

УДК 523.42;550.3

МОДЕЛИ ВНУТРЕННЕГО СТРОЕНИЯ ЗЕМЛЕПОДОБНОЙ ВЕНЕРЫ

© 2020 г. Т. В. Гудкова^а, *, В. Н. Жарков^а

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

*e-mail: gudkova@ifz.ru

Поступила в редакцию 03.07.2019 г.

После доработки 02.08.2019 г.

Принята к публикации 05.09.2019 г.

Используя данные наблюдений и общий опыт геофизики, построена рабочая земледобная модель внутреннего строения Венеры (распределение плотности, давления, гравитационного ускорения и скоростей продольных и поперечных сейсмических волн по радиусу). Рассчитаны поправки из-за влияния неупругости недр планеты на значение модельного числа Лява k_2 . Рассчитаны параметры равновесной фигуры Венеры.

Ключевые слова: Венера, земледобная модель внутреннего строения, неупругость, параметры равновесной фигуры

DOI: 10.31857/S0320930X20010041

ВВЕДЕНИЕ

В отличие от атмосферы и поверхности Венеры, которые интенсивно исследовались космическими аппаратами, внутреннее строение планеты не достаточно изучено из-за больших интервалов ошибок в данных наблюдений. Для определения внутренней структуры планеты сейсмические данные могли бы служить хорошей базой. Из-за сложных технических условий на поверхности Венеры (температура 740 К и давление 9.3 МПа), сейсмический эксперимент пока не проводится. В настоящее время разрабатывается совместный проект Роскосмоса и NASA, в котором планируется отправка станции Венера-Д со спускаемым модулем (одним из приборов будет сейсмометр), который должен проработать на поверхности планеты около двух месяцев. Европейское космическое агентство разрабатывает проект EnVision (Ghail и др., 2018), направленный на уточнение данных о гравитационном поле Венеры. Предложена миссия VERITAS для улучшения точности гравитационного поля Венеры до 3 мГал, и пространственным разрешением 145 м (Smrekar и др., 2016).

В связи с планируемыми экспериментами интерес к исследованию недр Венеры последнее время возрастает – это работы по тепловой истории и реологии Венеры, определению толщины коры и структуры литосферы по данным гравитационного поля и топографии Венеры (Li и др., 2015; Jimenez-Diaz и др., 2015; Yang и др., 2016; Karimi, Dombard, 2016; Dumoulin и др., 2017).

Обычно при построении модели внутреннего строения планеты опираются на данные о гравитационном поле и топографии: масса, средний радиус, момент инерции и приливное число Лява k_2 , которое является функционалом от распределения упругих параметров в недрах планеты. В отличие от Земли и Марса, для Венеры не существует данных наблюдений, которые позволяют рассчитать момент инерции (имеются оценки только до второго знака после запятой, значение безразмерного момента инерции I/MR^2 варьируется от 0.327 до 0.342). Момент инерции является одним из основных ограничений на модель внутреннего строения. 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. В работе (Жарков, Гудкова, 2019) с учетом данных о гравитационном поле, для земледобной модели Венеры было получено модельное значение момента инерции и прогностическое значение постоянной прецессии. Модельное значение H очень мало $\sim 2 \times 10^{-5}$. Поэтому, по-видимому, невозможно получить момент инерции Венеры из наблюдений в ближайшее время.

Единственное ограничение, полученное из данных наблюдений КА Magellan и Pioneer Venus Orbiter, это число Лява k_2 для Венеры, но оно измерено с небольшой точностью. Из-за недостаточной точности оценки интервала значений приливного числа Лява k_2 ($k_2 = 0.295 \pm 0.066$)

(Konopliv, Yoder, 1996) по солнечному приливу на Венере (период которого составляет 58.4 дня) и отсутствия данных о неупругих свойствах ее недр, продолжается обсуждение вопроса о том, находится ли ядро планеты в жидком или твердом состоянии, и имеется ли внутреннее твердое ядро (Dumoulin и др., 2017). Допустимые границы радиуса ядра находятся в интервале 2800–3500 км.

При оценке величины k_2 имеются определенные сложности, так как требуется понимание неупругости недр Венеры. Значение k_2 зависит от неупругости недр при периоде приливной волны. При построении модели внутреннего строения рассчитывается упругое значение k_2 , поэтому необходимо вводить поправку за неупругость, учитывая, что приливные деформации при больших периодах происходят в режиме неустановившейся ползучести. Этот вопрос будет рассмотрен в данной работе.

По своим механическим параметрам — массе, среднему радиусу, средней плотности — Венера считается планетой-близнецом Земли. При расчетах землеподобных моделей внутреннего строения Венеры используют уравнения состояния земного вещества, определенные по динамическим и статическим экспериментальным данным.

