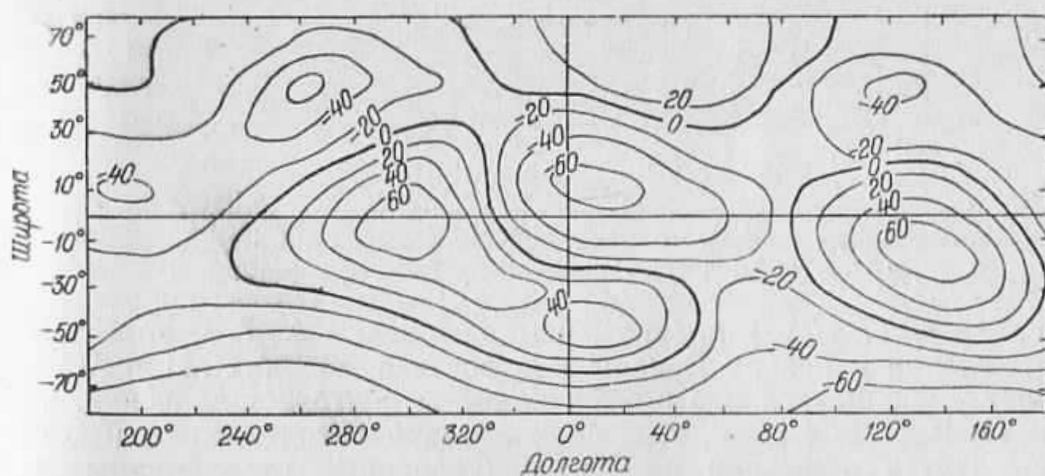
Таблица 1

Распределение δ , ρ , g в Венере

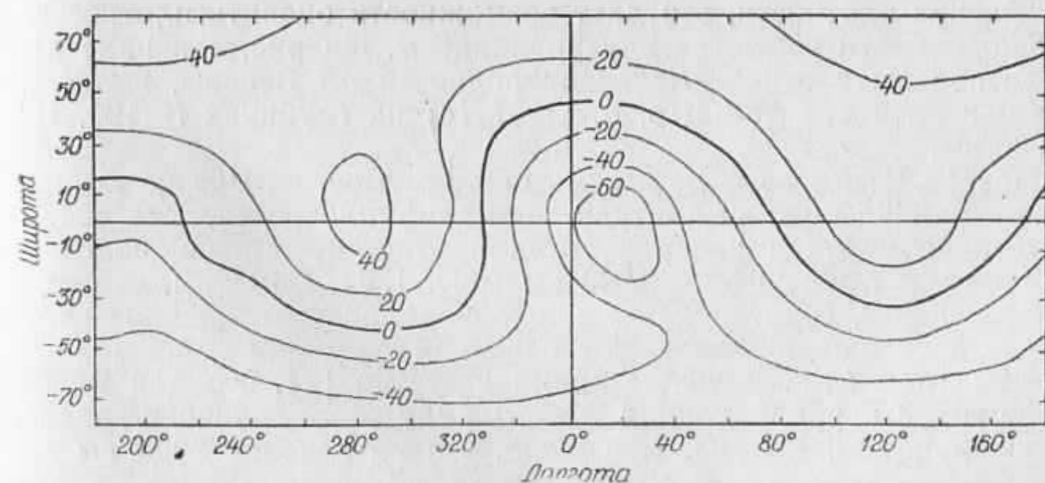
I , км	δ , г/см ³	P , кбар	g , см/с ²	I , км	δ , г/см ³	P , кбар	g , см/с ²
Модель М1 ($I/MR^2=0,330$)				Модель М2 ($I/MR^2=0,325$)			
Кора				Кора			
0	2,77	0	888	0	2,77	0	888
70	2,83	17,4	892	70	2,83	17,4	892
Верхняя мантия				Верхняя мантия			
70	3,20	17,4	892	70	3,07	17,4	892
309	3,39	88,0	899	309	3,24	85,0	902
544	3,57	161,9	906	617	3,45	178,6	916
544	3,82	161,9	906	617	3,78	178,6	916
605	3,86	183,1	906	800	3,90	243,1	920
823	4,03	261,2	908	901	3,96	279,6	922
Нижняя мантия				Нижняя мантия			
823	4,27	261,2	908	901	4,29	279,6	922
1210	4,53	456	904	1210	4,48	404,5	923
1815	4,91	674,2	906	1600	4,70	570,1	928
1420	5,23	955,5	932	1815	4,81	665,4	935
2813	5,42	1154,5	974	2420	5,10	951,1	976
				2656	5,20	1071,7	1008
Ядро				Ядро			
2813	10,48	1154,5	974	2656	10,34	1071,7	1008
3025	10,57	1365,2	915	3025	10,49	1433,5	906
3630	10,79	1900,4	740	3630	10,69	1964,5	732
4235	10,97	2329,3	561	4235	10,84	2383,9	554
4840	11,09	2642,3	376	4840	10,96	2609,4	372
5445	11,17	2832,9	189	5451	11,02	2876,3	185
6050	11,19	2896,9	0	6050	11,04	2937,4	0



