

Math-Net.Ru

Общероссийский математический портал

В. П. Мясников, Е. П. Тимошкина, Модель эволюции внутреннего строения Земли на этапе конвективного остывания, *Докл. АН СССР*, 1989, том 304, номер 1, 65–68

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: 18.97.14.87

15 февраля 2025 г., 10:29:52



ЛИТЕРАТУРА

1. Алексеев А.С., Бабич В.М., Гельчинский Б.Я. Вопросы динамической теории распространения сейсмических волн, 1961, вып. 5, с. 3–24. 2. Алексеев А.С., Михайленко Б.Г. – Изв. АН СССР. Физика Земли, 1976, № 12, с. 11–25. 3. Алексеев А.С., Михайленко Б.Г. – ДАН, 1982, т. 267, № 5, с. 1079–1083. 4. Цванкин И.Д., Калинин А.В., Пивоваров Б.Л. – Изв. АН СССР. Физика Земли, 1983, № 10, с. 32–45. 5. Цванкин И.Д., Калинин А.В. – Там же, 1984, № 2, с. 34–40. 6. Бабич В.М. – Там же, 1979, № 2, с. 3–11. 7. Киселев А.И. – Там же, 1983, № 9, с. 51–56. 8. Hron F., Mikhailenko B.G. – Bull. Seismol. Soc. Amer., 1981, vol. 71, № 4, p. 1011–1021.

УДК 550.38

ГЕОФИЗИКА

В.П. МЯСНИКОВ, Е.П. ТИМОШКИНА

**МОДЕЛЬ ЭВОЛЮЦИИ ВНУТРЕННЕГО СТРОЕНИЯ ЗЕМЛИ
НА ЭТАПЕ КОНВЕКТИВНОГО ОСТЫВАНИЯ**

(Представлено академиком Г.Г. Черным 25 IX 1987)

В общем случае эволюция внутреннего строения планет земной группы в зависимости от массы планеты, ее состава и характеристик начального состояния состоит из трех этапов: первоначального расслоения на оболочки с устойчивой стратификацией, конвективного остывания с локализацией конвективных движений в оболочках и заключительного этапа кондуктивного остывания.

Анализ геофизических и геологических данных показывает, что для Земли начальный этап расслоения завершился образованием тяжелого ядра к рубежу 2,9–3,0 млрд. лет назад и в настоящее время наша планета проходит этап конвективного остывания. Сопоставление геологических данных позволяет сделать вывод, что этот этап ее эволюции связан с высоконадкритической конвекцией в ядре и мантии [1]. Представляет интерес количественно оценить характерную длительность этого этапа эволюции и соответствующий масштаб изменения температуры и других характеристик в недрах Земли.

При развитой конвекции, следуя методике [2], уравнения эволюции сферически-симметричных составляющих геофизических полей для ядра и мантии можно представить в виде

$$\frac{dS_c}{d\tau} \int_0^{R_c} \rho_c T_c R^2 dR - R_c^2 \lambda_c \left(\frac{\partial T_c}{\partial R} \right)_{R=R_c} = 0;$$

$$(1) \quad \frac{dS_m}{d\tau} \int_{R_c}^{R_m} \rho_m T_m R^2 dR - R_m^2 \lambda_m \left(\frac{\partial T_m}{\partial R} \right)_{R=R_m} + R_c^2 \lambda_m \left(\frac{\partial T_m}{\partial R} \right)_{R=R_c} +$$

$$+ 2\kappa_m \alpha_m \rho_m \left[R_m^2 (T_m - T_s) \left(\frac{\partial \varphi_m}{\partial R} \right)_{R=R_m} - R_c^2 (T_c - T_m) \left(\frac{\partial \varphi_m}{\partial R} \right)_{R=R_c} \right] = 0;$$

$$T_k = \frac{\partial h_k}{\partial S_k}; \quad \frac{1}{\rho_k} = \frac{\partial h_k}{\partial P_k}; \quad h_k = h_k(P_k, S_k);$$

$$\frac{\partial P_k}{\partial R} = -\rho_k \frac{\partial \varphi_k}{\partial R}; \quad \Delta \varphi_k = 3\rho_k; \quad h_k + \varphi_k = E_k(\tau);$$

здесь ρ — плотность; T — температура; P — давление; φ — гравитационный потенциал; R — радиус; S — энтропия; h — энтальпия; E — внутренняя энергия; κ , α , λ — коэффициенты температуропроводности, объемного расширения, теплопроводности; T_s — температура на поверхности Земли; τ — время; индекс $k = c, m$ помечает параметры ядра и мантии соответственно. Система (1) справедлива при следующих условиях:

1. Ядро является маловязким по сравнению с мантией, и конвекция в нем полностью определяется охлаждением вещества ядра в тонком пограничном слое около нижней границы мантии, а температуропроводность в мантии мала по сравнению с температуропроводностью ядра $\kappa_m \sim \kappa_c \sqrt{\epsilon}$, где $\epsilon = \left(\frac{\kappa_m \nu_m}{g_0 R_0^3} \right)^{1/2}$, g_0 — характерное значение ускорения силы тяжести, R_0 — характерный радиус планеты, ν_m — вязкость мантии.