Ряд моделей внутреннего строения Венеры был построен с использованием параметрической модели Земли (Dziewonski и др., 1975) как базисной (Zharkov и др., 1981; Жарков, Засурский, 1982; Козловская, 1982; Yoder, 1995; Mosquet и др., 2011; Aitta, 2012). В работах (Козловская, 1982; Zharkov, 1983) было рассчитано большое количество моделей Венеры, в которых получено распределение по радиусу плотности, давления, гравитационного ускорения, для того, чтобы выяснить различия между составом Венеры и средним химическим составом Земли. В работе (Жарков, Засурский, 1982) было проведено детальное исследование моделей внутреннего строения Венеры на базе моделей Земли и других данных и построена физическая модель Венеры (распределение теплоемкости, коэффициента теплового расширения, адиабатической температуры и эффективной вязкости). Было принято, что глубина венерианской литосферы равна 200 км, и на этой глубине температура равна $\sim 1200^\circ\text{C}$. Далее, считая, что распределение температур в мантии должно быть гладкой непрерывной функцией глубины, по аналогии с Землей, было получено оценочное значение температуры в зоне фазового перехода (примерно 1500°C) и найдено, что в конвективной нижней мантии температура распределена по адиабате и на границе ядра и мантии составляет примерно $\sim 3500\text{ K}$. Температуры в ядре

считаются адиабатическими. В результате температура в центре Венеры найдена равной $\sim 4670\text{ K}$. Проведенные исследования выявили не только сходство, но также важные различия между Землей и Венерой и показали, что каждая планета имеет свои характерные особенности.

В отсутствие сейсмических данных для Венеры не известны глубины фазовых переходов, которые позволяют определить реперные точки в распределении температуры по фазовым диаграммам. Ясно, что недра Венеры находятся при высоких температурах, но конкретно, несмотря на важность этого вопроса, неопределенности в распределении температуры остаются, это видно, если сравнить теоретически рассчитанные профили температур из работ (Steinberger и др., 2010; Armann, Tackley, 2012). Неопределенности в распределении температуры в недрах Венеры оставляют открытым вопрос о том, является ли ядро Венеры жидким или твердым (Dumoulin и др., 2017).

До настоящего времени считалось, что кора Венеры должна быть толстая. Толщина коры выбиралась 60–70 км, что было обосновано тем, что в базальтах на этой глубине должен происходить фазовый переход базальт-эклогит. В тектонике плит существует механизм погружения коры в мантию, для Венеры такой механизм не предложен и кора накапливается (см., например, Zharkov, 1992). Оценки толщины коры, полученные из моделей тепловой эволюции планеты и интерпретации данных топографии и гравитационного поля, варьируются от 15 до 35 км (Breuer, Moore, 2007; Wiczorek, 2007). В ряде последних публикаций (Jimenez-Diaz и др., 2015; O'Rourke, Korenaga, 2015; Yang и др., 2016) вопрос о мощности коры пересмотрен в сторону уменьшения, причем указано, что средняя толщина коры может быть существенно меньше, около 25–30 км, при этом региональные толщины коры варьируются от 12 до 65 км (Yang и др., 2016). В работе (Dumoulin и др., 2017) авторы продолжают принимать толщину коры равной 60 км. Образцы пород приводят к оценкам плотности 2700–2900 kg m^{-3} , что соответствует составу базальтов (Grimm, Hess, 1997).

Далее будут представлены землеподобные модели внутреннего строения Венеры, удовлетворяющие имеющимся наблюдательным данным, как с толстой, так и с тонкой корой; проведена оценка изменения числа Лява k_2 за счет учета неупругости; и рассчитаны параметры равновесной фигуры планеты для модельного распределения плотности.

Таблица 1. Данные наблюдений Венеры

| Параметры | Значения параметров |
|---|--------------------------------------|
| Масса M , кг | $4.8669 \times 10^{24} = 0.815M_3$ |
| Средний радиус R , км | $6050.9 = 0.95R_3$ |
| Экваториальный радиус R_e , км | 6051.0 |
| Средняя плотность ρ , кг/м ³ | 5241.9 |
| Ускорение свободного падения на экваторе g_0 , м/с ² | 8.87 |
| I/MR^2 | 0.331–0.341 |
| J_2 | $(4.4192 \pm 0.0016) \times 10^{-6}$ |
| k_2 | 0.295 ± 0.066 |
| Период вращения τ , дни | 243.0185 |
| $m = 3\pi/G\rho\tau^2$ | 6.1×10^{-8} |

ЗЕМЛЕПОДОБНЫЕ МОДЕЛИ ВНУТРЕННЕГО СТРОЕНИЯ ВЕНЕРЫ

Данные наблюдений, используемые при построении модели внутреннего строения Венеры, собраны в табл. 1: масса M , средний и экваториальный радиус R и R_e , средняя плотность ρ , безразмерный момент инерции I/MR^2 и число Лява k_2 . Табл. 1 включает также период вращения τ и величину малого параметра теории фигуры m .

Для расчета моделей внутреннего строения планет обычно используется уравнение гидростатического равновесия, уравнение для массы, и задается уравнение состояния. Полученный профиль плотности должен удовлетворять моменту инерции планеты и числу Лява k_2 . Венера близка по массе и размеру Земле (табл. 1) и в основе нашего подхода мы учитываем это при построении модели внутреннего строения Венеры. За исход-

ное уравнение состояния примем уравнение состояния для Земли. Удобство такого выбора заключается еще в том, что тем самым автоматически учитывается влияние температуры на уравнение состояния, так как, по-видимому, распределение температуры в обеих планетах для глубин, больших ~ 200 км, близко.

