

На правах рукописи



**Батов Алексей Владимирович**

**ОЦЕНКА НЕГИДРОСТАТИЧЕСКИХ НАПРЯЖЕНИЙ  
В НЕДРАХ МАРСА ПО ДАННЫМ ТОПОГРАФИИ  
И ГРАВИТАЦИОННОГО ПОЛЯ**

Специальность 25.00.10 Геофизика, геофизические  
методы поисков полезных ископаемых

АВТОРЕФЕРАТ  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Москва – 2018

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте физики Земли им. О.Ю. Шмидта Российской академии наук в лаборатории происхождения, внутреннего строения и динамики Земли и планет

Научный руководитель: **Гудкова Тамара Васильевна**,  
доктор физико-математических наук,  
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта Российской академии наук,  
главный научный сотрудник лаборатории происхождения,  
внутреннего строения и динамики Земли и планет

Официальные оппоненты: **Иванов Борис Александрович**,  
доктор физико-математических наук,  
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Институт динамики геосфер Российской академии наук,  
ведущий научный сотрудник лаборатории деформационных  
процессов в земной коре

**Никишин Анатолий Михайлович**,  
доктор геолого-минералогических наук, профессор,  
Федеральное государственное бюджетное образовательное  
учреждение высшего образования «Московский  
государственный университет имени М.В. Ломоносова»,  
заведующий кафедрой региональной геологии и истории Земли  
геологического факультета

Ведущая организация: **Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Институт космических исследований Российской академии наук**

Защита диссертации состоится 13 декабря 2018 г. в 14<sup>00</sup> на заседании диссертационного совета Д 002.001.01 при ИФЗ РАН по адресу: 123242, г. Москва, ул. Большая Грузинская, д. 10, стр. 1, конференц-зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИФЗ РАН и на сайте [www.ifz.ru](http://www.ifz.ru). Автореферат размещен на официальном сайте Высшей аттестационной комиссии при Министерстве образования и науки Российской Федерации [vak.ed.gov.ru](http://vak.ed.gov.ru) и на сайте института [www.ifz.ru](http://www.ifz.ru).

Отзывы на автореферат, заверенные печатью, в двух экземплярах, просьба направлять по адресу: 123242, Москва, ул. Большая Грузинская, д. 10, стр. 1, ИФЗ РАН, ученому секретарю диссертационного совета Владимиру Анатольевичу Камзолкину.

Автореферат разослан « \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2018 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,  
кандидат геолого-минералогических наук



В.А. Камзолкин.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность темы исследования

Для решения фундаментальной задачи планетарной геофизики – построения теории образования Земли, ее начального состояния и эволюции – большое значение имеет изучение внутреннего строения Марса. Многие из процессов, когда-то происходящих на Земле, и следы которых уже стерлись, имели место и на Марсе, хотя при других условиях и в других временных масштабах, но, тем не менее, они могут дать информацию о том, как формировалась Земля и о ранней эпохе её развития. Поэтому исследование внутреннего строения Марса является одним из приоритетных направлений планетных исследований.

В настоящее время ведется завершающая фаза подготовки сейсмического эксперимента на Марсе, запуск космического аппарата миссии НАСА “InSight” (Interior exploration using Seismic investigations, geodesy and heat transport – Исследование внутреннего строения с использованием сейсмических исследований, данных геодезии и измерения теплового потока) осуществлен в мае 2018 г. Установка трехкомпонентного широкополосного сейсмометра, который может зарегистрировать сейсмические сигналы от метеоритных ударов, от марсотрясений, вызванных охлаждением литосферы, и собственных колебаний, ожидается в ноябре 2018 г. для работы в течение одного года. В проект международной кооперации Российского Космического Агентства и Европейского Космического Агентства также включена разработка сейсмометра.

Спецификой проведения сейсмического эксперимента на Марсе является установка только одного сейсмометра. В связи с этим, для интерпретации результатов, исследование напряженного состояния недр планеты и прогностическая локализация возможных очагов марсотрясений имеет большое значение. Прогресс в развитии моделей гравитационного поля и топографии благодаря миссиям Mars Global Surveyor (MGS), Mars Odyssey (ODY), Mars Reconnaissance Orbiter (MRO), а также детализация моделей внутреннего строения Марса, позволяют оценить напряженное состояние недр планеты с большой точностью.

Диссертационная работа направлена на решение этой актуальной задачи.

**Целью работы** является получение детальной картины распределения негидростатических напряжений в недрах Марса по современным данным топографии и гравитационного поля планеты на базе модели внутреннего строения, уточненной по всем имеющимся данным наблюдений, и выявление зон высоких значений напряжений сдвига на фоне растягивающих напряжений в недрах планеты как возможных очагов марсотрясений.

### Основные задачи исследования:

В рамках сформулированных целей исследования решаются следующие задачи:

1. Уточнение современной модели внутреннего строения Марса.

2. Определение диссипативных свойств недр Марса.
3. Анализ последних данных гравитационного поля и топографии.
4. Расчет нагрузочных коэффициентов для разных глубин залегания аномальных масс.
5. Получение детальной картины распределения негидростатических напряжений в недрах Марса с шагом 1x1 градус по широте и долготе до глубины 1000 км.
6. Поиск областей одновременно высоких значений напряжений сдвига и растяжения как возможных очагов марсотрясений.

### **Методология**

Планета моделируется как упругое тело с зависящими от радиуса плотностью, модулем сжатия и модулем сдвига. 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. В отличие от решения уравнений теории упругости для небольших тел, система уравнений включает уравнение Пуассона, связывающего аномальный гравитационный потенциал с распределением плотности. Рассматриваются только негидростатические напряжения, возникающие вследствие отклонения планеты от состояния гидростатического равновесия. Амплитуды нагрузок подбираются так, чтобы удовлетворить данным топографии и гравитационного поля планеты (отсчитываемым от референсной равновесной поверхности), которые представлены в виде разложения в ряд по сферическим функциям. Решение системы уравнений упругого равновесия гравитирующей планеты определяет поле смещений для каждого значения степени гармоник  $n$  и заданной глубины, затем гармонические ряды суммируются. Симметричный тензор негидростатических напряжений приводится к диагональному виду с главными напряжениями  $\sigma_3 \leq \sigma_2 \leq \sigma_1$ , и вычисляются напряжения всестороннего сжатия/растяжения  $\sigma = (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)/3$  и максимальные сдвиговые (или касательные) напряжения  $\tau = \max|\sigma_i - \sigma_k|/2$ , ( $i, k = 1, 2, 3; i \neq k$ ).

### **Научная новизна**

1. Проведена детальная интерпретация неравновесного гравитационного поля и топографии планеты в разложении по сферическим функциям до 120 степени и порядка.
2. Создано программное обеспечение для расчета негидростатических напряжений в недрах планеты на языке FORTRAN и MATLAB.
3. Впервые проведено сравнение двухуровневой (источники аномального гравитационного поля – неравновесный рельеф и аномалии плотности на границе кора-мантия) и трехуровневой (неравновесный рельеф, аномалии плотности на границе кора-мантия и на нижней границе литосферы) моделей компенсации залегания аномальных масс в недрах Марса.

4. Получено распределение диссипативного фактора в недрах Марса по данным о приливном запаздывании Фобоса.
5. Построена модель внутреннего строения Марса, удовлетворяющая современным данным наблюдений.
6. Впервые получена детальная картина негидростатических напряжений по данным топографии и гравитационного поля в разложении по сферическим функциям до 90 степени и порядка.
7. Выявлены зоны высоких значений напряжений сдвига и растяжения, как области наиболее вероятных очагов марсотрясений.

#### **Основные защищаемые положения:**

1. Созданная модель внутреннего строения Марса (распределение плотности, гравитационного ускорения, давления, упругих модулей и диссипативного фактора), уточненная по современным данным наблюдений, подтверждает гипотезу о хондритовом составе планеты. Марс имеет базальтовую кору толщиной 50-100 км, силикатную мантию с содержанием железа  $Fe\#$  20-22 и жидкое железо-никелевое ядро с добавками легких элементов радиусом 1820-1870 км, массовое отношение  $Fe/Si=1.7$ .
2. Напряжения в недрах Марса определяются толщиной литосферы для любой из рассмотренных моделей неоднородной упругости, и не зависят от выбора модели компенсации (двухуровневая или трехуровневая), за исключением областей крупных ударных кратеров Эллада и Аргир. Касательные напряжения в литосфере достигают 60, 80 и 100 МПа в зависимости от мощности литосферы (500, 300 и 150 км), соответственно.
3. Зоны возможных очагов марсотрясений, обусловленные высокими значениями напряжений сдвига на фоне растягивающих напряжений в литосфере Марса, расположены под ударными бассейнами Эллада и Аргир, равнинами Ацидалийское море, Аркадия и долиной Маринера.

#### **Научная и практическая значимость полученных результатов**

Полученные в диссертации результаты могут быть использованы при разработке космических программ для исследования Марса и интерпретации их результатов. Они имеют прогностическое значение для локализации очагов марсотрясений, и могут быть полезны при обработке сейсмических данных, а также идентификации и интерпретации мод крутильных и сфероидальных колебаний при их регистрации во время сейсмического эксперимента на Марсе.

Разработанная модель внутреннего строения Марса включена в базу тестовых моделей проекта InSight.

Научная и практическая значимость выполненных автором исследований подтверждается тем, что часть работ, вошедших в диссертацию, проводилась при поддержке грантов РФФИ (15-02-840), РФФИ (18-32-00875) и Программы РАН 28.

### **Достоверность полученных научных результатов**

Для оценки достоверности результаты соотносились с материалами работ, опубликованными ранее. Тестирование пакета программ для расчета негидростатических напряжений проводилось путем сравнения результатов вычислений с данными других авторов.

Результаты, представленные в диссертации, прошли рецензирование и опубликованы в журналах ВАК.

### **Личный вклад**

Все результаты, представленные в диссертации, получены автором самостоятельно или при его непосредственном участии в коллективе соавторов.

Постановка большинства задач формулировалась при совместных обсуждениях с д.ф.-м.н. Т.В. Гудковой. Автором создано программное обеспечение, которое использовано для решения поставленных задач, выполнены расчеты и дана интерпретация результатов.

### **Апробация и публикации**

По теме работы автором опубликовано 22 печатные работы, из которых 5 – статей в журналах, включенных в перечень российских рецензируемых научных журналов и изданий для опубликования основных научных результатов диссертации.

Основные положения работы были представлены на международных конференциях по исследованию Солнечной Системы 7M-S3, 8M-S3, 9M-S3 в ИКИ РАН в 2016, 2017 и 2018 годах; конференции по Солнечной системе в КФУ, Казань в 2016 году; международной школе-конференции молодых учёных «Недра планет» в Gran Sasso Science Institute, Италия в 2016 году; международных семинарах им. Д.Г. Успенского в ИФЗ РАН в 2017 году и в КФУ, Казань в 2018 году; на совещаниях научной группы проекта InSight в 2017–2018 годах; Европейском конгрессе планетарных наук в Берлинском техническом университете, Германия в 2018 году. Результаты работы также докладывались и обсуждались на научных семинарах ИФЗ РАН и конференциях молодых ученых ИФЗ РАН, ИКИ РАН и ИПУ РАН в 2016–2018 годах.

### **Структура и объем работы**

Диссертация состоит из введения, пяти глав и заключения; содержит 142 страницы машинописного текста, в том числе 34 рисунка, 7 таблиц и 44 формулы; список использованной литературы составляет 136 наименований.

