

ОТБОР МОДЕЛЕЙ ВНУТРЕННЕГО СТРОЕНИЯ МАРСА ПО ЧАНДЛЕРОВСКОМУ ПЕРИОДУ¹

Кулик Е.А., Гудкова Т.В.

Институт физики Земли им. О. Ю. Шмидта РАН, Москва, Россия

kulik.ea@ifz.ru, gudkova@ifz.ru

Аннотация. Выполнено численное моделирование периода чандлеровского колебания Марса для ряда моделей внутреннего строения. Модели удовлетворяют моменту инерции, приливному числу Лява k_2 и данным, полученным в ходе сейсмического эксперимента в 2019-2022 гг. Для учета вязкоупругого поведения недр использована реологическая модель Андраде.

Ключевые слова: численное моделирование, Марс, период чандлеровского колебания, реология Андраде.

Введение

Для отбора моделей внутреннего строения планеты при численном моделировании ее недр используются данные, полученные космическими миссиями. Обычно это момент инерции и приливное число Лява, которые для Марса имеют следующие значения: $I = 0.3640 \pm 0.0006$, $k_2 = 0.174 \pm 0.008$ [1]. Для Марса мы имеем дополнительно сейсмические данные, и в данном исследовании, используем значения толщины коры и радиуса ядра (см. Таблица 1). Толщина коры и радиус ядра Марса - результат обработки данных, полученных по результатам регистрации сейсмических событий в течение 4 лет. Довольно долго предпринимались попытки зарегистрировать чандлеровское колебание (ЧК) Марса, которое могло бы быть дополнительным ограничением на модели внутреннего строения, точнее служить ограничением на распределение упругих параметров в недрах. Подробно об определении ЧК Марса можно узнать в [2, 3]. С достаточно хорошей точностью период этого колебания (206.9 ± 0.5 дня) на Марсе был измерен впервые в 2020 году. Для его определения были использованы данные радионаблюдений спутников [1].

В работе предпринята попытка моделирования внутреннего строения Марса, для получения моделей, удовлетворяющих как наблюдаемым данным геодезии (среднему радиусу, массе, моменту инерции, приливному числу Лява k_2); значениям толщины коры и радиуса ядра, определенным по данным широкополосного сейсмометра, а также периоду чандлеровского колебания планеты.

1. Данные наблюдений

До успешного сейсмического эксперимента миссии InSight (НАСА, 2019-2022 гг.) модели внутреннего строения Марса опирались на обычно используемые геодезические величины: масса, средний радиус, момент инерции и число Лява k_2 (Таблица 1). В работе [1] опубликованы уточненные данные по моменту инерции ($I = 0.3640 \pm 0.0006$) и числу Лява k_2 ($k_2 = 0.174 \pm 0.008$). Сейсмический эксперимент на Марсе дал нам значение толщины коры под посадочным модулем. Объединив данные гравитационного поля и топографии с результатами, полученными из сейсмологии Марса, ученые определили, что средняя толщина коры Марса варьируется от 32 до 70 км, а средняя плотность менее 3100 кг/м^3 [4]. Кроме этого найдено, что радиус ядра [5] составляет 1830 ± 40 км, и совсем недавно эта оценка была пересмотрена [6]. На данный момент, можно сказать, что над металлическим ядром Марса, имеется расплавленный силикатный слой, а его металлическое ядро на 150-170 км меньше (радиус 1650 ± 20 км) и, соответственно, плотнее на 5-8% (6500 кг/м^3).

¹Грант РФФ № 23-22-00074, <https://rscf.ru/project/23-22-00074>
Внутреннее строение и физика недр Венеры

Таблица 1. Данные наблюдений для Марса, используемые в работе

Название		Значение	Источник
Масса		$M = 6.4185 \times 10^{23}$ кг	[1]
Средний радиус		$R = 3389.92$ км	
Нормализованный момент инерции		$I/(MR^2) = 0.3640 \pm 0.0006$	
Число Лява		$k_2 = 0.174 \pm 0.008$	
Кора	толщина	$l_{crust} = 24-70$ км	[4]
	плотность	$\rho_{crust} = 2700-3100$ кг/м ³	
Радиус ядра		$r_{core} = 1830 \pm 40$ км	[5, 6]
		$r_{core} = 1650 \pm 20$ км	