За базисную модель примем параметрическую простую модель Венеры PVM (Жарков, Засурский, 1982) (табл. 2), в которой распределение плотности $\rho(x)$ и скоростей продольных $V_p(x)$ и поперечных $V_s(x)$ объемных сейсмических волн заданы кусочно-непрерывными аналитическими функциями радиуса x ($x = r/R$ – безразмерный радиус, $R = 6050$ км – средний радиус Венеры). Непрерывные куски распределений описываются полиномами от x не старше третьей степени.

Основным вопросом при построении модели внутреннего строения Венеры является параметризация (толщина коры, глубина фазовых переходов силикатов, радиус ядра). Учитывая имеющиеся неопределенности, варьируемыми параметрами в моделях являются радиус ядра R_c (от 2800 до 3500 км), толщина коры (h_{cr}) (от 30 до 100 км) и плотность мантии ρ_m (см. табл. 3).

Плотность коры принята равной 2800 кг м^{-3} . Плотность мантии как функция давления задается введением коэффициента A : $\rho_m(P) = \rho(P) \cdot A$, где $\rho(P)$ уравнение состояния базисной PVM модели. Тем самым кривые $\rho_m(P)$ получаются смещением базовой плотности вверх или вниз по оси плотности. В табл. 3 включены модели как с “облегченной”, так и с “утяжеленной” силикатной мантией по сравнению с базовой моделью PVM. Отклонение плотности от базовой модели составляет до 6%. При коэффициенте A меньше единицы, содержание железа в мантийных силикатах меньше, чем в принятой базовой модели. Состав мантии меняется в результате изменения молярной доли Fe по отношению к магнию Mg

Таблица 2. Параметрически простая модель Венеры (PVM) (Жарков, Засурский, 1982)

| l , км | ρ , г/см ³ | V_p , км/с | V_s , км/с |
|-----------|--|-------------------------------------|--------------------------|
| 70–470 | $7.374 - 4.146x$ | $27.17 - 19.74x$ | $14.4 - 10.4x$ |
| 471–746 | $10.101 - 6.871x$ | $19.32 - 10.59x$ | $13.54 - 9.21x$ |
| 747–2843 | $6.77 - 2.467x - 0.266x^2$ | $14.84 - 0.074x - 5.011x^2$ | $6.83 + 2.65x - 3.95x^2$ |
| 2843–6050 | $11.742 - 0.17x - 5.402x^2 - 3.642x^3$ | $9.88 + 0.66x - 9.125x^2 - 0.74x^3$ | |

$\rho_k = 2.8 \text{ г/см}^3$; $x = r/R$; $R = 6050 \text{ км}$.

Таблица 3. Параметры моделей Венеры

| Модель | h_{cr} , км | ρ_{cr} , кг/м ³ | R_{core} , км | $Coef A$ | I/MR^2 | I_{core}/MR^2 | k_2^S |
|--------|---------------|---------------------------------|-----------------|----------|----------|-----------------|---------|
| V_1 | 70 | 2800 | 2800 | 1.057 | 0.3439 | 0.0173 | 0.2122 |
| V_2 | 70 | 2800 | 2900 | 1.045 | 0.3416 | 0.0204 | 0.2219 |
| V_3 | 70 | 2800 | 3000 | 1.032 | 0.3392 | 0.0240 | 0.2321 |
| V_4 | 70 | 2800 | 3100 | 1.017 | 0.3367 | 0.0280 | 0.2432 |
| V_5 | 70 | 2800 | 3200 | 1.001 | 0.3341 | 0.0325 | 0.2542 |
| V_6 | 70 | 2800 | 3300 | 0.984 | 0.3314 | 0.0375 | 0.2660 |
| V_7 | 70 | 2800 | 3400 | 0.966 | 0.3287 | 0.0431 | 0.2777 |
| V_8 | 70 | 2800 | 3500 | 0.946 | 0.3259 | 0.0493 | 0.2893 |
| V_9 | 50 | 2800 | 3500 | 0.945 | 0.3260 | 0.0492 | 0.2893 |
| V_10 | 30 | 2800 | 3500 | 0.944 | 0.3261 | 0.0493 | 0.2892 |
| V_11 | 100 | 2800 | 3500 | 0.948 | 0.3257 | 0.0493 | 0.2892 |
| V_12 | 50 | 2800 | 3400 | 0.965 | 0.3289 | 0.0431 | 0.2778 |
| V_13 | 30 | 2800 | 3400 | 0.964 | 0.3290 | 0.0431 | 0.2779 |
| V_14 | 100 | 2800 | 3400 | 0.968 | 0.3285 | 0.0431 | 0.2776 |
| V_15 | 50 | 2800 | 3300 | 0.983 | 0.3316 | 0.0375 | 0.2660 |
| V_16 | 30 | 2800 | 3300 | 0.982 | 0.3318 | 0.0375 | 0.2661 |
| V_17 | 100 | 2800 | 3300 | 0.986 | 0.3312 | 0.0375 | 0.2658 |
| V_18 | 50 | 2800 | 3200 | 1.000 | 0.3343 | 0.0325 | 0.2545 |
| V_19 | 30 | 2800 | 3200 | 0.999 | 0.3345 | 0.0325 | 0.2546 |
| V_20 | 100 | 2800 | 3200 | 1.004 | 0.3340 | 0.0325 | 0.2548 |

(Fe/(Mg + Fe)). Как было показано в (Zharkov, 1992), уменьшение плотности на 1% соответствует уменьшению железа в силикатах мантии на 1.4%.