### **Благодарности**

Автор выражает признательность и благодарность своему научному руководителю д.ф.-м.н. Гудковой Тамаре Васильевне за постоянное внимание, поддержку и помощь в проведении исследований. Автор глубоко благодарен за полезные обсуждения и консультации д.ф.-м.н. проф. В.Н. Жаркову. Автор выражает искреннюю благодарность д.ф.-м.н. Ю.Л. Ребецкому за полезные замечания.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

### Глава 1. Обзор литературы и анализ данных наблюдений

В первой главе показано современное состояние исследуемой проблемы, дается обоснование применения статического метода (метода нагрузочных чисел) для решения поставленной задачи, проводится анализ данных топографии и гравитационного поля Марса, а также сравнение величин напряжений при использовании моделей гравитационного поля разных авторов.

В п.1.1. показано, что в основном, начиная с эпохи Viking (середина 1970-х годов), теоретические моделирования напряженного состояния предпринимались для того, чтобы понять эволюционные процессы и механизмы, отвечающие за специфические черты поверхности Марса. Отмечено, что совместная интерпретация аномального гравитационного поля и топографии планеты позволяет исследовать напряженное состояние марсианской литосферы, и существует два подхода к решению этой задачи: динамический и статический. Для расчета напряжений в недрах Земли применяется динамический метод (решение системы уравнений вязкой жидкости Навье-Стокса). Подчеркивается, что в отличие от Земли, где подкоровые напряжения создаются тектоническими процессами, и максимальные напряжения совпадают с зонами конвергенции, на Марсе нет следов плейт-тектоники, и тектонические черты на поверхности планеты носят региональный характер. Если под литосферой Марса и существует тепловая конвекция, то она носит второстепенный характер, и напряженное состояние связано главным образом с упругими деформациями приповерхностных горизонтов планеты, что позволяет использовать при анализе статический подход, который был развит в работах [Марченков и др., 1984; Жарков и др., 1986; Жарков, Марченков, 1987; Марченков, Жарков, 1989] при исследовании напряженного состояния недр Венеры. До настоящей работы, расчеты напряженного состояния марсианской литосферы были выполнены, используя данные о разложении топографии и гравитационного поля по сферическим функциям до 18-й (Жарков и др., 1991) и 50-й степени и порядка [Кошляков, Жарков, 1993].

В п.1.2. проведен детальный анализ данных гравитационного поля и топографии. В настоящее время разложение гравитационного потенциала по нормализованным сферическим функциям доведено до 120-й степени и порядка (модель MRO120D [Konopliv и др., 2016] и модель GMM-3 [Genova и др., 2016]):

$$V(r, \varphi, \lambda) = \frac{GM}{r} \left[ 1 + \sum_{n=2}^{120} \sum_{m=0}^n \left( \frac{R_e}{r} \right)^n (C_{gnm} \cos m\lambda + S_{gnm} \sin m\lambda) P_{nm}(\sin \varphi) \right], \quad (1.1)$$

где  $r$  – расстояние от точки наблюдения до начала координат,  $\varphi$  и  $\lambda$  – ареоцентрические широта и долгота,  $M$  – масса планеты,  $G$  – гравитационная постоянная,  $R_e$  – экваториальный радиус

(нормирующий радиус),  $C_{gnm}$  и  $S_{gnm}$  – нормализованные гравитационные моменты,  $P_{nm}$  – нормализованные функции Лежандра степени  $n$  и азимутального числа  $m$ , удовлетворяющие соотношению

$$\int_0^{2\pi} \int_{-1}^1 P_{nm}^2(\sin \varphi) \begin{cases} \cos^2(m\lambda) \\ \sin^2(m\lambda) \end{cases} d(\sin \varphi) d\lambda = 4\pi. \quad (1.2)$$

Данные топографии представлены в виде коэффициентов разложения по полиномам Лежандра высот рельефа относительно центра масс группой [Smith и др., 2001] до 1152 степени и порядка

$$R_{\text{рельеф}}(r, \varphi, \lambda) = R + \sum_{n=1}^{1152} \sum_{m=0}^n [C_{nm} \cos m\lambda + S_{nm} \sin m\lambda] P_{nm}(\sin \varphi), \quad (1.3)$$

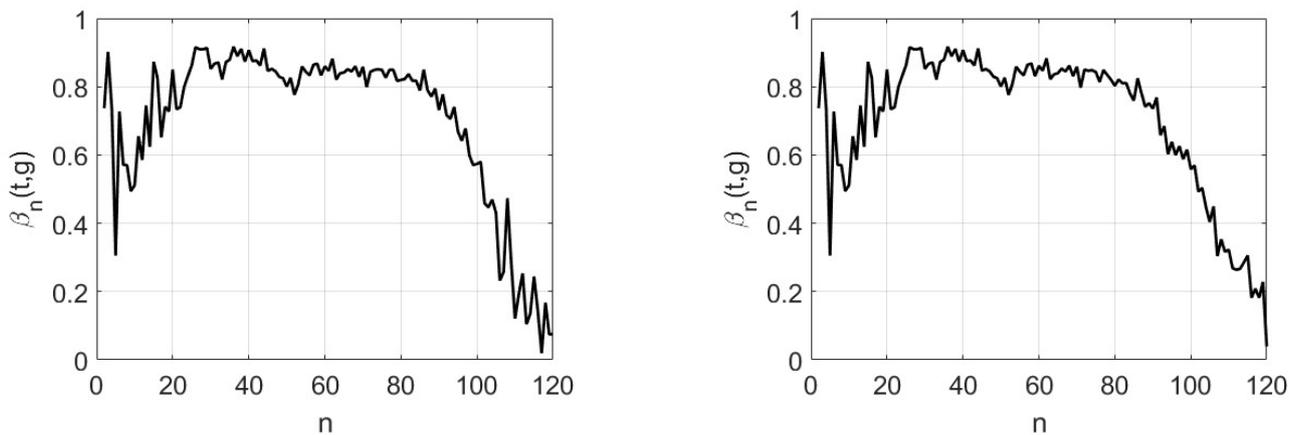
где  $R$  – средний радиус Марса,  $C_{nm}$  и  $S_{nm}$  – гармонические коэффициенты в разложении рельефа (в метрах).

Коэффициенты порядковой корреляции топографии и гравитационного поля Марса  $\beta_n(t, g)$ :

$$\beta_n(t, g) = \frac{\sum_{m=0}^n (C_{nm} C_{gnm} + S_{nm} S_{gnm})}{\sqrt{(D_t)_n (D_g)_n}}, \quad (D_t)_n = \sum_{m=0}^n (C_{nm}^2 + S_{nm}^2), \quad (D_g)_n = \sum_{m=0}^n (C_{gnm}^2 + S_{gnm}^2). \quad (1.4)$$

Показано, что для гармоник выше 90 степени, корреляция между данными топографии и гравитационного поля, как для модели MRO120D [Konopliv и др., 2016], так и для модели GMM-3 [Genova и др., 2016], начинает спадать (Рис. 1). Поэтому для расчета распределения напряжений использовались данные гравитационного поля и топографии в виде коэффициентов разложения по полиномам Лежандра до 90 степени и порядка.

В п.1.3. приводится сравнение полей напряжений, полученных для моделей MRO120D и GMM-3. Показано, что среднее отклонение величин напряжений растяжения-сжатия составляет не более 4 %, и менее 1% для напряжений сдвига практически для всей планеты,



**Рис. 1.** Коэффициенты порядковой корреляции топографии и гравитационного поля для модели GMM-3 (слева) и MRO120D (справа)

что позволяет выбрать любую из данных моделей для исследования напряженного состояния недр Марса. В данной работе используется модель гравитационного поля MRO120D.

**Основной вывод:** Аргументировано применение статического метода для расчета напряженного состояния недр Марса. Показано, что можно использовать любую из последних моделей гравитационного поля MRO120D и GMM-3, представленные в виде коэффициентов разложения по полиномам Лежандра только до 90 степени и порядка.

## Глава 2. Построение модели внутреннего строения Марса

В п.2.1. проводится построение тестовой модели внутреннего строения Марса. Распределение плотности контролируется по моменту инерции  $I$  и числу Лява  $k_2$ , значения которых были существенно уточнены в работах [Konopliv и др., 2016; Genova и др., 2016]: момент инерции  $I=0.3637\div 0.3639$ , упругое числа Лява  $k_2^S=0.158\div 0.170$ .

Построенные модели внутреннего строения Марса основаны на космохимической WD модели [Wänke, Dreibus, 1994] и включают четыре подмодели: модель внешнего пористого слоя, модель консолидированной коры, модель мантии и модель ядра. Для марсианской коры приняты минералогические и упругие параметры, полученные методом численного термодинамического моделирования в [Babeiko, Zharkov, 2000]. При моделировании мантии Марса использованы экспериментальные данные из работы [Bertka, Fei, 1997, 1998], в которой образцы, соответствующие составу WD-модели, сжимались вдоль модельной ареотермы до давлений, которые соответствуют границе ядро-мантия. Варьируемым параметром в мантии при моделировании служило содержание железа  $Fe\#$  ( $Fe\# = Fe^{2+}/(Fe^{2+}+Mg) \times 100$ ). Ядро состоит из железа и никеля, с добавкой таких легких элементов, как 14 вес. % серы, и, в соответствие с работой [Жарков, 1996], содержит заметное количество водорода ( $N_{\text{ядро}}$ ). Из набора полученных моделей выбраны две модели со значением средней толщины коры 50 (M\_50) (Рис. 2) и 100 км (M\_100) и средней плотностью 2900 кг/м<sup>3</sup> (Таблица 1). Увеличение наблюдаемого числа Лява  $k_2$  привело к увеличению модельного радиуса жидкого ядра и уменьшению содержания железа в мантии.

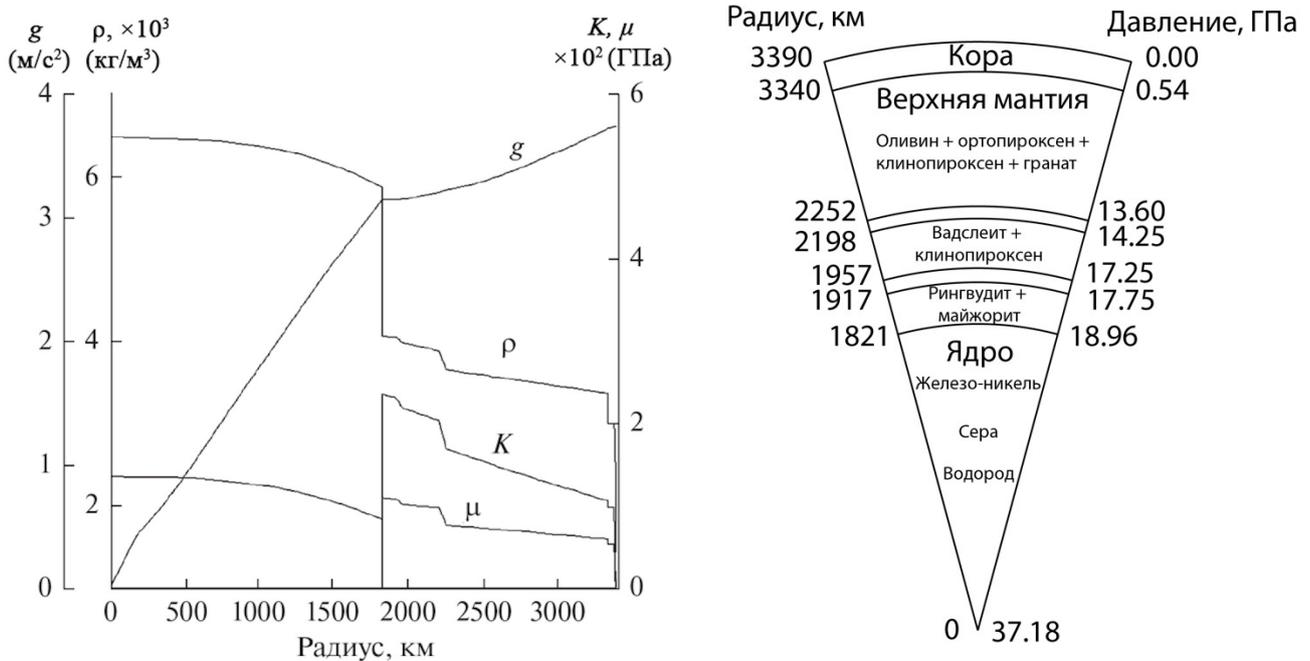
В п.2.2. показан выбор распределения диссипативного фактора в недрах Марса. Для Марса существует единственное условие, которое накладывает ограничение на распределение диссипативного фактора недр Марса  $Q_{\mu}(l)$  – это данные о приливном запаздывании его спутника Фобоса. Исходя из того, что земная геотерма на плоскости P-T близка и похожа на ареотермы Марса, сделано предположение, что распределение  $Q_{\mu}(l)$  в недрах Марса должно быть топологически похоже на земное. В качестве начального пробного распределения  $Q_{\mu}(l)$  была принята кусочно-постоянная функция из работы [Lawrence, Wysession, 2006], полученная для

