

ОЦЕНКИ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ НЕДР ВЕНЕРЫ¹**Гудкова Т.В.***Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, Москва, Россия*
gudkova@ifz.ru**Батов А.В.***Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, Москва, Россия*
Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, Москва, Россия
batov@ipu.ru

Аннотация. Проведена оценка негидростатических напряжений в недрах Венеры для различных моделей неоднородной упругости: упругой модели и модели с литосферой. Граничными условиями задачи служат данные топографии и гравитационного поля планеты. Численное моделирование системы уравнений упругого равновесия гравитирующей планеты проведено с шагом 1×1 градус по широте и долготе до глубины 480 км.

Ключевые слова: Венера, моделирование, напряжение, топография, гравитационное поле.

Введение

Венера является неравновесной планетой и деформации, вызванные отклонением от состояния гидростатического равновесия, могут приводить к существенным касательным напряжениям в ее недрах. Оценки напряженного состояния в недрах Венеры были выполнены в работах [Жарков и др., 1986; Жарков, Марченков, 1987; Марченков, Жарков, 1989] с использованием разложения данных гравитационного поля и топографии по сферическим функциям до 18 гармоники. Данные о гравитационном поле Венеры [Konopliv et al., 1999] и топографии [Rapaport et al., 1999] позволяют рассмотреть этот вопрос с большей детальностью.

На Марсе оценки негидростатических напряжений показали хорошую корреляцию зон напряжений растяжения и достаточно больших касательных напряжений с расположением очагов марсотрясений. О сейсмической активности Венеры и местоположении потенциальных сейсмических источников имеется мало данных. Исследование зон возможной сейсмической активности на Венере представляет несомненный интерес в связи с планируемыми сейсмическими экспериментами на планете. Для предстоящих сейсмических экспериментов на Венере важно знать, в каких областях напряжения достаточно велики и способны вызвать сотрясения. В настоящей работе мы рассчитываем поле негидростатических напряжений в недрах Венеры с помощью статического метода, с шагом 1×1 градус по широте и долготе до глубины 480 км. Для этого используются упрощенные модели неоднородной упругости планеты: 1) упругая модель, и 2) модель с упругой литосферой варьируемой толщины (150–500 км), расположенной на ослабленном слое, который частично потерял свои упругие свойства.

1. Метод моделирования напряженного состояния недр планеты

Задача интерпретации неравновесной части гравитационного поля планеты имеет точное решение для конкретной модели распределения упругих параметров: нахождение функции Грина для аномальных волн, расположенных на некоторых глубинах. Для оценки негидростатических напряжений планета рассматривается как упругое сферически-симметричное тело, находящееся под воздействием как поверхностной (рельеф на поверхности планеты), так и внутренней (заглубленные аномалии плотности) нагрузки. Статический подход (метод нагрузочных коэффициентов), учитывающий деформацию планеты под воздействием нагрузки, был разработан и применен для исследования напряженного состояния недр Венеры в работах [Марченков и др., 1984; Жарков и др., 1986; Жарков, Марченков, 1987; Марченков, Жарков, 1989]. Здесь мы предполагаем, что имеется два уровня залегания нагрузок (аномальных масс) – на поверхности $r = R$, и границе кора-мантия $r = R_1 = R - l$, где l – толщина коры (двухуровневая модель компенсации) (Рис. 1). Амплитуды нагрузок $R_{inm}^1(\varphi, \lambda)$ и $R_{inm}^2(\varphi, \lambda)$ (где φ – широта и λ – долгота) выбираются таким образом, чтобы удовлетворить данным топографии и гравитационного поля планеты, взятым по отношению к равновесной поверхности планеты.