Согласно данным космохимии содержание железа в мантийных силикатах должно систематически убывать при переходе от Марса к Меркурию. При коэффициенте A меньше единицы модели Венеры имеют дефицит железа в мантийных силикатах.

Ряд моделей внутреннего строения Венеры представлен в табл. 3. Зная распределение плотности в модели Венеры, можно построить сейсмическую модель планеты. Для этого следует воспользоваться функциями V_p и V_s для моделей РЕМ (параметрическая модель Земли – Parametric Earth Model) (Dziewonski, Anderson, 1981).

На рис. 1 показано распределение ρ , ускорения силы тяжести g и скоростей продольных V_p и

поперечных V_s волн в пробной модели Венеры V_5. Модель Венеры включает три оболочки: кора, мантия, и ядро. Значение момента инерции представленных в табл. 3 моделей находится в диапазоне 0.326–0.344. Для каждой модели рассчитано число Лява k_2 . Рис. 2 демонстрирует зависимость модельного упругого числа Лява k_2^S от безразмерного момента инерции I/MR^2 для широкого диапазона состава коры, мантии и размеров ядра. Из рис. 1 и табл. 3 видно, что сильнее всего число Лява k_2 коррелирует с размером ядра. Однако разброс допустимых значений числа Лява не позволяет наложить ограничения на радиус ядра планеты. Как будет показано ниже, из-за эффекта неупругости, границы допустимых наблюдаемых значений для применения к упругим моделям внутреннего строения надо сместить вниз по крайней мере на 0.02–0.03.

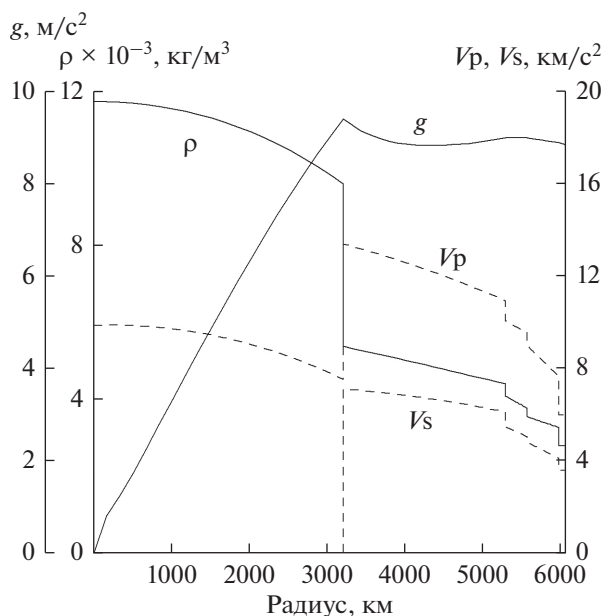


Рис. 1. Распределение плотности ρ , гравитационного ускорения g , и скоростей продольных V_p и поперечных V_s волн, как функция радиуса для модели V_5 , параметры которой приведены в табл. 3.

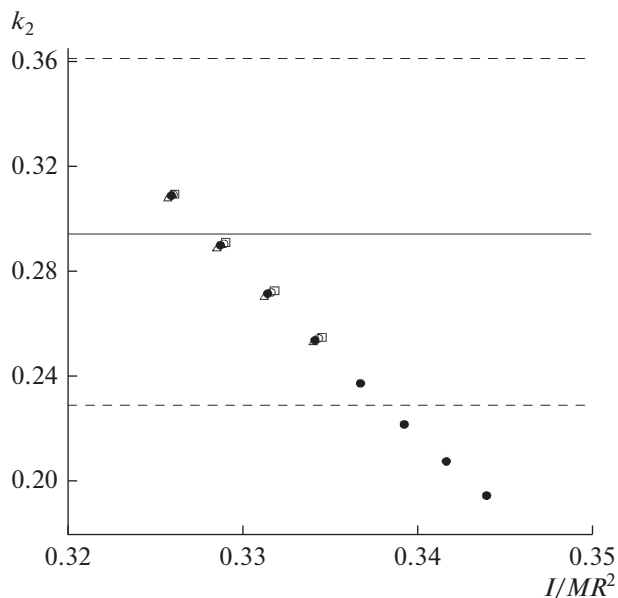


Рис. 2. Упругие числа Лява k_2^S в зависимости от безразмерного момента инерции I/MR^2 для ряда моделей Венеры, представленных в табл. 3 (черные кружки – кора 70 км, белые кружки – 50 км, черные треугольники – 30 км). Горизонтальная сплошная линия соответствует наблюдаемому значению k_2 . Горизонтальные штриховые линии показывают полосу допустимых наблюдаемых значений k_2 .

ЭФФЕКТЫ НЕУПРУГОСТИ

Модели внутреннего строения Венеры являются упругими (модельный модуль сдвига не зависит от частоты), а значение k_2 содержит как упругую, так и неупругую составляющие. Чтобы использовать k_2 как ограничение при построении моделей внутреннего строения Венеры, оценка k_2 должна быть уменьшена из-за эффекта неупругости недр. Задача о разделении числа Лява k_2 на упругую и неупругую составляющие для Марса подробно разобрана в работе (Жарков, Гудкова, 2005).