**Таблица 1.** Параметры тестовых моделей внутреннего строения Марса

Модель	$\rho_{\text{кора}}$ кг/м <sup>3</sup>	$l_{\text{кора}}$ км	Fe# мантия	Ядро, мол. %	г ядро км	Рядро (ГПа)	Fe/Si	Fe в планете, вес. %	$I/MR^2$	$k_2^S$
M_50	2900	50	20	70	1821	19.0	1.8	27.8	0.3639	0.162
M_100	2900	100	22	80	1870	18.4	1.9	29.5	0.3639	0.170

сейсмической полосы частот. Соответственно, для глубин Марса  $Q_\mu(l)$  принято равным 600 (0-240 км), 80 (240-660 км), 143 (660-1200 км) и 276 (1200-1600 км) и исследовано, как эта функция преобразуется при переходе от сейсмической полосы периодов (1 с - 1 ч) к фобосовскому периоду (5.55 ч). На основании лабораторных и геофизических данных для показателя степени в зависимости  $Q_\mu$  от частоты  $Q_\mu(T) = Q_\mu(T_0)(T/T_0)^{-n}$  принят интервал 0.1-0.3. Оказалось, что при  $n=0.1$ , рассчитанные значения диссипативного фактора равны 96.2 и 89.9 для моделей внутреннего строения M\_50 и M\_100, соответственно, и близки к значению, полученному по данным наблюдений  $91.9 \pm 3.3$ .

Пункты 2.3. и 2.4. посвящены собственным колебаниям Марса, чтобы обратить внимание на то, что если такие колебания будут зарегистрированы, то эти результаты могут быть использованы как для корректировки модели внутреннего строения, так и для распределения диссипативного фактора недр Марса. Приведены выборочные значения периодов собственных колебаний и оценки времени их затухания.



**Рис. 2.** Распределение плотности  $\rho$ , гравитационного ускорения  $g$ , модуля сжатия  $K$  и модуля сдвига  $\mu$  (слева) и схема модели внутреннего строения Марса M\_50 (химический состав и значения радиуса и давления на границах раздела) (справа)

### **Основной вывод и первое защищаемое положение:**

Созданная модель внутреннего строения Марса (распределение плотности, гравитационного ускорения, давления, упругих модулей и диссипативного фактора), уточненная по современным данным наблюдений, подтверждает гипотезу о хондритовом составе планеты. Марс имеет базальтовую кору толщиной 50-100 км, силикатную мантию с содержанием железа Fe# 20-22 и жидкое железо-никелевое ядро с добавками легких элементов радиусом 1820-1870 км, массовое отношение Fe/Si=1.7.

### **Глава 3. Метод расчета напряженного состояния недр Марса**

Планета рассматривается как упругий сферически-симметричный объект, находящийся под воздействием возмущающей нагрузки в состоянии равновесия. Возмущающей нагрузкой являются как аномалии плотности на поверхности планеты, так и в её недрах. Блок-схема численного моделирования напряженного состояния недр Марса показана на Рис. 3.

Система уравнений, определяющих задачу, включает:

1. уравнение равновесия деформированного (упругого тела) при наличии объемных сил  $F$

$$\frac{\partial \sigma_{ik}}{\partial x_k} + \rho F_i = 0, \quad (3.1)$$

где  $\sigma_{ik}$  – тензор напряжений,  $x_k$  – координаты,  $\rho$  – плотность, объемной силой является гравитационное воздействие  $F = \nabla \psi$ ,

2. уравнение Пуассона, связывающее аномальный гравитационный потенциал с распределением плотности

$$\nabla^2 \psi = -4\pi G \rho, \quad (3.2)$$

3. реологическое уравнение, дающее соотношение между напряжением и смещениями (закон Гука для идеально упругой и изотропной среды)

$$\sigma_{ik} = K \varepsilon_{ij} \delta_{ik} + 2\mu \left( \varepsilon_{ik} - \frac{1}{3} \delta_{ik} \varepsilon_{jj} \right) = \lambda \varepsilon_{jj} \delta_{ik} + 2\mu \varepsilon_{ik}, \quad (3.3)$$

где  $K$  – модуль сжатия,  $\mu$  – модуль сдвига,  $\lambda = K - 2/3\mu$  – постоянная Лямэ,  $\delta_{ik}$  – символ Кронекера, симметричный тензор  $\varepsilon_{ik} = (\partial U_i / \partial x_k + \partial U_k / \partial x_i) / 2$  – тензор деформаций.  $U_k$  – компоненты вектора смещения.

Решение удобно искать в сферической системе координат. Система уравнений (3.1–3.3) в сферических координатах впервые была получена для расчета сфероидальных колебаний Земли [Alterman и др., 1959].

Точное решение полной системы уравнений является безупречным с математической точки зрения, но модель планеты содержит неопределенности, так как данные о реологическом строении отсутствуют. Оценки напряженного состояния недр Марса проводятся для нескольких вариантов моделей неоднородной упругости. (Рис. 4): 1) упругая модель; 2) модель

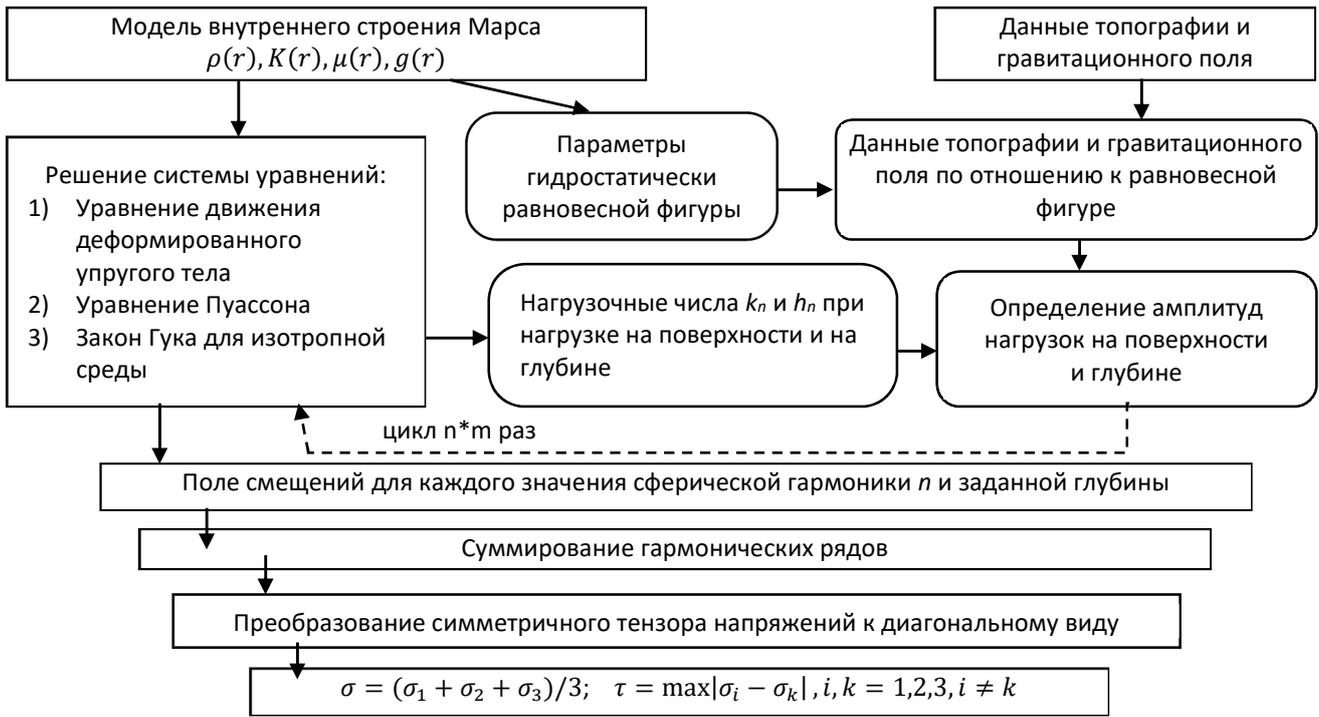


Рис. 3. Блок-схема расчета напряжений в недрах Марса

с литосферой варьируемой толщины (150–500 км), расположенной на ослабленном слое, который частично потерял свои упругие свойства. Ослабление моделируется пониженным в десять раз значением модуля сдвига  $\mu$  в слое под литосферой, который считается простирающимся до ядра или до первого фазового перехода; 4) модель с литосферой 300 км и зонами подплавления на глубинах 100–150 км и 100–200 км.

В данной работе система уравнений используется для исследования отклика Марса, находящегося под действием как поверхностных, так и внутренних аномалий-нагрузок. Метод решения упругой задачи при расположении нагрузки на глубине (техника нагрузочных коэффициентов для заглубленных аномалий плотности), который применяется в настоящей работе, развит в работах [Марченков и др., 1984; Жарков и др., 1986; Жарков, Марченков, 1987; Марченков, Жарков, 1989].

