



Общероссийский математический портал

В. С. Троицкий, О. И. Орнатская, И. П. Рязанцева, Исследование тепловой истории Марса, *Докл. АН СССР*, 1978, том 243, номер 3, 600–602

Использование Общероссийского математического портала Math-Net.Ru подразумевает, что вы прочитали и согласны с пользовательским соглашением

<http://www.mathnet.ru/rus/agreement>

Параметры загрузки:

IP: 18.97.9.174

27 марта 2025 г., 03:05:03



Член-корреспондент АН СССР В. С. ТРОИЦКИЙ,  
О. И. ОРНАТСКАЯ, И. П. РЯЗАНЦЕВА

## ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОВОЙ ИСТОРИИ МАРСА

Тепловую историю Марса исследовали в работах (<sup>1-9</sup>), однако лишь в (<sup>9</sup>) учитывали дифференциацию вещества и вынос радиоактивных элементов к поверхности, фактически определяющие основные особенности тепловых процессов в планете, моделировали образование ядра из смеси Fe—FeS при достижении температуры эвтектики  $T_{эвт}$ .

В настоящей работе, как и в (<sup>9</sup>), учитывается вынос при плавлении радиоактивных элементов и образование ядра, но исследуется значительно больше вариантов содержания радиоактивных элементов, а также различные интервалы плавления  $\Delta T$ , по-иному задаются значения теплоемкости и теплопроводности. Кроме того, в наших расчетах при послойном разогреве и дифференциации используется в 50 раз меньший, чем в (<sup>9</sup>), шаг, что существенно повышает информативность расчетов, особенно вблизи поверхности Марса.

Решается уравнение теплопроводности для шара с плотностью  $\rho = 3,96$  г/см<sup>3</sup>, теплопроводностью  $K$ , состоящей из трех членов — фононной, фотонной и экситонной (<sup>10</sup>), и теплоемкостью  $C$ , постоянной до начала плавления и после его завершения и резко меняющейся во время плавления (<sup>11</sup>) в зависимости от температуры  $T$ , интервала плавления  $\Delta T$  и теплоты плавления (100 кал/г);  $K$  во время плавления также резко возрастает. Рассматриваются три варианта начальных условий: «холодный» Марс ( $T_0 = 273$  К), «горячая» и «самая горячая» модели с неравномерным начальным распределением температуры (<sup>9</sup>) (на поверхности 273 К, затем резкий рост до 1000 или 1400 К и постепенный спад к центру Марса до 350 или 750 К соответственно в указанных моделях) и шесть вариантов концентраций радиоактивных элементов в настоящее время (время расчета 4,7 млрд лет). Ниже приведены значения концентраций урана [U] и концентрации тория [Th] и калия-40 [<sup>40</sup>K]. [Th] = 4[U] (см. например, (<sup>12</sup>)); [<sup>40</sup>K] = 1,2[U] в предположении, что [K]/[U] = 10 000 (<sup>9</sup>) и [<sup>40</sup>K]/[K] =  $1,2 \cdot 10^{-4}$ . Здесь же приведены соответствующие значения стационарных потоков  $q_{стац}$  через поверхность Марса:

Вариант	I	II	III	IV	V	VI
[U], $10^{-8}$ г/г	1,16	2	3	4	5,2	8,5
$q_{стац} \cdot 10^{-6}$ кал·см <sup>-2</sup> , с <sup>-1</sup>	0,3	0,53	0,79	1,05	1,37	2,24

Варианты I, II соответствуют хондритовой модели Юри — Мак-Дональда (<sup>1, 2</sup>), III—IV — модели (<sup>9</sup>), варианты V и VI — соответственно земному (<sup>13</sup>) и «мантийному» (пиролитовому) содержанию радиоактивных элементов.