¹ Работа выполнена за счет гранта Российского научного фонда № 23-22-00074, <https://rscf.ru/project/23-22-00074/>

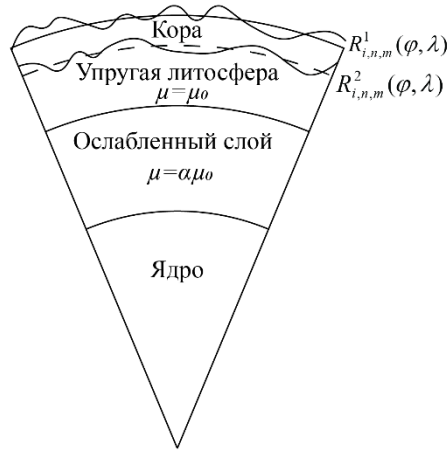


Рис. 1. Модель нагрузки на поверхности и границе кора-мантия, и модели неоднородной упругости: 1) упругая модель $\alpha = 1.0$, 2) модель с литосферой, расположенной на ослабленном слое, который частично потерял свои упругие свойства, простирающимся до ядра $\alpha = 0.1$. Обозначения: $R_{inm}^1(\varphi, \lambda)$, $R_{inm}^2(\varphi, \lambda)$ – амплитуды нагрузок степени n на поверхности и границе кора-мантия, соответственно; φ и λ – широта и долгота

Коэффициенты разложения по сферическим функциям аномальных волн плотности на поверхности R и на границе кора-мантия R_1 , соответственно $R_{inm}^1(\varphi, \lambda)$ и $R_{inm}^2(\varphi, \lambda)$, связаны с коэффициентами разложения аномального гравитационного поля C_{ginm} и топографии C_{tinm} следующим соотношением [Жарков и др., 1991]:

$$C_{ginm} = \frac{R_{inm}^1}{R\rho_0} \frac{3(1+k_n(R))}{(2n+1)} + \frac{R_{inm}^2}{R\rho_0} \frac{3(1+k_n(R_1))}{(2n+1)} \left(\frac{R_1}{R}\right)^{n+2} \quad (1)$$

$$C_{tinm} = \frac{R_{inm}^1}{R\rho_c} + \frac{R_{inm}^1}{R\rho_0} \frac{3h_n(R)}{(2n+1)} + \frac{R_{inm}^2}{R\rho_0} \frac{3h_n(R_1)}{(2n+1)} \left(\frac{R_1}{R}\right)^{n+2} \quad (2)$$

В формуле (2) ρ_0 – средняя плотность, ρ_c – плотность на границе кора-мантия. Первое слагаемое представляет вклад от нагрузки на поверхности, а два других определяют деформацию под действием нагрузки на поверхности и на границе кора-мантия, соответственно. Нагрузочные числа $k_n(r)$, $h_n(r)$ рассчитываются для модельного распределения плотности и упругих параметров (модуля сжатия K и модуля сдвига μ) в недрах планеты. Коэффициенты $R_{inm}^1(\varphi, \lambda)$ и $R_{inm}^2(\varphi, \lambda)$, которые служат граничными условиями при решении системы уравнений, подбираются так, чтобы получить наблюдаемое значение гравитационного поля C_{ginm} и топографии C_{tinm} , представленным в виде разложения в ряд по сферическим функциям. Мы учитываем лишь неравновесные компоненты топографии и гравитационного поля, вычитая из измеренных (наблюдаемых) величин C_{ginm} и C_{tinm} их модельные значения для гидростатически равновесной планеты.

Система уравнений, определяющая задачу, включает в себя: уравнение равновесия деформированного (упругого тела) при наличии объемных сил, уравнение Пуассона, реологическое уравнение, дающее соотношение между напряжением и деформациями (закон Гука для идеально упругой и изотропной среды). Решение системы определяет поле смещения для каждого значения степени гармоник n и заданной глубины, затем ряды гармоник суммируются. В каждой точке (r, φ, λ) симметричный полный тензор напряжений σ_{ik} приводится к диагональной форме путем преобразования координат, и определяются соответствующие главные напряжения σ_1 , σ_2 и σ_3 ($\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3$), которые раскладываются на напряжения всестороннего сжатия $\sigma = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{3}$ и сдвиговые (или касательные) напряжения. Под напряжениями растяжения-сжатия понимаются напряжения всестороннего сжатия (отрицательные значения соответствуют сжимающим напряжениям, положительные – растягивающим). Максимальные напряжения сдвига (или касательные) представляют собой наибольшую из полуразностей главных напряжений $\tau = \max |\sigma_i - \sigma_k| / 2$, ($i, k = 1, 2, 3; i \neq k$). Метод решения задачи моделирования негидростатических напряжений статическим методом был подробно описан в Приложении работы [Батов и др., 2019].