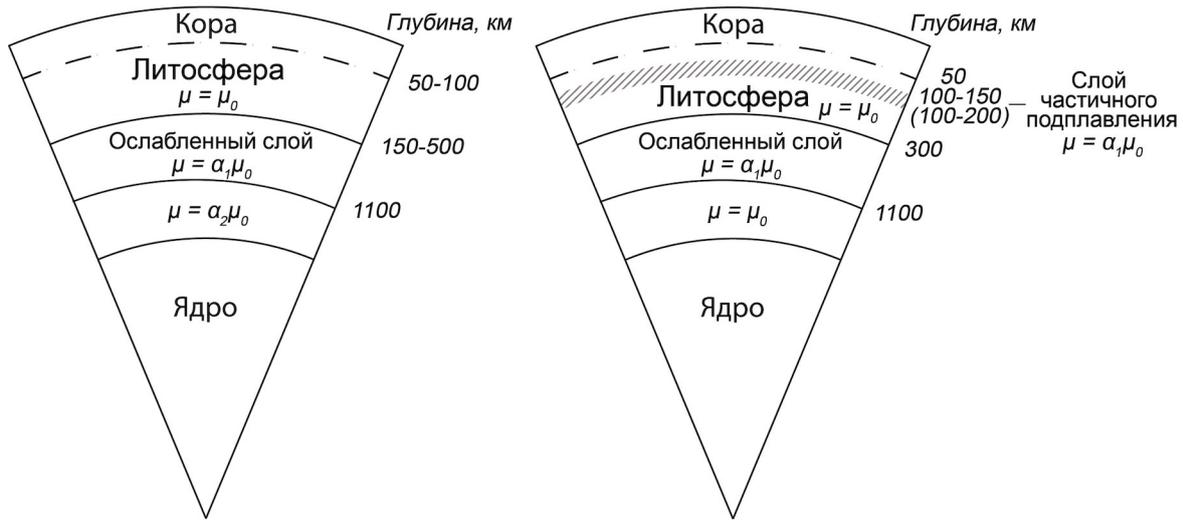
Аномальная поверхностная плотность (неравновесный рельеф)  $\delta\rho(r, \varphi, \lambda)$ , в виде бесконечно тонкого сферического слоя раскладывается в ряд по сферическим функциям

$$\delta\rho(r, \varphi, \lambda) = \sum_{i,n,m} R_{i,n,m}(r) Y_{i,n,m}(\varphi, \lambda) = \sum_{i=1}^2 \sum_{n=2}^{\infty} \sum_{m=0}^n R_{i,n,m}(r) Y_{i,n,m}(\varphi, \lambda), \quad (3.4)$$

где амплитуды  $R_{i,n,m}$  имеют размерность  $[M L^{-2}]$  и

$$Y_{im}(\varphi, \lambda) = P_{nm}(\sin \varphi) \begin{cases} \cos(m\lambda), i = 1 \\ \sin(m\lambda), i = 2. \end{cases}$$

Аномальный слой действует на планету как нагрузка, и ее недра испытывают деформации, приводящие к дополнительному возмущению потенциала. Чтобы получить



**Рис. 4.** Модели неоднородной упругости. Слева: 1)  $\alpha_1 = \alpha_2 = 1$  – полностью упругая модель; 2) модели с литосферой варьируемой толщины (150–500 км), расположенной на ослабленном слое, который частично потерял свои упругие свойства, простирающимся до ядра  $\alpha_1 = \alpha_2 = 0.1$ ; или до первого фазового перехода (оливин-вадслеит)  $\alpha_1 = 0.1$ ,  $\alpha_2 = 1$ . Справа: модель с литосферой 300 км и возможными областями подплавления на глубинах 100–150 или 100–200 км,  $\alpha_1 = 0.1$

выражение для полного аномального потенциала, учитывающего глобальную деформацию планеты, в потенциал от сферического слоя на поверхности планеты вводится множитель  $K_n(r) = (1 + k_n(r))$ :

$$\Delta V = 4\pi GR \sum_{i,n,m} \left(\frac{r}{R}\right)^{n+2} \frac{R_{i,n,m}(r)(1 + k_n(r))}{(2n + 1)} Y_{i,n,m}(\varphi, \lambda), \quad (3.5)$$

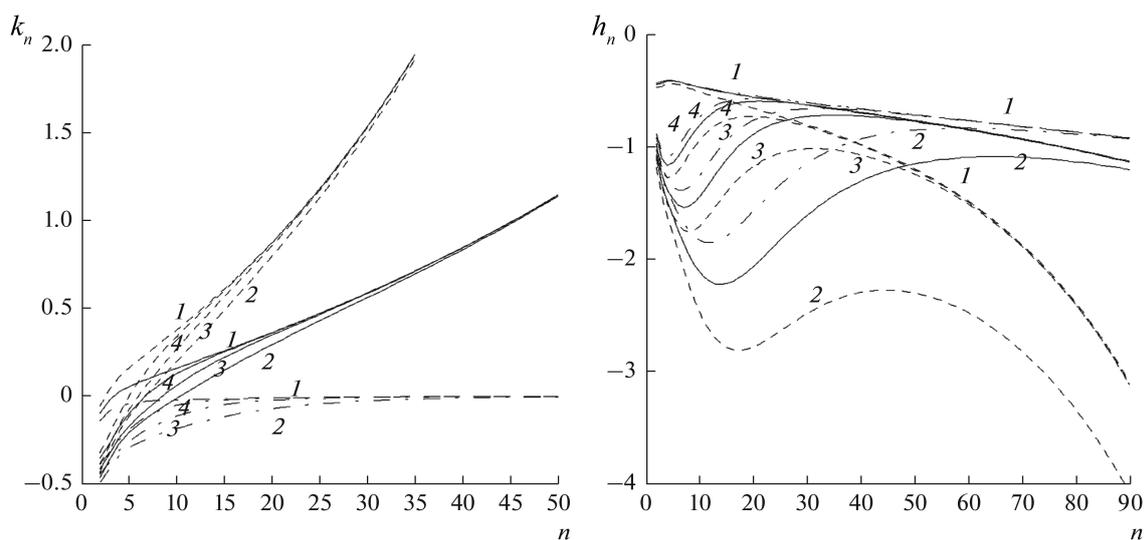
где  $k_n(r)$  – нагрузочные числа порядка  $n$  для заглубленной на глубине  $r$  аномалии, и  $K_n(r)$  – функция Грина – были введены в работах [Марченков и др., 1984; Жарков и др., 1986].

Аналогично вводятся числа  $h_n$  – нагрузочные числа, описывающие деформацию планеты  $D(\varphi, \lambda)$  под действием нагрузки  $\delta\rho(r, \varphi, \lambda)$ :

$$D = \frac{4\pi GR}{g_0} \sum_{i,n,m} \left(\frac{r}{R}\right)^{n+2} \frac{R_{i,n,m}(r)h_n(r)}{(2n + 1)} Y_{i,n,m}(\varphi, \lambda). \quad (3.6)$$

Задача сводится к решению системы шести обыкновенных дифференциальных уравнений первого порядка (см. [Марченков и др., 1984]). Используя метод Рунге-Кутты, и задавая нагрузку на поверхности или глубине, для распределения плотности и упругих параметров (модуля сжатия  $K$  и модуля сдвига  $\mu$ ), принятых в модели внутреннего строения Марса рассчитываются нагрузочные числа  $k_n(r)$ ,  $h_n(r)$  для каждой гармоники  $n$  до заданной степени (в данной работе до 90 степени) (Рис. 5).

Данные топографии и гравитационного поля служат граничными условиями для нахождения решения системы и определяются по отношению к референсной поверхности,



**Рис. 5.** Нагрузочные числа  $k_n$  (слева) и  $h_n$  (справа) для упругой модели  $M_{50}$  (1) и моделей с толщиной литосферы 150 км (2), 300 км (3) и 500 км (4) как функция номера сферической гармонике  $n$  на поверхности (штрих-пунктирные линии), на глубине 50 км (сплошные линии) и 100 км (пунктирные линии)

за которую выбирается равновесный сфероид [Zharkov и др., 2009; Жарков, Гудкова, 2016]. Гидростатически равновесная модель хорошо служит в качестве отсчетной модели для оценки напряженного состояния недр, так как в ней все другие напряжения, кроме давления, равны нулю. Нагрузка в таком случае представляет собой вес рельефа, относительно эквипотенциальной поверхности, т.е. определяется отклонением от состояния гидростатического равновесия. Из второго и четвертого зональных коэффициентов  $C_{l20}$ ,  $C_{l40}$  и  $C_{g20}$ ,  $C_{g40}$  в (1.1) и (1.3) вычитаются их модельные равновесные значения, тем самым определяя негидростатические составляющие.

Обратная задача потенциала имеет бесконечное число решений. Обычно для определенности задачи делается предположение, что существует два уровня сосредоточения аномальных масс – поверхность (вес рельефа, отсчитанного от эквипотенциальной поверхности) и граница Мохо (двухуровневая модель компенсации). Эти массы представляют собой утолщение или утоньшение коры на указанных уровнях. В данной работе дополнительно введена трехуровневая модель компенсации, в которой источниками аномального гравитационного поля могут являться неравновесный рельеф, аномалии плотности на границе кора-мантия и аномалии плотности на нижней границе литосферы.

Коэффициенты разложения по сферическим функциям аномальных волн плотности на поверхности  $R$ , на границе кора-мантия  $R_1$ , и на нижней границе литосферы  $R_2$ , соответственно  $R_{i,n,m}^1(\varphi, \lambda)$ ,  $R_{i,n,m}^2(\varphi, \lambda)$ , и  $R_{i,n,m}^3(\varphi, \lambda)$  связаны с коэффициентами разложения аномального гравитационного поля и топографии и подбираются так, чтобы получить наблюдаемое значение гравитационного поля  $C_{ginm}$  и топографии  $C_{imn}$ .

$$C_{ginm} = \frac{R_{inm}^1(\varphi, \lambda)}{R\rho_0} \frac{3(1+k_n(R))}{(2n+1)} + \frac{R_{inm}^2(\varphi, \lambda)}{R\rho_0} \frac{3(1+k_n(R_1))}{(2n+1)} \left(\frac{R_1}{R}\right)^{n+2} + \frac{R_{inm}^3(\varphi, \lambda)}{R\rho_0} \frac{3(1+k_n(R_2))}{(2n+1)} \left(\frac{R_2}{R}\right)^{n+2}, \quad (3.7a)$$

$$C_{tinm} = \frac{R_{inm}^1(\varphi, \lambda)}{R\rho_c} + \frac{R_{inm}^1(\varphi, \lambda)}{R\rho_0} \frac{3h_n(R)}{(2n+1)} + \frac{R_{inm}^2(\varphi, \lambda)}{R\rho_0} \frac{3h_n(R_1)}{(2n+1)} \left(\frac{R_1}{R}\right)^{n+2} + \frac{R_{inm}^3(\varphi, \lambda)}{R\rho_0} \frac{3h_n(R_2)}{(2n+1)} \left(\frac{R_2}{R}\right)^{n+2}, \quad (3.7b)$$

где  $\rho_0$  и  $\rho_c$  – средняя плотность Марса и плотность коры.

В формуле (3.7б) первый член представляет вклад от нагрузки на поверхности, а три других определяют деформацию под действием нагрузки на поверхности, на границе коры, и на нижней границе литосферы, соответственно. Положим  $R_{i,n,m}^2(\varphi, \lambda) = R_{i,n,m}^3(\varphi, \lambda)$ .

