

**ВКЛАД ГРАНИЦ РАЗДЕЛА И АНОМАЛИЙ  
ПЛОТНОСТИ В КОРЕ МАРСА ВО ВНЕШНЕЕ  
ГРАВИТАЦИОННОЕ ПОЛЕ МАРСА В  
КВАДРАТИЧНОМ ПРИБЛИЖЕНИИ**

**Л.П.Насонова, Н.А.Чуйкова, Т.Г.Максимова**

**[nason@sai.msu.ru](mailto:nason@sai.msu.ru) , [chujkova@sai.msu.ru](mailto:chujkova@sai.msu.ru)**

Государственный астрономический институт им. П.К.Штернберга

## ВВЕДЕНИЕ

- **Какие силы поддерживают значительные глобальные вариации высот рельефа планет земной группы, которые под действием внешнего поля силы тяжести и атмосферных эффектов должны выравниваться в силу процесса денудации ?**
- Одной из интереснейших планет для исследования этого вопроса является Марс, диапазон вариаций высот поверхности которого по последним данным **Mars Orbiter Laser Altimeter (MOLA)** [M.T. Zuber, 2000] достигает 44 км, т.е. порядка величины 0.013 по сравнению со средним радиусом  $R = 3389.5$  км
- Для Земли максимальный диапазон вариаций высот рельефа, приведенного к однородной плотности, порядка  $0.002R$ , было показано [Н.А.Чуйкова, 2006], **что значительные аномалии внутреннего гравитационного поля и поля напряжений в коре могут поддерживать существующие перепады высот, несмотря на процессы денудации.** Такие значительные аномалии поля в коре возникают из-за того, что в основном распределение аномальных масс по глубине носит дипольный характер в силу процесса изостатической компенсации.
- Тем более такой вывод может быть справедлив для **Марса**, где диапазон вариаций высот рельефа на порядок больше. **Поэтому исследования глобального плотностного строения коры Марса и сравнение с Землей представляет большой научный интерес.**

1. Zuber, M.T., et al . *Internal structure and early thermal evolution of Mars from Mars Global Surveyor topography and gravity* // **Science**, 2000, 287, P. 1788
2. Чуйкова Н.А., Насонова Л.П., Максимова Т.Г. , // **Вестн. Моск. ун-та, Физ. Астрон.** 2006. №4. С.48

В работе [G.A. Neumann, 2004] была построена модель поверхности  $M$  (поверхности Мохоровичича) для Марса (т.е., возможной границы кора-мантия) на основе гравитационного поля Марса после учета вклада рельефа [ M.T.Zuber, 2000]. Задача решалась в линейном приближении.

- Однако наши аналогичные исследования плотностного строения коры Земли показали, что **линейное приближение недостаточно для точного учета вклада границ коры во внешнее и внутреннее гравитационное поле, необходимо учитывать квадратичные члены** [Н.А.Чуйкова, 2006; Л.П.Насонова, 2007].
- **В настоящей работе рассматриваются два метода получения коэффициентов разложения поверхности  $M$  для Марса, оценивается вклад рельефа и скачка плотности на  $M$  в гравитационное поле Марса в квадратичном приближении, проводится их сравнение между собой и с соответствующими результатами для Земли, делаются оценки возможного распределения аномалий плотности в коре Марса.**

1. Zuber, M.T., et al // *Science*, 2000, 287, P. 1788

3. Yuan, D.-N., et al., Gravity field of Mars: A 75th degree and order model, // *J. Geophys. Res.*, 2001. 106, NO. E10. P. 23377

4. G.A. Neumann, et al // *J. Geophys. Res.* 2004. 109..P.E08002, doi:10.1029/2004JE002262

2. Чуйкова Н.А., Насонова Л.П., Максимова Т.Г. , // *Вестн. Моск. ун-та, Физ. Астрон.* 2006. №4. С.48

5. Насонова Л.П., Чуйкова Н.А.,. // *Вестн. Моск. ун-та, Физ. Астрон.* 2007. №6. С.61

## **Постановка задачи.**

- **Расчет вклада рельефа Марса в гравитационное поле в квадратичном приближении (как это было сделано нами для Земли).**
- **Разложение высот поверхности  $M$  по сферическим функциям первым способом (модель  $M1$ ) было получено методом последовательных приближений. Сначала определялись гармонические коэффициенты потенциала Марса после учета вклада масс рельефа в квадратичном приближении (т.е. аналог аномалий Буге) и на основе полученных коэффициентов определялись коэффициенты разложения высот  $M$  в линейном приближении. Затем, после учета вклада в потенциал квадратичных членов, обусловленных скачком плотности на  $M$ , снова определялись коэффициенты разложения высот  $M$  в линейном приближении. Процесс вычисления проводился до полной сходимости результатов.**
- **Коэффициенты разложения высот поверхности  $M$  вторым способом (модель  $M2$ ) были получены с использованием гипотезы изостатической компенсации высот рельефа на  $M$ . При этом для всех гармоник использовался один и тот же передаточный множитель:**