В данной работе для определения поправки за неупругость и с учетом того, что Венера по своим механическим параметрам (массе, радиусу и плотности) похожа на Землю, в качестве распределения $Q_\mu(l)$ в недрах силикатной оболочки Венеры

положим распределение $Q_\mu(l)$ в недрах Земли. За исходное распределение примем четырехслойное кусочно-постоянное распределение из земной модели QML9 (Lawrence, Wyssession, 2006) (табл. 4): (0–80 км), $Q_\mu = 600$; (80–220 км), $Q_\mu = 80$; (220–400 км), $Q_\mu = 143$ и (400–670 км), $Q_\mu = 276$.

В диссипативной среде, каковой являются недра Венеры, диссипативная функция $Q_\mu(l)$, модуль сдвига $\mu(l)$ и приливное число Лява планеты k_2 являются функциями частоты.

Определение частотной зависимости диссипативного фактора Q_i земных недр опирается на сейсмические данные и данные лабораторных исследе-

Таблица 4. Значения диссипативного фактора $Q_\mu(l)$ и изменения модуля сдвига в четырех слоях силикатной оболочки Венеры при переходе от периода 1 с к периоду 1 ч и периоду 58.4 дней, которые соответствуют частотам σ_1 , σ_2 , σ_3 , и значениях $n = 0.15$ и 0.2 в формулах (1) и (2)

| n | 0.15 | | | | 0.2 | | | | |
|-------------------------------|-------------|-------|--------|---------|---------|-------|--------|---------|---------|
| | Глубина, км | 0–80 | 80–220 | 220–400 | 400–670 | 0–80 | 80–220 | 220–400 | 400–670 |
| $Q(\sigma_1)$ | | 600 | 80 | 143 | 276 | 600 | 80 | 143 | 276 |
| $Q(\sigma_2)$ | | 202 | 27 | 48 | 93 | 140 | 20 | 35 | 65 |
| $\mu(\sigma_2)/\mu(\sigma_1)$ | | 0.991 | 0.935 | 0.964 | 0.981 | 0.991 | 0.935 | 0.964 | 0.981 |
| $\mu(\sigma_3)/\mu(\sigma_2)$ | | 0.96 | 0.7 | 0.903 | 0.91 | 0.93 | 0.5 | 0.71 | 0.85 |
| $\mu(\sigma_3)/\mu(\sigma_1)$ | | 0.95 | 0.65 | 0.77 | 0.89 | 0.92 | 0.47 | 0.68 | 0.83 |

дований (Жарков, 2012). Обзор последних работ по исследованию диссипативных свойств земных недр можно найти в работе (Жарков и др., 2017).

В стандартной модели Земли PREM в интервале периодов от ~ 1 с до ~ 1 ч (3.6×10^3 с), который соответствует земной сейсмологии, значение Q_μ постоянно. Этому случаю отвечает логарифмическая функция крипа (модель Ломница) (Жарков, 2012), а отношение модулей сдвига $\mu_0(\sigma)$ на двух частотах σ_1 и σ_2 дается формулой (Акопян и др., 1977)

$$\frac{\mu_0(\sigma_2)}{\mu_0(\sigma_1)} = 1 - \frac{2}{\pi Q_\mu} \ln \frac{\sigma_1}{\sigma_2}. \quad (1)$$

Для меньших частот имеет место слабая зависимость Q_μ от частоты, относящаяся к стадии неустановившейся ползучести (Zharkov, Molodensky, 1979; Молоденский, Жарков, 1982; Anderson, Minster, 1979; Smith, Dahlen, 1981; Zharkov и др., 1996) и справедливы формулы (Акопян и др., 1977; Жарков, 2012)

$$\frac{\mu_0(\sigma_2)}{\mu_0(\sigma_1)} = 1 - \frac{1}{Q_\mu(\sigma_1)} \left[\left(\frac{\sigma_1}{\sigma_2} \right)^n - 1 \right] \operatorname{ctg} \frac{n\pi}{2}, \quad (2)$$

$$Q_\mu(\sigma_2) = Q_\mu(\sigma_1) \left(\frac{\sigma_2}{\sigma_1} \right)^n. \quad (3)$$

Показатель n в (2)–(3) лежит в интервале ~ 0.1 – 0.2 .

В данной работе в интервале периодов от 1 с до 1 ч будем использовать модель Ломница, формулу (1) для отношения модулей сдвига $\mu_0(\sigma)$. В интервале периодов от 1 ч до 58.4 дня используется формула (2). Обозначим через σ_1 частоту, соответствующую периоду, равному 1 с, через σ_2 частоту, соответствующую периоду, равному 1 ч $= 3.6 \times 10^3$ с. Частоту Солнечной приливной волны на Венере, соответствующую периоду, равному ~ 58.4 дня, $\approx 5 \times 10^6$ с, обозначим через σ_3 . Формулы (1) и (2) позволяют оценить уменьшение модуля сдвига при переходе от частоты σ_1 к σ_3 (см. табл. 4).