2. Построение модели внутреннего строения Марса

Численное моделирование проводилось на основе метода, подробно изложенного в [7]. Железистое число мантии $Fe\#$ ($Fe\# = Fe^{2+}/(Fe^{2+}+Mg) \times 100$) (принимается пределы 18-25), плотность и радиус ядра, плотность коры выбираются варьируемыми параметрами численного эксперимента. Рисунок 1 представляет процесс отбора моделей. Точки на рис. 1 соответствуют рассчитанным моделям. Границы предельных значений среднего нормированного момента инерции I/MR^2 и числа Лява k_2 показаны толстыми линиями, а линии, на которых средние значения плотности коры и ядра соответствуют одинаковым значениям – тонкими, при этом отмечены эти значения. Как можно заметить, железистое число $Fe\# = 25$ плохо подходит для мантийного состава, потому что выбранные по моменту инерции I и числу Лява k_2 модели не проходят по плотности коры, она получается ниже допустимых значений ($\rho_{кора} = 2000-2300$ кг/м³). На наш взгляд, наиболее вероятными можно считать модели с железистым числом $Fe\# = 20$ и $Fe\# = 18$, для этих моделей выполняются все заданные условия по имеющимся данным наблюдений.

Ниже проведено численное моделирование значений чандлеровского периода Марса, для наложения дополнительных ограничений на модели внутреннего строения.

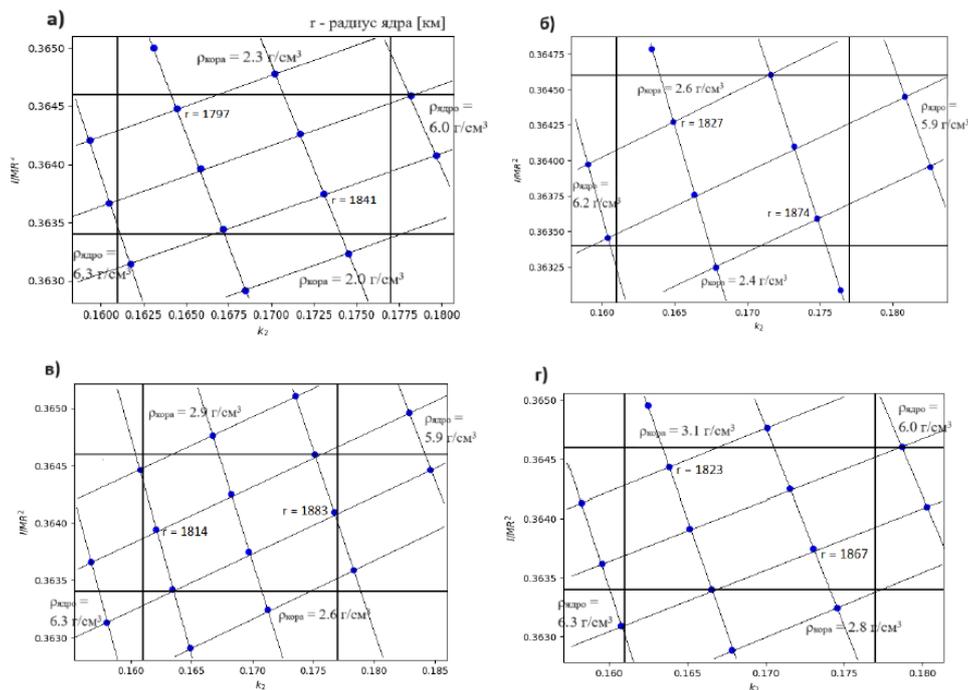


Рис. 1. Процесс выбора моделей внутреннего строения Марса (поправка за неупругость для числа Лява k_2 принята равной 0.005). Модельные значения числа Лява и момента инерции для моделей с различным радиусом ядра, плотностью коры и железистому составу мантии: $Fe\# = 25$ (а), 22 (б), 20 (в), 18 (г). Ось X – число Лява k_2 , ось Y – момент инерции. Горизонтальные и вертикальные сплошные линии соответствуют максимальным и минимальным наблюдаемым значениям среднего момента инерции и числа Лява k_2 , соответственно. Тонкие линии отмечают области с одинаковыми значениями плотности коры и ядра

3. Расчет чандлеровского периода

Для упругой трехосной планеты с жидким ядром период ЧК задается формулой [8]

$$T_W = T_E \left(1 - \frac{(A_c B_c)^{1/2}}{(AB)^{1/2}}\right) / (1 - k_2/k_0), \quad (1)$$

где A и B – главные моменты инерции планеты, A_c и B_c – главные моменты инерции жидкого ядра, T_E – эйлеровский период (период твердого тела с осевой симметрией), k_2 – число Лява выбирается при частоте прилива (в данной работе, число Лява для неупругой модели определяется на частоте ЧК), k_0 – вековое число Лява, и его значение определяется как

$$k_0 = \frac{3G(C-A)}{R^5 \omega^2}, \quad (2)$$

где $R = 3389.5$ км - средний радиус планеты, $G = 6.67 \times 10^{-11}$ м³с⁻²кг⁻¹ - гравитационная постоянная, $\omega = 7.088191 \times 10^{-5}$ с⁻¹ - угловая скорость вращения планеты.

