

УДК 523.42;550.3

О ПАРАМЕТРАХ ЗЕМЛЕПОДОБНОЙ МОДЕЛИ ВЕНЕРЫ

© 2019 г. В. Н. Жарков*,^a, Т. В. Гудкова**,^a

^aИнститут физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, Москва, Россия

*e-mail: zharkov@ifz.ru

**e-mail: gudkova@ifz.ru

Поступила в редакцию 16.05.2018 г.

После доработки 16.05.2018 г.

Принята к публикации 16.05.2018 г.

Дан краткий обзор истории построения землеподобных моделей внутреннего строения Венеры. Проведен анализ имеющихся данных наблюдений. Предложено объяснение аномально большому значению отношения квадрупольного гравитационного момента J_2 к малому параметру Венеры q . Это позволило получить оценки значений постоянной прецессии и главных значений моментов инерции землеподобной модели Венеры.

Ключевые слова: Венера, землеподобная модель внутреннего строения, постоянная прецессии, главные моменты инерции

DOI: 10.1134/S0320930X18060087

ВВЕДЕНИЕ

Венера относится к планетам земной группы, в которую входят Меркурий, Земля и Марс. Все планеты земной группы, включая Венеру и Землю, относительно малы. В процессе их формирования они не смогли удержать самую распространенную водородо-гелиевую компоненту. Более того, все эти планеты имеют дефицит воды, метана и аммиака (низкокипящих веществ, которые также распространены). Основные компоненты планет земной группы — силикаты, железо и соединения железа и серы.

Согласно современным теориям, планеты, спутники и кометы образовались в результате эволюции протопланетного облака, которое на ранней стадии своего существования было газо-пылевым. При построении модели планеты важно иметь представление о химическом составе протопланетного облака, поскольку это указывает на возможность химической дифференциации железа, серы и радиоактивных источников в зависимости от температуры конденсации на различных расстояниях от Солнца (Lewis, 1972; Grossman, Larimer, 1974). Одна из важных проблем при построении моделей планет земной группы — их сравнительный анализ и получение количественной оценки концентрации пылевой компоненты в начальном газо-пылевом облаке, а также подтверждение вывода о пространственно-химической схеме конденсации облака.

По своим механическим параметрам — массе M , среднему радиусу R и средней плотности ρ_0 — Венера является планетой-близнецом Земли. Поэтому вполне естественно, что построение первой современной модели внутреннего строения Венеры (Jeffreys, 1937) было выполнено на основе

первой современной модели Земли (Bullen, 1936). В то время, которое сейчас кажется очень далеким, значение массы $M = 4.91 \times 10^{24}$ кг было больше на 1%, и средний радиус $R = 6150$ км был известен с хорошей точностью. В двухслойной модели планеты, плотность в мантии изменялась от 3290 до 5440 кг м⁻³, в ядре от 9600 до 11100 кг м⁻³; на границе мантия—ядро давление составляло 1.23 Мбар, а в центре Венеры 2.4 Мбар; масса ядра 1.06×10^{24} кг, и его радиус 2910 км. Сравнивая эти значения с параметрами моделей Венеры, построенных в (Zharkov, 1983), можно сделать вывод, что механические параметры модели планеты в работе (Jeffreys, 1937) (распределение плотности $\rho(l)$, давления $p(l)$, и гравитационного ускорения с глубиной l) были очень близки.

После работы (Jeffreys, 1937) в классической монографии (Urey, 1952), была значительно расширена концептуальная основа, которая с тех пор всегда используется при построении моделей планет, включая планеты земной группы. Гарольд Юри подчеркнул значение космохимических данных и космогонических концепций. С тех пор стало обычным сравнивать состав Венеры не только с составом Земли, но и с составом метеоритов. Появился интерес к проблеме распределения концентрации железа и других основных элементов в планетах земной группы. Обзор работ, выполненных в 1950–1960 гг., дан в книгах (Levin, 1970; Bullen, 1975). Основной вывод из этих работ — внутреннее строение Венеры подобно строению Земли.

