

## НАПРЯЖЕННОЕ СОСТОЯНИЕ НЕДР МАРСА И ВЕНЕРЫ

© 2024 г. Т. В. Гудкова<sup>1, \*</sup>, А. В. Батов<sup>1, 2, \*\*</sup>

<sup>1</sup>Институт физики Земли им. О.Ю.Шмидта РАН, г. Москва, Россия

<sup>2</sup>Институт проблем управления им. В.А.Трапезникова РАН, г. Москва, Россия

\*E-mail: gudkova@ifz.ru

\*\*E-mail: batov@ipu.ru

Поступила в редакцию 19.04.2023 г.

После доработки 05.07.2023 г.

Принята к публикации 07.07.2023 г.

Показано, что большинство эпицентров марсотрясений расположено в зонах растяжений и достаточно больших касательных напряжений, связанных с отклонением планеты от состояния гидростатического равновесия. Проведен расчет негидростатических напряжений в недрах Венеры для двух типов моделей: упругой модели и модели с литосферой варьируемой толщины (150–500 км), расположенной на ослабленном слое, который частично потерял свои упругие свойства. Численное моделирование системы уравнений упругого равновесия гравитирующей планеты выполнено с шагом  $1^\circ \times 1^\circ$  градус по широте и долготе до глубины 480 км – первого фазового перехода в мантии. Граничными условиями задачи служат данные о топографии и гравитационном поле планеты. В целом, уровень негидростатических напряжений на Венере не слишком высок. На поверхности планеты и в коре наибольшие касательные напряжения проявляются в районе горы Максвелла (Maxwell Monte) на Земле Иштар (Ishtar Terra). Под горами Максвелла напряжения сдвига в коре достигают 80 МПа, значения сжатия достигают значений 125–150 МПа, в зависимости от модели. Напряжения растяжения вокруг этой области составляют около 20 МПа. Наибольшие напряжения растяжения приходятся на области под такими структурами как равнина Лавинии (Lavinia Planitia), равнина Седны (Sedna Planitia), равнина Айно (Aino Planitia).

**Ключевые слова:** моделирование негидростатических напряжений, топография, гравитационное поле, Марс, Венера.

**DOI:** <https://doi.org/10.31857/S0002333724010078>, **EDN:** EHWFNZ

### ВВЕДЕНИЕ

Известно, как изменились представления о внутреннем строении Земли после регистрации первого сейсмического события 17.04.1889 г., которое ознаменовало начало сейсмической эры в исследованиях Земли. По анализу сейсмических данных было получено доказательство того, что у Земли есть ядро [Oldham, 1906], кора [Mohorovičić, 1910], и что в жидком ядре есть внутреннее твердое ядро [Lehmann, 1936], создана глобальная референсная модель внутреннего строения [Dziewonski, Anderson, 1981]. Сейчас наша планета покрыта огромной сетью сейсмических станций, которые позволяют изучать детали ее внутреннего строения и строить томографические модели (см., напр., обзор работ в статье [Жарков, 2012]).

На планетах эти исследования очень дорогостоящие и поэтому, можно использовать только ограниченное число приборов. До недавнего времени Луна была единственным космическим телом, кроме Земли, для которого были получены сейсмические данные. Непрерывные сейсмические наблюдения на Луне проводились с 19.11.1969 г. до сентября 1977 г. сетью сейсмических станций, установленных на видимой стороне Луны по программе “Аполлон”. Применяя новейшие методы обработки, удалось выделить отраженные от ядра Луны волны и тем самым определить радиус ее внешнего жидкого ядра, а также обнаружить твердое внутреннее ядро Луны [Weber et al., 2011].

Марсианская сейсмология началась 04.09.1976 г., когда две посадочные станции Viking были оборудованы трехкомпонентными

короткопериодными сейсмометрами [Anderson et al., 1977]. К сожалению, сейсмометр Viking-1 не заработал. Сейсмометр Viking-2 функционировал с сентября 1976 г. до февраля 1978 г. и записал несколько сигналов, которые, как считалось, были вызваны порывами ветра. Поэтому до миссии НАСА InSight (Interior exploration using Seismic investigations, geodesy and heat transport — Исследование внутреннего строения, используя сейсмические исследования, данные геодезии и измерения теплового потока) [Mimoun et al., 2012; Banerdt et al., 2013; Panning et al., 2017] было неясно насколько сейсмичен Марс.

В настоящее время завершен успешный сейсмический эксперимент SEIS на Марсе в миссии “InSight” [Lognonné et al., 2019; Banerdt et al., 2020; Giardini et al., 2020; Ceylan et al., 2022]. Широкополосный сейсмометр, установленный в конце декабря 2018 г. проработал до декабря 2022 года. Чувствительность прибора составляла  $<10^{-9}$  м с $^{-2}$  Гц $^{1/2}$  в диапазоне от  $10^{-3}$  до 10 Гц, частота регистраций 20 измерений/с. Впервые была определена сейсмичность Марса по данным наблюдений [Giardini et al., 2020]. Магнитуда большинства марсотрясений оценивается как 3.2–3.6, два удаленных события имеют магнитуду 4.1 и 4.2 [Horleston et al., 2022], особо выделяется произошедшее в 2022 году событие магнитудой 4.7 [Kawamura et al., 2023], до регистрации которого не удавалось выделить записи поверхностных волн.

До миссии InSight, толщина коры Марса была определена с использованием косвенных методов, таких как обработка гравитационных данных, и учет состава поверхностных пород. Анализ данных, собранных сейсмометром InSight, предоставил нам первое прямое сейсмическое измерение толщины коры под посадочным модулем [Knapmeyer-Endrun et al., 2021], который был расположен в северных низменностях, где считается, что кора тоньше, чем в среднем. Сейсмическим данным удовлетворяют две модели: двухслойная, с толщиной коры  $20 \pm 5$  км и с плотностью до  $2850$  кг/м $^3$ , и трехслойная, с толщиной коры  $39 \pm 8$  км и с плотностью до  $3100$  кг/м $^3$ , эти модели продолжают уточняться. С учетом данных гравитационного поля и топографии установлено, что средняя толщина коры Марса составляет от 32 до 70 км, а средняя плотность не более  $3100$  кг/м $^3$  [Wieczorek et al., 2022]. Это значение ниже, чем у большинства типичных марсианских базальтовых пород, что позволяет предположить, что состав коры отличается от вулканических пород на поверхности.

Впервые по сейсмическим данным была определена граница марсианского ядра [Stähler et al., 2021] — это третье обнаружение границы ядра планеты сейсмическими методами после работ [Oldham, 1906; Weber et al., 2011]. Долгое время продолжалась дискуссия, имеется ли перовскитовый слой у Марса. Большое ядро Марса ( $1830 \pm 40$  км) свидетельствует о наличии мантии, минералогически сходной с верхней мантией Земли и переходной зоной, и об отсутствии перовскитовой зоны. Марсианское ядро гораздо менее плотное, чем земное, что говорит о наличии ряда легких элементов, таких как кислород, сера, водород, растворенных в железоникелевом ядре [Stähler et al., 2021].

В мантии Марса было важно определить глубину фазового перехода оливин—вадслеит, так как это фиксирует распределение температуры в планете и дает важный ключ к пониманию состава марсианской мантии. По сейсмическим данным, собранным миссией НАСА InSight на Марсе, был обнаружен скачок параметров в средней мантии на глубине  $1006 \pm 40$  км, что соответствует ожидаемой глубине и резкости постоливинового перехода [Huang et al., 2022]. Марсианская мантия более богата железом, чем земная, и обе планеты имеют одинаковую потенциальную температуру  $1605 \pm 100$  К.