## Модель M2

Передаточный множитель  $k = \Delta d / \Delta h = (\rho_r / \Delta\rho_M) \left( \frac{R_r}{R_M} \right)^3$

$\rho_r = 2.8g / cm^3$  - средняя плотность масс рельефа;

$\Delta\rho_M = 0.6g / cm^3$  - средний скачок плотности на M

$\Delta\bar{d} = 40km$  - средняя глубина поверхности M относительно уровенной поверхности, соответствующей  $\bar{R}_M = 3349.2km$

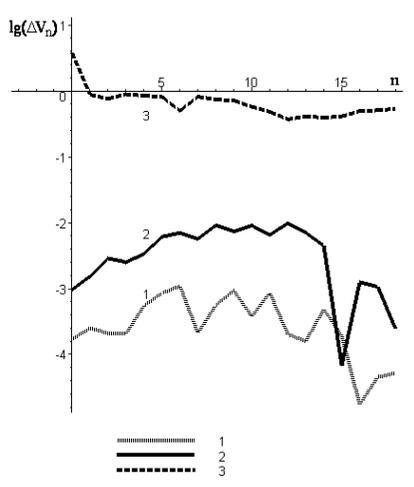
$\Delta h$  - высоты рельефа Марса относительно уровенной поверхности, соответствующей  $R_r = 3389.5km$

• Коэффициенты разложения высот M, полученные двумя методами, сравнивались между собой с целью выделения из аномалий Буге возможного вклада аномалий плотности в коре Марса, а именно: 1) в модели M1 во второй зональной гармонике потенциала Марса учитывалось сжатие ядра (2%) [G.A. Neumann, 2004]; 2) из модели M2 исключались те гармоники, знак которых противоположен знаку соответствующих гармоник для модели M1; 3) рассчитывались коэффициенты линейной регрессии между двумя моделями. Если отношения коэффициентов разложения M2 и M1 превышали коэффициенты регрессии для разложения соответствующей степени, то коэффициенты модели M2 уменьшались согласно степенным коэффициентам регрессии; 4) полученные в итоге разности гармонических коэффициентов моделей M1 и M2 интерпретировались как коэффициенты разложения простого слоя аномальной плотности в коре Марса.

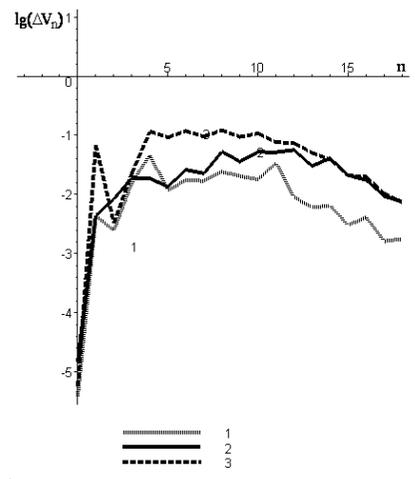
**Рис.1 (а, b,с) .Зависимость относительного среднеквадратичного вклада квадратичных членов во внешний гравитационный потенциал планеты от степени разложения n**

$$\Delta V_n = \sqrt{D_{n,2} / D_{n,1}} , \quad D_n = \sum_{m=0}^n \left( (a_{n,m})^2 + (b_{n,m})^2 \right)$$

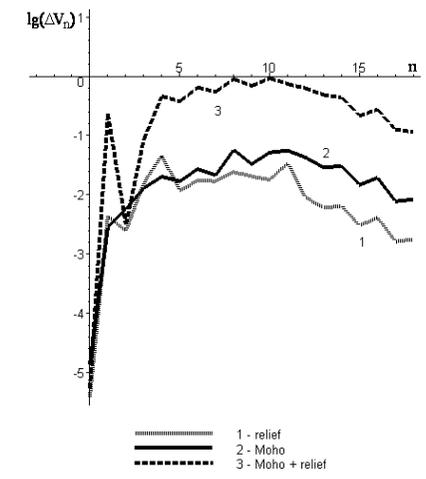
**Кривая 1 - для масс рельефа; кривая 2 –для скачка плотности на М; кривая 3- суммарный вклад (от масс рельефа и скачка плотности на М)**