Реологическое поведение мантийных пород на приливных периодах, как известно, зависит от частоты. В настоящее время, существует общепринятое мнение, что для описания вязкоупругого поведения недр планет лучше всего подходит реология Андраде (см. обзор [9]).

В реологии Андраде, для описания вязкоупругого поведения тела, комплексный модуль сдвига μ равен $1/f$, где f - «комплексная податливость материала» [10]

$$f(\chi) = J[1 + (i\tau_M \chi)^{-\alpha} \Gamma(1 + \alpha)] - \frac{i}{\eta \chi}, \quad (3)$$

$J = 1/\mu$, $\tau_M = \eta/\mu$ – время Максвелла, χ – частота прилива, Γ – гамма-функция, α – параметр Андраде.

В задачах, учитывающих вязкоупругое поведение недр планеты, мы сталкиваемся с несколькими проблемами. Первое это выбор значения параметра Андраде α , поскольку его величина точно не определена, диапазон составляет 0.2–0.5 [10]. Второе – определение распределения вязкости в недрах планеты. В нашем случае, вязкость недр Марса также плохо известна. Поэтому мы вводим некоторое пробное распределение вязкости - многослойную модель с кусочно-постоянным распределением вязкости – и тестируем наши параметры при численном моделировании. В нашей пробной модели вязкости мы задаем вязкость коры – положим значение η_0 . Вязкость нижележащих мантийных слоев определяется через этот параметр: в верхнем слое (оливин-содержащий слой) вязкость вводится как $10^{-2}\eta_0$, в среднем слое (β -слой) $10^{-1}\eta_0$, в нижнем слое (γ -слой) - η_0 . Мы полагаем толщину слоя над границей ядро-мантия [16] (частично расплавленного слоя) равной 200 км, что соответствует опубликованным данным, и вязкость в этом неупругом слое принимаем равной 10^9 Па·с. Вязкость жидкого ядра равна нулю.

Результаты численного моделирования величин периода ЧК приведены в Таблице 2. Влияние тестируемых мантийных параметров (параметра Андраде и пробных значений вязкости) на модельные значения чандлеровского периода Марса показано на рис. 2. Видно, что неупругость мантии увеличивает период чандлеровского колебания. Как было отмечено выше, одной из неопределенностей при выполнении расчетов служат неточные параметры реологической модели. В публикациях по моделированию чандлеровского периода Марса, оценка параметра α находится в довольно широком диапазоне 0.07–0.35 и 0.09–0.35 (см. [1, 11]). Численное моделирование, проведенное в настоящей работе, указывает, что при выбранном распределении вязкости, значения параметра α для Марса ложатся в диапазон 0.3–0.5.

Численные расчеты позволили получить возможные значения вязкости в зависимости от принимаемого значения железистого числа в мантии Марса. Так для $Fe\# = 21$, значения вязкости составляют от $\eta_0 = 10^{18}$ Па·с и выше, для $Fe\# = 23$ - $\eta_0 = 10^{16.5}$ Па·с и выше. Для многих моделей с $Fe\# = 23$ и 25 чандлеровский период получился завышенным, кроме того, модели с $Fe\# = 25$, как отмечено выше, имеют низкую плотность коры. На основании проделанного численного моделирования можно сделать вывод, что наиболее правдоподобными моделями с учетом ограничения на чандлеровский период являются модели с $Fe\# = 21$.

Таблица 2. Численное моделирование периода чандлеровского колебания Марса для набора моделей внутреннего строения с железистым числом в мантии $Fe\# = 21$

Fe#	Радиус ядра, км	Период чандлеровского колебания T_w , сут				
		$\alpha = 0.1$	$\alpha = 0.2$	$\alpha = 0.3$	$\alpha = 0.4$	$\alpha = 0.5$
21	1654-1734	206.0-209.4	205.9-211.0	205.9-215.6	205.9-232.6	205.9-233.9

