

## ОТЗЫВ

официального оппонента

доктора физико-математических наук ИВАНОВА Б.А.

на диссертационную работу БАТОВА Алексея Владимировича

«Оценка негидростатических напряжений в недрах Марса по данным  
топографии и гравитационного поля»,

представленную на соискание ученой степени кандидата физико-  
математических наук по специальности 25.00.10 – «Геофизика, геофизические  
методы поисков полезных ископаемых»

В настоящее время ведется подготовка сейсмических экспериментов на Марсе, которые позволят получить информацию о недрах планеты. 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. Решению этой **актуальной задачи** и посвящена рассматриваемая работа.

Общей **целью работы** ставится 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. Как следует из цели, **объектом** исследования является Марс.

Диссертационная работа общим объёмом 142 страницы состоит из введения, пяти глав и заключения.

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.

Во второй главе проводится построение тестовой модели внутреннего строения Марса. Распределение плотности контролируется по наблюдаемому моменту инерции  $I$  и числу Лява  $k_2$ , уточненных в 2016 г. Увеличение наблюдаемого числа Лява  $k_2$  привело к увеличению модельного радиуса жидкого ядра и уменьшению содержания железа в мантии.

Пункты 2.3. и 2.4. посвящены собственным колебаниям Марса. Пока это чисто теоретические оценки, но если такие колебания будут зарегистрированы, то полученные автором результаты будут использованы как для корректировки моделей внутреннего строения и распределения диссипативного фактора в недрах Марса.

Данная глава обосновывает первое защищаемое положение: модель внутреннего строения Марса (распределение плотности, гравитационного ускорения, давления, упругих модулей и диссипативного фактора), уточненная по современным данным наблюдений, подтверждает гипотезу о хондритовом среднем составе планеты. Согласно модели, 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  $Fe/Si=1.7$ .

Главным результатом *третьей главы* является создание комплекса компьютерных программ для расчета нагрузочных чисел Лява и напряжений на любой заданной глубине. Созданные автором программы вычислений позволили автору провести модельные расчеты напряженного состояния недр Марса (главы 4 и 5).

*В четвертой главе* исследовано напряженное состояние недр Марса в зависимости от модели компенсации (двухуровневая или трехуровневая), слоистого строения планеты (модели неоднородной упругости), толщины литосферы, а также выполнены количественные оценки длинноволнового и коротковолнового полей девиаторных (негидростатических) напряжений. Показано, что амплитуды упругих девиаторных напряжений в теле Марса определяются, в первую очередь, 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. Сдвиговые упругие напряжения в литосфере достигают 60, 80 и 100 МПа в предположении мощности литосферы 500, 300 и 150 км, соответственно. Эти оценки соответствуют второму защищаемому положению.

Пятая глава содержит региональный анализ напряжений под основными топографическими структурами Марса. Здесь получены новые важные теоретические результаты: зоны возможной сейсмичности (определяемые в работе как зоны высоких значениями напряжений сдвига на фоне растягивающих напряжений в литосфере) наиболее выражены под ударными бассейнами Эллада и Аргир, равнинами Ацидалийское море, Аркадия и долиной Маринера.

Прогноз сейсмичности составляет третье защищаемое положение.

Диссертация Батова Алексея Владимировича выполнена на актуальную тему, обладает научной новизной. Работа содержит в себе теоретические оценки, которые имеют практическое применение: результаты могут быть использованы при подготовке и проведении сейсмических экспериментов на Марсе.

Результаты работы опубликованы в 5 статьях в журналах, рекомендованных ВАК. Также защищаемые положения докладывались на многочисленных российских и международных конференциях. Автореферат полностью отражает суть работы А.В. Батова и ее основные защищаемые положения.

К работе можно предъявить следующие (в основном – технические) замечания:

1) В разделе 3.6. «Трехуровневая модель компенсации» нечетко изложена природа нагрузки «на третьем уровне» - на нижней границе литосферы. Из общих соображений можно предположить, что в «литосфере» плотность материала отличается от плотности ниже границы «литосферы», например, за счет частичного плавления. Без описания модели нагрузки для «третьего уровня» трудно оценить важность перехода от двухуровневой модели к трехуровневой.

2) В тексте работы не вполне корректно используется выражение «чисто упругая модель». Все решения в рассматриваемой работе основаны на статической (без внутреннего движения материала) модели равновесия. Из контекста можно предположить, что «чисто упругая модель» означает «модель с упругими модулями, зависящими только от глубины (от давления) и от материала слоев». «Не чисто упругая модель», как следует из текста, относится к вариантам с астеносферой, где возможно частичное плавление. Но и эта зона моделируется с помощью искусственно пониженного сдвигового модуля упругости, но по-прежнему – с помощью уравнений упругости. Только на стр. 105 сказано, что автор использует «модели неоднородной упругости», что, по-видимому, и является лучшим антонимом «однородной упругости».



3) Говоря о прогнозе сейсмичности (например, на стр. 116 главы 5) автор считает, что «значительные касательные напряжения в зонах растяжения, возможно, представляют наиболее вероятные области очага марсотрясений». Это интуитивно верное предположение было бы хорошо подкрепить примерами из земной сейсмологии. В представленном тексте виде эта дискуссия ограничивается двумя фразами на стр. 117: «Как признано в настоящее время, поведение массива пород в целом определяется, прежде всего, нарушениями целостности среды. Как возможные локальные очаги марсотрясений, выделяются районы, где имеют место одновременно максимальные сдвиговые напряжения и растягивающие напряжения». Несколько ссылок на работы по очагам землетрясений на Земле усилили бы эту мысль автора.

Указанные замечания и пожелания к стилю изложения носят технический характер не снижают качества работы.

Работа Батова А.В. является законченным научным трудом. Все выводы и защищаемые положения обоснованы. Все результаты работы отражены в публикациях автора в периодических научных изданиях и апробированы в ходе выступлений на различных конференциях, семинарах и заседаниях. Автореферат в полной мере отражает основное содержание работы. Диссертация соответствует паспорту специальности (пп. 5, 11 и 12) и направлена на изучение напряженного состояния Марса по геофизическим данным. Работа носит междисциплинарный характер и применяет методы геофизики для исследования планет.

Диссертация соответствует критериям, установленным п. 9 Положения о присуждении учёных степеней (утверждено постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842) для учёной степени

кандидата наук, а её автор А.В. Батов достоин присуждения учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 25.00.10 – «Геофизика, геофизические методы поисков полезных ископаемых».

**Официальный оппонент:**

Ведущий научный сотрудник лаборатории деформационных процессов в земной коре Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института динамики геосфер Российской академии наук (ИДГ РАН), доктор физико-математических наук



Иванов Борис Александрович

Я, Иванов Борис Александрович, даю свое согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с работой диссертационного совета, и их дальнейшую обработку.

Адрес: 119334, Ленинский проспект, 38, корпус 1, Москва, Россия, ИДГ РАН  
Тел.: +7 (495) 338-17-13, E-mail: [boris\\_a\\_ivanov@mail.ru](mailto:boris_a_ivanov@mail.ru),  
[baivanov@idg.chph.ras.ru](mailto:baivanov@idg.chph.ras.ru)

25 ноября 2018 г.

Подпись Б.А. Иванова заверяю:

*Ученый секретарь*