а



б



в

Рис. 1. Плотностные неоднородности Венеры ($2 \cdot 10^{-4}$ г/см³) на глубине 100 км (а), 1000 км (б), 3000 км (в).

Общий ход распределения плотности в моделях М1 и М2 по сравнению с исходными моделями А и Б до границы ядра практически не изменился — отклонения не превышают $0,2 \text{ г/см}^3$. В самом же ядре для обеих полученных моделей четко прослеживается такая закономерность: у кровли ядро в моделях М1 и М2 немного

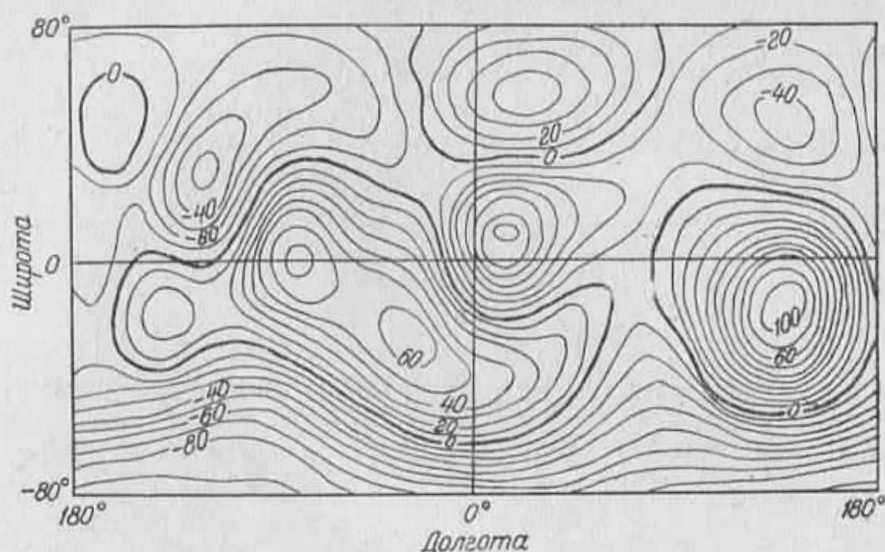


Рис. 2. Распределение высот уровенной поверхности Венеры, вычисленных по модели гравитационного поля относительно сферы ($r=6052,3 \text{ км}$). Изолинии проведены через 10 м.

(на $0,18\text{--}0,17 \text{ г/см}^3$) плотнее, чем в моделях А и Б, но затем в направлении к центру Венеры плотность в моделях М1 и М2 начинает уменьшаться и в центре планеты достигает значений, равных $11,19$ и $11,04 \text{ г/см}^3$, т. е. сравнительно с моделями А и Б она уменьшается примерно на 1%. Вычисленные безразмерные моменты инерции для модели М1 и М2 равны $0,330$ и $0,325$.

Поскольку методика [2, 3] позволяет находить трехмерное распределение плотности, это дает возможность оценить плотностные неоднородности вещества внутри планеты. На рис. 1 в виде карт представлены плотностные неоднородности $\Delta\delta$ Венеры, вычисленные как разности $\Delta\delta = \delta_4(\rho, \vartheta, \lambda) - \delta_4(\rho)$ на глубинах $l=100, 1000$ и 3000 км .