2. Анализ негидростатических напряжений

В настоящее время для Венеры разложение данных гравитационного поля по полиномам Лежандра известно до 180-й степени и порядка (модель SHGJ180u) [Konopliv et al., 1999]), данные о топографии до 360-ой степени и порядка (модель SHTJV360u) [Rapaport et al., 1999]). Эти модели, представленные в виде рядов полностью нормализованных коэффициентов, можно найти на сайте Системы Планетных данных (<http://pds-geosciences.wustl.edu>). В данной работе используются коэффициенты этих моделей, взятые до 70-ой степени и порядка, так как корреляция между гравитационным полем и топографией резко убывает для более высоких гармоник [Менщикова и др., 2021]. На Рис. 2 представлена топографическая карта Венеры с обозначением основных структур.

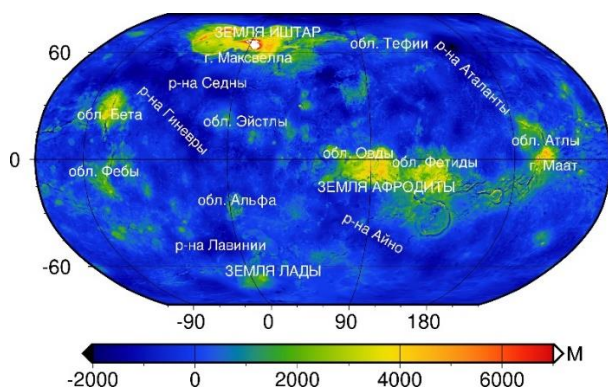


Рис. 2. Топографическая карта Венеры (в метрах). Нулевое значение соответствует среднему радиусу планеты. За центр проекции выбран меридиан 60°

Для получения значений негидростатических напряжений, возникающих вследствие отклонения планеты от состояния гидростатического равновесия, а Венера является сильно неравновесной планетой, топография и гравитационное поле Венеры определяются по отношению к референсной поверхности, за которую выбирается поверхность эффективно равновесной Венеры [Жарков, Гудкова, 2019]. Фигура этой поверхности получена в предположении, что Венера землеподобна и форма равновесной планеты «зафиксировалась», какой была в отдаленную эпоху

Ответ планеты на приложенную нагрузку зависит от реологических свойств недр планеты, которые для Венеры не определены. Оценки напряженного состояния недр Венеры проводятся для двух вариантов идеализированных моделей неоднородной упругости (Рис. 1), которые позволяют оценить порядок величины напряжений в планете: 1) упругая модель, 2) модель с упругой литосферой варьируемой толщины (150–500 км), расположенной на ослабленном слое, который частично потерял свои упругие свойства. Наличие под литосферой ослабленного слоя, который частично потерял свои жесткостные свойства, моделируется понижением в десять раз значения модуля сдвига μ в слое под литосферой, который считается простирающимся до ядра.

Моделирование негидростатических напряжений растяжения-сжатия и сдвиговых напряжений выполняется для тестовых моделей внутреннего строения Венеры V_16 и V_5 из работы [Гудкова, Жарков, 2020], которые удовлетворяют всем имеющимся на сегодняшний день данным наблюдений для Венеры. Средняя толщина коры моделей составляет 30 и 70 км, средняя плотность коры равна 2900 кг/м³.

В целом, уровень негидростатических напряжений на Венере не слишком высок (Рис. 3 и 4). Этот результат согласуется со значениями, полученными в [Жарков и др., 1986; Марченков, Жарков, 1989], где расчеты проводились используя данные гравитационного поля и топографии до 18-й степени (точность гравитационного поля на тот момент).