В настоящее время для Венеры нет сейсмических данных. По теоретическим оценкам, сейсмичность Венеры стоит в ряду между Марсом и Землей [Lognonné, Johnson, 2015; Van Zelst et al., 2023], ожидается 11–34 событий в год с магнитудой  $>5$ , что соответствует силе внутриплитных землетрясений. Наиболее обширные данные о поверхности Венеры были собраны орбитальным аппаратом Magellan [Saunders et al., 1992] в 1991–1994 гг. Картирование поверхности планеты (98%) с разрешением 100–200 м выявило, что на поверхности доминируют обширные вулканические равнины и разнообразные вулканические образования различных размеров [Ivanov, Head, 2011; Bondarenko, Kreslavsky, 2018]. На Венере имеется глобальная система рифтов, простирающаяся на тысячи километров, которая указывает на активность процессов в последние десятки миллионов лет [Basilevsky, 1993]. Молодой возраст поверхности Венеры, сложный гористый рельеф, структуры растяжений, складчатые гребни свидетельствуют о тектонической активности, несмотря на видимое отсутствие плейт-тектоники земного типа. Анализ поверхности указывает на то, что на Венере нет признаков границ плит или их движений, тем не менее, с морфологической точки зрения рифтовые

долины на Венере имеют несколько аналогий со срединно-океаническими хребтами и тройными сочленениями на Земле [Graff et al., 2018]. В настоящее время существуют доказательства современного вулканизма на Венере [Smrekar et al., 2010; Shalygin et al., 2015]. Совсем недавно, по анализу данных радиолокационных наблюдений за поверхностью Венеры космическим аппаратом “Магеллан” в 1990–1992 гг., путем сравнения элементов поверхности в разное время, было получено прямое свидетельство продолжающейся вулканической активности на современной Венере [Herrick, Hensley, 2023].

Внутриплитные землетрясения, лунотрясения, и марсотрясения показывают, что сейсмическая активность может быть приурочена не только к плейт-тектоническим явлениям, но и менее геологически активные планеты подвержены сейсмическим событиям, что дает возможность изучать их состав и строение. Вулканизм может служить триггером для сброса напряжений, и не вызывает сомнения, что Венера является сейсмически активной планетой.

Сложность проведения сейсмических исследований на Венере заключается в том, что требуется применение специальной аппаратуры, которая способна работать при очень сложных условиях: температуре  $\sim 750$  К и давлении на поверхности  $\approx 90$  бар. В 1982 г. попытка зарегистрировать сейсмические события была предпринята советскими аппаратами “Венера-13” и “Венера-14” при помощи простейшего одноосного сейсмометра высокочастотного типа. Данные были слишком загрязнены внешними источниками, такими как ветер, и воздействием самого прибора. Анализ результатов, переданных с “Венера-13” не показал каких-либо колебаний поверхности, а “Венера-14” зарегистрировала два слабых микросейсма, природа которых оказалась не ясна [Ксанфомалити и др., 1982; Ксанфомалити, 1983]. Обсуждалась их возможная связь с вулканическими явлениями от удаленных источников, областей Бета и Феба, которые рассматриваются как возможные вулканически активные районы. К сожалению, на основе этих данных невозможно было дать какую-либо интерпретацию.

Чтобы понять, как эволюционировала Венера, необходимо обнаружить признаки сейсмической активности, разместив сейсмометры на поверхности на длительный период времени. Проект “Венера-Д” [Zasova et al., 2019], разработанный российским космическим агентством в сотрудничестве с НАСА, направлен на

измерение сейсмичности и исследование коры и внутреннего строения Венеры с использованием орбитального аппарата, субспутника и посадочного аппарата LLISSE (Long-Lived In-Situ Solar System Explorer) и запланирован на конец десятилетия. Прорабатывается оснащение посадочного модуля сейсмометром [Kremic et al., 2020; Tian et al., 2023] с использованием высокотемпературной электроники, способной в три раза увеличить продолжительность пребывания на поверхности (до 120 земных дней).

Альтернативой поверхностной сейсмологии для Венеры может стать регистрация сейсмических сигналов в атмосфере и ионосфере планеты, вызванных сейсмическими событиями. Наблюдения, которые велись с начала 1960-х годов, показали, что сильные сейсмические события на Земле и процессы в атмосфере взаимосвязаны: после сильных землетрясений наблюдается возмущение ионосферы. Акустические волны в атмосфере, генерируемые сейсмическими поверхностными волнами, наблюдались как от удаленных очень сильных землетрясений (с магнитудой выше 7), так и вблизи небольших сейсмических событий. Такие явления и сейчас регистрируются при землетрясениях силой 7–7.5 при помощи GPS (используется для определения электронной плотности в ионосфере) или доплеровскими зондами, которые определяют вертикальную скорость движения ионосферных слоев на высоте отражения зондирующего электромагнитного сигнала (см., например, [Liu et al., 2011; Yang et al., 2019]). Хотя на Венере сейсмические события ожидаются не столь большими, как на Земле, это компенсируется более сильным взаимодействием поверхности Венеры с более мощной атмосферой, что приводит к значительному усилению сигнала [Garcia et al., 2005; Lognonné, Johnson, 2015; Lognonné et al., 2016]. Для Венеры на высоте 50 км давление сравнимо с давлением на поверхности Земли, и можно оценить, что для сейсмических событий с одинаковыми магнитудами, амплитуды инфразвуковых волн на Венере будут в 600 раз больше амплитуд аналогичных волн на Земле, поэтому имеется потенциальная вероятность обнаружения сигналов от таких волн. Прибор (VAMOS, The Venus Airglow Measurements and Orbiter for Seismicity) – это концепция миссии, позволяющая небольшому космическому аппарату на орбите Венеры обнаруживать и регистрировать возмущения нейтральной атмосферы и ионосферы, вызванные сейсмическими волнами [Komjathy et al., 2018].

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 гравитационного поля и топографии по сферическим функциям до 18 гармоники. Данные о гравитационном поле Венеры [Konopliv et al., 1999] и топографии [Rappaport 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  $1^\circ \times 1^\circ$  по широте и долготе до глубины 480 км. Для этого используются два типа моделей: 1) упругая модель, и 2) модель с упругой литосферой варьируемой толщины (150–500 км), расположенной на ослабленном слое, который частично потерял свои упругие свойства.

#### МЕТОД МОДЕЛИРОВАНИЯ НЕГИДРОСТАТИЧЕСКИХ НАПРЯЖЕНИЙ В НЕДРАХ ПЛАНЕТЫ

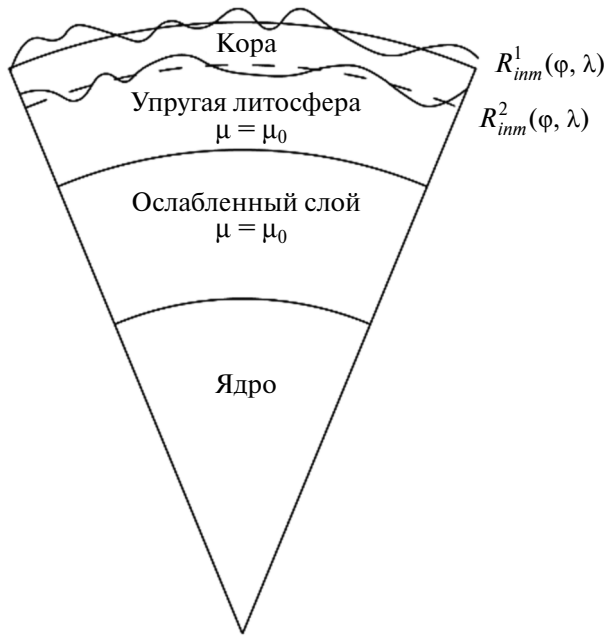
Задача интерпретации неравновесной части гравитационного поля планеты имеет точное решение для конкретной модели распределения упругих параметров: нахождение функции Грина для “аномальных волн плотности”, т.е. сферических гармоник в разложении плотности слоя, расположенного на некоторой глубине. Для 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].