2. Ядро "перегрето" относительно мантии. Как показано в [2], более высокая температура в ядре планеты возникает в процессе первоначального расслоения на устойчиво стратифицированные оболочки.

С физической точки зрения этап конвективного остывания планеты, описываемый уравнениями (1), обусловлен тем, что тепло из разогретого в процессе дифференциации ядра диссипируется во внешнее пространство через малотеплопроводную и вязкую мантию, вызывая в ней сильно надкритическую конвекцию. Ядро при этом служит как бы резервуаром, в котором накоплена выделившаяся в процессе дифференциации энергия.

Для проведения количественных расчетов на основе уравнений (1) было выбрано уравнение состояния в форме Гильдебрандта [3]:

$$(2) \quad P(\rho, T) = P_p(\rho) + \alpha K_T T, \quad \alpha K_T \approx \text{const};$$

здесь K_T — изотермический модуль сжатия, P_p — потенциальное давление. Это приближение справедливо в предельном случае высоких температур, при температурах выше дебаевской αK_T постоянно и не зависит ни от плотности, ни от температуры. Подробный анализ этого приближения дан в [4].

В общем случае для (1) можно показать, что энтропия внутри мантии и ядра зависит только от медленного времени, т.е. $S = S(\tau)$.

Приближение Гильдебрандта приводит к некоторому классу уравнений состояния, для которых условие (2) будет автоматически выполняться. Свободная энергия Гельмгольца для этого класса уравнений состояния в общем случае имеет вид

$$(3) \quad F = \theta(\rho) + \Phi(\rho) T.$$

Используя теперь стандартное термодинамическое соотношение, определяющее энтропию $S = - \frac{\partial F}{\partial T}$, получаем

$$(4) \quad S - S_0 = - \frac{\alpha K_T}{\rho}.$$

Условие постоянства $S(\tau)$ по пространству приводит к существенному упрощению в решении уравнений гидростатики, входящих в (1), так как с точностью до исполь-

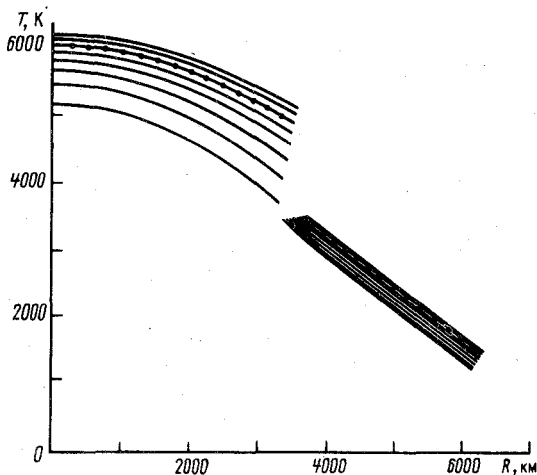


Рис. 1. Модельные расчеты распределения температур в ядре и мантии на этапе конвективного остывания Земли в различные моменты времени для случая $\kappa_c = 0,35$ см/с; $\kappa_m = 0,01$ см/с; шаг по времени составляет 1,5 млрд. лет. Выделено распределение в слоях, соответствующее современному состоянию планеты. Можно видеть уменьшение радиусов ядра и мантии в процессе эволюции

зуемого в уравнениях состояния приближения планета имеет постоянные, хотя и различные для каждого слоя, плотности в пределах ядра и мантии. Используя закон сохранения массы для определения радиусов ядра и мантии, получаем полное решение задачи о пространственном распределении полей температуры, давления и плотности. В итоге система уравнений (1) сводится к системе обыкновенных дифференциальных уравнений для определения $S_c(r)$ и $S_m(r)$. Решая численно эту систему, можно проследить ход эволюции планеты на этапе конвективного остывания. На рис. 1 приведены модельные расчеты распределения температур в ядре и мантии в различные моменты времени. Необходимое начальное значение поля температур, соответствующее степени начального перегрева ядра, рассчитывалось так, чтобы эволюция за отрезок времени $3 \cdot 10^9$ лет давала средние значения поля температур в ядре и мантии, соответствующие средним значениям на современном этапе. В табл. 1 представлены результаты модельных расчетов изменения основных сферически-симметричных характеристик Земли за время конвективного остывания планеты для различных значений температуропроводности в ядре и мантии.