а) для Земли



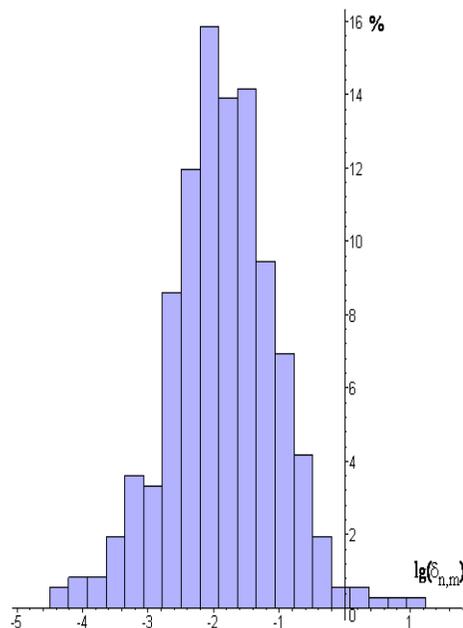
б) для Марса – модель M1



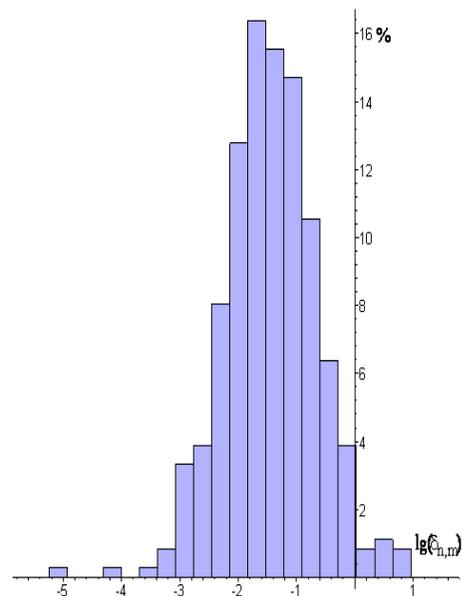
с) для Марса – модель M2

**Из сравнения рис.1а, 1б, 1с видно, что для Марса вклад квадратичных членов во внешний потенциал как от масс рельефа, так и от скачка плотности на М в среднем на порядок больше, чем для Земли, а суммарный квадратичный вклад примерно того же порядка малости, что и линейный вклад, особенно выраженный для второй модели M2.**

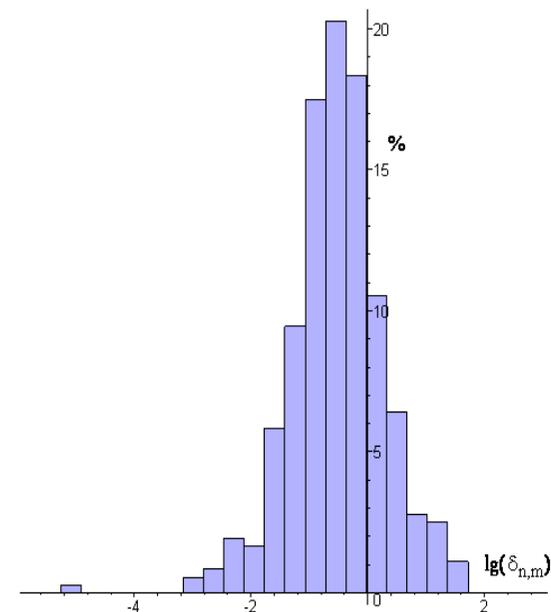
**Рис.2(а,б,с). Гистограммы распределения относительного вклада в стоксовы постоянные от суммы квадратичных членов для масс рельефа и скачка плотности на М.**



а) для Земли



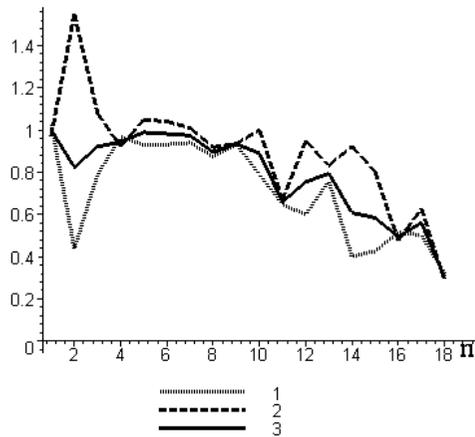
б) для Марса (M1)



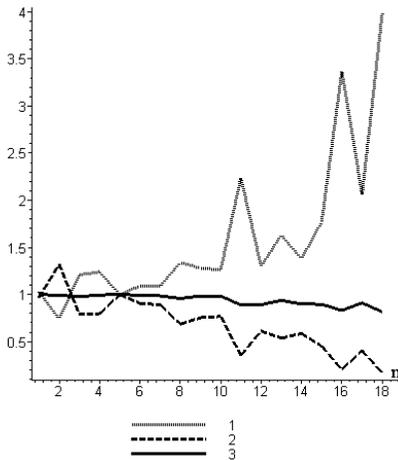
с) для Марса (M2)

**Общий квадратичный вклад в потенциал Марса превышает линейный для гораздо большего числа стоксовых постоянных, чем для Земли.**

