

ОЦЕНКА НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ НЕДР МАРСА В РАЙОНЕ ОБЛАСТИ ПОСАДКИ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА МИССИИ INSIGHT

Батов А.В.¹, Гудкова Т.В.²

¹*Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН,
Россия, г. Москва, ул. Профсоюзная д.65*

²*Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН,
Россия, г. Москва, ул. Б. Грузинская д.10
batov@ipu.ru, gudkova@ifz.ru*

Аннотация: для тестовой модели Марса, удовлетворяющей всем имеющимся данным наблюдений рассчитано напряженное состояние недр Марса в районе области посадки космического аппарата миссии InSight. Моделирование напряженного состояния основано на статическом методе (методе нагрузочных чисел). Показано, что максимальные значения растягивающих и касательных напряжений достигаются в восточной части рассматриваемой области.

Ключевые слова: Марс, напряжения растяжения, напряжения сдвига, марсотрясение

Введение

26 ноября 2018 года была осуществлена посадка космического аппарата миссии InSight (Interior Exploration using Seismic Investigations Geodesy and Heat Transport) на поверхность Марса ([1]) в районе равнины Элизий. В связи с тем, что на поверхность Марса установлен только один сейсмометр, информация о напряженном состоянии недр Марса может помочь при определении местоположения очагов марсотрясений. Область посадки космического аппарата миссии InSight является важным районом для исследования.

1 Метод

1.1 Статический метод

Мы оцениваем только негидростатические напряжения, которые возникают вследствие отклонения Марса от состояния гидростатического равновесия. Для расчета напряженного состояния планеты использовался статический метод, при котором расчеты проводятся с помощью техники функций Грина (или методе нагрузочных чисел), развитый в работах ([2-5]). При статическом подходе планета моделируется как упругое тело с зависящими от радиуса плотностью, модулем сжатия K и модулем сдвига μ . Считается, что деформации и напряжения, подчиняющиеся закону Гука, обусловлены давлением на поверхность планеты топографических структур и аномалиями плотности, распределенными некоторым образом в коре и мантии. Для расчета напряжений решается система уравнений, в которую входят: уравнение упругого равновесия; уравнение Пуассона, связывающего аномальный гравитационный потенциал с распределением плотности. Метод функций Грина (или метод нагрузочных чисел) позволяет определить граничные условия на основании данных о высотах рельефа и гравитационном поле планеты. Подробное описание этого метода можно найти в работе (Gudkova et al., 2017).