Компоненты вектора смещения  $\vec{u} = (u, v, w)$  в сферической системе координат имеют вид:

$$u = \sum_{i,n,m} U_n(r) Y_{inm}(\theta, \phi), \quad v = \sum_{i,n,m} V_n(r) \frac{\partial Y_{inm}(\theta, \phi)}{\partial \theta}, \quad w = \sum_{i,n,m} \frac{V_n(r)}{\sin \theta} \frac{\partial Y_{inm}(\theta, \phi)}{\partial \phi}. \quad (3.8)$$

Компоненты тензора деформаций в сферических координатах имеют вид:

$$\varepsilon_{rr} = \frac{\partial u}{\partial r}, \quad \varepsilon_{\theta\theta} = \frac{1}{r} \frac{\partial v}{\partial \theta} + \frac{u}{r}, \quad \varepsilon_{\phi\phi} = \frac{1}{r \sin \theta} \frac{\partial w}{\partial \phi} + \frac{v}{r} \operatorname{ctg} \theta + \frac{u}{r}, \quad \varepsilon_{r\theta} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial v}{\partial r} - \frac{v}{r} + \frac{1}{r} \frac{\partial u}{\partial \theta} \right), \quad (3.9)$$

$$\varepsilon_{r\phi} = \frac{1}{2} \left( \frac{1}{r \sin \theta} \frac{\partial u}{\partial \phi} + \frac{\partial w}{\partial r} - \frac{w}{r} \right), \quad \varepsilon_{\theta\phi} = \frac{1}{2} \left( \frac{1}{r} \frac{\partial w}{\partial \theta} - \frac{w}{r} \operatorname{ctg} \theta + \frac{1}{r \sin \theta} \frac{\partial v}{\partial \phi} \right).$$

Компоненты тензора напряжений определяются через компоненты тензора деформаций:

$$\sigma_{rr} = \lambda \Delta + 2\mu \varepsilon_{rr}, \quad \sigma_{\theta\theta} = \lambda \Delta + 2\mu \varepsilon_{\theta\theta}, \quad \sigma_{\phi\phi} = \lambda \Delta + 2\mu \varepsilon_{\phi\phi}, \quad (3.10)$$

$$\sigma_{r\theta} = 2\mu \varepsilon_{r\theta}, \quad \sigma_{r\phi} = 2\mu \varepsilon_{r\phi}, \quad \sigma_{\theta\phi} = 2\mu \varepsilon_{\theta\phi},$$

где  $\Delta$  – дилатация:

$$\Delta = \sum_{i=1}^2 \sum_n \sum_m X_n(r) Y_{inm}(\theta, \phi), \quad X_n(r) = \dot{U}_n(r) + \frac{2}{r} U_n(r) - \frac{n(n+1)}{r} V_n(r), \quad (3.11)$$

где точка означает дифференцирование по  $r$ ,  $\theta$  – полярный угол,  $\phi$  – долгота,  $\lambda = K - 2/3\mu$  – параметр Ламе.

Решение системы уравнений упругого равновесия планеты, находящейся под действием нагрузок на поверхности и глубине (3.1–3.3), в сферической системе координат позволяет нам для каждого значения степени гармоник  $n$  и глубины  $j$  найти поле смещений, и затем поле тензора негидростатических напряжений. Подставляя (3.8) и (3.9) в (3.10), и суммируя

гармонические ряды, получаем компоненты тензора напряжений  $\sigma_{ik}$  до заданной степени  $n$ . В каждой точке  $(r, \theta, \phi)$  симметричный полный тензор напряжений  $\sigma_{ik}$  путем преобразования координат приводится далее к диагональному виду: получая соответствующие нормальные напряжения  $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ . Главные напряжения  $\sigma_3 \leq \sigma_2 \leq \sigma_1$  определяются как корни кубического уравнения  $|\sigma_{ik} - \sigma_k \cdot \delta_{ik}| = 0, i=1,2,3$ . По найденным значениям главных напряжений  $\sigma_1, \sigma_2$  и  $\sigma_3$  ( $\sigma_3 \leq \sigma_2 \leq \sigma_1$ ) в каждой точке  $(r, \theta, \phi)$  определяются негидростатические напряжения растяжения-сжатия  $\sigma = (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)/3$ , изменяющие первоначальное гидростатическое давление, а также максимальные сдвиговые (или касательные) напряжения  $\tau = \max|\sigma_i - \sigma_k|/2, (i, k = 1, 2, 3; i \neq k)$ , которые, в принципе, и приводят к течению и разрушению вещества.

Оценки напряжений проведены для двух тестовых моделей внутреннего строения Марса М\_50 и М\_100 (Таблица 1) с шагом 1x1 градус по широте и долготе до глубины 1000 км.

**Основной вывод:** В данной главе для поставленной цели – оценки негидростатических напряжений в недрах Марса – была решена техническая задача: написание алгоритма и разработка программного продукта для расчета нагрузочных чисел Лява и напряжений на любой заданной глубине, а также для визуализации полученных результатов.

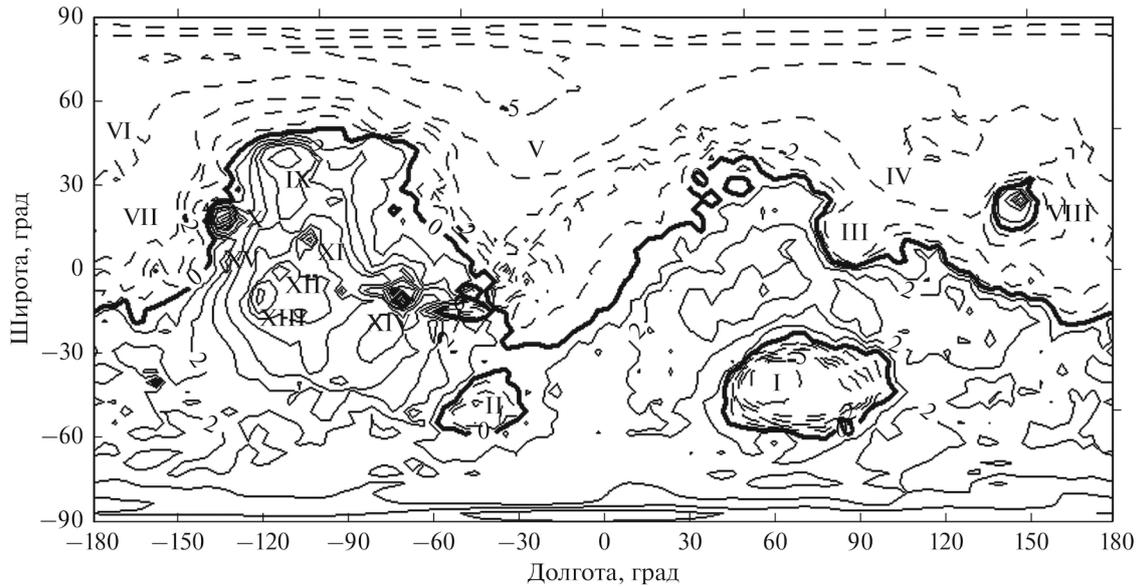
#### Глава 4. Общая картина негидростатических напряжений в недрах Марса

Топографическая поверхность Марса крайне нерегулярна (Рис. 6). Одна из основных особенностей топографии Марса: приподнятость южных сильно кратерированных областей относительно северной планетарной депрессии. Тектонические структуры на Марсе расположены: в основном, в районе плато Фарсида, огромнейшего поднятия вулканического происхождения, с гигантскими щитовыми вулканами Олимп, Аскрийский, Арсия и Павлиний. В восточной части поднятие Фарсида пересекается огромнейшим каньоном - долиной Маринера. Другое поднятие, но значительно меньшее, чем Фарсида, это Элизий. На поверхности выделяются такие крупные низменности ударного происхождения, как Эллада, Аргир, Исида, Утопия.

В главе 4 исследуется напряженное состояние недр Марса в зависимости от модели компенсации (двухуровневая или трехуровневая), реологического строения планеты (модели неоднородной упругости), толщины литосферы, а также выполнен анализ длинноволнового и коротковолнового поля напряжений.

#### Общая картина напряжений в недрах Марса для двухуровневой модели компенсации

Распределение напряжений растяжения-сжатия и максимальных касательных напряжений в литосфере Марса обнаруживает четкую корреляцию с поверхностными структурами планеты (Рис. 7). Несмотря на то, что в поле напряжений доминирует длинноволновая составляющая,



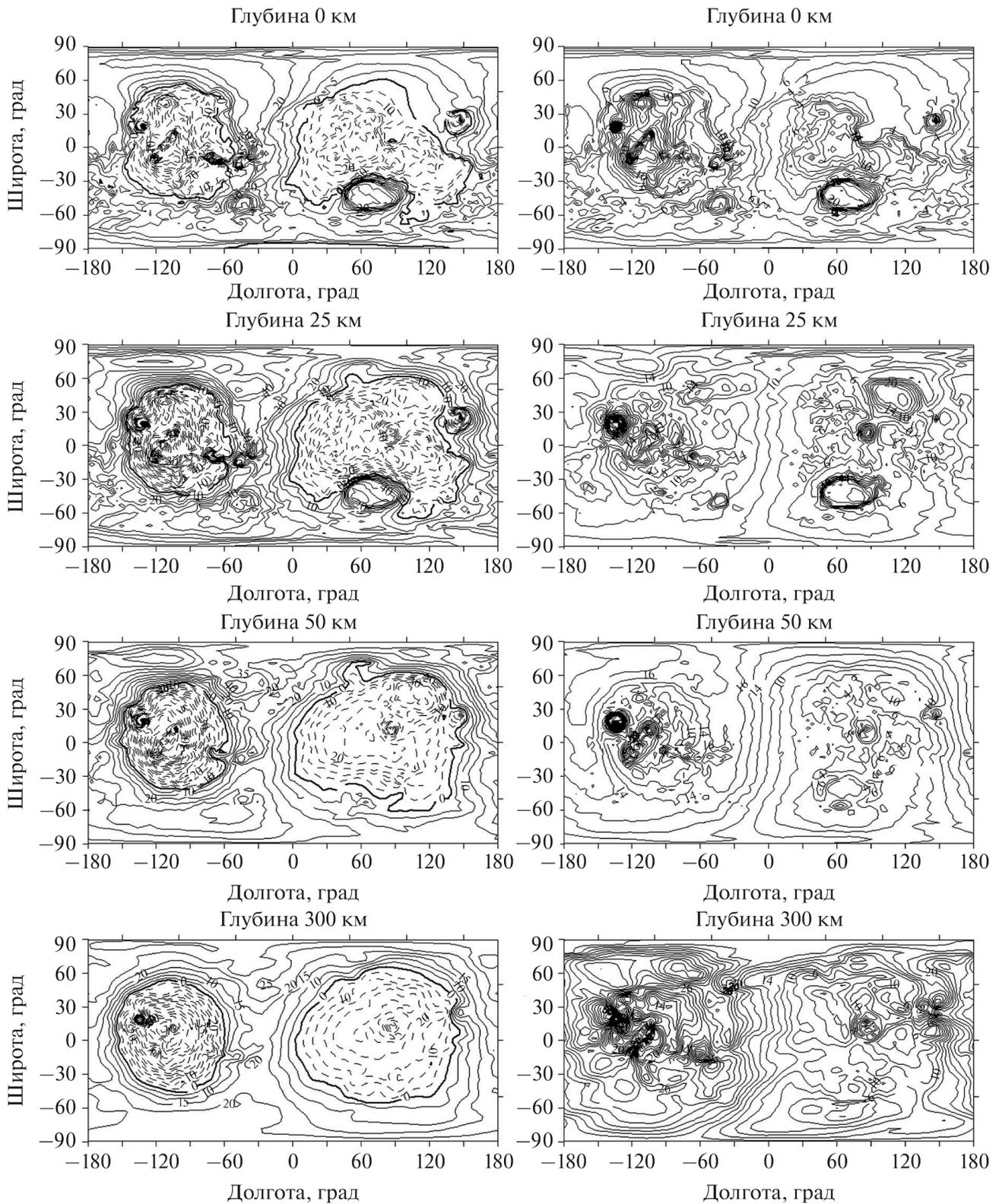
**Рис. 6.** Карта изолиний высот марсианского рельефа после разложения в ряд до 90 степени и порядка. Нулевой уровень (жирная сплошная линия) соответствует равновесной фигуре. Сплошные линии соответствуют положительным высотам, пунктирные – отрицательным. Интервал между изолиниями 1 км. Условные обозначения: I – бассейн Эллада, II – бассейн Аргир, III – бассейн Исиды, IV – равнина Утопия, V – Ацидалийское море, VI – равнина Аркадия, VII – равнина Амазония, VIII – поднятие Элизий, IX – Альба патера, X – вулкан Олимп, XI – вулкан Аскрийский, XII – вулкан Павлиний, XIII – вулкан Арсия, XIV – долина Маринера, XV – патера Библиды

при рассмотрении напряжений на поверхности планеты и в коре четко прослеживается интенсивная концентрация изолиний в районах основных топографических структур, таких как вулканы Олимп, Аскрийский, Павлиний и Арсия, долина Маринера, равнина Утопия и бассейны Эллада и Исиды (Рис. 7). При переходе через кору наблюдается сглаженная картина изолиний и отсутствие концентрации напряжений в районе конкретных топографических структур, за исключением области плато Фарсида. На глубине 300 км, значения напряжений сдвига в полтора-два раза выше, чем на поверхности планеты. Для чисто упругой модели средний уровень сдвиговых напряжений на поверхности Марса относительно невелик, и составляет 6–7 МПа. Уровень напряжений в литосфере зависит от выбора модели неоднородной упругости. В целом, уровень напряжений в литосфере для модели с литосферой толщиной 300 км в 2–3 раза превосходит напряжения, полученные для тех же глубин для чисто упругой модели.