В табл. 4 приведены результаты расчета преобразования исходного распределения $Q_\mu(t)$ в сейсмической полосе периодов (~ 1 с) к периодам 1 ч и 58.4 дней, соответствующие изменения модуля сдвига в четырех слоях в силикатной оболочке Венеры, а также суммарное изменение модуля сдвига. Исходя из лабораторных данных и опыта изучения этой задачи для Земли, было выбрано значение n в интервале 0.15–0.2.

Из-за неупругости, $\mu(5 \times 10^6$ с) меньше, чем $\mu(1$ с) на 5, 35, 23 и 11% в четырех слоях, соответственно. Так как число k_2 приблизительно обратно пропорционально модулю сдвига, эффект неупругости недр приводит к увеличению значения

числа Лява k_2 по сравнению со значением для упругой модели k_2^s .

Численный расчет показал, что при использовании показателя степени n в интервале 0.15–0.2 число k_2 увеличивается на 8–12%. Таким образом, по этой оценке различие между $k_2(5 \times 10^6$ с) и $k_2(1$ с) составляет, соответственно, 0.02–0.03, что находится в пределах ошибки измерения числа Лява.

Значения чисел Лява k_2 для моделей Венеры с жидким и твердым ядрами заметно различаются.

Для моделей с твердым ядром k_2^s равно 0.17 (Yoder, 1995). В работе (Dumoulin и др., 2017) сделан вывод, что с учетом эффекта неупругости нельзя утверждать, находится ли ядро Венеры в жидком или твердом состоянии.

Оценки изменения величины k_2 за счет неупругости зависят от выбора диссипативного фактора в недрах планеты и величины n в функции ползучести. При выборе $n = 0.25$ – 0.3 нельзя исключить наличие твердого ядра. Шагом вперед в этом вопросе может быть уменьшение ошибки измерений, что также позволит уточнить радиус ядра и содержание железа в мантии.

ПАРАМЕТРЫ РАВНОВЕСНОЙ ФИГУРЫ ВЕНЕРЫ

При построении равновесной фигуры уравнение стандартного сфероида (фигура планеты) ищется в виде (Жарков, Трубицын, 1980; Жарков, Гудкова, 2005)

$$r(s, \theta) = s \{ 1 + s_0(s) + s_2(s)P_2(t) + s_4(s)P_4(t) + \dots \}, \quad (4)$$

где s – средний радиус (радиус сферы эквивалентного объема), $P_2(t)$ и $P_4(t)$ – два первых четных полинома Лежандра, зависящих от четных степеней $t = \cos \theta$. Величина второго порядка $s_0(s)$ связана с $s_2(s)$ соотношением

$$-s_0 = \frac{1}{5} s_2^2. \quad (5)$$

Внешний гравитационный потенциал $V(r, t)$ равновесной планеты также содержит только четные гармоники

$$V(r, t) = \frac{GM}{r} \times \left\{ 1 - \left(\frac{R_e}{r} \right)^2 J_2^0 P_2(t) - \left(\frac{R_e}{r} \right)^4 J_4^0 P_4(t) - \dots \right\}, \quad (6)$$

где r – расстояние от центра планеты, R_e – экваториальный радиус (нормирующий радиус в $V(r, t)$), M – масса планеты и G – гравитационная постоянная.

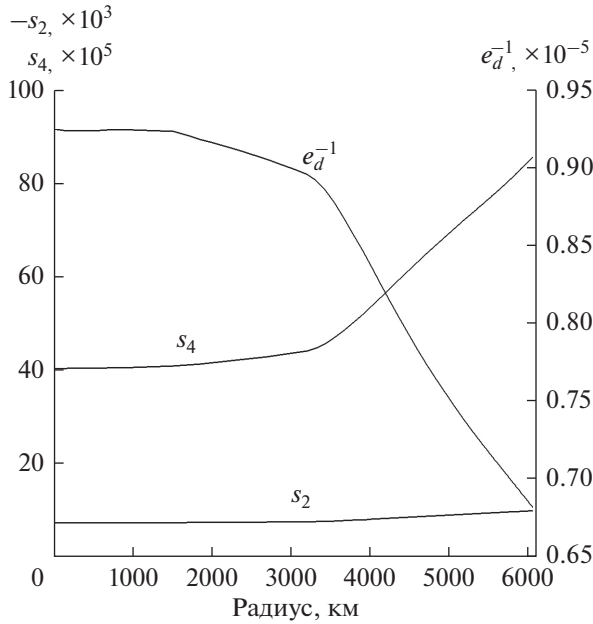


Рис. 3. Функции s_2 , s_4 и e_d^{-1} в зависимости от среднего радиуса планеты s .

Теория фигуры строится последовательными приближениями. Малым параметром теории фигуры является безразмерный квадрат угловой скорости вращения планеты:

$$m = \frac{\omega^2 R^3}{GM} = \frac{3\pi}{G\rho_0\tau^2}, \quad (7)$$

где ω , τ и ρ_0 — угловая скорость, период вращения и средняя плотность планеты, соответственно.

