

СЕКЦИЯ 13

МЕТОДОЛОГИЯ, МЕТОДЫ И ПРОГРАММНО-АЛГОРИТМИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ОБРАБОТКИ И ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО АНАЛИЗА БОЛЬШИХ МАССИВОВ ИНФОРМАЦИИ

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕНИЙ В НЕДРАХ МАРСА БЕЗ УЧЕТА ДЛИННОВОЛНОВОЙ КОМПОНЕНТЫ¹

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

Гудкова Т.В.

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

gudkova@ifz.ru

Аннотация. Проведено численное моделирование напряженного состояния в недрах Марса без учета длинноволновой компоненты. Модельные расчёты напряжённого состояния выполнялись на регулярной сетке с дискретизацией 1° по широте и долготе. Для задания граничных условий использовались разложения топографии и гравитационного потенциала Марса по сферическим функциям, начиная с гармоник 7-го порядка. Продемонстрирована корреляция расположения большинства эпицентров марсотрясений с зонами растяжений и большими касательными напряжениями.

Ключевые слова: численное моделирование, напряженное состояние, Марс, топография, гравитационное поле.

Введение

За почти 4 года работы (с февраля 2019 по декабрь 2022) широкополосный сейсмометр, развернутый в северных низменностях, вблизи границы дихотомии между Южным нагорьем и вулканическими провинциями Элизиум на севере, зарегистрировал более 1300 сейсмических событий [1]. Очаги большинства марсотрясений находятся вблизи системы разломов Цербер Фосса (Cerberus Fossae). Cerberus Fossae – одна из крупнейших сетей разломов на Марсе, общей длиной около 1200 км, и включает пять основных параллельных разломов, разрезающих очень молодые вулканические территории Elysium Planitia. Предполагается, что сейсмичность Cerberus Fossae имеет вулканотектоническую природу, связанную с древней сетью даек, расположенных под разломами на глубине (5–20 км).

Из-за установки только одной сейсмической станции, локация сейсмических источников гораздо сложнее, чем в случае триангуляции эпицентров из сети сейсмометров (например, наземных или лунных сетей). Как следствие, определение координат и глубины очагов марсотрясений были выполнены с большой неопределенностью. Эпицентры марсотрясений обычно представлены функциями плотности вероятности эллипсоидальной формы [2], с наибольшей вероятностью в центре. Размеры эллипсоидов охватывают несколько сотен километров (примерно 180–300 км). Эти неопределенности в локации очагов марсотрясений довольно значительны и затрудняют выявление истинного эпицентра сейсмического источника. Глубина событий InSight также является неопределенным параметром, и расчетные значения находятся между 20 и 50 км [3–5].

Карты региональных полей напряжений, рассчитанные по данным гравитационного поля и топографии, показывают области растяжения и сжатия на Марсе [6, 7]. Эти карты напряжений рассчитаны для разных глубин: в коре и под марсианским Мохо, и их горизонтальное разрешение составляет около 90 км/пиксель, что ограничивается данными гравитационного поля. На поверхности Марса наблюдается несколько десятков компрессионных структур, и они не учитываются при расчете напряжений с горизонтальным разрешением 90 км/пиксель. Однако, полученные результаты в сочетании с региональными ограничениями [6, 7], предполагают, что глобальное сжатие и растяжение, создаваемое зоной Фарсида, не является доминирующим процессом.

Наибольший вклад в гравитационный потенциал вносят низшие гармоники (вторая–шестая), отвечающие за глобальные особенности поля, в частности за аномалию Фарсида [8]. Это массивное

¹ Работа выполнена за счет бюджетного финансирования ИФЗ РАН.

вулканическое плато протянуто вдоль экватора более чем на 6000 км и возвышается на 7 км, покрывая около 20% поверхности планеты. В то же время для глубин 100–200 км именно мелкомасштабные детали спектра становятся определяющими в формировании напряжений, тогда как длинноволновые компоненты лишь фиксируют общее влияние Фарсиды.

Сопоставление рассчитанных напряжённых областей с данными о марсотрясениях выявило их согласованность: зоны растяжения и значительных касательных напряжений совпадают с областями активности [9]. В дальнейшем мы анализируем распределение очагов марсотрясений на картах негидростатических напряжений, полученных методом нагрузочных коэффициентов с дискретизацией $1^\circ \times 1^\circ$, без учёта длинноволнового вклада.

1. Метод расчета

Для оценки негидростатической составляющей напряжений Марс моделировался как упругое сферическое тело, испытывающее воздействие поверхностных и глубинных нагрузок. В основу положен статический подход [10], при котором деформация планеты рассчитывается под действием аномальных масс, расположенных на поверхности и на границе кора–мантия.