Картина напряжений для модели М\_100 (толщина коры 100 км) похожа по формам изолиний на картину напряжений для модели М\_50 (толщиной коры 50 км), при этом средний уровень напряжений для этих моделей отличается в среднем на 10 процентов.

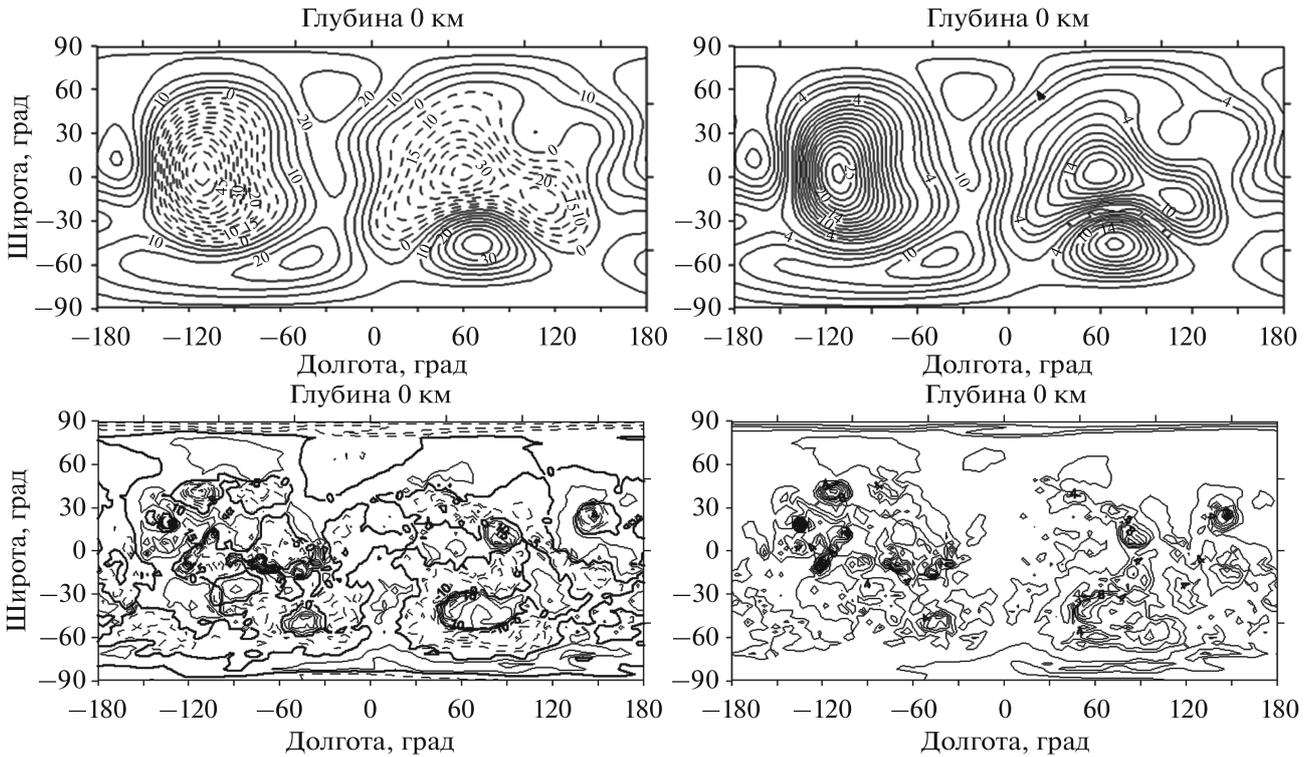
#### **Длинноволновые и коротковолновые компоненты напряжений**

Для оценки напряжений, связанных с поднятием Фарсида, проводился анализ длинноволнового (суммирование гармоник до 6 степени и порядка) поля напряжений (Рис.8, верхняя панель).

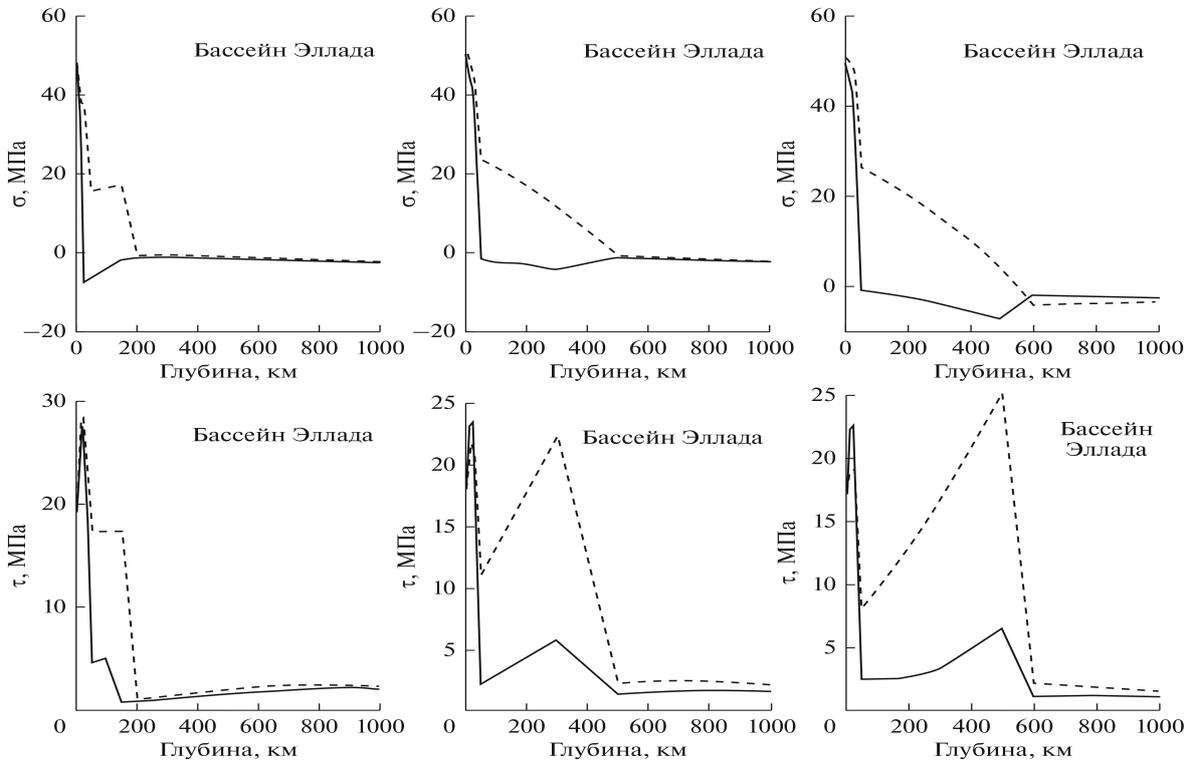


**Рис. 7.** Напряжения растяжения-сжатия (слева) и напряжения сдвига (справа) на поверхности, на глубинах 25 км, 50 км (сразу под корой) и 300 км (на нижней границе литосферы) для модели  $M_{50}$  с толщиной литосферы 300 км. Слева: сжимающим (отрицательным) напряжениям соответствуют штриховые линии, растягивающим – сплошные. Интервал между изолиниями 5 МПа. Справа: интервал между изолиниями 2 МПа

Длинноволновое поле не выявляет напряжений от конкретных структур, и показывает лишь доминирующую роль поднятия Фарсида в структуре изолиний поля напряжений. Для



**Рис. 8.** Напряжения растяжения-сжатия (слева) и напряжения сдвига (справа) для модели  $M_{50}$  с толщиной литосферы 300 км на поверхности для гармоник степеней  $n = 2 - 6$  (верх) и для гармоник степеней  $n = 7 - 90$  (низ). Слева: сжимающим (отрицательным) напряжениям соответствуют штриховые линии, растягивающим – сплошные. Интервал между изолиниями 5 МПа. Справа: интервал между изолиниями 2 МПа



**Рис. 9.** Распределения напряжений растяжений-сжатия (верх) и максимальных касательных напряжений (низ) по глубине для модели  $M_{50}$  под бассейном Эллада для моделей с литосферой варьируемой толщины (слева направо: 150, 300 и 500 км). Двухуровневая модель компенсации (сплошные линии), трехуровневая модель компенсации (пунктирные линии). Линии соединяют значения, полученные для глубин: 0, 5, 10, 25, 50, 100, 150, 200, 300, 500, 600, 700, 800, 900 и 1000 км

выявления мелкомасштабной структуры напряжений учитываются члены, начиная с седьмой гармоники, т.е. после устранения длинноволнового фона (Рис. 8, нижняя панель). Поле напряжений длинноволновых компонент на глубинах больше 500–600 км совпадает с полем напряжений, рассчитанным до 90 гармоники. На глубинах 100–200 км большой вклад в общее поле напряжений вносит коротковолновая компонента.

### **Зависимость поля напряжений от толщины литосферы**

В моделях с ослабленным слоем под литосферой, литосфера является внешней механически жесткой оболочкой, и отвечает на приложенные нагрузки. При компенсации на двух уровнях, на поверхности и границе кора-мантия, в коре концентрируются напряжения. Часть напряжений вытесняется в литосферу, которая может их выдерживать, и меньшая часть напряжений просачивается из литосферы в мантию. Наличие ослабленной зоны, по сравнению с чисто упругой моделью, приводит к увеличению напряжений в литосфере в зависимости от ее мощности: чем толще литосфера, тем слабее напряжения в ней. Под литосферой напряжения обрезаются почти под всеми структурами за исключением областей таких высоких структур как вулканы Олимп, Аскрийский, Павлина и Арсия.

Показано, что амплитуды напряжений приблизительно обратно пропорциональны толщине литосферы. Касательные напряжения в упругой литосфере могут достигать 60, 80 и 100 МПа для толщины литосферы 500, 300 и 150 км, соответственно.

### **Негидростатические напряжения для трехуровневой модели компенсации**

Величина напряжений для трехуровневой модели компенсации (источниками аномального гравитационного поля являются неравновесный рельеф, аномалии плотности на границе кора-мантия и аномалии плотности на нижней границе литосферы) отличается от значений напряжений, полученных для двухуровневой модели (источниками аномального гравитационного поля являются неравновесный рельеф, аномалии плотности на границе кора-мантия) на 5–10 процентов, при этом остаются все тенденции, выявленные для двухуровневой модели компенсации. Существенное различие распределения напряжений по глубине для моделей двух- и трехуровневой компенсации выявлено под областями Эллада и Аргир (см. Рис. 12 для области Эллада).