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 гармоники  $n$  и заданной глубины, затем ряды гармоник суммируются. В каждой точке  $(r, \varphi, \lambda)$  симметричный полный тензор напряжений  $\sigma_{ik}$  приводится к диагональной форме путем преобразования координат, и определяются соответствующие главные напряжения  $\sigma_1, \sigma_2$  и  $\sigma_3$  ( $\sigma_3 \leq \sigma_2 \leq \sigma_1$ ), которые раскладываются на напряжения всестороннего сжатия  $\sigma = (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)/3$  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].

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  $R_{imm}^1(\varphi, \lambda)$  и  $R_{imm}^2(\varphi, \lambda)$  (где  $\varphi$  — широта и  $\lambda$  — долгота) выбираются таким образом, чтобы удовлетворить данным топографии и гравитационного поля планеты, взятым по отношению к равновесной поверхности планеты.

Коэффициенты разложения по сферическим функциям плотности на поверхности  $R$  и на границе кора–мантия  $R_1$ , соответственно  $R_{imm}^1(\varphi, \lambda)$  и  $R_{imm}^2(\varphi, \lambda)$ , связаны с коэффициентами



**Рис. 1.** Схема нагружки на поверхности и границе кора-мантия для двух типов моделей: 1) упругая модель  $\alpha = 1.0$ , 2) модель с литосферой, расположенной на ослабленном слое, простирающимся до ядра, и который частично потерял свои упругие свойства,  $\alpha = 0.1$ ,  $\mu_0$  — значение модуля сдвига для чисто упругой модели. Обозначения:  $R^1_{inn}(\varphi, \lambda)$ ,  $R^2_{inn}(\varphi, \lambda)$  — амплитуды нагрузок степени  $n$  на поверхности и границе кора-мантия, соответственно;  $\varphi$  и  $\lambda$  — широта и долгота.

разложения аномального гравитационного поля  $C_{ginn}$  и топографии  $C_{tinn}$  следующим соотношением [Жарков и др., 1991]:

$$C_{ginn} = \frac{R^1_{inn}(\varphi, \lambda)}{Rp_0} \frac{3(1+k_n(R))}{(2n+1)} + \frac{R^2_{inn}(\varphi, \lambda)}{Rp_0} \frac{3(1+k_n(R_1))}{(2n+1)} \left( \frac{R_1}{R} \right)^{n+2}, \quad (1)$$

$$C_{tinn} = \frac{R^1_{inn}(\varphi, \lambda)}{Rp_c} + \frac{R^1_{inn}(\varphi, \lambda)}{Rp_0} \frac{3h_n(R)}{(2n+1)} + \frac{R^2_{inn}(\varphi, \lambda)}{Rp_0} \frac{3h_n(R_1)}{(2n+1)} \left( \frac{R_1}{R} \right)^{n+2}. \quad (2)$$

В формуле (2) 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  $\mu$ ) в недрах планеты. Коэффициенты  $R^1_{inn}(\varphi, \lambda)$  и  $R^2_{inn}(\varphi, \lambda)$ , которые служат граничными условиями при решении системы уравнений, подбираются так, чтобы получить наблюдаемое значение гравитационного поля  $C_{ginn}$  и топографии  $C_{tinn}$ , представленным в виде разложения в ряд по сферическим функциям. Мы учитываем лишь неравновесные компоненты топографии и гравитационного поля, вычитая из измеренных (наблюдаемых) величин  $C_{ginn}$  и  $C_{tinn}$ , их модельные значения для гидростатически равновесной планеты.

### НЕГИДРОСТАТИЧЕСКИЕ НАПРЯЖЕНИЯ В НЕДРАХ МАРСА И ИХ КОРРЕЛЯЦИЯ С ЭПИЦЕНТРАМИ МАРСОТЯСЕНИЙ

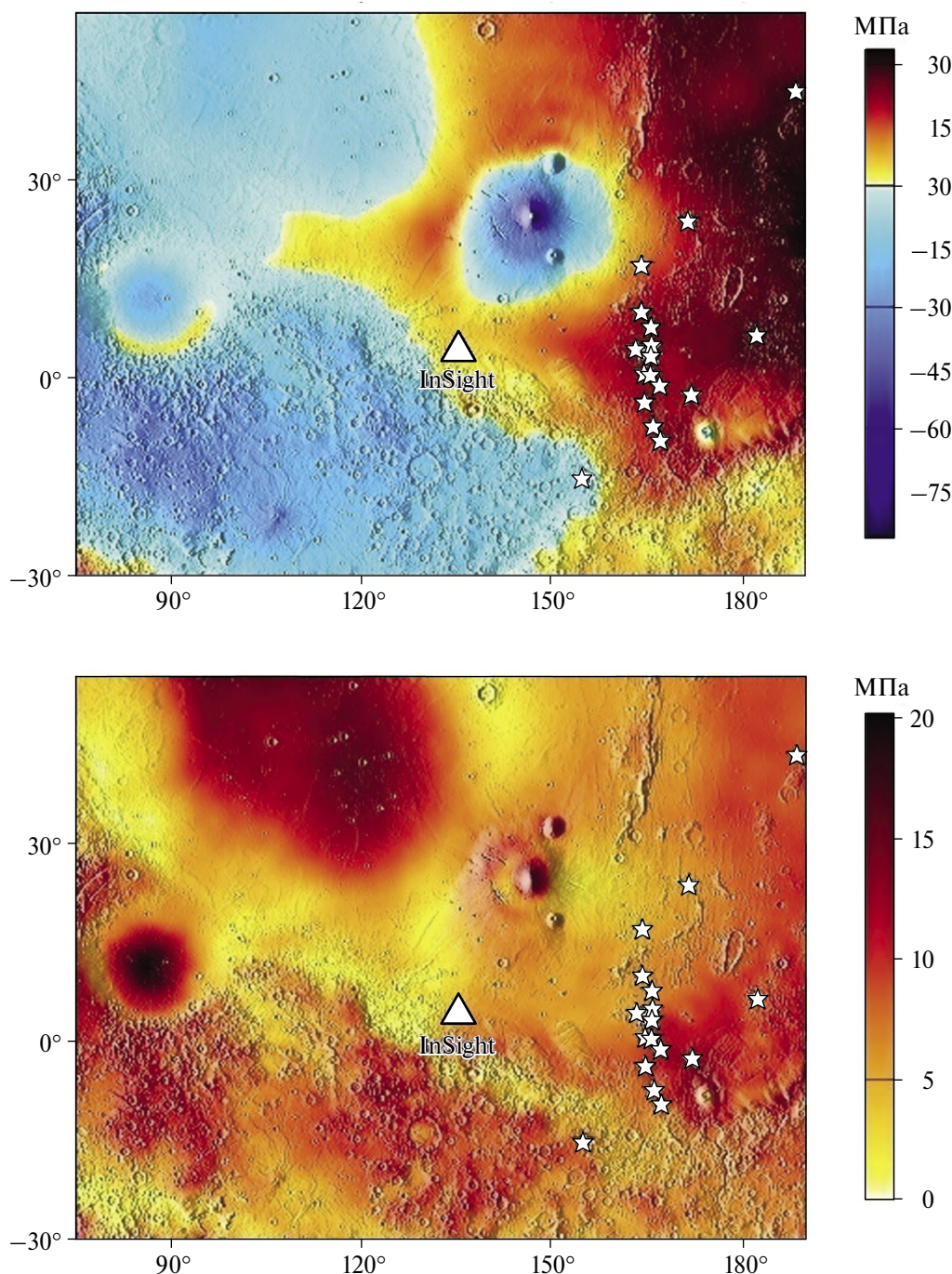
Совместный анализ современных данных топографии и неравновесной части гравитационного поля Марса позволил получить детальную картину распределения негидростатических напряжений в недрах планеты [Гудкова и др., 2017; 2018; Батов и др., 2019]. Для расчетов была принята модель внутреннего строения Марса, которая имеет среднюю толщину коры 50 км с плотностью 2900 кг/м<sup>3</sup>, радиус ядра составляет 1821 км [Гудкова и др., 2017]. Эти значения попадают в диапазон определения толщины коры (32–70 км) [Knapmeyer-Endrun et al., 2021; Wiczorek et al., 2022] и радиуса ядра Марса сейсмическими методами (1830±40 км) [Stähler et al., 2021]. Поскольку для гармоник выше 90, корреляция данных гравитационного поля и топографии Марса заметно ухудшается [Батов и др., 2018], для оценок напряженного состояния недр Марса использовались коэффициенты разложения топографии [Smith и др., 2001] и гравитационного поля [Konopliv et al., 2016] только до 90-й степени и порядка. Для выделения неравновесной части гравитационного поля, топография и гравитационное поле Марса определялись по отношению к равновесному сфероиду [Zharkov et al., 2009; Жарков, Гудкова, 2016]. Критерием выбора возможных эпицентров марсотрясений служили большие значения напряжений сдвига на фоне существенных растягивающих напряжений. Было предположено, что именно значительные касательные напряжения в зонах растяжения представляют наиболее вероятные области очага марсотрясений.

