

Список литературы: 1. Инструкции по нивелированию I, II, III, IV классов. — М.: Недра, 1974. 2. Павлова П. В., Савик З. Р. О некоторых особенностях влияния разностей высот нулей основных и дополнительных шкал инварных реек на результаты нивелирования в горных условиях. — Инженерная геодезия, 1979, вып. 22. 3. Павлова П. В. Проблемы высокогорного нивелирования. — Львов: Вища шк., 1980. 4. Павлова П. В., Пивевский П. И. Исследование точности работы короткой визирной лучом. — Геодезия, картография и аэрофотоосъемка, 1983, вып. 37.

Статья поступила в редколлегию 10. 01. 84

УДК 523.42:550.423

Ю. П. ДЕНИНКА, А. Д. 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 $\delta_{ср} = 5,249$ 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 $g = \omega^2 R^2 / M$ 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:

$$\delta_n(\rho, \nu, \lambda) = \sum_{k=0}^n a_k \rho^k + \sum_{l=0}^k h_l \left(\sum_{k=0}^n b_k \right) \rho^k - \sum_{l=1}^k \theta_l h_l, \quad (1)$$

где a_k, b_k — известные функции моментов плотности $I_{pq}(\delta)$ [2], глубин скачков ν и угловых координат ν и λ ; θ_l — 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

$$\delta_4(\rho) = A + B\rho^2 + C\rho^4 - \sum_{l=1}^3 \theta_l h_l, \quad (2)$$

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

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

$$\begin{aligned}
 P(r) = & 4\pi f R^2 \left\{ \frac{A^2}{6} (1-r^2) + \frac{2AB}{15} (1-r^4) + \left(\frac{5AC}{63} + \frac{B^2}{30} \right) (1-r^6) + \right. \\
 & + \frac{3BC}{70} (1-r^8) + \frac{C^2}{70} (1-r^{10}) - \sum_{l=1}^3 \frac{\Theta_l h_l}{3} \left[A(1-r^{2l}) + \frac{2B}{5} (1-r^l) + \right. \\
 & + \frac{5C}{21} (1-r^l) + A r_l^2 \left(1 - \frac{1}{r_l} \right) - B r_l^3 (1-r_l) - \frac{C r_l^4}{3} (1-r_l^2) \left. \right] + \\
 & + \frac{1}{3} \sum_{l=1}^3 \Theta_l h_l \left[\left(\frac{1-r_l^2}{2} \right) + r_l^2 \left(1 - \frac{1}{r_l} \right) \right] + \frac{1}{3} \sum_{l=1}^3 \Theta_l h_l \sum_{j=l+1}^3 \Theta_j h_j \times \\
 & \times \left[(1-r_l^2) + (r_l^2 - r_j^2) \left(1 - \frac{1}{r_l} \right) \right], \quad (4)
 \end{aligned}$$

где $r_l = r$, если $r > r_l$ и $r_l = r_l$, если $r < r_l$.

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.

Распределение δ , P , g в Венере

Таблица 1

| r , км | δ , г/см ³ | P , кбар | g , см/с ² | r , 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 |
| 514 | 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 | 4,56 | 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 |
| Ядро | | | | Ядро | | | |
| 2813 | 10,48 | 1154,5 | 974 | 2656 | 10,34 | 1071,7 | 1008 |
| 3025 | 10,57 | 1365,2 | 915 | 3025 | 10,49 | 1434,5 | 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 |

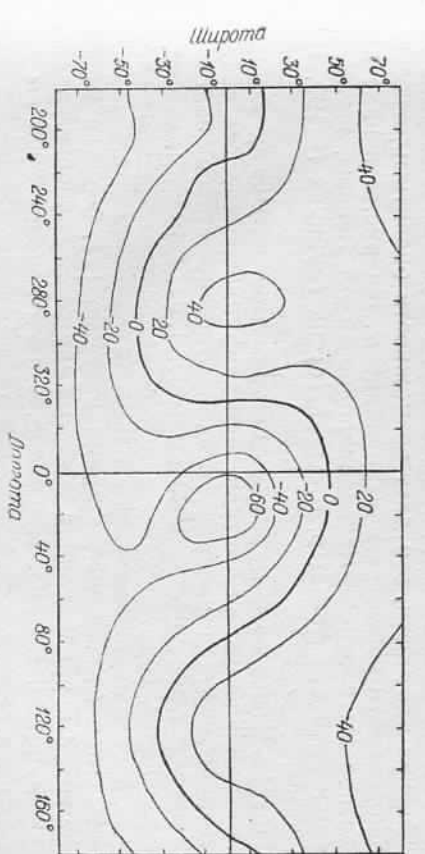
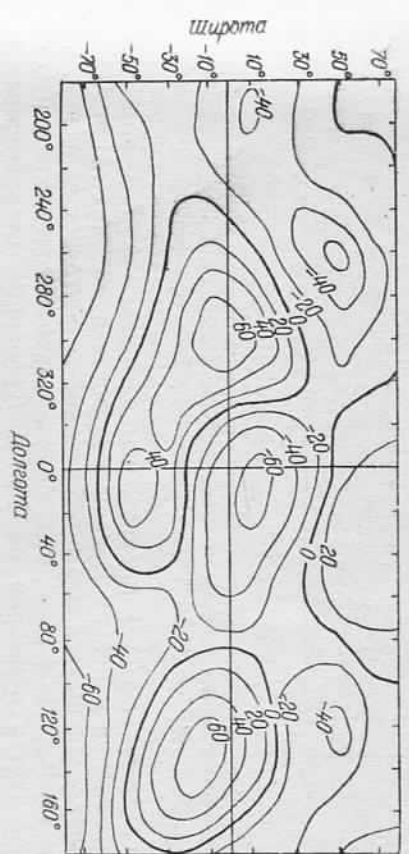
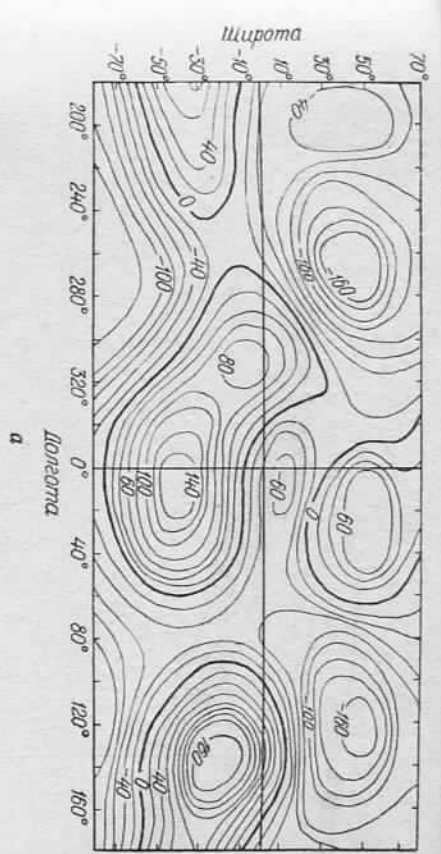