### **Основной вывод и второе защищаемое положение:**

Напряжения в недрах Марса определяются толщиной литосферы для любой из рассмотренных моделей неоднородной упругости, и не зависят от выбора модели компенсации (двухуровневая или трехуровневая), за исключением областей крупных ударных кратеров Эллада и Аргир. Касательные напряжения в литосфере достигают 60, 80 и 100 МПа в зависимости от мощности литосферы (500, 300 и 150 км), соответственно.

## **Глава 5. Выявление локальных зон повышенных негидростатических напряжений на Марсе как возможных очагов марсотрясений**

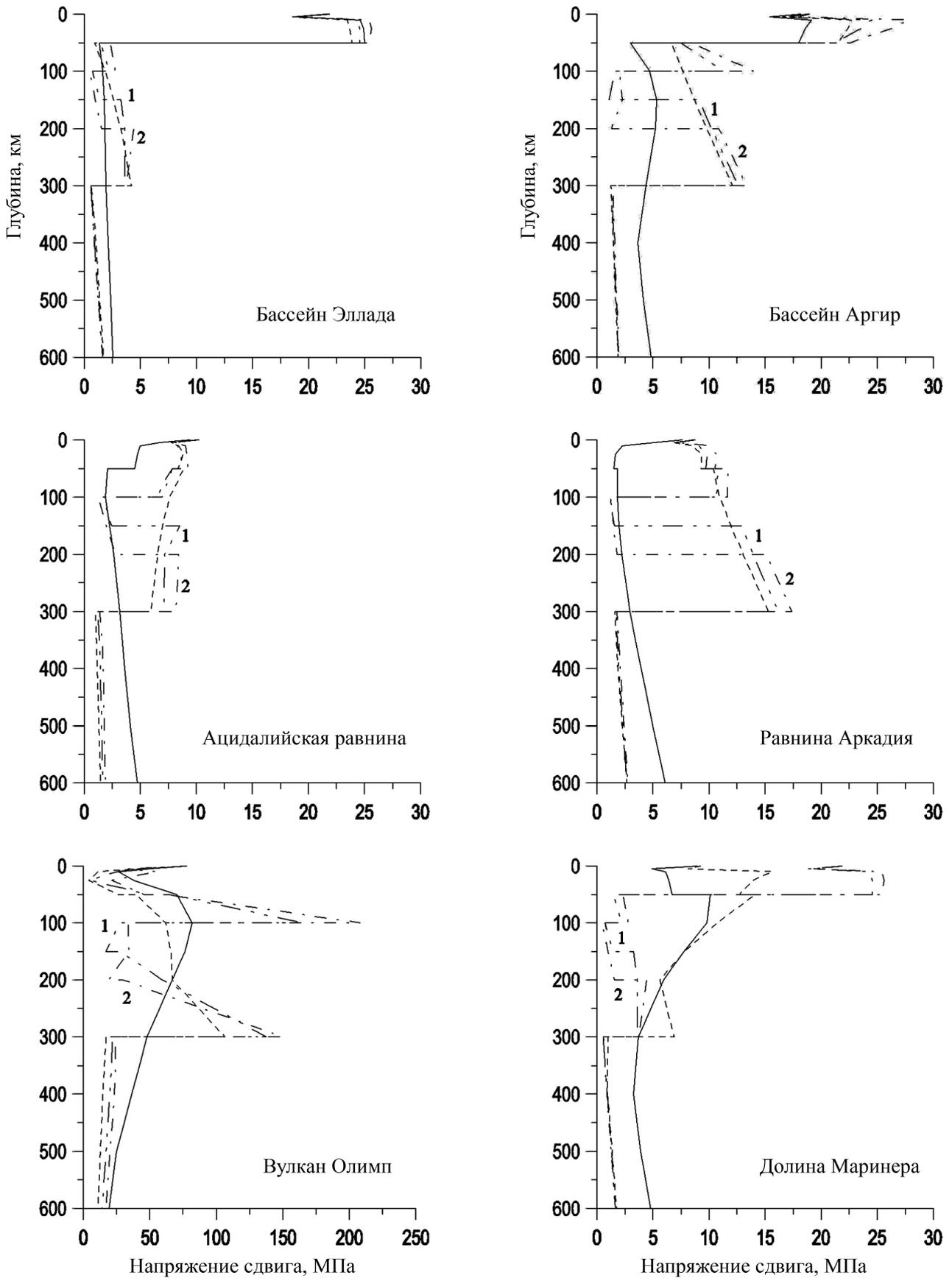
В главе 5 подробно проанализированы напряжения под основными топографическими структурам, отмеченными на Рис. 6. Как и следовало ожидать, на поверхности планеты и в коре значительные напряжения проявляются в районе Фарсиды. Локальные максимумы совпадают с расположением вулканов Олимп, Аскрийский, Арсия, Павлиний. Области высоких значений сдвиговых напряжений под вулканами (под вулканом Олимп касательные напряжения в коре достигают 20–30 МПа) характеризуются значительными сжимающими напряжениями (50–130 МПа), что будет подавлять образование разломов в этих областях.

Области сосредоточения растягивающих усилий могут рассматриваться как наиболее вероятные очаги разрушения и указывают на возможные потенциальные очаги марсотрясений. Выявлено, что для всех типов моделей неоднородной упругости высокие сдвиговые напряжения одновременно с растягивающими напряжениями приходятся на области под такими структурами как гигантские низменности ударного происхождения: бассейн Эллада и бассейн Аргир; Ацидалийская равнина, равнина Аркадия и долина Маринера. Наличие зон подплавлений в литосфере приводит к вытеснению напряжений из ослабленной зоны в над- и под- ослабленные области, и некоторому увеличению значений напряжений в коре (Рис. 10).

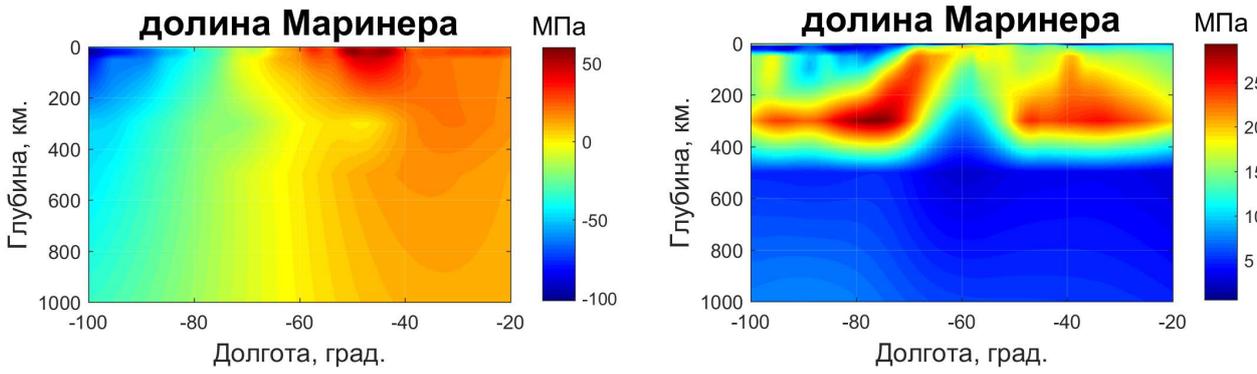
Напряжения растяжения под областью Эллада и Аргир в коре достигают значений около 40–50 МПа, напряжения сдвига на уровне 20–25 МПа, и спадают после уровня компенсации для любой из рассмотренных реологических моделей. Напряжения сдвига в области равнины Аркадия в литосфере составляют 10–15 МПа, напряжения растяжения достигают 45 МПа на глубине 10–25 км. Картина распределения напряжений растяжения под Ацидалийской равниной почти полностью совпадает с распределением напряжений под долиной Аркадия. Напряжения сдвига несколько меньше, около 10 МПа, но напряжения растяжения имеют такие же значения.

Отчетливые аномалии напряжений прослеживаются в районе крупнейшего каньона Долина Маринера: напряжения сдвига достигают 25 МПа в коре, на фоне существенных напряжений растяжения. Изменение интенсивности напряжений под долиной Маринера вдоль по долготе представляет сложную картину (Рис. 11). Минимальные значения напряжений сдвига в центре, и максимальные значения на краях на глубинах от 10–25 км до 500 км. Такая картина может быть проявлением локального тектонизма, вызванного нагрузкой от Фарсиды.

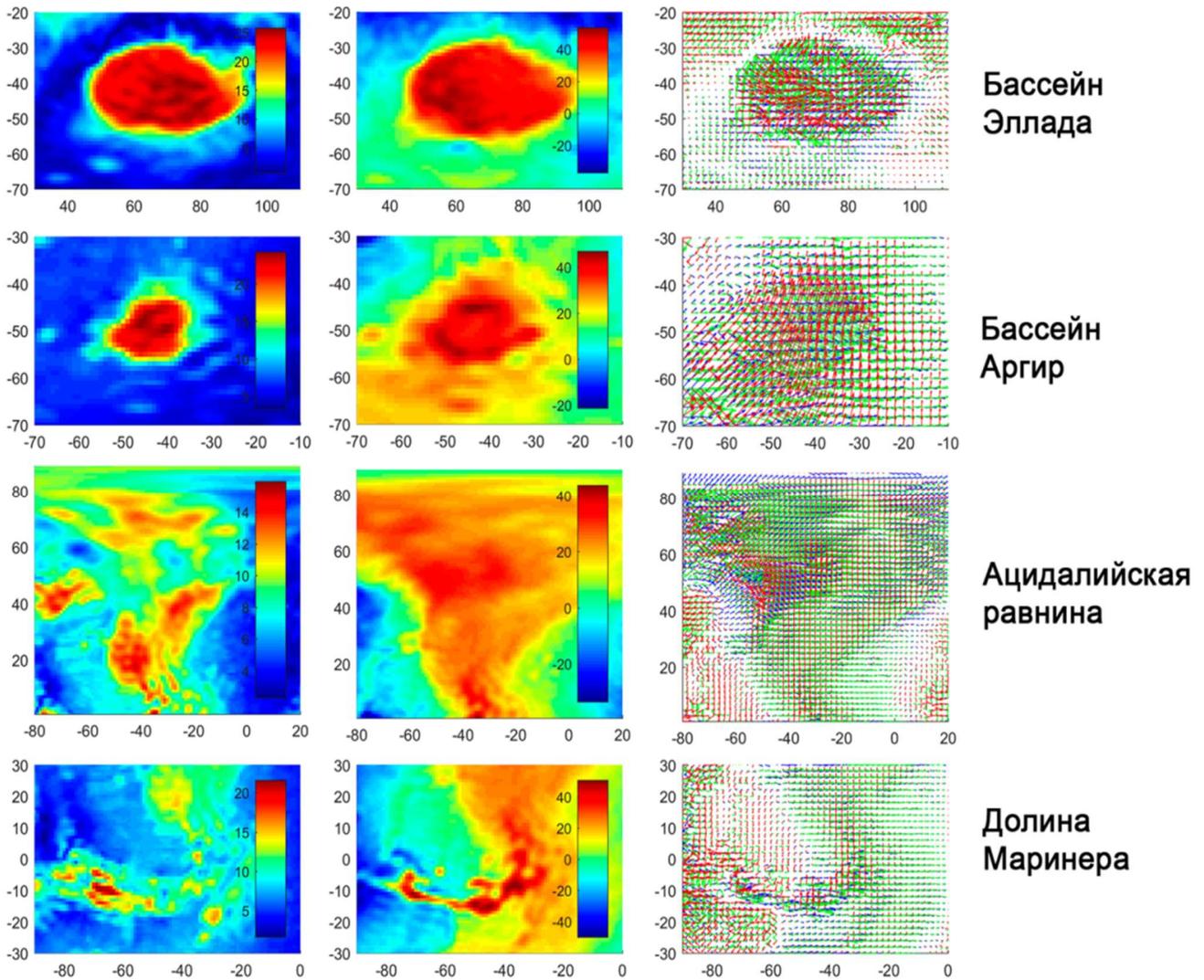
Не существует однозначного критерия для выбора зон максимальной вероятности разрушения прочности породы, особенно когда речь идет о литосфере планеты, которая простирается на тысячи км. Как возможные локальные очаги марсотрясений, выделены районы, где имеют место одновременно максимальные сдвиговые напряжения и растягивающие