В 1970–1980 гг. снова возрос интерес к исследованию внутреннего строения Венеры. В работе (Козловская, 1982) было рассчитано большое

число механических моделей Венеры с целью выявления различий в ее составе по сравнению со средним химическим составом Земли. Выводы, сделанные в этой работе, и работах, в которых построена физическая модель Венеры (Zharkov и др., 1981; Жарков, Засурский, 1982) были изложены в (Zharkov, 1983). Большое число моделей внутреннего строения Венеры в настоящее время рассмотрено в работе (Dumoulin и др., 2017).

Со времени первых публикаций Jeffreys (1937) и Urey (1952) геофизика сильно изменила свой подход (Stacey, 1977; Zharkov, Trubitsyn, 1978; Schubert, 1979; Phillips, Ivins, 1979; Жарков, 2012). Благодаря развитию работ по гидродинамике планетных недр, значительные изменения претерпела проблема распределения температуры в недрах планет (Toksöz и др., 1978; Zharkov, 1983; Steinberger и др., 2010; Armann, Tackley, 2012).

Тектонический режим Венеры и других планет земной группы отличается от плейт-тектонического. Как следствие, Луна и, очевидно, Меркурий, Венера и Марс должны иметь значительно более толстую кору, чем Земля. Толщина лунной коры ~ 50 км. Толщина коры других планет земной группы, вероятно, имеет такую же величину.

Смещение центра геометрической фигуры планеты по отношению к центру масс можно интерпретировать как указание на значительные региональные вариации толщины коры. На Венере расстояние между этими центрами составляет $0.339 \pm \pm 0.088$ км, что намного меньше соответствующей разницы для Земли (2.1 км; Balmino и др., 1973), Луны (2.0 км; Bills, Ferrari, 1977) и Марса (2.5 км; Bills, Ferrari, 1978). Поэтому вариация толщины коры на Венере меньше, чем для других планет земной группы. Этот факт можно считать указанием на то, что внешние слои Венеры ближе к сферической симметрии, чем слои Земли.

ДАННЫЕ НАБЛЮДЕНИЙ

Данные наблюдений для Венеры собраны в табл. 1, в которой для сравнения приведены аналогичные параметры для Земли. В табл. 1 включены масса M , первые коэффициенты разложения гравитационного потенциала по сферическим функциям J_2, C_{22}, S_{22} (Konopliv и др., 1999), период вращения τ , средний и экваториальный радиус R и R_e , средняя плотность ρ_0 , безразмерный момент инерции I/MR^2 . Табл. 1 включает также величину малого параметра теории фигуры q , динамическое сжатие α (сжатие внешней эквипотенциальной поверхности гравитационного потенциала планеты) и геометрическое сжатие e

$$q = \frac{\omega^2 R_e}{GM} = \frac{4\pi^2 R_e^3}{GM \tau^2}; \quad \alpha = \frac{3}{2} J_2 + \frac{1}{2} q; \quad (1)$$

$$e = \frac{R_e - R_p}{R_e},$$

где α – угловая скорость вращения, G – гравитационная постоянная и R_p – полярный радиус.

Для планет, находящихся в состоянии, близком к гидростатическому равновесию, средний радиус, в первом приближении, выражается через R_e : $R = (1 - \alpha/3)R_e$. Как известно, для равновесной планеты величины q и J_2 должны быть одного порядка малости (Zharkov, Trubitsyn, 1978). Из табл. 1 видно, что для Венеры J_2 больше q в ≈ 72 раза. Следовательно, можно утверждать, что Венера является самой неравновесной планетой в Солнечной системе. Этот факт, по-видимому, не является случайным и связан с тем, что вращение Венеры в прошлом было сильно замедлено приливным трением. Если мы примем для эффективно равновесной Венеры отношение J_2/q равным 0.3 (т.е. примерно такое же, как для Земли, см. табл. 1), тогда можно определить динамическое сжатие равновесной Венеры $\alpha_0 = 1.5J_2 + 0.5q_0 \sim \sim 13.9 \times 10^{-6}$, $q_0 \sim 14.6 \times 10^{-6}$. Соответствующий экваториальный радиус R_e для Венеры показан в табл. 1. Таким образом, мы видим, что для Венеры R_e практически совпадает с R . Обычный метод определения момента инерции планеты, близкой к состоянию гидростатического равновесия, по заданным J_2 и q основан на формуле Радо–Дарвина (Zharkov, Trubitsyn, 1978)

$$\frac{I}{MR^2} = \frac{2}{3} \left\{ 1 - \frac{2}{5} \left[5 \left(1 - \frac{3}{2} \frac{J_2}{\alpha_0} \right) - 1 \right]^{1/2} \right\}. \quad (2)$$