Нагрузки описывались через сферические гармоники топографии и гравитационного потенциала. Для каждого уровня залегания (поверхность R и граница $R_1 = R - l$, где l – толщина коры) строились разложения с коэффициентами, подбираемыми так, чтобы они соответствовали наблюдаемым значениям гравитационного поля и топографии.

Были рассчитаны нагрузочные числа k_n , h_n для выбранной модели распределения плотности и упругих параметров (модуль сжатия K , модуль сдвига μ). Это позволило учесть реакцию планеты на приложенные нагрузки.

Далее система уравнений – включающая уравнение упругого равновесия с объёмными силами, уравнение Пуассона и соотношения между напряжениями и деформациями – решалась для каждой гармоники. После суммирования по спектру получали поле смещений и тензор напряжений σ_{ij} в каждой точке (r, φ, λ) .

Главные напряжения определялись диагонализацией тензора: $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3$. На их основе вычислялись:

Напряжение всестороннего сжатия ($\sigma = (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)/3$), где отрицательные значения соответствуют сжатию, положительные – растяжению;

касательные (сдвиговые) напряжения, определяемые как половина максимальной разности между главными компонентами ($\tau = \max|\sigma_i - \sigma_k|/2, i \neq k$).

Таким образом, метод позволяет выделить области доминирования растягивающих или сжимающих напряжений и зоны повышенной сдвиговой активности, которые наиболее важны для интерпретации марсианской сейсмичности.

Подробное описание методики приведено ранее [7], здесь используется её адаптированный вариант.

2. Данные наблюдений

Для расчётов использовались разложения топографии [11] и гравитационного потенциала [12] Марса по сферическим гармоникам от 7-й до 90-й степени. В качестве опорной была выбрана тестовая внутренняя модель планеты, задающая кору средней толщиной около 50 км (при плотности порядка 2900 кг/м^3) и ядро радиусом ~ 1821 км [6]. Эти параметры находятся в согласии с данными миссии InSight, по которым толщина коры варьирует в пределах 32–70 км [13], а радиус ядра оценивается в 1830 ± 40 км [14].

3. Численное моделирование

Сравнение расчётных полей негидростатических напряжений с данными о сейсмических событиях в регионе Элизий (Elysium Planitia) показало их тесную связь. В модели, где литосфера имеет мощность порядка 300 км, а ниже залегает ослабленный слой с модулем сдвига, уменьшенным до $\sim 0.1 \mu_0$, под массивом Elysium Mons преобладают сжимающие напряжения. Напротив, восточнее, в пределах равнины Элизий, выделяются обширные области растяжения. Их величины достаточны для генерации марсотрясений даже без учёта дополнительного влияния купола Фарсида.

Особое внимание заслуживает зона Cerberus Fossae, где расчёты выявляют сочетание растягивающих и значительных касательных напряжений. Именно в этой области располагается основное скопление эпицентров, зарегистрированных сейсмометром миссии InSight. Полученные карты демонстрируют, что локальные напряжения, формируемые мелкомасштабными структурами, оказываются критически важными для проявления современной сейсмической активности.

На рисунках 1–3 приведены примеры распределения модельных напряжений в коре Марса на глубине около 25 км. В варианте с учётом длинноволновой составляющей (влияния поднятия Фарсида) видно чередование зон сжатия и растяжения, а также области повышенных касательных напряжений. В случае, когда длинноволновый вклад исключён, картина становится более контрастной: в ряде регионов фиксируется усиление локальных зон растяжения, что соответствует расположению эпицентров марсотрясений.

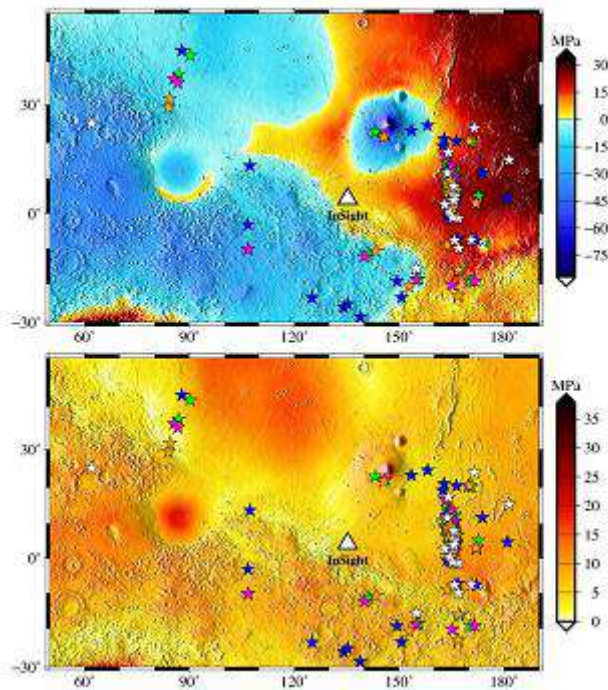


Рис. 1. Распределение расчётных напряжений в марсианской коре на глубине 25 км с учётом длинноволновой части спектра (влияние Фарсида). Верхняя панель – поля растяжения и сжатия, нижняя – величины касательных напряжений (МПа). Δ – положение сейсмостанции InSight, звёздочки – эпицентры марсотрясений