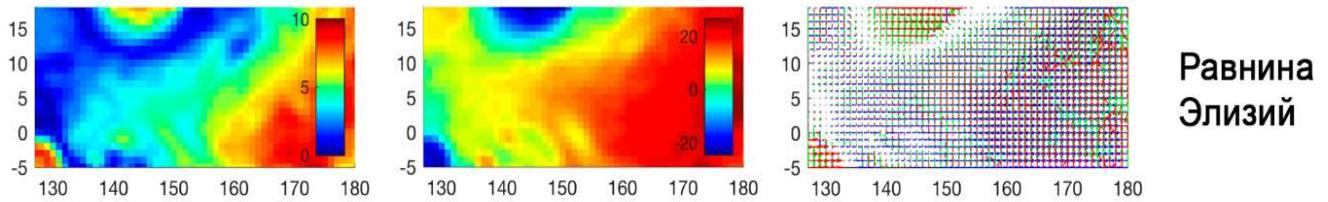
**Рис. 10.** Распределение напряжений сдвига для различных моделей неоднородной упругости по глубине под вулканом Олимп, бассейном Эллада, бассейном Аргир, Ацидалийской равниной, равниной Аркадия, и долиной Маринера (сплошная линия: упругая модель; пунктирная линия: модель с литосферой 300 км; штрих-пунктирные линии: модель с литосферой 300 км и зонами частичного подплавления на глубинах 100–150 км, 1; 100–200 км, 2)



**Рис. 11.** Напряжения сдвига (справа) и напряжения растяжения-сжатия (слева) под долиной Маринера. Разрез дан на широте расположения структуры. Толщина литосферы 300 км



**Рис. 12.** Напряжения сдвига (слева), напряжения растяжения-сжатия (по центру) и проекции осей главных напряжений  $\sigma_1$  (синий),  $\sigma_2$  (зеленый),  $\sigma_3$  (красный) на горизонтальную плоскость (справа) на глубине 25 км для модели с литосферой 300 км и возможной зоной подплавления на глубине 100–150 км, для ряда структур: бассейн Эллада, бассейн Аргир, Ацидалийская равнина, и долина Маринера. Длины проекций осей главных напряжений пропорциональны величинам напряжений



**Рис. 13.** Напряжения сдвига (слева), напряжения растяжения-сжатия (по центру), проекции осей главных напряжений  $\sigma_1$  (синий),  $\sigma_2$  (зеленый),  $\sigma_3$  (красный) на горизонтальную плоскость (справа) на глубине 5 км для модели с литосферой 300 км и возможной зоной подплавления на глубине 100–150 км, для района места посадки миссии InSight в области равнины Элизий. Длины проекций осей главных напряжений пропорциональны величинам напряжений

напряжения, при этом особенно следует отметить в них зоны «направленности» напряжений (Рис. 12). Зоны максимальной концентрации напряжений и образования возможных разломов в литосфере наблюдаются в области Эллады, совпадая с областью положительных гравитационных аномалий. Для бассейна Аргир – эта область соответствует контуру вокруг кратера. Для Ацидалийского моря более вероятная зона для образования разломов – западная граница области. Зона Маринера, с этой точки зрения, целиком представляет интерес для дальнейшего исследования.

Оценено поле напряжений в области посадки миссии InSight для проведения сейсмического эксперимента, расположенной к юго-востоку от поднятия Элизий, второго крупного поднятия на Марсе после зоны Фарсида. Напряжения сдвига на глубине 5 км составляют 8–10 МПа, а напряжения растяжения достигают 20 МПа (Рис. 13).

#### **Основной вывод и третье защищаемое положение:**

Зоны возможных очагов марсотрясений, обусловленные высокими значениями напряжений сдвига на фоне растягивающих напряжений в литосфере Марса, расположены под ударными бассейнами Эллада и Аргир, равнинами Ацидалийское море, Аркадия и долиной Маринера.

### **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

В диссертационной работе представлены результаты исследований автора, направленные на решение важной и практической задачи: исследования зон возможной повышенной сейсмической активности на Марсе в преддверии проведения сейсмических экспериментов на планете.

Кратко основной итог работы можно сформулировать так: используя данные топографии и гравитационного поля Марса получена детальная картина негидростатических напряжений в недрах планеты, и проведена локализация областей повышенных напряжений сдвига одновременно с большими значениями напряжений растяжения, как зон вероятных источников марсотрясений.

## СПИСОК ОСНОВНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

**Статьи в периодических изданиях, рекомендованных ВАК:**

1. Жарков В.Н., Гудкова Т.В., **Батов А.В.** Об оценке диссипативного фактора недр Марса // *Астрономический вестник*. – 2017. – Т. 51. – № 6. – С. 512–523.
2. Гудкова Т.В., **Батов А.В.**, Жарков В.Н. Модельные оценки негидростатических напряжений в коре и мантии Марса: 1. Двухуровневая модель // *Астрономический вестник*. – 2017. – Т. 51. – № 6. – С. 490–511.
3. **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.
4. **Батов А.В.**, Гудкова Т.В., Жарков В.Н. Модельные оценки негидростатических напряжений в коре и мантии Марса: 2. Трехуровневая модель // *Астрономический вестник*. – 2018. – Т. 52. – № 3. – С. 232–238.
5. Gudkova T.V., **Batov A.V.**, Zharkov V.N. On Zones of Potential High Seismic Activity on Mars // *Doklady Earth Sciences*. – 2018. – Vol. 481. – Part 2. – Pp. 1013–1016 (Гудкова Т.В., **Батов А.В.**, Жарков В.Н. О зонах возможной повышенной сейсмической активности на Марсе // *ДАН*. – 2018. – Т. 481. – № 4).

**Публикации в прочих изданиях:**

1. **Батов А.В.** Расчет нагрузочных чисел и оценка напряжений на границе кора-мантия для упругой модели // Научная конференция молодых учёных и аспирантов ИФЗ РАН. Тезисы докладов. – М.: ИФЗ РАН, 2016. – С. 19.
2. **A. Batov**, T. Gudkova and V.N. Zharkov. Calculation of load Love numbers and static stresses for the interior structure model of Mars with an elastic mantle // *Reports of the International Symposium «Lunar Exploration and Space Technology Heritage»*. – Kazan: Kazan federal university, 2016. – Pp. 62–66.
3. **Batov A.V.**, Gudkova T.V., Zharkov V.N. Static stresses estimates in Mars with an elastic mantle // *Abstract book, The seventh Moscow Solar System Symposium 7M-S<sup>3</sup>-PS-08, IKI, 10–14 October 2016*. – М.: IKI RAS, 2016. – Pp. 172–173.
4. **Батов А.В.**, Гудкова Т.В., Жарков В.Н. О расчетах напряжений в недрах Марса // *Материалы 13-й Всероссийской школы-конференции молодых ученых «Управление большими системами» (УБС'2016, Самара)*. – М.: ИПУ РАН, 2016. – С. 29–41.
5. **Batov A.V.**, Gudkova T.V., Zharkov V.N. Calculation of load Love numbers and static stresses for the interior structure model of Mars with an elastic mantle // *Planetary Interiors, International School of space science, 12–16 September 2016, L'Aquila 2016*.

6. **Батов А.В.**, Гудкова Т.В., Жарков В.Н. Исследование напряженного состояния недр Марса по данным о гравитационном поле и топографии планеты // Материалы 44-й сессии Международного семинара им. Д.Г. Успенского. – М.: ИФЗ РАН, 2017. – С. 43–48.
7. **Батов А.В.** Поиск зон максимальных касательных напряжений и напряжений растяжения-сжатия в недрах Марса // Научная конференция молодых учёных и аспирантов ИФЗ РАН. Тезисы докладов. – М.: ИФЗ РАН, 2017. – С. 20.
8. **Батов А.В.** Выявление областей максимальных сдвиговых и растягивающих напряжений в недрах Марса // Сборник тезисов 14-й конференции молодых учёных «Фундаментальные и прикладные космические исследования». – М.: ИКИ РАН, 2017. – С. 113.
9. Zharkov V.N., Gudkova T.V., **Batov A.V.** On the estimate of the dissipative factor of Martian interiors // Abstract book, The eighth Moscow Solar System Symposium 8M-S<sup>3</sup>-PS-19, IKI, 9–13 October 2017. – М.: IKI RAS, 2017. – Pp. 263–265.
10. Gudkova T. V., Zharkov V.N., **Batov A.V.** On attenuation of torsional oscillations on Mars // Abstract book, The eighth Moscow Solar System Symposium 8M-S3-PS-19, IKI, 9–13 October 2017. – М.: IKI RAS, 2017. – Pp. 260–262.
11. **Batov A.V.**, Gudkova T.V., Zharkov V.N. Model stresses in Martian interiors for two-level loading // Abstract book, The eighth Moscow Solar System Symposium 8M-S3-PS-19, IKI, 9–13 October 2017. – М.: IKI RAS, 2017. – Pp. 266–268.
12. **Batov A.V.**, Gudkova T.V., Zharkov V.N. Estimates of non-hydrostatic stress field in Mars // Материалы 45-й сессии Международного семинара им. Д.Г. Успенского. – Казань: КФУ, 2018. – С. 1–4.
13. **Батов А.В.** Поиск очагов возможных марсотрясений // Научная конференция молодых учёных и аспирантов ИФЗ РАН. Тезисы докладов. – М.: ИФЗ РАН, 2018.
14. **Батов А.В.** Исследование поля негидростатических напряжений под локальными структурами на Марсе // Сборник тезисов 15-й конференции молодых учёных «Фундаментальные и прикладные космические исследования». – М.: ИКИ РАН, 2018. – С. 7.
15. **Batov A.V.**, Gudkova T.V., Zharkov V.N. Estimates of non-hydrostatic stresses in the Martian Interior // EPSC Abstracts, Vol. 12, EPSC2018-283-1, European Planetary Science Congress 2018, 16-21 September 2018, Berlin, Germany.
16. **Batov A.V.**, Gudkova T.V., Zharkov V.N. On the location of potential marsquakes' sources // Abstract book, The eighth Moscow Solar System Symposium 8M-S3-PS-19, IKI, 8–12 October 2018. – М.: IKI RAS, 2018. – Pp. 216–217.
17. Gudkova T.V., **Batov A.V.**, Zharkov V.N. Model estimates of stress state in Mars for three-level loading // Abstract book, The eighth Moscow Solar System Symposium 8M-S3-PS-19, IKI, 8–12 October 2018. – М.: IKI RAS, 2018. – Pp. 218–220.

Подписано в печать 12.10.2018 г.  
Формат 64×90/16. Объем 1,5 усл. печ. л.  
Тираж 100 шт. Заказ № 275

Отпечатано в федеральном государственном бюджетном учреждении науки  
Институте проблем управления им. В.А. Трапезникова Российской академии наук  
117997, г. Москва, ул. Профсоюзная, д. 65  
Тел./факс: (495) 334-89-31. E-mail: oop@ipu.ru