Большинство очагов марсотрясений было обнаружено к востоку от сейсмометра, в районе системы грабенов Церберы (Cerberus Fossae) [Giardini et al., 2020; InSight Marsquake Service,

2023], крупной тектонической структуры. Область Церберы (Cerberus Fossae) считается образованием, которое возможно связано с недавней вулканической активностью в районе поднятия Элизий (Elysium Mons). Сейсмические события этой группы расположены на эпицентральных расстоянии  $26^{\circ}$ – $27^{\circ}$ , имеют магнитуду 3.5–4,

и механизм очага этих событий соответствует тектонике растяжения [Brinkman et al., 2021].

Сравнение теоретически рассчитанных негидростатических напряжений в регионе равнины Элизий (Elysium Planitia) с данными локации эпицентров сейсмических событий на Марсе в этом регионе показано на рис. 2.



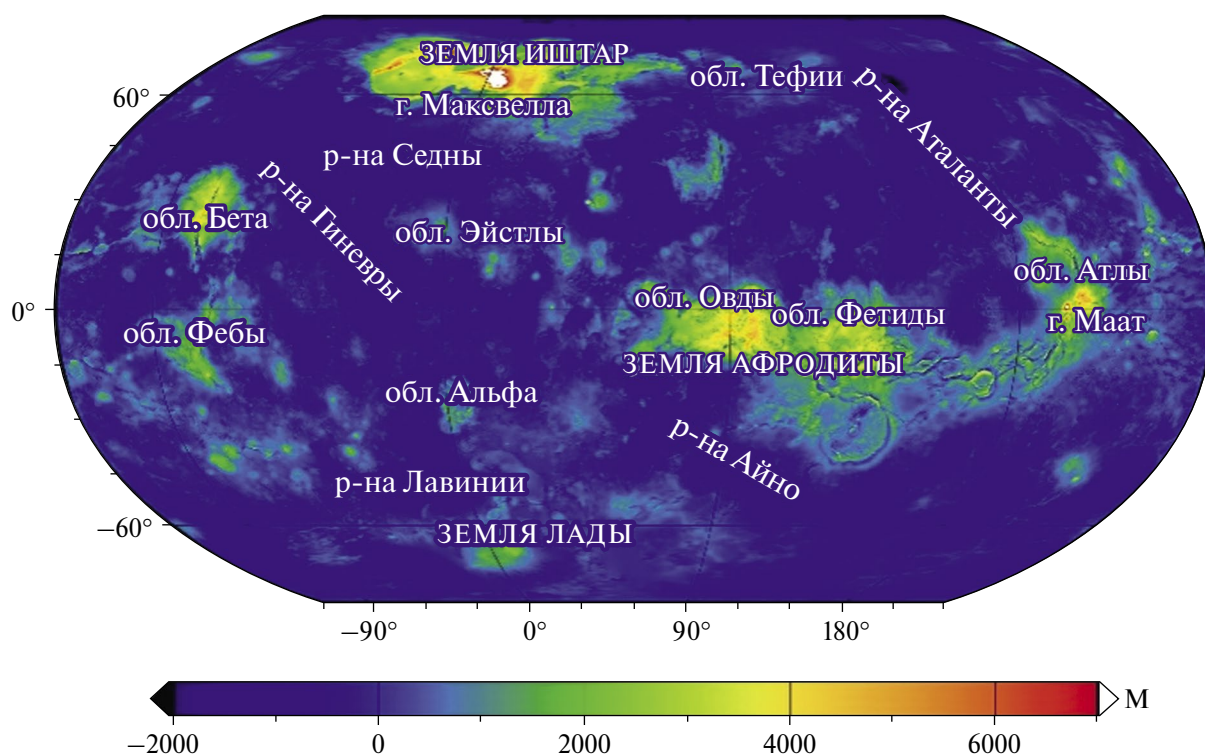
**Рис. 2.** Модельные негидростатические напряжения в коре Марса на глубине 25 км в области равнины Элизий (Elysium Planitia): напряжения растяжения–сжатия (вверху) и напряжения сдвига (внизу) в МПа. Обозначения:  $\Delta$  – положение сейсмоприемника,  $\star$  – эпицентры марсотрясений.

Рисунок соответствует модели внутреннего строения Марса с толщиной коры 50 км, толщина литосферы 300 км, под литосферой имеется ослабленный слой  $\mu = 0.1\mu_0$  до глубины 1140 км ( $\mu_0$  — значение модуля сдвига для чисто упругой модели). В поле напряжений под щитом Элизий (Elysium) преобладает поле сжимающих напряжений, в то время как к востоку от плато Элизий (Elysium Planitia) прослеживаются значительные растягивающие напряжения в литосфере, действительно достаточные для возникновения сейсмических событий. Значительные касательные напряжения в зонах растяжения хорошо коррелируют с выявленными эпицентрами марсотрясений. Ранее принятый критерий выбора зон с большими значениями напряжений сдвига на фоне существенных растягивающих напряжений как наиболее вероятных областей очагов марсотрясений, оправдал ожидания. Возможная плюмовая активность этого района [Broquet, Andrews-Hanna, 2022] может приводить к сбрасыванию накопившихся напряжений.

### АНАЛИЗ НЕГИДРОСТАТИЧЕСКИХ НАПРЯЖЕНИЙ В НЕДРАХ ВЕНЕРЫ

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-й 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-й степени и порядка, так как корреляция между гравитационным полем и топографией убывает для более высоких гармоник [Менщикова и др., 2021]. Топографическая карта Венеры с обозначением структур представлена на рис. 3.