На рис. 1, а выделяем восемь экстремумов, четыре из которых имеют наибольшую амплитуду аномалий плотности. Эта же качественная картина распределения плотностных неоднородностей сохраняется и на глубине 1000 км (рис. 1, б). Отметим, что такое распределение горизонтальных неоднородностей хорошо коррелирует с особенностями высот основной уровенной поверхности Венеры (рис. 2) *. В то же время известно [7], что для Венеры имеет место корреляционная связь между топографией и гравитационным полем. Из рис. 1, в видно, что на глубине 3000 км ано-

* Карта высот уровенной поверхности построена на основании гармонических коэффициентов модели гравитационного поля Венеры [7] до 6-го порядка включительно.

мальные плотности значительно сглажены и выделяются только два экстремума, расположенные на экваторе и отстоящие друг от друга по долготе на 90° .

Таким образом, можно предположить, что в приповерхностном слое Венеры (глубиной до 1000 км) горизонтальные неоднородности проявляют себя в планетарных особенностях ее топографии, если физическую природу аномалий плотности связывать с механизмом конвективных течений мантийного вещества Венеры [4]. Однако на глубине 3000 км распределение плотностных неоднородностей не проявляет себя в глобальных особенностях фигуры Венеры, поскольку положение наибольшей полуоси, вычисленное из соотношения $\text{tg } 2\lambda = S_{22}'/C_{22}'$, равное $129,6^\circ$, не совпадает с положительным экстремумом аномальной плотности (см. рис. 1, в). Наличие же одного максимума и одного минимума на рис. 1, в можно интерпретировать как результат действия конвекции, состоящей из одной ячейки. Последнее говорит о том, что Венера в настоящее время находится на более ранней стадии эволюции, чем Земля [4].

Выполним сравнительный анализ оценок плотностных неоднородностей Венеры с аналогичными характеристиками для Земли, Марса и Луны. В табл. 2 приведены максимальные значения отрицательных и положительных плотностных неоднородностей на глубинах 100 и 1000 км для Венеры, а также вычисленные ранее аномалии плотности для Земли [4], Марса [6] и Луны [5].

Из табл. 2 видно, что горизонтальные неоднородности Венеры имеют примерно такие же значения, как и для Земли. Плотностные неоднородности Марса и Луны на порядок больше.

Список литературы: 1. Козловская С. В. Внутреннее строение Венеры и содержание железа в планетах земной группы. — *Астрономический вестник*, 1982, т. 16, № 1. 2. Мещеряков Г. А. Использование стоксовых постоянных Земли для уточнения ее механических моделей. — *Геодезия, картография и аэрофотосъемка*, 1975, вып. 21. 3. Мещеряков Г. А., Дейнека Ю. П. Об эллипсоидальном распределении плотности земных недр. — *Геофиз. сб.*, 1978, вып. 86. 4. Мещеряков Г. А., Дейнека Ю. П., Церклевич А. Л. О глобальных плотностных неоднородностях Земли по данным о гравитационном поле. — В кн.: *Изучение Земли как планеты методами астрономии, геофизики и геодезии*. К., 1982. 5. Мещеряков Г. А., Церклевич А. Л., Дейнека Ю. П., Зазуляк П. М. Некоторые вопросы интерпретации гравитационного поля Земли в аспекте сравнительной планетологии. — В кн.: *Теория и методика интерпретации гравитационных полей*. К., 1981. 6. Церклевич А. Л., Дейнека Ю. П., Мещеряков Г. А. Гравитационное поле и распределение плотности внутри Марса. — *Геофиз. журн.*, 1983, т. 5, № 3. 7. Ananda M. P. et al. A low-order global gravity field of Venus and dynamical implications. — *J. Geophys. Res.*, 1980, 85, № A13.

Статья поступила в редколлегию 31.12.83

Таблица 2
Значения плотностных неоднородностей $\Delta\delta$ для Венеры, Земли, Марса и Луны

Планета	Значения плотностных неоднородностей $\Delta\delta$, г/см ³	
	$l=100$ км	$l=1000$ км
Венера	—0,0016—0,0016	—0,0008—0,0008
Земля	—0,0012—0,0024	—0,0004—0,0012
Марс	—0,0125—0,0175	—0,0125—0,0025
Луна	—0,0100—0,0100	—0,0060—0,0030