Масштаб неравновесности Венеры препятствует определению момента инерции таким способом. Полярный и экваториальные моменты инерции C и $A \approx B$ в константе прецессии $H = (C - A)/C$ не известны для Венеры, и не ясно, будет ли H определено в обозримом будущем. Как видно из табл. 1, модельное значение H очень мало. Поэтому, по-видимому, невозможно получить момент инерции Венеры из наблюдений в ближайшее время. Молодая Венера в раннюю эпоху – когда ее вращение еще не было замедлено приливным трением – вращалась намного быстрее, с периодом ~ 10 ч (Zharkov, Trubitsyn, 1978). Таким образом, малый параметр теории фигуры, обратно пропорциональный квадрату периода вращения ($q \sim \tau^{-2}$), был намного больше (приблизительно на четыре порядка) для молодой Венеры, чем современное значение. Наблюдаемая величина J_2 для Венеры приблизительно в 70 раз больше, чем q , которое можно рассматривать как некоторое реликтовое значение, относящееся к ранним и большим значениям q , когда вращение планеты еще не было замедлено приливным трением до современной величины. Так как недра Венеры значительно остыли и стали очень твердыми (или очень вязкими), фигура планеты “зафиксировалась”, какой была в отдаленную эпоху, и поэтому не соответствует современному значению угловой скорости

Таблица 1. Данные наблюдений и параметры фигуры Венеры и Земли

Параметры	Венера	Земля
Масса M , 10^{24} кг	4.869	5.974
J_2 , 10^{-6}	4.40	1082.64
C_{22} , 10^{-6}	0.8578	1.565
S_{22} , 10^{-6}	-0.0955	-0.894
Период вращения τ , дней	243.16	1.00
Экваториальный радиус R_e , км	6051.53*	6376
Средний радиус R , км	6051.5	6371
Средняя плотность ρ_0 , кг м ⁻³	5250	5514
Средний момент инерции I/MR^2	0.334*	0.33076
Малый параметр теории фигуры q	0.326**	
J_2/q	6.1×10^{-8}	3.47×10^{-3}
f , 10^{-6}	72	0.31
постоянная прецессии H	3.45	7.2
	$\sim 2 \times 10^{-5}$ *	0.00327

* Значения, рассчитанные теоретически для модели внутреннего строения (см. текст).

** Значение, рассчитанное по формуле (2) (см. текст).

Таблица 2. Модельные значения момента инерции, главных моментов инерции и постоянной прецессии

	I/MR^2	A/MR^2	B/MR^2	C/MR^2	H
1	0.334	0.333997	0.334000	0.334003	1.834×10^{-5}
2	0.326	0.325997	0.326000	0.326003	1.879×10^{-5}

вращения планеты. Если выразить период вращения из формулы Радо–Дарвина

$$\tau_{J_2} = \left\{ \frac{\pi}{\rho_0 G J_2} \left[\frac{5}{6.25(1 - 1.5I)^2 + 1} - 1 \right] \right\}^{1/2}, \quad (3)$$

то тогда можно оценить τ_{J_2} для эпохи, когда была зафиксирована равновесная фигура планеты, а также значение J_2 , которое сохранилось до сегодняшнего дня. Принимая для момента инерции Венеры величину $I^* = 0.334$ (значение, рассчитанное по модели внутреннего строения) или $I^{**} = 0.326$ (значение, полученное при помощи формулы (2)) (см. табл. 1), можно получить палеопериод вращения Венеры $\tau_0 = \tau_{J_2} \approx 15.7$ дней. Полученный результат говорит о том, что Венера в прошлом вращалась намного быстрее. Период вращения молодой Венеры, возможно, был еще меньше и равен ~ 10 ч, хотя неравновесность планеты, соответствующая такому быстрому вращению, была, вероятно, давно стерта из “памяти” Венеры из-за “пластичности” мантии и ядра.

