

УДК 550–551

ГИДРОДИНАМИЧЕСКАЯ ТЕОРИЯ ГЕОДИНАМИЧЕСКОЙ ЭВОЛЮЦИИ

© 2011 г.

В.Д. Котелкин¹, Л.И. Лобковский²

¹Московский госуниверситет им. М.В. Ломоносова

²Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва

kotelkin55@mail.ru

Поступила в редакцию 24.08.2011

Численные эксперименты, основанные на термохимической модели мантийной конвекции, позволили воспроизвести и объяснить геологическую историю Земли. Модель учитывает двухслойное строение мантии, образование легкого вещества в слое D" (за счет перехода в ядро металлических компонент) и тяжелого вещества в зонах субдукции (фазовый переход «габбро-эклогит»). Моделирование показало, что в такой системе возможны глобальные мантийные перевороты, которые определяют основные геологические феномены и проясняют их причины. После двух циклов Вильсона общемантийный сток тяжелого вещества, который производит закрытие океанов атлантического типа и сборку суперконтинентов, действует в одном полушарии (континентальном), тогда как в другом (океаническом) – поднимаются легкие суперплюмы, которые формируют ложе более крупного Тихого океана. Предлагаемая теория устанавливает причинно-следственные связи в цепи эволюционных событий и хорошо согласуется с геологическими, геофизическими, геохимическими и астрофизическими данными.

Ключевые слова: термохимическая мантийная конвекция, легкое и тяжелое вещество, верхняя и нижняя мантии, фазовый переход, неустойчивое начальное состояние равновесия, оверторно-циклический режим конвекции, сейсмоотомаграфия, тектоника плит и тектоника плюмов, циклы Вильсона и суперконтиненты, асимметрия Земли.

Введение

Геологи восстановили поверхностную картину эволюции Земли [1]. Однако глубинные причины четырехкратного закрытия океанов и образования суперконтинентов (циклов Вильсона), существования океанов двух типов – атлантического и тихоокеанского, одновременного проявления двух тектоник – тектоники плит и тектоники плюмов, асимметрии планеты в виде континентального и океанического полушарий оставались неизвестными. Численные эксперименты по эволюции Земли на основе термохимической модели позволили воспроизвести геологические события и установить их причины [2].

Модель

Систему уравнений термохимической мантийной конвекции составляют уравнения движения изовязкой безынерционной жидкости в приближении Буссинеска

$$\bar{\nabla} p = Ra(T + C + \phi\chi(r - r_{ph}))\bar{e}_r + \Delta \bar{\nabla},$$

$$\bar{\nabla} \cdot \bar{\nabla} = 0,$$

уравнение теплопроводности, включающее тепловые эффекты фазового перехода Q (на границе

между верхней и нижней мантиями, 670 км) и распада радиоактивных элементов $H(t)$,

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \bar{\nabla} \cdot \bar{\nabla} T = \frac{\Delta T}{Pe} + QT\nu_r \frac{d\chi(r - r_{ph}^0)}{dr} + H(t)$$

и уравнение массопереноса с учетом двух химических превращений мантийного вещества

$$C = \begin{cases} C_{light}, & \text{если } r = r_c, \quad T > T_{melt}, \\ C_{ecl}, & \text{если } r = r_{ecl}, \quad \nu_r < 0. \end{cases}$$

В остальных случаях

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \bar{\nabla} \cdot \bar{\nabla} C = 0.$$

Плавление мантийного вещества вблизи ядра сопровождается ростом последнего за счет стекания металлических компонент и появлением в мантии легкого вещества C_{light} . Условия баланса массы и тепла позволяют следить за изменениями радиуса r_c и температуры T_c ядра в процессе эволюции

$$\frac{\partial r_c}{\partial t} = \frac{K_{Ch}}{r_c^2} \frac{\sum (C_{light} - C)}{dt},$$

$$\frac{dT_c}{dt} = K_T \int_s \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r_c^+} ds, \quad T_c = \lambda_T \frac{i_c}{r_c^3}.$$

Учитывается также фазовый переход «габбро-эклогит», происходящий в зонах субдукции на глу-