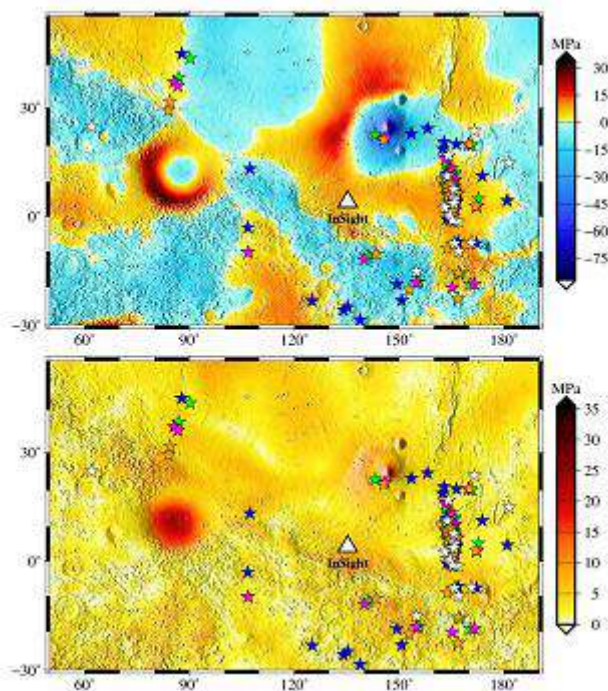


Рис. 2. Та же модель, но при исключении длинноволнового вклада: карты растягивающих/сжимающих напряжений (вверху) и касательных напряжений (внизу), рассчитанные на глубине 25 км

На рисунке 3 показаны направления наибольшего главного напряжения σ_1 и цветом изображено его значение. Области смены ориентации напряжений представляют интерес для дальнейшего исследования и сопоставления с мелкомасштабными геологическими структурами.

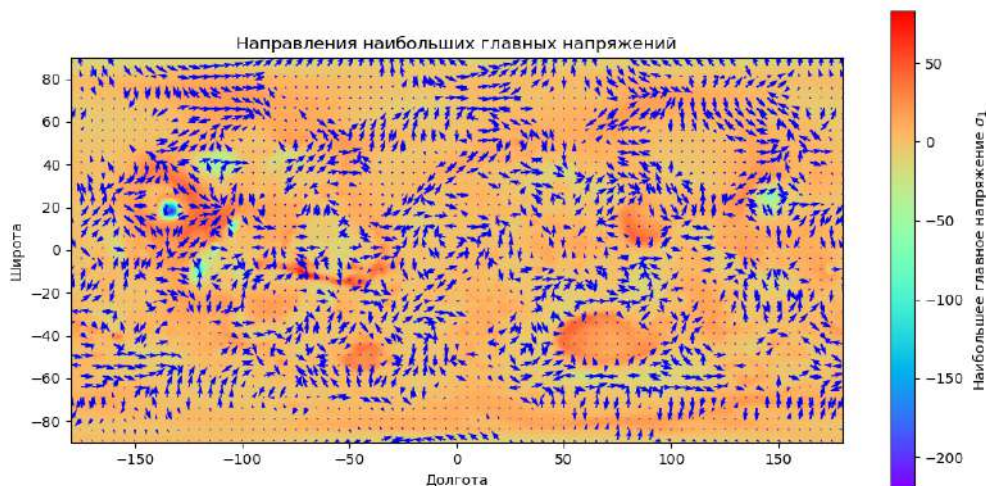


Рис. 3. Направления и величины максимального главного напряжения σ_1 в коре Марса на глубине 25 км (цветом показана величина σ_1 , стрелками – ориентация осей)

4. Заключение

Совместный анализ данных топографии и неравновесной части гравитационного поля Марса позволил построить детализированную картину распределения негидростатических напряжений без учёта длинноволновой составляющей. Расчёты, выполненные начиная с 7-й гармоники, были сопоставлены с каталогом эпицентров марсотрясений, зарегистрированных миссией InSight. Установлено, что зоны растяжения с повышенными касательными напряжениями пространственно совпадают с очагами сейсмических событий. Значительные касательные напряжения в зонах растяжения, которые не обусловлены глобальным влиянием поднятия Фарсида, хорошо коррелируют с выявленными эпицентрами марсотрясений.