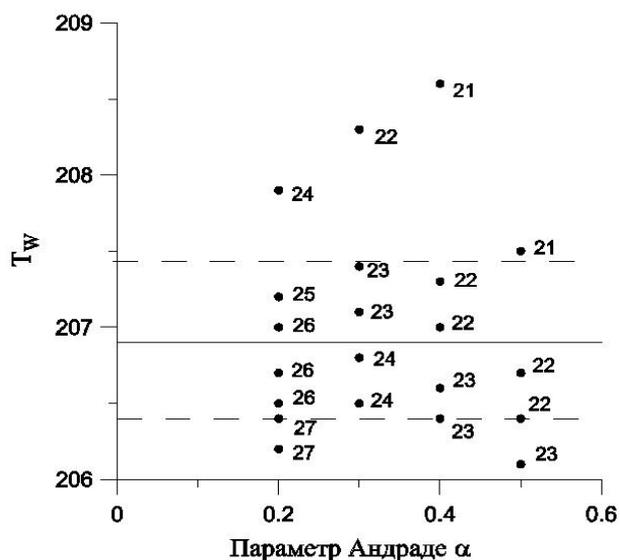


Рис. 2. Моделирование величины чандлеровского периода Марса для ряда моделей, отличающихся по профилю вязкости и значению параметра Андраде α . Цифры на рисунке показывают степень в параметре вязкости η_0

4. Заключение

В работе проведено численное моделирование величины чандлеровского колебания Марса для ряда выбранных моделей внутреннего строения. Для учета неупругого поведения мантии Марса использована однопараметрическая модель Андраде. При учете вязкоупругого поведения недр планеты имеются следующие проблемы: выбор значения параметра Андраде α и распределения вязкости в недрах планеты. В работе было введено пробное распределение вязкости - многослойная модель с кусочно-постоянным распределением вязкости – и эта модель была численно протестирована. Получены модельные значения чандлеровского периода Марса и проведено сравнение с наблюдаемым значением. Чандлеровский период это важный дополнительный параметр, и для дальнейшего продвижения в изучении реологических свойств мантии Марса на длинных периодах, следует использовать двухпараметрическую модель Андраде, а также варьировать минералогический состав мантии.

Литература

1. Konopliv A.S., Park R.S., Rivoldini A., Baland R.M., Le Maistre S., Van Hoolst, T., Yseboodt M., Dehant V. Detection of the chandler wobble of mars from orbiting spacecraft // *Geophys. Res. Lett.* 2020. V. 47. – P. e2020GL090568
2. Konopliv A. S., Yoder C. F., Standish E. M., Yuan D. N., Sjogren W. L. A global solution for the Mars static and seasonal gravity, Mars orientation, Phobos and Deimos masses, and Mars ephemeris // *Icarus.* 2006. V. 182. – P.23–50.
3. Konopliv A. S., Asmar S. W., Folkner W. M., Karatekin Ö., Nunes D. C., Smrekar S. E., Yoder C.F., Zuber M.T. Mars high resolution gravity fields from MRO, Mars seasonal gravity, and other dynamical parameters // *Icarus.* 2011. V. 211. – P. 401–428.
4. Wieczorek M.A., Broquet A., McLennan S.M. et al. InSight constraints on the global character of the Martian crust // *Journal of Geophysical Research: Planets.* 2022. V.127. – e2022JE007298.
5. Stähler S.C., Khan A., Banerdt W.B., et al. Seismic detection of the martian core // *Science.* 2021. V.373. – P. 443–448.
6. Samuel H., Drilleau M., Rivoldini A., et al. Geophysical evidence for an enriched molten silicate layer above Mars's core // *Nature.* 2023. V.622. – P.712-717.
7. Жарков В.Н., Гудкова Т.В. Построение модели внутреннего строения Марса // *Астрон. Вестник.* 2005. Т. 39 (5). – С.387-418.
8. Zharkov V.N., Gudkova T.V. The period and Q of the chandler wobble of Mars // *Planet. Space Sci.* 2009. V. 57. – P.288-295.
9. Bagheri A., Efroimsky M., Castillo-Rogez J., et al. Tidal insights into rocky and icy bodies: An introduction and overview // *Advances in Geophysics.* 2022. V. 63. Ch. 5. – P. 231-320.
10. Castillo-Rogez J.C., Efroimsky M., Lainey V. The tidal history of Japetus: Spin dynamics in the light of a refined dissipation model // *J. Geophys. Res: Planets.* 2011. V. 116. id. E9.

11. *Harada Y.* Reconsideration of the anelasticity parameters of the martian mantle: Preliminary estimates based on the latest geodetic parameters and seismic models // *Icarus*. 2022. V.383. – P. 114917.