бине 80–100 км и приводящий к появлению в мантии тяжелого вещества C_{ecl} . Критерии подобия модели

$$Ra = \frac{\rho_0 g \alpha T_* I_*^2}{\eta \nu_*}, \quad Pe = \frac{I_* \nu_*}{\kappa}, \quad \phi = \frac{\delta \rho_{\text{ph}}}{\delta \rho_{\text{th}}},$$

$$Q = \frac{\gamma T_{\text{ph}} \delta \rho_{\text{ph}}}{\rho_0 T_* c_p}, \quad \Gamma = \frac{\gamma T_*}{\rho_0 g I_*}, \quad K_{\text{Ch}} = \frac{\delta \rho_{\text{Ch}} \nu_1}{I_*^3 4 \pi r_c},$$

$$K_T = \frac{3 \kappa}{4 \pi I_* \nu_*}, \quad \lambda_T = \frac{\rho_0 c_p}{\rho_c c_p^c}, \quad H_0 = \frac{h_0 t_*}{c_p T_*},$$

$$\lambda_H = \lambda_h t_h.$$

Результаты численного моделирования

Эндотермический фазовый переход приводит к расслоению мантии и перемежающейся конвекции. Большую часть времени реализуется раздельная двухъярусная конвекция, при которой верхняя мантия остывает быстрее нижней. Вследствие

виде нескольких суперплюмов. Различие между погружением и всплытием вещества объясняется радиально сходящейся геометрией шарового слоя, при которой эффект заклинивания возникает только при погружении. После двух циклов Вильсона положение стока стабилизируется, одновременно восходящие суперплюмы перемещаются на противоположную сторону мантии и формируются асимметрия планеты. Во время переворотов общемантийный сток производит закрытие межконтинентальных океанов и собирает суперконтиненты (после закрытия стока континенты расходятся и между ними образуются новые океаны атлантического типа). Суперплюмы, действующие во время переворотов в противоположном полушарии, формируют крупное ложе неподвижного Тихого океана.

На рис. 1 изображены перемежающийся характер термохимической мантийной конвекции и ступенчатый характер эволюции.

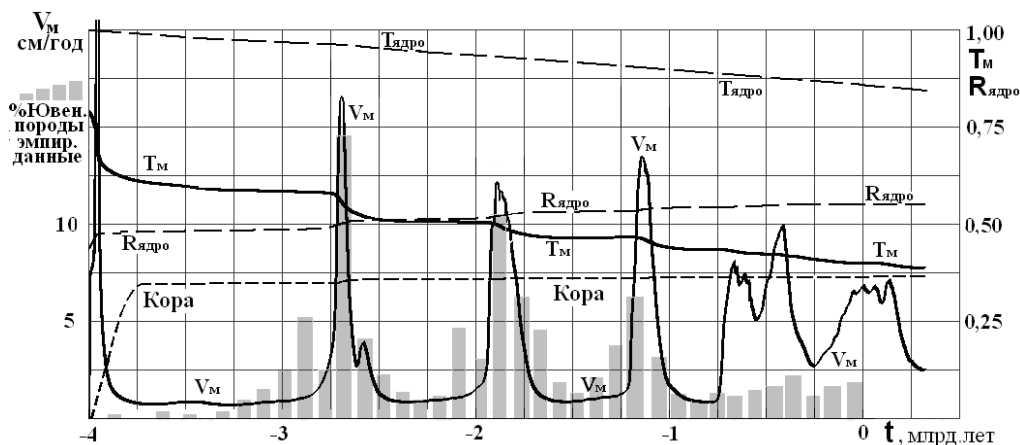


Рис. 1

этого двухслойная мантия становится неустойчивой, и в ней происходят мантийные перевороты. Во время переворотов наблюдается глобальная самоорганизация конвекции, выражающаяся в образовании общемантийного стока для тяжелого верхнемантийного вещества. Выполняется принцип минимума работ для действительных перемещений, коллективное погружение вещества оказывается энергетически более выгодным. Легкое нижнемантийное вещество поднимается в

Работа выполнена при поддержке РФФИ, грант №10-05-0550-а.

Список литературы

1. Лобковский Л.И., Никишин А.М., Хаин В.Е. Современные проблемы геотектоники и геодинамики. М.: Научный мир, 2004. 612 с.
2. Котелкин В.Д., Лобковский Л.И. Общая теория Мясникова эволюции планет и современная термохимическая модель эволюции Земли // Физика Земли. 2007. №1. С. 26–44.

A HYDRODYNAMIC THEORY OF GEODYNAMIC EVOLUTION

V.D. Kotelkin, L.I. Lobkovsky

Theoretical ideas based on the results of numerically modeling the mantle convection are presented. The thermochemical model accounts for such factors as a two-layer structure of the mantle, formation of light substance in the D" layer (owing to transition of metallic components into the core), and heavy substances in subduction zones (eclogite-alteration of the oceanic crust). Numerical experiments have shown that this system allows phenomena of global mantle overturns, which makes possible

to model the general pattern of the Earth's geologic evolution. The suggested theory establishes the cause-effect relationships in the sequence of geological events and is confirmed by all the empirical data.

Keywords: thermochemical mantle convection, light and heavy substances, upper and lower mantle, phase transition, unstable initial equilibrium state, the overturn-cyclic regime of convection, seismic tomography, plate tectonics and plume tectonics, Wilson cycles and supercontinents, the asymmetry of the Earth.