1.2 Расчет напряжений

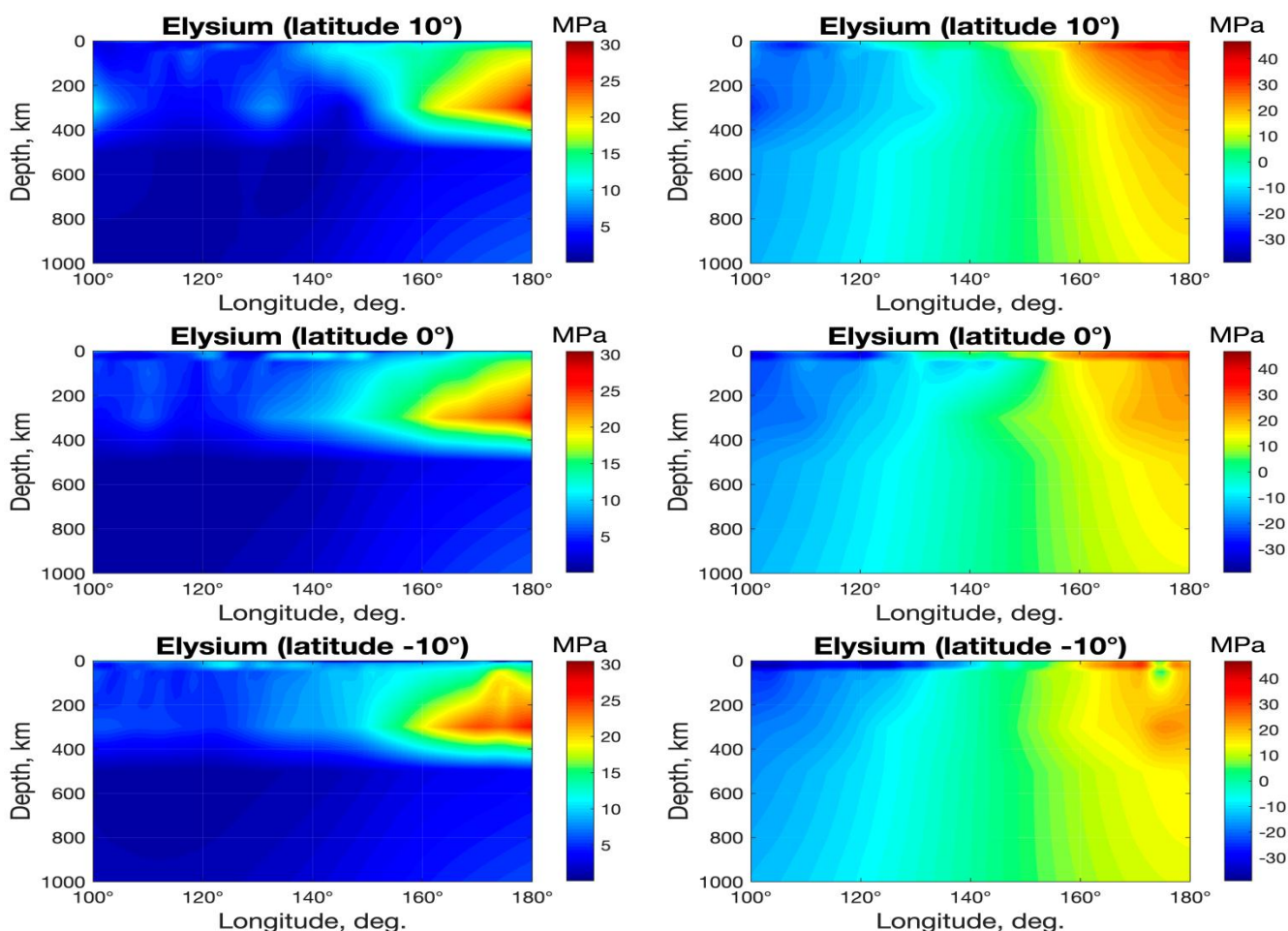


Рис. 1. Распределение напряжений под районом равнины Элизий: слева – напряжения сдвига, справа – напряжения растяжения-сжатия (в МПа), долгота от 100 до 180 градусов, широты 10, 0, -10 градусов, соответственно.

Для модельного распределения плотности и упругих параметров (модуля сжатия K и модуля сдвига μ) в недрах Марса, рассчитываются нагрузочные числа $k_n(r), h_n(r)$ и определяются коэффициенты, которые служат граничными условиями при решении системы уравнений упругого равновесия гравитирующей планеты для каждой гармоники n и m , до заданной степени и порядка. В данной работе используются коэффициенты разложения топографии и гравитационного поля до 90 степени и порядка, так как в работе [6] было показано, что корреляция данных гравитационного поля и топографии заметно ухудшается для более высоких гармоник.

В каждой точке (r, θ, φ) симметричный полный тензор напряжений σ_{ij} путем преобразования координат приводится далее к диагональному виду: получая соответствующие нормальные напряжения $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$. Главные напряжения $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ определяются как корни кубического уравнения $\sigma^3 - I_1\sigma^2 + I_2\sigma - I_3 = 0$, где I_1, I_2, I_3 — инварианты тензора напряжений. По найденным значениям главных напряжений $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ в каждой точке определяются напряжения растяжения-сжатия σ_i и сдвига τ_{ij} , а также максимальные сдвиговые (или касательные) напряжения $\tau = \max|\sigma_i - \sigma_k|/2$, ($i, k = 1, 2, 3$).

2 Результаты

Выполнены расчеты (с шагом сетки $1^\circ \times 1^\circ$ по широте и долготе до глубины 1000 км) напряжений растяжения-сжатия и максимальных напряжений сдвига для тестовой модели внутренней структуры Марса, которая удовлетворяет всем современным геофизическим и геохимическим данным. Распределение плотности, ускорение силы тяжести, модуль сжатия K и модуль сдвига μ взято согласно модели M_{50} с толщиной коры 50 км ([7]). Некоторые результаты расчетов напряжений под районом равнины Элизий, которая представляет особый интерес ввиду того, что в рамках миссии InSight в западной ее части установлен сейсмометр, представлены на рисунке 1. Как видно из рисунка, области максимальных растягивающих напряжений наряду с высокими сдвиговыми напряжениями расположены к востоку от места посадки космического аппарата и установки сейсмометра.

Литература

1. Banerdt, W.B., Smrekar, S., Hoffman, T., Spath, S., Lognonne, P., Spohn, T., et al. 2017. The InSight mission for 2018. 48th Lunar and Planetary Science Conference, The Woodlands, Texas.
2. Марченков К.И., Любимов В.М., Жарков В.Н. Расчет нагрузочных коэффициентов для заглубленных аномалий плотности // Докл. АН СССР. 1984. Т.15. № 2. С.583-586.
3. Жарков В.Н., Марченков К.И., Любимов В.М. О длинноволновых касательных напряжениях в литосфере и мантии Венеры // Астрон. вестн. 1986. Т.20. №3. С.202-211.
4. Жарков В.Н., Марченков К.И. О корреляции касательных напряжениях в литосфере Венеры с поверхностными структурами // Астрон. вестн. 1987. Т. 21. № 2. С.170-175.
5. Марченков К.И., Жарков В.Н. О рельефе границы кора-мантия и напряжениях растяжения – сжатия в коре Венеры // Письма в астрон. журн. 1989. Т.15. № 2. С.182-190.
6. Батов А.В., Гудкова Т.В., Жарков В.Н. Оценки напряженного состояния недр Марса под локальными топографическими структурами. Геофизические исследования. 2018. Т. 3. С. 5-22.
8. Гудкова Т.В., Батов А.В., Жарков В.Н. Модельные оценки негидростатических напряжений в коре и мантии Марса: 1. Двухуровневая модель // Астрон. вестн. 2017. Т. 51. № 6. С. 490-511.