В теории фигуры первого приближения в формуле (4) удерживается функция $s_2(s)$, а в (6) момент J_2^0 , которые являются малыми величинами порядка m . В этом случае урвненными поверхностями являются эллипсоиды вращения. В теории фигуры второго приближения — теории Дарвина—Де Ситтера — в (4) сохраняется следующая функция $s_4(s)$, а в (6) момент J_4^0 , а урвненные поверхности во втором приближении отклоняются от эллипсоидов вращения, обе функции $s_4(s)$ и J_4^0 порядка m^2 .

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. Молодая Венера в раннюю эпоху вращалась намного быстрее, с периодом ~ 10 ч (Жарков, Трубицын, 1980). В работе (Жарков, Гудкова, 2019) для эффективно равновесной Венеры отношение J_2/m было принято

равным 0.3 (т.е. примерно такое же, как для Земли) и отмечено, что в результате остывания недр Венеры стали слишком твердыми (или очень вязкими), фигура планеты “зафиксировалась”, какой была в отдаленную эпоху, и поэтому не соответствует современному значению угловой скорости вращения планеты. Применяя отношение $J_2/m = 0.312$ для эффективно равновесной Венеры, для величины малого параметра m получим значение 0.15×10^{-6} . Это значение сохранилось от эпохи, когда была зафиксирована равновесная фигура планеты, палеопериод вращения Венеры в то время составлял ≈ 15.7 дней. Для дальнейших вычислений значение малого параметра взято для эффективно равновесной Венеры.

Для модельного распределением плотности $\rho(s)$ уравнения теории фигуры второго приближения позволяют рассчитать параметры фигуры $s_2(R) = s_2^0$ и $s_4(R) = s_4^0$. Алгебраические соотношения связывают параметры теории фигуры с гравитационными моментами (Жарков, Трубицын, 1980)

$$\begin{aligned} -J_2^0 &= s_2^0 + \frac{m}{3} + \frac{1}{7}(1s_2^0 + m)s_2^0, \\ -J_4^0 &= s_4^0 + \frac{6}{7}\left(\frac{6}{5}s_2^0 + m\right)s_2^0. \end{aligned} \quad (8)$$

Динамическое сжатие равновесной планеты e_d^0 — сжатие внешней урвненной поверхности при $s = R$ — с точностью до членов m^2 равно

$$e_d^0 = \frac{1}{2}(3J_2^0 + m)\left(1 + \frac{3}{2}J_2^0\right) + \frac{5}{8}J_4^0. \quad (9)$$

Функции s_2 , s_4 , e_d^{-1} в зависимости от среднего радиуса планеты показаны на рис. 3.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Имеющиеся данные наблюдений не накладывают жестких ограничений на толщину коры и радиус ядра Венеры. После первых российских успешных полетов к Венере (Венера-9, -10, -15, -16) были построены землеподобные модели Венеры, ряд особенностей которых сохраняется и в современных моделях.

В работе рассмотрены модели с широким диапазоном размера ядра, толщины коры и плотности мантии. Показано, что для отбора моделей по числу Лява k_2 необходимо учитывать эффекты неупругости. Проведенные оценки показали, что неупругость мантии Венеры увеличивает k_2 более чем на 10%. Определяемое из наблюдений число k_2 для солнечного прилива на Венере, период которого составляет 58.4 дня, должно быть умень-

шено по крайней мере на 0.02–0.03, что пока находится в пределах ошибки измерений числа k_2 .

Недра Венеры близки к сферической симметрии. Соответственно используются сферически симметричные модели Венеры. Для значения малого параметра землеподобной модели Венеры предложено принять значение малого параметра эффективно равновесной планеты. В работе также рассчитаны параметры равновесной фигуры Венеры: для выбранной пробной модели $V_5 J_2^0 = 4.77 \times 10^{-6}$, $J_4^0 = -5.79 \times 10^{-11}$, $e_d^{-1} = 0.9 \times 10^{-6}$ (динамическое сжатие).