На рисунке 3 показаны карты напряжений растяжения-сжатия и сдвига в коре и мантии для модели с толщиной коры 30 км для чисто упругой модели. Как и ожидалось, на поверхности планеты и в коре наибольшие касательные напряжения проявляются в районе гор Максвелла на Земле Иштар. Под горами Максвелла напряжения сдвига в коре достигают 80 МПа, значения сжатия достигают значений 120 МПа, в то время как напряжения растяжения вокруг этой области составляют около 20 МПа. Наибольшие напряжения растяжения приходятся на области под такими структурами, как равнина Атланы, равнина Гиневры, равнина Седны, равнина Снегурочки, равнина Леды, равнина Ниобы.

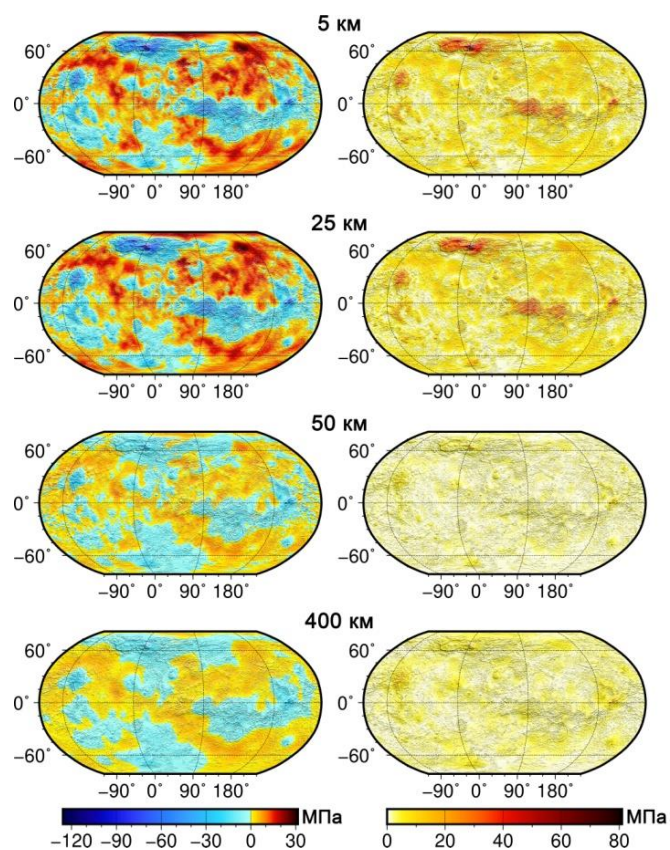


Рис. 3. Напряжения растяжения-сжатия (слева) и напряжения сдвига (справа) (в МПа) в коре на глубинах 5 и 25 км и в мантии на глубинах 50 и 400 км для упругой модели V_{16} из работы [Гудкова, Жарков, 2020]