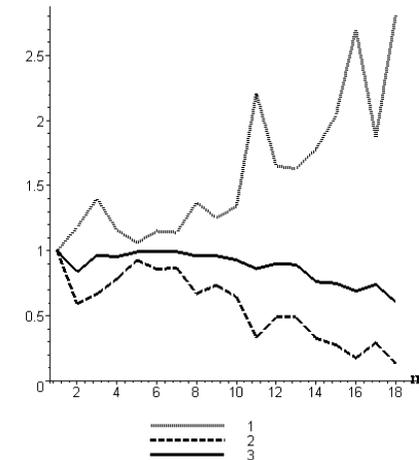
**Рис.3 (а,b,c) . Коэффициенты прямой (1) и обратной (2) регрессии и корреляции (3) в зависимости от степени разложения для двух моделей М**



**а) – для модели М1, полученной на основе аномалий Буге, и модели М2, полученной на основе полной компенсации рельефа на М**



**б) – для модели М1 и уточненной модели М2, полученной после учета аномалий плотности в коре Марса**



**с) – для исходной модели М2 и уточненной модели М2**

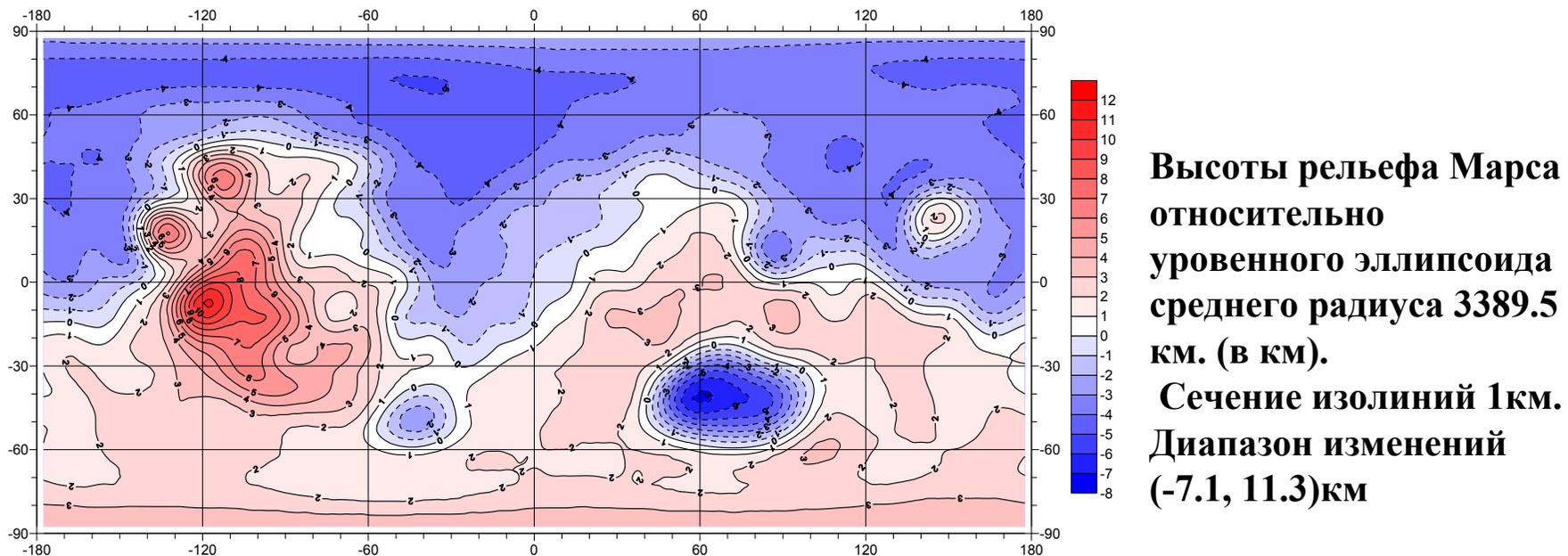


Рис. 5а. Высоты рельефа Марса относительно уровенного эллипсоида среднего радиуса 3389.5 км (в км). Сечение изолиний 1 км. Диапазон изменений (-7.1, 11.3) км.