При расчете сначала принималось однородное распределение радиоактивных элементов и плотности, а затем рассматривался вынос радиоактивных элементов из слоев, где температура превышала начало плавления на варьируемую величину  $\Delta T$  (200, 100, 50 К), в соседние вышележащие слои. Кроме того, при расчете учитывалось образование ядра, т. е. оседание вниз смеси Fe—FeS, составляющей 0,1 от массы слоя, после превышения на  $\Delta T$  температуры эвтектики  $T_{эвт} = 1263$  К. Образование ядра прекращалось после заполнения смесью плотностью 7 г/см<sup>3</sup> всех нижележащих слоев или при  $T > 1663$  К.

При плавлении смеси в слое значения  $K$  и  $C$  задавались, как и при плавлении с выносом радиоактивных элементов. При численном решении уравнения теплопроводности, как и в работе по Луне (<sup>14</sup>), использовали метод сеток. Для аппроксимации уравнения применялась абсолютно устойчивая разностная схема. Получаемую линейную систему уравнений решали методом прогонки. Для более точного вычисления глубины основного залегания радиоактивных элементов, толщины коры, ядра, величины потока и т. д., производилось измельчение шага по радиусу у поверхности до тех пор, пока указанные параметры не оставались неизменными при уменьшении шага вдвое. Оптимальными оказались шаги: 100 слоев от центра по 26,89 км и остальные 700 слоев по 1 км. Шаг по времени выбирался таким же образом и составил  $10^7$  лет. Время счета одного варианта на ЭВМ БЭСМ-6 не превышало 55 мин. В результате расчетов получены зависимости температуры вещества Марса от времени и от расстояния до центра планеты, временные зависимости теплового потока через поверхность Марса, а также временные зависимости толщины твердого слоя (коры) и радиуса ядра. Из рассмотрения этих зависимостей можно заключить следующее.

Если принять в качестве объективного и достаточно твердо установленного факта наличие ядра, то отпадают варианты I и II, в которых ядро еще не образовалось, т. е. хондритовая (с малыми концентрациями радиоактивных элементов) модель Марса, по-видимому, нереальна. Если к тому же принять, что к настоящему времени нагрев всего вещества Марса уже завершился и началось его постепенное остывание, то отпадают также III и IV варианты, в которых сейчас все еще продолжается нагрев, а также «холодная» модель начальных условий в V варианте, т. е., по-видимому, разумно считать, что концентрация урана в Марсе больше чем  $40 \cdot 10^{-9}$  г/г. Если предположить, что Марс в настоящее время все еще умеренно активен, т. е. в отличие от Луны пока еще не находится в стационарном состоянии, то, как следует из временной зависимости потока через поверхность, вряд ли можно ожидать концентраций урана, больших, нежели в варианте VI, так как даже в этом варианте поток уже близок к стационарному. Поэтому наиболее вероятные значения концентрации урана, по-видимому, заключены в пределах V–VI вариантов, т. е. от  $40$  до  $85 \cdot 10^{-9}$  г/г, но это содержание радиоактивных элементов является также наиболее вероятным и для Луны (<sup>14</sup>).

Закономерно предположить, что вещество Марса имеет земной или «мантийно»-пиролитовый состав, как и вещество Луны, но с большим содержанием железа, что естественно вытекает из общности их происхождения. Из ограничения на  $[U]$  следует ограничение на величину потока тепла через его поверхность, которая заключена в пределах  $1,5-2,5 \cdot 10^{-6}$  кал·см<sup>-2</sup>с<sup>-1</sup>. «Холодная» модель начальных условий, как оказалось, нереальна для всех вариантов, кроме VI, а в VI начальные условия сравнительно мало влияют на параметры Марса в настоящее время. Из общепринятых схем образования планет путем аккреции вещества (см., например, (<sup>15</sup>)) также следует не «холодная» модель, а неравномерное начальное распределение температуры. Поэтому наиболее реальными нам представляются варианты V и VI с неравномерным начальным распределением температуры.

На основании сказанного можно представить себе тепловую историю Марса следующим образом.