Рис. 1. Плотностные неоднородности Венеры (2-1-4 г/см³) на глубине 100 км (а), 1000 км (б), 3000 км (в).

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 г/см³. В таком же ядре для обеих полученных моделей четко прослеживается такая закономерность: у кровли ядра в моделях М1 и М2 немного

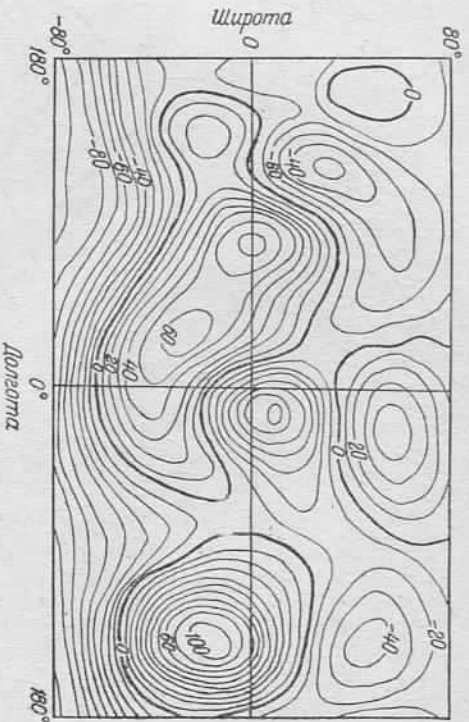


Рис. 2. Распределение высот урвневной поверхности Венеры, вычисленных по модели гравитационного поля относительно сферы ($r=6052,3$ км). Изолинии проведены через 10 м.

(на 0,18—0,17 г/см³) 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 г/см³, 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 характеристика 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 урвневной 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 урвневной 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 долоте 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 доли, вычисленное из соотношения $\text{tg } 2\lambda = S_{22}^z / C_{22}^z$, равное 129,6°, 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 оценки плотностных неоднородностей Венеры с аналогичными характеристиками для Земли, Марса и Луны. В табл. 2 приведены максимальные значения ориентальных 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 сохранение железа в планетарной земной группе. — Астрономический вестник, 1982, т. 16, № 1. 2. Мещеряков Г. А. Использование стоксовых постоянных Земли для уточнения ее механических моделей. — Геодезия, картография и воздухоплавательство, 1975, вып. 21. 3. Мещеряков Г. А., Денкека Ю. П. Об эллипсоидальном распределении плотности земных недр. — Геофиз. сб., 1978, вып. 86. 4. Мещеряков Г. А., Денкека Ю. П., Церквев А. Д. О глобальных плотностных неоднородностях Земли по данным о гравитационном поле. — В кн.: Изучение Земли как планеты методами астрономии, геофизики и геодезии. М., 1982. 5. Мещеряков Г. А., Церквев А. Д., Денкека Ю. П., Завдяк П. М. Некоторые вопросы интерпретации гравитационного поля Земли в аспекте сравнительной планетологии. — В кн.: Теория и методика интерпретации гравитационных полей. К., 1981. 6. Церквев А. Д., Денкека Ю. П., Мещеряков Г. А. Гравитационное поле и распределение плотности внутри Марса. — Геофиз. журн., 1983, т. 5, № 3. 7. Ананда М. Р. et al. A low-order global gravity field of Venus and dynamical implications. — J. Geophys. Res., 1980, 85, № A13.

Статья поступила в редакцию 31. 12. 83