ОЦЕНКА ЗНАЧЕНИЙ ПОСТОЯННОЙ ПРЕЦЕССИИ И ГЛАВНЫХ МОМЕНТОВ ИНЕРЦИИ

Использование идеи о том, что в нулевом приближении разумно принять землеподобную модель Венеры, и что оценочные значения параметров H , A , B , C сформировались в эпоху, когда планета заканчивала свою приливную эволюцию, пребывая в состоянии, близком к гидростатически равновесному (см. предыдущий пункт), позволяют

определить оценочные значения H . Полярный момент инерции C , экваториальные моменты A и B , и постоянная прецессии связаны следующими соотношениями (Zharkov и др., 1996):

$$H = 1 - \frac{I - 2\sqrt{C_{22}^2 + S_{22}^2} - J_2/3}{I + 2/3 J_2}, \quad (4)$$

$$C = MR^2 \frac{J_2 + \sqrt{5/3(C_{22}^2 + S_{22}^2)}}{H}, \quad (5)$$

$$A = (1 - H)/C, \quad (6)$$

$$B = \left(1 - \frac{J_2 - \sqrt{5/3(C_{22}^2 + S_{22}^2)}}{J_2 + \sqrt{5/3(C_{22}^2 + S_{22}^2)}} H \right) C. \quad (7)$$

Значения моментов, рассчитанных по этим формулам, приведены в табл. 2.

ОБСУЖДЕНИЕ

Недра Земли и Венеры близки к сферической симметрии. Соответственно используются сферически симметричные модели, как Земли, так и Венеры. Сравнение ряда параметров этих моделей выявляет их особенности. Смещение центра геометрической фигуры планеты относительно ее центра масс может интерпретироваться как указание на значительные региональные вариации в толщине коры. В Венере расстояние между обоими центрами равно 0.339 ± 0.088 км, что заметно меньше, чем соответствующая разность для Земли 2.1 км (Balmino и др., 1973). Соответственно, вариации в толщине венерианской коры меньше,

чем у Земли. Этот факт может рассматриваться как указание на то, что внешние слои Венеры ближе к сферической симметрии, чем у Земли.

Из-за вращения планет их фигуры становятся слабо осесимметричными. Этот эффект определяется параметром f , приведенным в табл. 1, который рассчитывается по формуле (Zharkov, Trubitsyn, 1978)

$$f = \frac{B - A}{MR^2} = 4\sqrt{C_{22}^2 + S_{22}^2}, \quad (8)$$

определяющей разность главных моментов инерции по отношению к осям координат в экваториальной плоскости.

Как общий вывод, можно заключить, что фигура Венеры заметно ближе к сферической симметрии, чем фигура Земли.

У Венеры отношение $J_2/q \sim 72$ (табл. 1). В статье предложено объяснение этой аномалии. Предполагается, что в раннюю эпоху, по мере остывания, фигура Венеры была близкой к гидростатически равновесной и величины J_2 и q были одного порядка. Это сохранялось до некоторого значения q_0 . В эту эпоху J_2 приняло значение, наблюдаемое в настоящее время у Венеры, которое приведено в табл. 1. При дальнейшем замедлении вращения планеты и уменьшении значения q , возникающие малые неравновесные силы были недостаточны, чтобы заставить значение J_2 следовать за изменением q . Таким образом, квадрупольный гравитационный момент J_2 сохранился как некоторое реликтовое значение в приливной эволюции Венеры.

Для Земли отношение $J_2/q \sim 0.3$ (см. табл. 1). Для землеподобной модели Венеры разумно предположить, что соответствующее реликтовое отношение $J_2/q_0 \sim 0.3$, т.е. такое же, как у Земли, состояние которой близко к гидростатически равновесному.

Это позволило оценить значение палеопериода вращения Венеры ($\tau_0 \sim 15.7$ дней), соответствующего реликтовому отношению $J_2/q_0 \sim 0.3$, и получить оценки постоянной прецессии и главных моментов инерции Венеры. Эти данные приведены в табл. 2.