Для получения значений негидростатических напряжений, возникающих вследствие отклонения планеты от состояния гидростатического равновесия, а Венера является очень неравновесной планетой, топография и гравитационное поле Венеры определяются по



**Рис. 3.** Топографическая карта Венеры (в метрах). Нулевое значение соответствует среднему радиусу планеты. За центр проекции выбран меридиан 60°. Для наглядности, области с высотой более 7000 м обозначены белым цветом.

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.

Как планета реагирует на приложенную нагрузку, зависит от реологических свойств ее недр, которые для Венеры не определены. Оценки напряженного состояния недр Венеры проводятся для двух типов моделей (рис. 1), которые позволяют оценить порядок величины напряжений в планете: 1) упругая модель, 2) модель с упругой литосферой варьируемой толщины (100–500 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  $\mu$  в слое под литосферой, который считается простирающимся до ядра.

Моделирование негидростатических напряжений растяжения–сжатия и сдвиговых напряжений выполнены 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 (V\_16) и 70 (V\_5) км, средняя плотность коры равна 2800 кг/м<sup>3</sup>.

В целом, уровень негидростатических напряжений на Венере не слишком высок (рис. 4 и рис. 5). Этот результат согласуется со значениями, полученными в работах [Жарков и др., 1986; Марченков, Жарков, 1989], где расчеты проводились с использованием данных гравитационного поля и топографии до 18-й степени (точность гравитационного поля на тот момент).

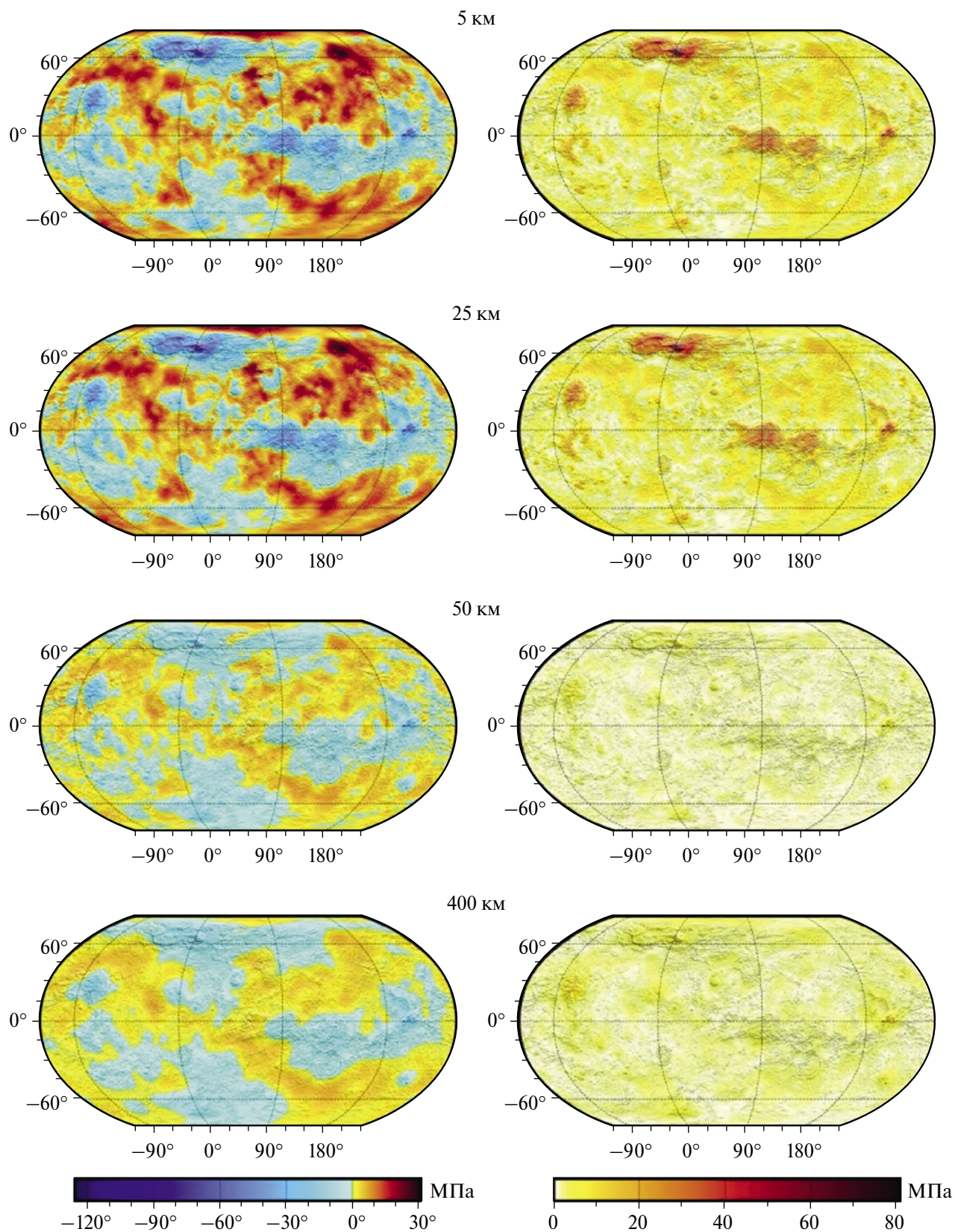
На рис. 4 показаны карты напряжений растяжения–сжатия и сдвига в коре и мантии для модели с толщиной коры 30 км для чисто упругой модели. Как и ожидалось, на поверхности планеты и в коре наибольшие касательные напряжения проявляются в районе горы Максвелла на Земле Иштар (Ishtar Terra). Под горами Максвелла (Maxwell Montes) напряжения сдвига в коре достигают 80 МПа, значения сжатия достигают значений 125–150 МПа, в зависимости от модели: 125 МПа для чисто

упругой модели, и 150 МПа для модели с литосферой 100 км. Напряжения растяжения вокруг этой области составляют около 20 МПа. Наибольшие напряжения растяжения приходятся на области под такими структурами как равнина Лавинии (Lavinia Planitia), равнина Седны (Sedna Planitia), равнина Айно (Aino Planitia). Уровень напряжений в литосфере зависит от выбора модели. Напряжения сжатия–растяжения и сдвига для модели с литосферой 300 км (рис. 5) выше, чем для однородной по упругим свойствам модели (рис. 4). Чем меньше толщина литосферы, тем выше в ней напряжения. В области равнины Айно напряжения растяжения составляют 23 МПа для моделей с литосферой 100 км, и 20 МПа для толщины литосферы 500 км. Нет существенной разницы в характере напряжений, полученных для моделей с толщиной коры 30 и 70 км.