### Разложение степени N=18

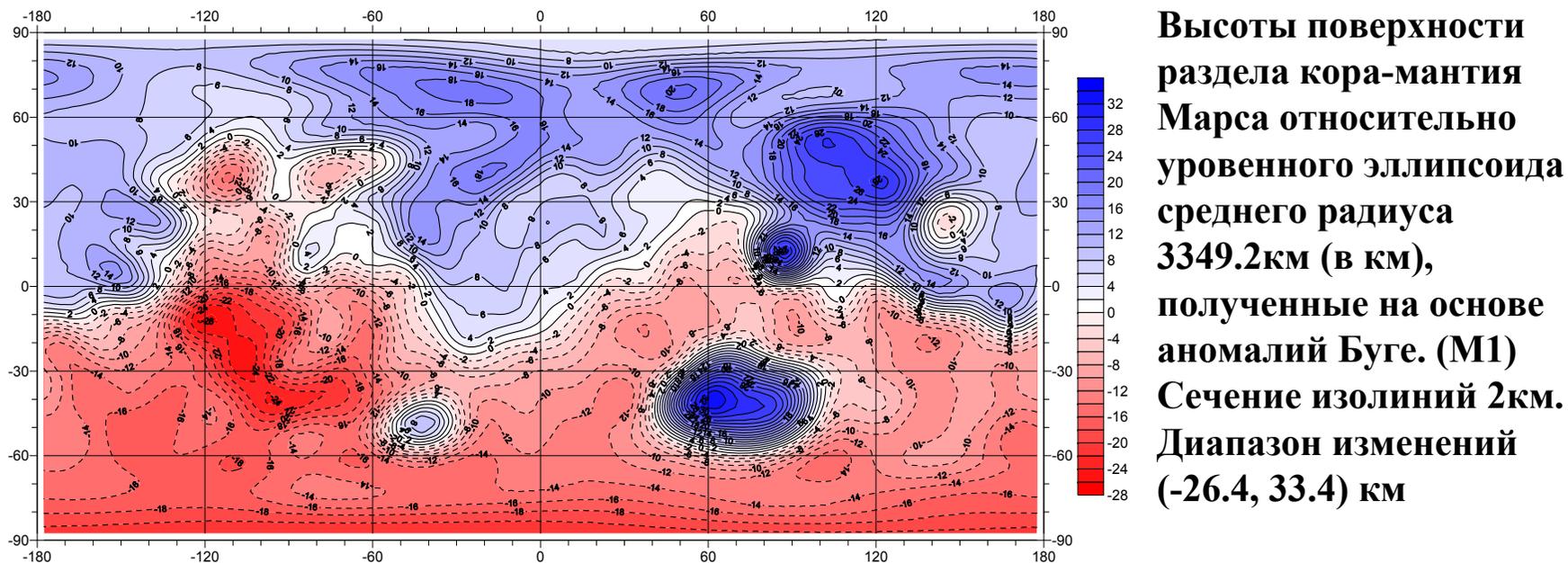
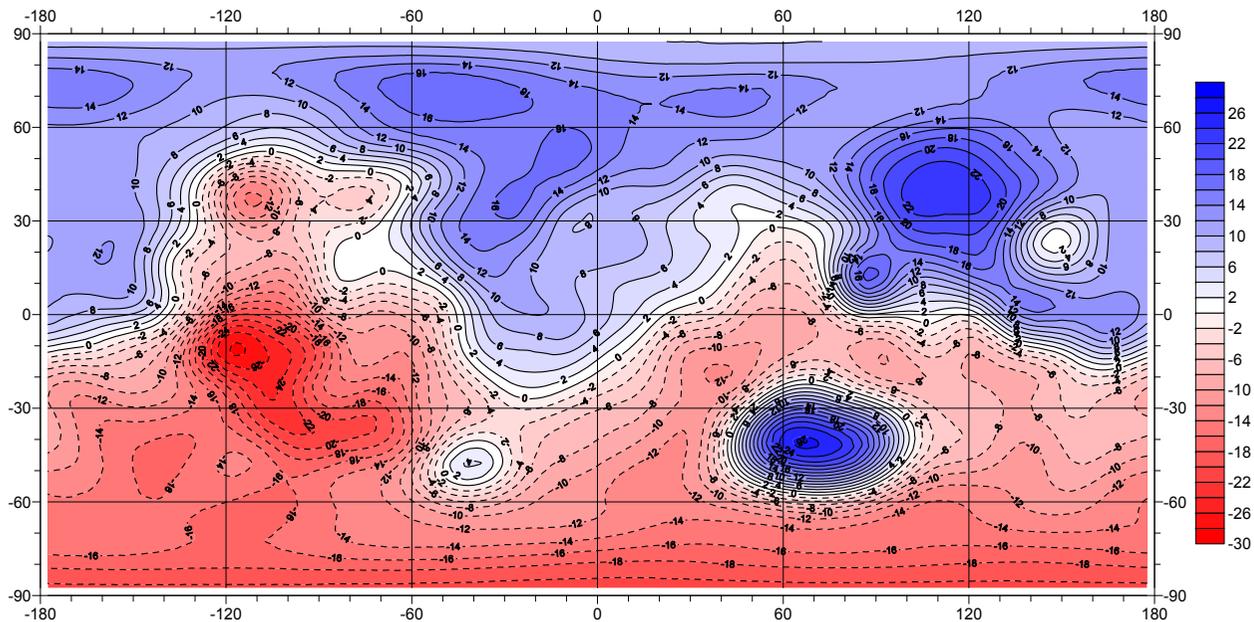
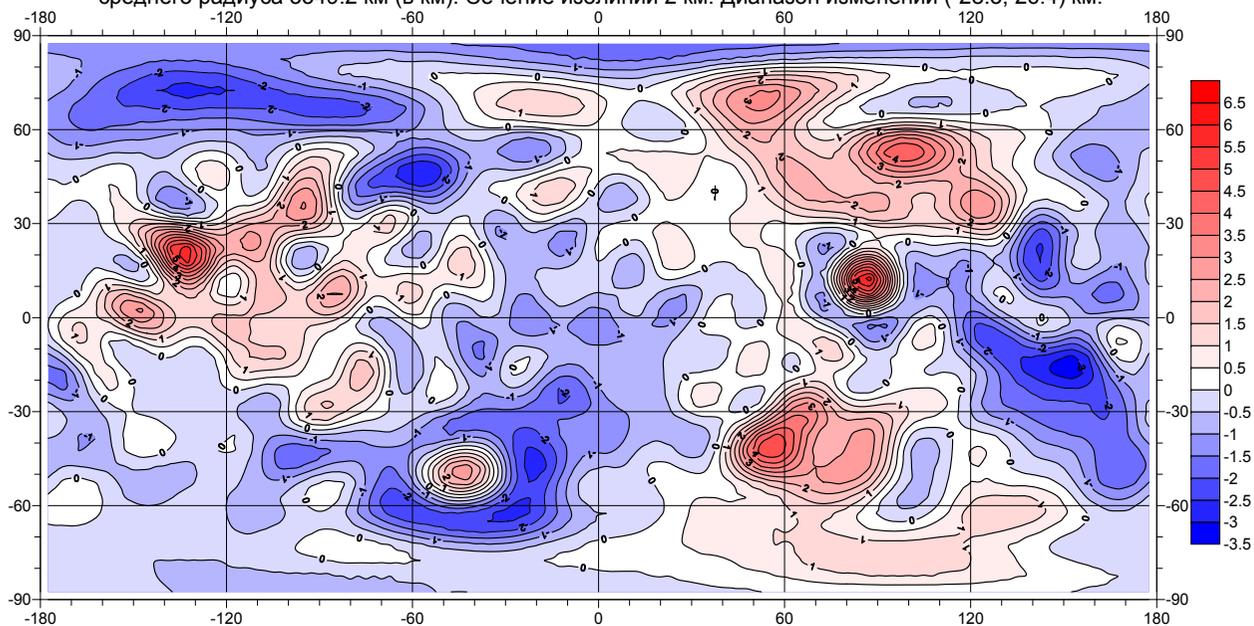