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Акопян С.Ц., Жарков В.Н., Любимов В.М. Теория затухания крутильных колебаний Земли // Изв. АН СССР. Физика Земли. 1977. Т. 8. С. 15–24.
- Жарков В.Н., Засурский И.Я. Физическая модель Венеры // Астрон. вестн. 1982. Т. 16. С. 18–28. (Zharkov V.N., Zasurskii I.Ya. A physical model of Venus // Sol. Syst. Res. 1982. V. 16. P. 14–22.)
- Жарков В.Н. Физика земных недр. М.: ООО Наука и образование, 2012. 386 с.
- Жарков В.Н., Гудкова Т.В. Построение модели внутреннего строения Марса // Астрон. вестн. 2005. Т. 39. № 5. С. 1–32. (Zharkov V.N., Gudkova T.V. Construction of Martian Interior Model // Sol. Syst. Res. 2005. V. 39. № 5. P. 343–373).
- Жарков В.Н., Гудкова Т.В. О параметрах землеподобной модели Венеры // Астрон. вестн. 2019. Т. 53. № 1. С. 3–6. (Zharkov V.N., Gudkova T.V. On Parameters of the Earth-like model of Venus // Sol. Syst. Res. 2019. V. 53. № 1. P. 1–4.)
- Жарков В.Н., Гудкова Т.В., Батов А.В. Об оценке диссипативного фактора недр Марса // Астрон. вестн. 2017. Т. 51. № 6. С. 479–490. (Zharkov V.N., Gudkova T.V., Batov A.V. On estimating the dissipative factor of the Martian Interior // Sol. Syst. Res. 2017. V. 51. № 6. P. 512–523.)
- Жарков В.Н., Трубицин В.П. Физика планетных недр. М.: Наука, 1980. 448 с.
- 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.)
- Молоденский С.М., Жарков В.Н. О чандлеровском колебании и частотной зависимости Q_{μ} мантии Земли // Изв. АН СССР. Физика Земли. 1982. № 4. С. 3–16.
- Aitta A. Venus' internal structure, temperature and core composition // Icarus. 2012. V. 218. P. 967–974.
- Anderson D.L., Minster J.B. The frequency dependence of Q in the Earth and implications for mantle rheology and Chandler wobble // Geophys. J. Roy. Astron. Soc. 1979. V. 58. P. 431–440.
- 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. <https://doi.org/10.1029/2012JE004231>
- Breuer D., Moore W.B. Dynamics and thermal history of the terrestrial planets, the Moon and Io / Ed. Spohn T. Treatise on geophysics. Planets and Moons. 2007. V. 10. P. 299–348.
- 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. <https://doi.org/10.1002/2016JE005249>
- Dziewonski A.M., Anderson D.L. Preliminary reference Earth model // Phys. Earth and Planet. Inter. 1981. V. 25. P. 297–356.
- Dziewonski A.M., Hales A.L., Lapwond E.R. Parametrically simple Earth models consistent with geophysical data // Phys. Earth and Planet. Inter. 1975. V. 10. P. 12–48.
- Ghail R.C., Hall D., Mason P.J., Herrick R.R., Carter L.M., Williams Ed. VenSAR on EnVision: Taking Earth observation radar to Venus // Inter. J. Appl. Earth Observation and Geoinformation. 2018. V. 64. P. 365–376.
- Grimm R.E., Hess P.C. The crust of Venus // Venus II. Geology, geophysics, atmosphere, and solar wind environment / Eds Bougler S.W., Hunten D.M., Philipps R.J. Tucson: Univ. of Arizona Press, 1997. P. 1163–1204.
- Jimenez-Diaz A., Ruiz J., Kirby J.F., Romeo I., Tejero R., Capote R. Lithospheric structure of Venus from gravity and topography // Icarus. 2005. V. 260. P. 215–231.
- Karimi S., Dombard A.J. Studying lower crustal flow beneath Mead basin: Implications for the thermal history and rheology of Venus // Icarus. 2017. V. 282. P. 34–39.
- Konopliv A.S., Yoder C.F. Venusian k_2 tidal Love number from Magellan and PVO tracking data // Geophys. Res. Lett. 1996. V. 23. P. 1857–1860.
- Lawrence J.F., Wysession M.E. QLM9: A new radial quality factor (Q_{μ}) model for the lower mantle // Earth and Planet. Sci. Lett. 2006. V. 241. P. 962–971.
- Li F., Yan J., Xu L., Jin S., Rodriguez A.P., Dohm J.H. A 10 km-resolution synthetic Venus gravity field model based on topography // Icarus. 2015. V. 247. P. 103–111.
- Mocquet A., Rosenblatt P., Dehant V., Verhoeven O. The deep interior of Venus, Mars, and the Earth: A brief review and the need for planetary surface-based Measurements // Planet. and Space Sci. 2011. V. 59. P. 1048–1061.
- O'Rourke J.G., Korenaga J. Thermal evolution of Venus with argon degassing // Icarus. 2015. V. 260. P. 128–140.
- Smith M.L., Dahlen F.A. The period and Q of the Chandler wobble // Geophys. J. Roy. Astron. Soc. 1981. V. 64. P. 223–284.
- Smrekar S.E., Hensley S., Dyar M.D., Helbert J. VERITAS (Venus Emissivity, radio Science, InSAR, topography

- and Spectroscopy): a proposed discovery mission // Lunar and Planet. Sci. Conf. 2016. V. 47. P. 2439.
- 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.
- Wieczorek M.A.* Gravity and topography of the terrestrial planets / Ed. Spohn T. // *Treatise on geophysics. Planets and Moons*. 2007. V. 10. P. 105–206.
- Yang A., Huang J., Wei D.* Separation of dynamic and isotatic components of The Venusian gravity and topography and determination of the crustal thickness of Venus // *Planet. and Space. Sci.* 2016. V. 129. P. 24–31.
- Yoder C.* Venus's free obliquity // *Icarus*. 1995. V. 117. P. 250–286.
- Zharkov V.N.* Model of the interior structure: Earth-like models / Eds Barsukov V.L., Basilevsky A.T., Volkov V.P., Zharkov V.N. // *Venus geology, geochemistry and geophysics research results from the USSR*. Univ. Arizona Press, 1992. P. 233–240.
- Zharkov V.* Models of the internal structure of Venus // *The Moon and Planets*. 1983. V. 29. P. 139–175.
- Zharkov V.N., Kozlovskaya S.V., Zasurskii 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.
- Zharkov V.N., Molodensky S.M.* Corrections to love numbers and Chandler period for anelastic Earth's models // *Phys. Solid Earth*. 1979. V. 6. P. 88–89.