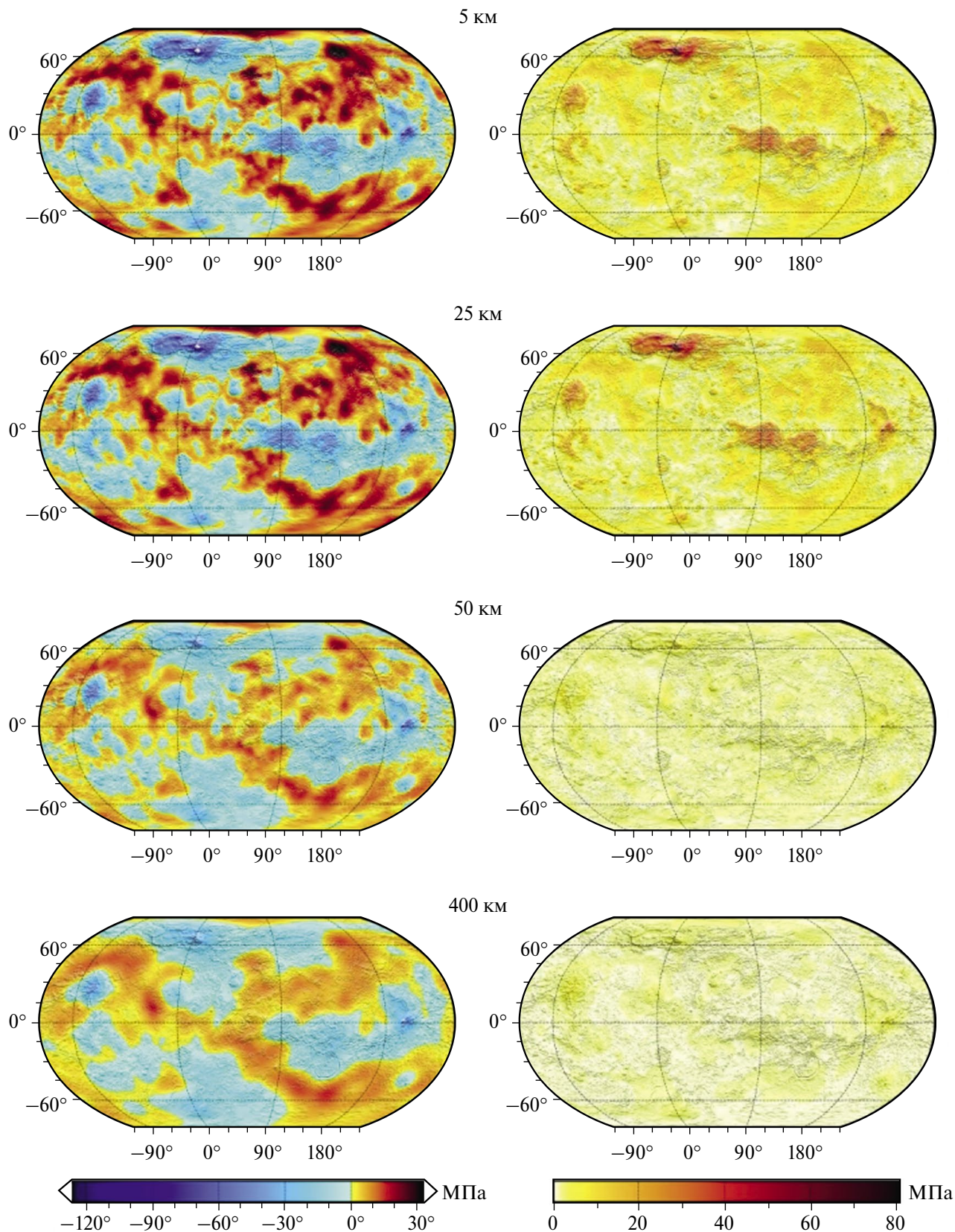
## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результат моделирования негидростатических напряжений в недрах Марса сопоставлен с локацией эпицентров марсотрясений, зарегистрированных в ходе сейсмического эксперимента миссии InSight. Показано, что ранее принятый критерий выбора зон с большими значениями напряжений сдвига на фоне существующих растягивающих напряжений как наиболее вероятных областей очагов марсотрясений, оправдал ожидания. Значительные касательные напряжения в зонах растяжения хорошо коррелируют с выявленными эпицентрами марсотрясений.

В настоящей работе эта техника применена к Венере. 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.



**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 упругой модели V\_16 из работы [Гудкова, Жарков, 2020].



**Рис. 5.** 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].

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

## ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена за счет темы госзадания ИФЗ им. О.Ю Шмидта РАН.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Батов А.В., Гудкова Т.В., Жарков В.Н.* Оценки напряженного состояния недр Марса под локальными топографическими структурами // Геофизические исследования. 2018. Т. 19. № 3. С. 5–22.
- 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. (*Batov A.V., Gudkova T.V., Zharkov V.N.* Nonhydrostatic stress state in the Martian interior for different rheological Models // *Izvestiya Physics of the solid Earth*. 2019. V. 55. № 4. P. 688–700.)
- 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. (*Gudkova T.V., Batov A.V., Zharkov V.N.* Model estimates of non-hydrostatic stresses in the Martian crust and mantle: 1. Two-level model // *Solar System Research*. 2017. V. 51. № 6. P. 457–478).
- Гудкова Т.В., Батов А.В., Жарков В.Н.* О зонах возможной повышенной сейсмической активности на Марсе // Докл. РАН. 2018. Т. 481. № 4. С. 1–4. (*Gudkova T.V., Batov A.V., Zharkov V.N.* On Zones of Potential High Seismic Activity on Mars // *Doklady of Earth Sciences*. 2018. V. 481. № 2. P. 1013–1016).
- Гудкова Т.В., Жарков В.Н.* Модели внутреннего строения землеподобной Венеры // Астрономический Вестник. 2020. Т. 54. № 1 С. 24–32. (*Gudkova T.V., Zharkov V.N.* Models of the Internal Structure of the Earth-like Venus // *Solar System Research*. 2020. V. 54. № 1. P. 20–27.)
- Жарков В.Н.* Физика земных недр. ООО Наука и образование. 2012. 386 с. (*Zharkov, V.N., Fizika zemnykh neдр (Physics of the Earth's Interior)*, Moscow: Nauka i Obrazovanie, 2012).
- 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. (*Zharkov V.N., Marchenkov K.I.* On the correlation of shear stresses in the Venusian lithosphere with surface structures // *Astron. Vestn.* 1987. V. 21. № 2. С. 170–175).
- Жарков В.Н., Гудкова Т.В.* О модельной структуре гравитационного поля Марса // Астрон. вестн. 2016. Т. 50. № 4. С. 252–267. (*Zharkov V.N., Gudkova T.V.* On the model Structure of the gravity field of Mars // *Sol. Syst. Res.* 2016. V. 50 (4). P. 235–250.)
- Жарков В.Н., Гудкова Т.В.* О параметрах землеподобной модели Венеры // Астрономический Вестник. 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., Марченков К.И., Любимов В.М.* О длинноволновых касательных напряжениях в литосфере и мантии Венеры // Астрон. вестн. 1986. Т. 20. № 3. С. 202–211. (*Zharkov V.N., Marchenkov K.I., Lyubimov V.M.* On long-period shear stresses in the lithosphere and mantle of Venus // *Astron. Vestn.* 1986. V. 20. № 3. С. 202–211.)
- Жарков В.Н., Кошляков Е.М., Марченков К.И.* Состав, строение и гравитационное поле Марса // Астрон. вестн. 1991. Т. 25. № 5. С. 515–547. (*Zharkov V.N., Koshlyakov E.M., Marchenkov K.I.* Composition, structure and gravitational field of Mars // *Astron. Vestn.* 1991. V. 25 (5). P. 515–547.)
- Ксанфомалити Л.В.* Поиск микросейсм на Венере // Космические исследования. 1983. Т. XXI (3). С. 355–360.
- Ксанфомалити Л.В., Зубкова В.М., Морозова Н.А., Петрова Н.В.* Микросейсм в местах посадки “Венеры-13” и “Венеры-14” // Письма в АЖ. 1982. Т. 8(7). С. 444–447. (*Ksanfomaliti L.V., Zubkova V.M., Morozova N.A., Petrova N.V.* Microseisms at the Venera 13 and Venera 14 landing sites // *Sov. Astron. Lett.* 8(4). P. 241–242.)
- 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. (*Marchenkov K.I., Lyubimov V.M., Zharkov V.N.* Calculation of loading coefficients for deep density anomalies // *Dokl. Akad. Nauk SSSR*. 1984. V. 15. № 2. С. 583–586.)
- Марченков К.И., Жарков В.Н.* О рельефе границы коры-мантии и напряжениях растяжения-сжатия в коре Венеры // Письма в астрон. журн. 1989. Т. 15. № 2. С. 182–190. (*Marchenkov K.I., Zharkov V.N.* On the relief of the crust-mantle boundary and extension-compression stresses in the crust of Venus // *Pis'ma Astron. Zh.* 1989. V. 15. № 2. С. 182–190.)
- 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. (*Menshchikova T.I., Gudkova T.V., Zharkov V.N.* Analysis of the topography and gravity data for the Earth-like Venus // *Sol. Syst. Res.* 2021. V. 55 (1). P. 11–19.)
- Anderson D.L., Miller W.F., Latham G.V., Nakamura Y., Toksoz M.N., Dainty A.M., Duennebie F.K., Lazarewicz A.R., Kovach R.L., Knight T.C.D.* Seismology on Mars // *JGR* 1977. V. 82 (28). 4524–4546.