Рис. 5б. Высоты поверхности раздела кора-мантия Марса относительно уровенного эллипсоида



**Высоты поверхности  
раздела кора-мантия  
Марса относительно  
уровенного эллипсои-  
да среднего радиуса  
3349.2 км. (Модель М2)  
Сечение изолиний 2км.  
Диапазон (-28.3,26.4) км**

Рис.4а. Высоты поверхности раздела кора-мантия Марса относительно уровенного эллипсоида среднего радиуса 3349.2 км (в км). Сечение изолиний 2 км. Диапазон изменений (-28.3, 26.4) км.



**Аномалии плотности в  
приповерхностных слоях  
коры Марса (в  $10^6$   
кг/м<sup>2</sup>). Сечение изолиний  
 $0.5 \cdot 10^6$  кг/м<sup>2</sup>. Диапазон  
изменений  
(-3.3, 6.2)  $10^6$  кг/м<sup>2</sup>**

Рис.4б. Аномалии плотности в приповерхностных слоях коры Марса (в  $10^6$ кг/м<sup>2</sup>). Сечение изолиний  $0.5 \cdot 10^6$ кг/м<sup>2</sup>. Диапазон изменений (-3.3, 6.2)  $10^6$ кг/м<sup>2</sup>.

**Разложение степени N=18**

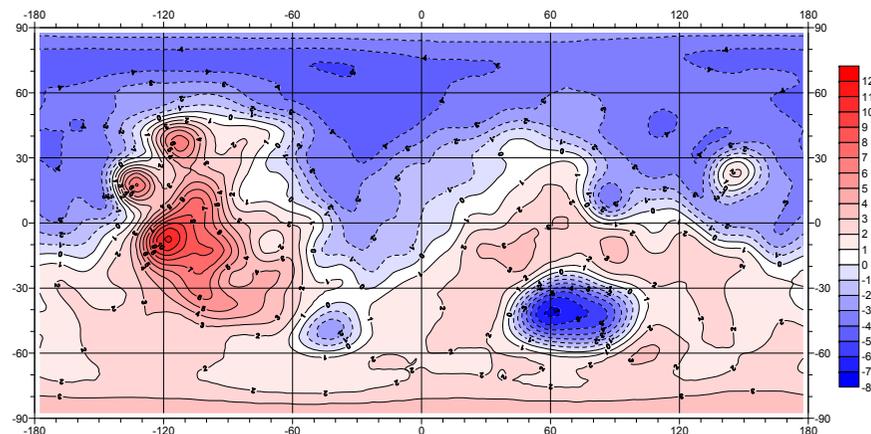


Рис. 5а. Высоты рельефа Марса относительно уровня эллипсоида среднего радиуса 3389.5 км (в км). Сечение изолиний 1 км. Диапазон изменений (-7.1, 11.3) км.