Данная работа выполнена в рамках госзадания ИФЗ РАН и при частичной финансовой поддержке Программы Президиума РАН 28.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Козловская С.В. Внутреннее строение Венеры и содержание железа в планетах земной группы // Астрон. вестн. 1982. Т. 16. № 1. С. 3–17. (Kozlovskaya S.V. The internal structure of Venus and the Iron Content in the terrestrial planets // Sol. Syst. Res. 1982. V. 16. № 1. P. 1–14.)
Жарков В.Н., Засурский И.Я. Физическая модель Венеры // Астрон. вестн. 1982. Т. 16. № 1. С. 18–28.

(Zharkov V.N., Zaslurskii I.Ya. A physical model of Venus // Sol. Syst. Res. 1982. V. 16. № 1. P. 14–22.)
Жарков В.Н. Физика земных недр. М.: Наука и Образование, 2012. 384 с.
Armann M., Tackley P. Simulating the thermochemical magmatic and tectonic evolution of Venus's mantle and lithosphere: Two-dimensional models // J. Geophys. Res. Planets. 2012. V. 117. E12003. doi 10.1029/2012JE004231
Balmino G., Lambeck K., Kaula W. A spectral harmonic analysis of the Earth's topography // J. Geophys. Res. 1973. V. 78. P. 21–22.
Bills B., Ferrari A. A harmonic analysis of lunar topography // Icarus. 1977. V. 2. P. 244–259.
Bills B., Ferrari A. Mars topography and geophysical implications // J. Geophys. Res. 1978. V. 83. P. 3497–3508.
Bullen K.E. The variation of density and the ellipticities of strata of equal density within the Earth // Mon. Notic. Roy. Astron. Soc. Geophys. Suppl. 1936. V. 3. P. 395–401.
Bullen K.E. The Earth's Density. London: Chapman and Hall. Netherlands: Springer, 1975. 420 p.
Dumoulin C., Tobie G., Verhoeven O., Rambaux N. Tidal constraints on the interior of Venus // J. Geophys. Res. Planets. 2017. V. 122(6). P. 1338–1352. doi 10.1002/2016JE005249
Jeffreys H. The density distribution of the inner planets // Mon. Notic. Roy. Astron. Soc. Geophys. Suppl. 1937. V. 4(1). P. 62–71.
Grossman L., Larimer J. Early chemical history of the Solar System // Rev. Geophys. and Space Phys. 1974. V. 12. P. 71–101.
Konopliv A.S., Banerdt W.B., Sjogren W.L. Venus gravity: A 180th degree and order model // Icarus. 1999. V. 139(1). P. 3–18.
Levin B. Internal constitution of terrestrial planets. In A. Dollfus (Ed.) // Surfaces and Interiors of Planets and Satellites / Ed. Dollfus A. London: Acad. Press, 1970. P. 462–510.
Lewis J. Metal/silicate fractionation in the Solar System // Earth and Planet. Sci. Lett. 1972. V. 15. P. 286–290.
Phillips R., Ivins E. Geophysical observations pertaining to solid-state convection in the terrestrial planets // Phys. Earth. Int. 1979. V. 19. P. 107–148.
Schubert G. Subsolidus convection in the mantles of terrestrial planets // Annu. Rev. Earth and Planet. Sci. 1979. V. 7. P. 289–342.
Stacey F. Physics of the Earth. N.Y.: Wiley, 1977. 414 p.
Steinberger B., Werner S., Torsvik T. Deep versus shallow origin of gravity anomalies, topography and volcanism on Earth, Venus and Mars // Icarus. 2010. V. 207. P. 564–577.
Toksöz M., Hsui A., Johnston D. Thermal evolutions of the terrestrial planets // Moon and Planets. 1978. V. 18. P. 281–320.
Urey H. The planets: Their origin and development. Yale Univ. Press, New Haven: Yale Univ. Press, 1952. 400 p.
Zharkov V. Models of the internal structure of Venus // Moon and Planets. 1983. V. 29. P. 139–175.
Zharkov V., Trubitsyn V. Physics of planetary interiors. Tucson: Pachart, 1978. 388 p.
Zharkov V.N., Kozlovskaya S.V., Zaslurskii I.Ya. Interior structure and comparative analysis of the terrestrial planets // Adv. Space Res. 1981. V. 1. P. 117–129.
Zharkov V.N., Molodensky S.M., Brzezinski A., Groten E., Varga P. The Earth and its rotation: Low frequency geodynamics. Heidelberg: Herbert Wichman Verlag, 1996. 501 p.