- Banerdt W.B., Smrekar S., Lognonné P., Spohn T., Asmar S.W., Banfield D., Boschi L., Christensen U., Dehant V., Folkner W., Giardini D., Goetze W., Golombek M., Grott M., Hudson T., et al. InSight: a discovery mission to explore the interior of Mars, Proc. 44th Lunar and Planetary Science Conf., Woodlands, 2013. V. 44. P. 1915.
- Banerdt W.B., Smrekar S.E., Banfield D., Giardini D., Golombek M., Johnson C.L., et al. Initial results from the InSight mission on Mars // *Nature Geosci.* 2020. V. 13. C. 183–189.
- Basilevsky A.T. Age of rifting and associated volcanism in Atla Regio, Venus // *Geophys. Res. Lett.* 1993. V. 20 (10). P. 883–886.
- Bondarenko N.V., Kreskavsky M.A. Surface properties and surficial deposits on Venus: New results from Magellan Radar Altimeter data analysis // *Icarus.* 2018. V. 309. P. 162–176.
- 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., Knapmeyer-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.
- Broquet A., Andrews-Hanna J.C. Geophysical evidence for an active mantle plume underneath Elysium Planitia on Mars // *Nature Astronomy.* 2022. <http://doi.org/10.1038/s41550-022-01836-3>
- Byrne P.K., Krishnamoorthy S. Estimates on the frequency of volcanic eruptions on Venus // *J. Geophys. Res.: Planets.* 2022. V. 127 (1). E2021JE007040
- Ceylan S., Clinton J.F., Giardini D., Stähler S.C., Horleston A., Kawamura T., Böse M., Charalambous C., Dahmen N.L., van Driel M., Duran C., Euchner F., Khan A., Kim D., Plasman M., Scholz J.-R., Zenhäusern G., Beucler E., Garcia R.F., Kedar S., Knapmeyer M., Lognonné P., Panning M.P., Perrin C., Pike W.T., Stott A.E., Banerdt W.B. The marsquake catalogue from InSight, sols 0–1011 // *Phys. Earth. Planet. Inter.* 2022. V. 333 (3). 106943.
- Dziewonski A.M., Anderson D.L. Preliminary reference earth model // *Phys. Earth. Planet. Inter.* 1981. V. 25 (4). P. 297–356.
- Garcia R., Lognonné Ph., Bonnin X. Detecting atmospheric perturbations produced by Venus quakes // *Geophysical Research Letters.* 2005. V. 32. L16205.
- Giardini D., Lognonné P., Banerdt W.B. et al. The Seismicity of Mars // *Nature Geoscience.* 2020. V. 13. № 3. P. 205.
- Graff J.R., Ernst R.E., Samson C. Evidence for triple-junction rifting focussed on local magmatic centres along Parga Chasma, Venus // *Icarus.* V. 306. P. 122–138.
- Herrick R.R., Hensley S. Surface changes observed on a Venusian volcano during the Magellan mission // *Science.* 2023. V. 379. Issue 6638. P. 1205–1208.
- Horleston A.C., Clinton J.F., Ceylan S., Giardini D., Charalambous C., Irving J.C.E., Lognonné P., Stähler S.C., Zenhäusern G., Dahmen N.L. et al. The far side of Mars: two distant marsquakes detected by InSight // *The seismic record.* 2022. V. 2 (2). P. 88–99.
- Huang Q., Schmerr N.C., King S. D., Kim D., Rivoldini A., Plesa A.-C., Samuel H., Maguire R.R., Karakostas F., Lekić V., Charalambous C., Collinet M., Myhill R., Antonangeli D., Drilleau M., Bystricky M., Bollinger C., Michaut C., Gudkova T., Irving J. C.E., Horleston A., Fernando B., Leng K., Nissen-Meyer T., Bejina F., Bozdağ E., Beghein C., Waszek L., Siersch N.C., Scholz J.-R., Davis P.M., Lognonné P., Pinot B., Widmer-Schmid R., Panning M.P., Smrekar S.E., Spohn T., Giardini D., Banerdt W.B. Seismic detection of a deep mantle discontinuity within Mars by InSight // *PNAS.* October 10. 2022.
- InSight Marsquake Service. Mars Seismic Catalogue, InSight Mission 2023. V. 14 2023-04-01. ETHZ, IPGP, JPL, ICL, Univ. Bristol. <https://doi.org/10.12686/a21>
- Ivanov M.A., Head J.W. Global geological map of Venus // *Planetary and Space Science.* 2011. V. 59 (13). P. 1559–1600.
- Kawamura T., Clinton J.F., Zenhäusern G., Ceylan S., Horleston A.C., Dahmen N.L., Duran C., Kim D., Plasman M., Stähler S.C., Euchner F., Charalambous C., Giardini D., Davis P., Sainton G., Lognonné P., Panning M., Banerdt W.B. S1222a – The largest marsquake detected by InSight // *Geophys. Res. Lett.* 2023. V. 50 (5). E2022GL101543.
- Knapmeyer-Endrun B., Panning M.P., Bissig F., Joshi R., Khan A., Kim D., Lekić V., Tauzin B., Tharimena S., Plasman M., Compaire N., Garcia R.F., Margerin L., Schimmel M., Stutzmann E., Schmerr N., E. Bozdağ, Plesa A.-C., Wiczorek M.A., Broquet A., Antonangeli D., McLennan S.M., Samuel H., Michaut C., Pan L., S.E. Smrekar S.E., Johnson C.L., Brinkman N., Mittelholz A., Rivoldini A., Davis P.M., Lognonné P., Pinot B., Scholz J.-R., Stähler S., Knapmeyer M., van Driel M., Giardini D., Banerdt W.B. Thickness and structure of the martian crust from InSight seismic data // *Science.* 2021. V. 373. P. 438–443.
- Komjathy A., Didion A., Sutin B., Nakazono B., Karp A., Wallace M., Lantoin G., Krishnamoorthy S., Rud M., Cutts J., Makela J., Grawe M., Lognonné P., Kenda B., Drilleau M., Helbert J. Remote sensing of seismic activity on Venus using a small spacecraft: initial modeling results // 49th Lunar and Planetary Science Conference. 2018. 2083.1731.pdf
- 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.
- 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.
- Kremic T., Ghail R., Gilmore M., Hunter G., Kiefer W., Limaye S., Pauken M., Tolbert C., Wilson C. Long-duration Venus lander for seismic and atmospheric science // *Planetary and Space Science.* 2020. V. 190. P. 104961
- Lehmann I. P'Bureau Central Séismologique International Strasbourg: Publications du Bureau Central Scientifiques. 1936. V. 14. P. 87–115.
- Liu J., Sieh K., Hauksson E. A structural interpretation of the aftershock “cloud” of the 1992  $M_w$  7.3 Landers earthquake // *Bulletin of the Seismological Society of America.* 2003. V. 93 (3). P. 1333–1344.