**Высоты рельефа Марса  
относительно уровня  
эллипсоида среднего радиуса  
3389.5**

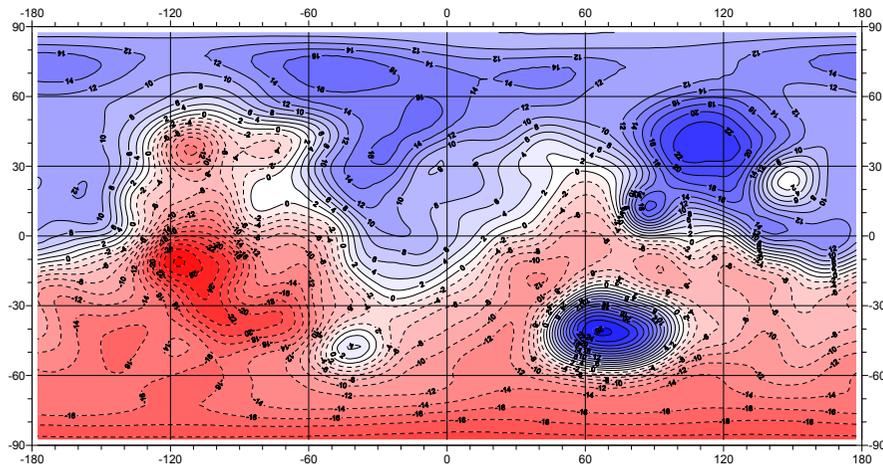


Рис. 4а. Высоты поверхности раздела кора-мантия Марса относительно уровня эллипсоида среднего радиуса 3349.2 км (в км). Сечение изолиний 2 км. Диапазон изменений (-28.3, 26.4) км.

**Высоты поверхности раздела кора-мантия  
Марса относительно уровня эллипсоида  
среднего радиуса 3349.2 км. (Модель М2)**

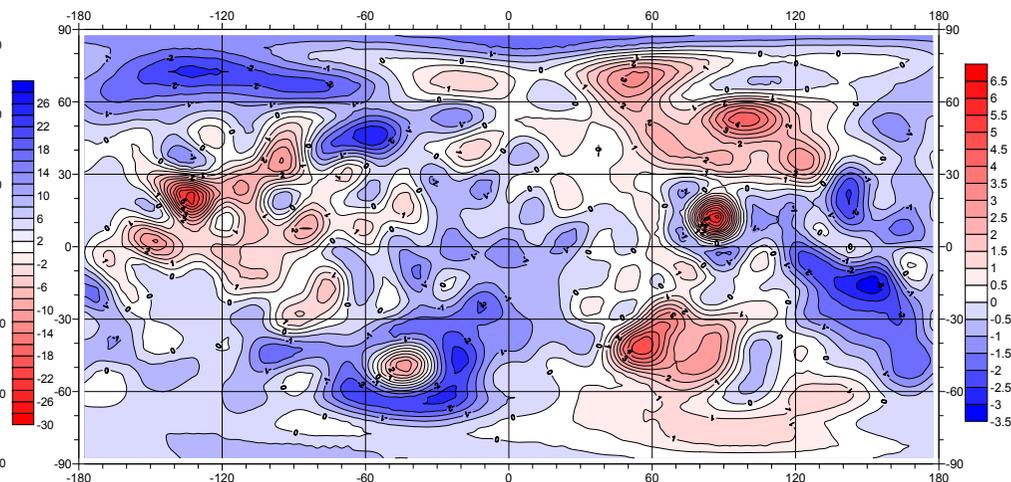
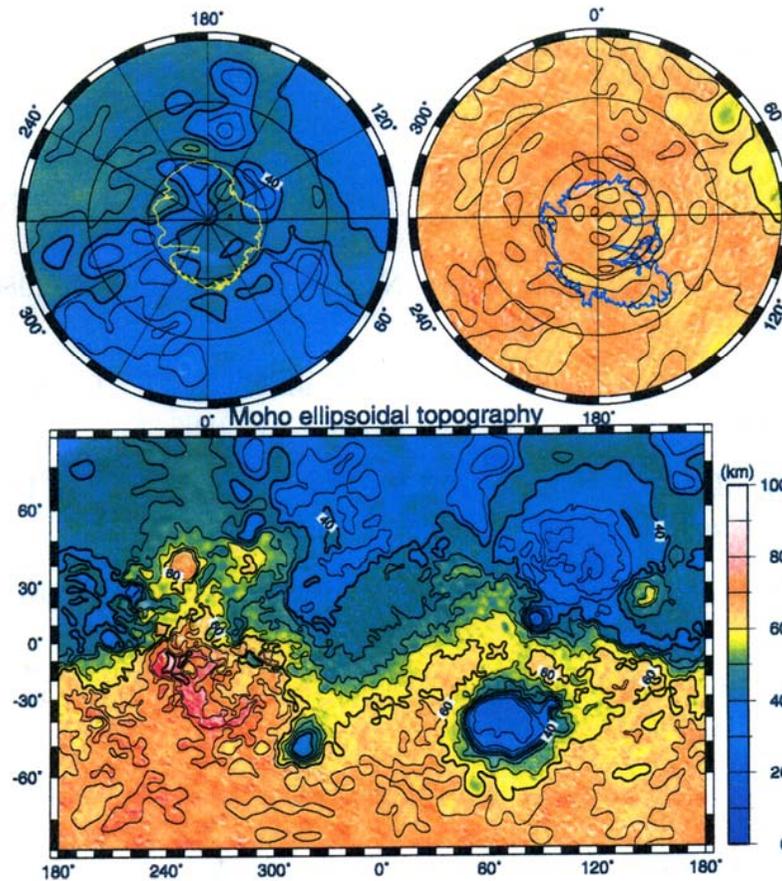