Литература

1. Mars Seismic Catalogue, InSight Mission 2023. V14 2023-04-01, InSight Marsquake Service, Bristol: Univ. Bristol, ETHZ, IGP, JPL, ICL, 2023. – <https://doi.org/10.12686/a21>.
2. Drilleau M., Samuel H., Garcia R.F., Rivoldini A., Perrin C., Wieczorek M. et al. Constraints on lateral variations of Martian crustal thickness from seismological and gravity field measurements // *Geophysical Research Letters*. – 2024. – V. 51. – e2023GL105701.
3. Brinkman N., Stähler S.C., Giardini D., Schmelzbach C., Khan A., Jacob A., Fuji N., Perrin C., Lognonné P., Beucler E., Böse M., Ceylan S., Charalambous C., Clinton J.F., van Driel M., Euchner F., Horleston A., Kawamura T., Knappmeyer-Endrun B., Mainsant G., Panning M.P., Pike W.T., Scholz J.-R., Robertsson J.O.A., Banerdt W.B. First focal mechanisms of Marsquakes // *Journal of Geophysical Research: Planets*. – 2021. – V.126. – e2020JE006546.
4. Drilleau M., Samuel H., Garcia R.F., Rivoldini A., Perrin C., Michaut C. et al. Marsquake locations and 1D seismic models for Mars from InSight data // *J.Geophys. Res.: Planets*. – 2022. – V. 127(9). – P. e2021JE007067.
5. Jacob A., Plasman M., Perrin C., Fuji N., Lognonné P., Xu Z. et al. Seismic sources of insight marsquakes and seismotectonic context of Elysium Planitia, Mars // *Tectonophysics*. – 2022. – V. 837. – P.229434.
6. 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.
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. Жарков В.Н., Гудкова Т.В. О модельной структуре гравитационного поля Марса // *Астрон. вестн.* – 2016. – Т.50, № 4. – С. 252-267.
9. Гудкова Т.В., Батов А.В. Напряженное состояние недр Марса и Венеры // *Физика Земли*. – 2024. – № 1. – С. 105-118.
10. 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.

11. *Smith D.E., Zuber M.T., Frey H.V., Garvin J.B., Head J.W., Muhleman D.O., Pettengill G.H., Phillips R.J., Solomon S.C., Zwally H.J., Banerdt W.B., Duxbury T.C., Golombek M.P., Lemoine F.G., Neumann G.A., Rowlands D.D., Aharonson O., Ford P.G., Ivanov A.B., Johnson C.L., McGavern P.J., Abshire J.B., Afzal R.S., Sun X.* Mars Orbiter Laser Altimeter: Experimental summary after the first year of global mapping of Mars // *J. Geophys. Res.* – 2001. – V.106 (E10). – P. 23689-23722.
12. *Konopliv A.S., Park R.S., Folkner W.M.* An improved JPL Mars gravity field and orientation from Mars orbiter and lander tracking data // *Icarus.* – 2016. – V. 274. – P. 253-260.
13. *Wieczorek M.A., Broquet A., McLennan S.M., Rivoldini A., Golombek M., Antonangeli D., Beghein C., Giardini D., Gudkova T., Gyalay S., Johnson C. L., Joshi R., Kim D., King S.D., Knapmeyer-Endrun B., Lognonné Ph., Michaut C., Mittelholz A., Nimmo F., Ojha L., Panning M.P., Plesa A.-C., Siegler M.A., Smrekar S.E., Spohn T., Banerdt W.B.* InSight constraints on the global character of the Martian crust // *Journal of Geophysical Research: Planets.* – 2022. – V.127. – e2022JE007298.
14. *Stähler S.C., Khan A., Banerdt W.B., Lognonné Ph., Giardini D., Ceylan S., Drilleau M., Duran A.C., Garcia R.F., Huang Q., Kim D., Lekic V., Samuel H., Schimmel M., Schmerr N., Sollberger D., Stutzmann É., Xu Z., Antonangeli D., Charalambous C., Davis P.M., Irving J.C.E., Kawamura T., Knapmeyer M., Maguire R., Marusiak A.G., Panning M.P., Perrin C., Plesa A.-C., Rivoldini A., Schmelzbach C., Zenhäusern G., Beucler É., Clinton J., Dahmen N., van Driel M., Gudkova T., Horleston A., Pike W.T., Plasman M., Smrekar S.E.* Seismic detection of the martian core // *Science.* – 2021. – V. 373. – P. 443–448.