- Lognonné P., Johnson C.L. Planetary Seismology / Spohn T. (ed.). Treatise on Geophysics. Planets and Moons. Amsterdam: Elsevier. Second Edition. 2015. V. 10. P. 65–120.
- Lognonné P., Karakostas F., Rolland L., Nishikawa Y. Modeling of atmospheric-coupled Rayleigh waves on planets with atmosphere: From Earth observation to Mars and Venus perspectives // The Journal of the Acoustical Society of America. 2016. V. 140 (2). P. 1447–1468.
- Lognonné P., Banerdt W.B., Giardini D., Pike W.T., Christensen U., Laudet P., et al. SEIS: Insight's Seismic Experiment for Internal Structure of Mars // Space Science Reviews. 2019. V. 215 (1). P. 12.
- Makela J.J., Lognonné P., Hebert H., Gehrels T., Rolland L., Allgeyer S., Kheranj A., Occhipinti G., Astafyeva E., Coisson P., Loevenbruck A., Clevede E., Kelley M.C., Lamouroux J. Imaging and modeling the ionospheric airglow response over Hawaii to the tsunami generated by the Tohoku earthquake of 11 March 2011 // Geophysical Research Letters. 2011. V. 38 (24). L00G02.
- Mimoun D., Lognonné P., Banerdt W.B., Hurst K., Deraucourt S., Gagnepain-Beyneix J., Pike T., Calcutt S., Bierwirth M., Roll R., Zweifel P., Mance D., Robert O., Nébut T., Tillier S., Laudet P., Kerjean L., Perez R., Giardini D., Christensen U., Garcia R. The InSight SEIS Experiment // Lunar and Planetary Science Conference. 2012. Lunar and Planetary Inst. Technical Report. V. 43. P. 1493.
- Mohorovičić A. Godišnje izvješće zagrebačkog meteorološkog opservatorija za godinu 1909. Godina IX, dio IV. – polovina 1. Potres od 8.X 1909. 1910. English translation: Earthquake of 1909 October 8 // Geofizika. 1992. V. 9. P. 3–55.
- Oldham R. D. The constitution of the interior of the Earth, as revealed by earthquakes // Quarterly Journal of the Geological Society. 1906. V. 62 (1–4). P. 456–475.
- Panning M.P., Lognonné Ph., Banerdt W.B., Garsia R., Golombek M., Kedar S., Knapmeyer-Endrun B., Mocquet A., Teanby N.A., Tromp J., Weber R., Beucler E., Blanchette-Guertin J.-F., Drilleau M., Gudkova T. et al. Planned products of the Mars structure service for the InSight mission to Mars // Space Sci. Rev. 2017.
- 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.
- Saunders R.S., A.J. Spear A.J., Allin P.C., Austin R.S., Berman A.L., Chandler R.C., Clark J., Decharon A.V., De Jong E.M., Griffith D.G., Gunn J.M., Hensley S., Johnson W.T.K., Kirby C.E., Leung K.S., Lyons D.T., Michaels G.A., Miller J., Morris B., Morrison A.D., Piereson R.G., Scott J.F., Shaffer S.J., Slonski J.P., Stofan E.R., Thompson T.W., Wall S.D. Magellan mission summary // Journal of Geophysical Research. 1992. V. 97. E8. P. 13067–13090.
- Shalygin, E.V., Markiewicz W.J., Basilevsky A.T., Titov D.V., Ignatiev N.I., Head J.W. Active volcanism on Venus in the Ganiki Chasma rift zone // Geophys. Res. Lett. 2015. V. 42. P. 4762–4769.
- 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.
- Smrekar S.E., Stofan E.R., Mueller N., Treiman A., Elkins-Tanton L., Helbert J., Piccioni G., Drossart P. Recent hotspot volcanism on Venus from VIRTIS emissivity data // Science. 2010. V. 328 (5978). P. 605–608.
- 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.
- Tian Y., Herrick R.R., West M.E., Kremic T. Mitigating power and memory constraints on a Venusian seismometer // Seismological Res. Lett. 2023. V. 94 (1). P. 159–171.
- van Zelst I., Maia J., Plesa A.-C., Ghail R., Spühler M. Estimates on the possible annual seismicity of Venus // Geophys. Res. Lett. 2023.
- Weber R.C., Lin P.Y., Garnero E., Williams Q., Lognonné P. Seismic detection of the lunar core // Science. 2011. V. 331 (6015). P. 309–312.
- 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.
- Yang S.-S., Asano T., Hayakawa M. Abnormal gravity wave activity in the stratosphere prior to the 2016 Kumamoto earthquakes // Journal of Geophysical Research: Space Physics. 2019. V. 124 (2). P. 1410–1425.
- Zasova L.V., Gorinov D.A., Eismont N.A., Kovalenko I.D., Abbakumov A.S., Bober S.A. Venera-D: A design of an automatic space station for Venus exploration // Solar System Research. 2019. V. 53 (7). P. 506–510.
- Zharkov V.N., Gudkova T.V., Molodensky S.M. On models of Mars' interior and amplitudes of forced nutations. 1. The effects of deviation of Mars from its equilibrium state on the flattening of the core-mantle boundary // Phys. Earth Planet. Inter. 2009. V. 172. P. 324–334.

## Stress state of the Mars' and Venus' interior

T. V. Gudkova<sup>a, \*</sup> and A. V. Batov<sup>a,b, \*\*</sup>

<sup>a</sup>*Schmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences, Moscow, 123242 Russia*

<sup>b</sup>*Trapeznikov Institute of Control Sciences, Russian Academy of Sciences, Moscow, 117997 Russia*

<sup>\*\*e-mail:</sup> gudkova@ifz.ru

<sup>\*\*e-mail:</sup> batov@ipu.ru

Received April 19, 2023

revised July 5, 2023

accepted July 7, 2023

**Abstract** — It is shown that most of the epicenters of marsquakes are located in the zones of extension and fairly large shear stresses associated with the deviation of Mars from hydrostatic equilibrium. Non-hydrostatic stresses in the interior of Venus are calculated for two types of models: an elastic model and a model with a lithosphere of varying thickness (150–500 km) overlying a weakened layer that has partially lost its elastic properties. Numerical modeling of the system of elastic equilibrium equations for a gravitating planet is carried out with a step of  $1^\circ \times 1^\circ$  in latitude and longitude up to a depth of 480 km — the first phase transition zone in the mantle. The topography and the gravitational field of the planet are the boundary conditions of the problem. Overall, the level of nonhydrostatic stress on Venus is not very high. On the surface and in the crust, the highest shear stresses are observed in the region of the Maxwell Monte on Ishtar Terra. Beneath the Maxwell Monte, shear stresses in the crust reach 80 MPa and compressive stresses, 125–150 MPa, depending on the model. Tensile stresses around this region are about 20 MPa. The highest tensile stresses occur in the regions beneath structures such as Lavinia Planitia, Sedna Planitia, and Aino Planitia.

**Keywords:** modeling of non-hydrostatic stresses, topography, gravitational field, Mars, Venus