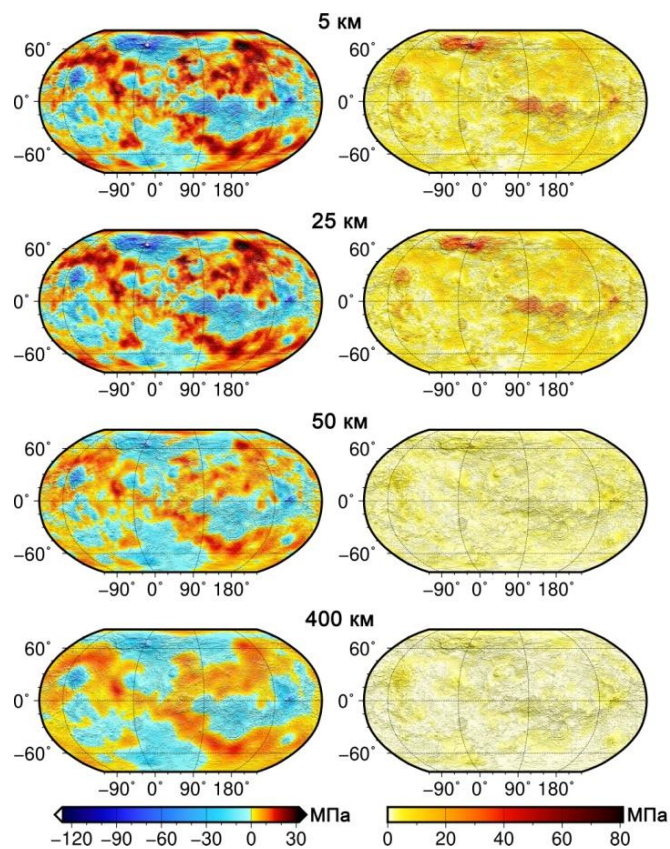


Рис. 4. Напряжения растяжения-сжатия (слева) и напряжения сдвига (справа) (в МПа) в коре на глубинах 5 и 25 км и в мантии на глубинах 50 и 400 км для модели с литосферой 300 км для модели V_{16} из работы [Гудкова, Жарков, 2020]

Уровень напряжений в литосфере зависит от выбора модели неоднородной упругости. Напряжения сжатия-растяжения и сдвига для модели с литосферой (Рис. 4) существенно выше, чем для однородной по упругим свойствам модели (Рис. 3). Нет существенной разницы в характере напряжений, полученных для модели с толщиной коры 30 и 70 км.

3. Заключение

Промоделированы негидростатические напряжения, возникающие из-за отклонения планеты от состояния гидростатического равновесия, используя идеализированные модели реологического строения Венеры. Это позволило оценить порядок величины напряжений растяжения-сжатия и касательных напряжений. Как и ожидалось, уровень негидростатических напряжений на Венере не очень высок. Мы получили поле напряжений на поверхности и в недрах Венеры для чисто упругой модели и модели с литосферой от 100 до 500 км, опираясь на данные гравитационного поля и топографии в рамках статического метода.

Представленные расчеты представляют интерес для выбора места установки сейсмометра и интерпретации сейсмических данных, в связи с планируемыми сейсмическими экспериментами на Венере.

Литература

1. *Жарков В.Н., Марченков К.И., Любимов В.М.* О длинноволновых касательных напряжениях в литосфере и мантии Венеры // *Астрономический вестник*. 1986. Т. 20. № 3. С. 202-211.
2. *Жарков В.Н., Марченков К.И.* О корреляции касательных напряжений в литосфере Венеры с поверхностными структурами // *Астрономический вестник*. 1987. Т. 21. № 2. С. 170-175.
3. *Марченков К.И., Жарков В.Н.* О рельефе границы кора-мантия и напряжениях растяжения-сжатия в коре Венеры // *Письма в астрономический журнал*. 1989. Т. 15. № 2. С. 182-190.
4. *Konopliv A. S., Banerdt W. B., Sjogren W. L.* Venus gravity: 180th degree and order model // *Icarus*. 1999. V. 139. P. 3–18. doi:10.1006/icar.1999.6086.
5. *Rappaport N. J., Konopliv A. S., Kucinskas A. B.* An improved 360 degree and order model of Venus topography // *Icarus*. 1999. V. 139. P. 19–31.
6. *Марченков К.И., Любимов В.М., Жарков В.Н.* Расчет нагрузочных коэффициентов для заглубленных аномалий плотности // *Доклады АН СССР*. 1984. Т. 15. № 2. С. 583-586.
7. *Батов А.В., Гудкова Т.В., Жарков В.Н.* Негидростатические напряжения в недрах Марса для различных моделей неоднородной упругости // *Физика Земли*. 2019. № 4. С. 166-180.
8. *Менщикова Т.И., Гудкова Т.В., Жарков В.Н.* Анализ данных топографии и гравитационного поля землеподобной Венеры // *Астрономический вестник*. 2021. Т. 55. № 1. С. 13-21.
9. *Жарков В.Н., Гудкова Т.В.* О параметрах землеподобной модели Венеры // *Астрономический Вестник*. 2019. Т. 53. № 1. С. 3-6.
10. *Гудкова Т.В., Жарков В.Н.* Модели внутреннего строения землеподобной Венеры // *Астрономический вестник*. 2020. Т. 54. № 1. С. 24-32.