В течение первых 0,1–0,5 млрд лет на глубине ~400 км под поверхностью Марса началось расплавление его вещества, которое через 1–2 млрд лет достигло центра планеты и через 0,5–1 млрд лет распространилось к поверхности. Примерно через 0,5 млрд лет из того же слоя, где впервые началось расплавление вещества, начали вылавляться к поверхности радиоактивные элементы, что привело к резкому увеличению температуры в слоях, близких к поверхности, за счет накопления радиоген-

ного тепла, в результате чего эти слои оказались расплавленными вплоть до глубины от 10 до 30 км под поверхностью. Этот период максимального расплавления, начавшийся в первые 0,5–1,5 млрд лет истории Марса, продолжался 1,5–2 млрд лет, после чего приповерхностные слои начали остывать и затвердевать. В результате современная толщина твердой коры составляет от 40 до 180 км (если окажется, что интервал плавления  $\Delta T = 50^\circ$ , то толщина коры 90–180 км, при  $\Delta T = 100^\circ$  — 70–160 км и при  $\Delta T = 200^\circ$  толщина коры 40–110 км).

Таким образом, максимальная активность Марса начала уменьшаться ~1,5–2,5 млрд лет назад. В период максимального расплавления естественно наблюдался и максимальный тепловой поток через поверхность. Пик величины этого потока, примерно вдвое превышающий стационарное значение, относится ко времени 1–1,5 млрд лет с начала марсианской истории. В настоящее время поток уменьшился почти до стационарного значения, превышая его примерно на 10%. В первые 0,5–1 млрд лет в результате оседания при плавлении смеси Fe–FeS практически сформировалось и ядро Марса, радиус которого составляет 1200–1300 км. В настоящее время вещество Марса вплоть до центра постепенно остывает.

Авторы признательны Н. М. Цейтлину за полезные обсуждения.

Горьковский государственный университет  
им. Н. И. Лобачевского

Поступило  
12 VI 1978

#### ЛИТЕРАТУРА

- <sup>1</sup> H. C. Urey, *Geochim. et cosmochim. acta*, v. 1, 209 (1951). <sup>2</sup> G. J. F. MacDonald, *J. Geophys. Res.*, v. 67, 2945 (1962). <sup>3</sup> Z. Kopal, *Techn. Rep.* 32-225, Jet. Propulsion Lab., Pasadena, California, 1962. <sup>4</sup> С. В. Маева, ДАН, т. 159, № 2 (1964). <sup>5</sup> D. L. Anderson, R. A. Phinney, In: *Mantles of the Earth and Terrestrial Planets*, N. Y., 1967. <sup>6</sup> W. H. Lee, *Earth Planet. Sci. Letters*, v. 4, 277 (1968). <sup>7</sup> T. S. Hanks, D. L. Anderson, *Phys. Earth Planet. Interiors*, v. 2, 19 (1969). <sup>8</sup> R. T. Reynolds, A. L. Sammers, *J. Geophys. Res.*, v. 74, № 10, 2494 (1969). <sup>9</sup> D. H. Johnston, T. R. McGetchin, M. N. Toksöz, *ibid.*, v. 79, 3959 (1974). <sup>10</sup> Е. А. Любимова, *Термика Земли и Луны*, М., «Наука», 1968. <sup>11</sup> С. В. Маева, *Изв. Комиссии по физике планет*, в. 5, М., «Наука», 1965. <sup>12</sup> Б. Ю. Левин, С. В. Маева, ДАН, т. 133, № 1, 44 (1960). <sup>13</sup> А. Г. Старкова, *Метеоритика*, № 13, 19 (1955). <sup>14</sup> О. И. Ornatskaya, N. M. Tseitlin *et al.*, In: *Proc. Lunar. Sci. Conf. VII*, 1976, p. 3205. <sup>15</sup> В. С. Сафронов, *Эволюция допланетного облака и образование Земли и планет*, М., «Наука», 1969.