Рис. 4б. Аномалии плотности в приповерхностных слоях коры Марса (в  $10^6 \text{кг/м}^2$ ). Сечение изолиний  $0.5 \cdot 10^6 \text{кг/м}^2$ . Диапазон изменений (-3.3, 6.2)  $10^6 \text{кг/м}^2$ .

**Аномалии плотности в приповерхностных  
слоях коры Марса (в  $10^6 \text{кг/м}^2$ ).**

**Кора Марса характеризуется неоднородным распределением плотности, особенно выраженным для кратеров вулканического и ударного происхождения.**



**Figure 8.** Moho relief (5 km contours), in Mercator and polar stereographic projections as in Figure 3. The degree 2 zonal component is removed. Polar masks of layered terrain show regions where a lower density is applied to compute the residual Bouguer anomaly. Similarly, a higher density is applied within the enclosing contours of the Tharsis volcanoes (not shown).

**Глубины Мохо,  
полученные в работе  
Neumann et al, 2004,  
полученные с  
использованием  
разложения до 60  
степени.**

## ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ:

- **при оценке вклада масс рельефа и скачка плотности на  $M$  в гравитационное поле Марса необходимо учитывать квадратичные члены;**
- **оценка глубин  $M$  на основе аномалий Буге, соответствующая гипотезе однородного (по латерали) строения недр Марса, противоречит данным анализа передаточных множителей (рельеф-поверхность  $M$ ) для Марса и аналогичным оценкам для Земли;**
- **кора Марса характеризуется неоднородным распределением плотности, особенно выраженным для кратеров вулканического и ударного происхождения.**
- Работа выполнена при поддержке РФФИ, грант 08-05-00256.

## Литература

- 1. Zuber, M.T., et al . *Internal structure and early thermal evolution of Mars from Mars Global Surveyor topography and gravity* // **Science**, 2000, 287, P. 1788
- 2. Чуйкова Н.А., Насонова Л.П., Максимова Т.Г. , // **Вестн. Моск. ун-та, Физ. Астрон.** 2006. №4. С.48
- 3 .Yuan, D.-N., et al., Gravity field of Mars: A 75<sup>th</sup> degree and order model, // **J. Geophys. Res.**, 2001. 106, NO. E10. P. 23377
- 4. G.A. Neumann, et al , Crustal structure of Mars from gravity and topography// **J.Geophys.Res.** 2004. 109..P.E08002,doi:10.1029/2004JE002262
- 5.. Насонова Л.П., Чуйкова Н.А.,. // **Вестн. Моск. ун-та, Физ. Астрон.** 2007. №6. С.61
- 6. Жарков В.Н., Кошляков Е.М., Марченков К.И. // **Астрон.Вестник**,1991. 25, №5, С.515
- 7. Н.А.Чуйкова, А.Н.Грушинский, Т.Г.Максимова // **Труды ГАИШ** . 1996. 65, С.51
- 8. Чуйкова Н.А., Казарян С.А., Максимова Т.Г. // **Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон.** 2003. №2 .С.55
- 9. Чуйкова Н.А., Максимова Т.Г. // **Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон.** 2007. №4 .С.46

Благодарим за внимание!