Отметим, что, если $\kappa_c < \sqrt{\epsilon} \kappa_m$, уравнения (1) неприменимы для моделирования процесса конвективного остывания планеты. При соблюдении отношения $\kappa_c \sim \sqrt{\epsilon} \kappa_m$ скачок температур на границе ядра и мантии уменьшается и за конечное время становится равным нулю, после чего конвекция в мантии вырождается. Для этого случая характерными особенностями результатов расчетов являются следующие обстоятельства: относительно небольшое, примерно 120 км, уменьшение радиуса планеты и относительно незначительное изменение уровня температур в мантии во время всего этапа конвективного остывания, при этом плотность ядра, и мантии увеличивается также незначительно (табл. 1, рис. 1). Изменение этих характеристик для заданных уравнений состояния и при фиксированной разности температур между слоями в некоторый момент времени (в наших расчетах фиксировалось современное состояние планеты) незначительно варьирует в зависимости от отношения κ_c/κ_m и абсолютных значений температуропроводностей в слоях. Длительность этапа конвективного остывания сильно зависит как от отношения κ_c/κ_m , так и от абсолютных значений температуропроводностей в ядре и мантии. Так, например, умень-

Таблица 1

Изменение основных сферически-симметричных характеристик Земли за время конвективного остывания планеты для различных значений температуропроводности в ядре и мантии

κ_c/κ_m	κ_m , см/с	Δt , млрд. лет	δT , К	$\Delta \rho_m$, г/см	$\Delta \rho_c$, г/см	ΔR_m , км	ΔR_c , км
$0,67 \cdot \sqrt{\epsilon}$	0,005	13,5	1535	0,07	2,64	107	258
	0,01	7,5	1680	0,08	2,42	108	251
$1 \cdot \sqrt{\epsilon}$	0,005	18	1475	0,10	2,57	114	250
	0,01	10,5	1576	0,12	2,73	126	270
$1,33 \cdot \sqrt{\epsilon}$	0,005	24	1433	0,14	2,53	124	243
	0,01	13,5	1502	0,11	2,63	134	258

Примечание. Δt — общее время конвективного остывания планеты; δT — скачок температур на границе ядра и мантии, сформировавшийся к началу этапа конвективного остывания; ΔR_c , ΔR_m , $\Delta \rho_c$, $\Delta \rho_m$ — изменение характерных радиусов и плотностей ядра и мантии за время конвективного остывания планеты; $\sqrt{\epsilon} \approx 0,03$.

шение температуропроводностей мантии и ядра в два раза увеличивает длительность этапа конвективного остывания почти вдвое. Увеличение отношения κ_c/κ_m в пределах $\kappa_c \sim \sqrt{\epsilon} \kappa_m$ дает тенденцию к увеличению длительности рассматриваемого этапа. Интенсивность же конвекции в мантии во время этапа конвективного остывания меняется от очень развитого состояния до практически почти полного вырождения в конце этапа. Поскольку именно интенсивность конвекции определяет интенсивность и структуру тектонических процессов, то можно утверждать, что поверхностные тектонические движения в процессе эволюции должны изменяться в сторону уменьшения их интенсивности. Такие выводы хорошо подтверждают заключения, сделанные в работе [1], как о степени развития конвективных движений в недрах Земли, так и об их изменении за интервал времени от рубежа $3,0 \cdot 10^9$ лет.

Принятые в работе для расчетов модельные уравнения состояния дают только общую качественную картину эволюции и достаточно надежную оценку порядка изменения основных характеристик недр нашей планеты. Использование более детальных сведений об уравнениях состояния может привести только к относительно небольшим количественным изменениям при сохранении общей качественной картины эволюции.

Геологический институт
Академии наук СССР, Москва

Поступило
13 X 1987

ЛИТЕРАТУРА

1. Мясников В.П., Новиков В.Л., Савельев А.А. — ДАН, 1986, т. 288, № 5, с. 1189—1191.
2. Мясников В.П., Фадеев В.Е. Модели эволюции Земли и планет земной группы. Итоги науки и техники. Физика Земли. М., 1980, т. 5. 232 с.
3. Кусков С.Л., Галимзянов Р.Ф., Трускиновский Л.М., Пильченко В.А. — Геохимия, 1983, № 6, с. 849—871.
4. Anderson O.L. — Phys. Chem. Minerals, 1979, vol. 5, № 1, p. 33—62.