

## МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ТЕРМОКОНВЕКТИВНИХ КОЛИВАНЬ НА МЕЖІ КОРИ ТА МАНТІЇ ЗЕМЛІ

Задача про тривимірний розподіл збурення температури в літосфері зводиться до розв'язування двовимірної задачі. Отримані в результаті проведених досліджень рівняння й алгоритми їхніх рішень дозволяють проводити чисельне моделювання розвинутої конвекції в умовах мантиї Землі, досліджувати теплову взаємодію конвектуючої мантиї з літосферою, відновлювати розподіл температури у верхній частині літосфери регіону.

**Ключові слова:** геодинамічна модель; термодинамічні параметри; термоконвективні процеси.

### *Вступ*

Стационарна конвекція під континентами, для дослідження якої використовують реологічну модель степеневі рідини [Stein et al., 2004], утворює верхній холодний нерухомий межовий шар (континентальну літосферу). Під час аналізу стійкості цього шару варто застосовувати реологічну модель Андраде. Аналіз засвідчує, що літосфера має коливальну нестійкість з періодом коливань близько 200 млн років [Loddoch et al., 2006]. Однак, для його знаходження необхідно знати розподіл температури у всіх внутрішніх точках області в початковий момент часу (а він невідомий навіть у даний момент часу), і знати граничні умови та розподіл теплофізичних характеристик середовища.

### *Моделювання термомеханічних процесів у корі та мантиї Землі*

Отримання розв'язку фундаментальної системи рівнянь динаміки сильно в'язких неоднорідних стисливих середовищ на основі однорідних нестисливих середовищ дозволяє перейти від неоднорідної системи рівнянь до обчислення інтегралів визначеного виду при досить загальних обмеженнях на характер розподілу зовнішніх сил.

Як окремий випадок задачі визначення напруг і деформацій у тектоносфері, створюваних в'язким аномальним за густиною включенням у гравітаційному полі Землі. Розвиток цих досліджень йде в напрямку включення в модельний опис процесів тепломасопереносу в складноорганізованому тріщинувато-пористому середовищі. Існують перші результати чисельного розв'язку таких задач для тривимірних моделей [Birger, 1998].

Процеси теплопровідності впливають на реологічні властивості порід у Землі, на фазові й мінералогічні переходи в корі та мантиї й на фізико-хімічний склад планети. Прикладом може слугувати еволюція теплових плюмів у мантиї Землі [Stein et al., 2004; Dobretsov, 2008]. У системі мантия – кора можна виділити три головні теплові режими.

По-перше, існують майже адіабатичні області [Loddoch et al., 2006; Birger, 2008; Sammarano et al., 2003], де адвективне вертикальне тепло перенесення переважає над іншими механізмами перенесення тепла. Напевно, майже вся нижня мантия (за винят-

ком її нижньомантийного шару  $D''$ , де фазові переходи можуть сповільнювати конвективне теплоперенесення) належить до цієї категорії.

По-друге, є області, у яких кількість енергії, перенесеної за допомогою адвекції, приблизно дорівнює кількості енергії, перенесеної за допомогою кондукції [Garnero, 2000; Garnero, McNamara, 2009]. До цієї категорії належить океанічна літосфера, шар  $D''$  і частина літосфери під континентальною корою. І, нарешті, існують області, де переважає кондуктивне теплоперенесення. Їх називають кондуктивними шарами. Континентальна земна кора і прилегла до неї верхня мантия – це найважливіші приклади з цієї групи.

Отримані в результаті проведених досліджень рівняння й алгоритми їхніх рішень дозволяють проводити чисельне моделювання розвинутої конвекції в умовах мантиї Землі, досліджувати теплову взаємодію конвектуючої мантиї з літосферою, відновлювати розподіл температури у верхній частині літосфери регіону, у тому числі з метою виділення об'єктів, перспективних на виявлення нафтогазових родовищ.

Розв'язок задачі якісно спрощується (відпадають принципові труднощі виконання початкових умов, якщо апріорна геологічна інформація дозволяє вважати, що усередині шару потужності  $h$  можливе стаціонарне наближення. Проте, залишається необхідність завдання теплофізичних характеристик середовища в кожній точці [Birger et al., 1998], що саме є змістовною геологічною задачею. Відновлення цих характеристик можливе на основі розв'язку **оберненої задачі геотермії**. Однак, як виявилось [Davaille, 2008], її розв'язок представляє значні труднощі навіть для моделі однорідного середовища з одним аномальним включенням з постійними значеннями теплопровідності і потужності теплогенерації.

Тому, для одержання геологічно змістовних геотермічних моделей звичайно використовується апріорна геолого-геофізична інформація. В описі природних, особливо, геодинамічних процесів [Davaille et al., 2008; Dobretsov et al., 2008], ми головню стикаємося з задачами, що мають неперервні параметри. Задачі з розривними параметрами середовища (наприклад, середовища із шаруватою структурою), ці задачі можна звести до розв'язку системи рівнянь із неперервними

параметрами з додатковими умовами у вигляді умов з'єднання на межах розривів.

Задачі з розривними параметрами і/або розв'язками, в яких нас цікавить обернений розв'язок саме в околі розриву, розв'язують специфічними методами, зокрема методами, у яких поверхні розриву виділяють й обробляють безпосередньо.

Математичний опис термомеханічної взаємодії літосфери з більш глибокими областями мантії довгий час вівся роздільно для твердої кори і літосфери та в'язкої рідини, що апроксимує стан мантії під літосферою. Численні дослідження умов виникнення повільних плинів, а потім розвинутої конвекції в мантії Землі показали (див. огляд у [Dobretsov et al., 2008; Cammarano et al., 2003; Garnero, McNamara, 2008]), що ці конвективні плини контролюють динамічну еволюцію мантії.

Такі термоконвективні коливання літосфери розглянуто в праці [Birger, 1998] як механізм еволюції осадових басейнів. Період коливальних рухів кори того ж порядку, що і період конвективних коливань літосфери, знайдений під час аналізу стійкості. Аналіз конвективної стійкості горизонтального шару передбачає розгляд збурень, що гармонійно залежать від горизонтальної координати.

Для шару з реологією Андраде характерна коливна нестійкість, і збурення можуть мати вигляд біжучих термоконвективних хвиль. Лінійну спадкову реологічну модель літосфери описує інтегральне співвідношення.

$$2e_{ij} = \int_0^t K(t-t_1)\tau_{ij}(t_1)dt_1, \quad K(t) = t^{-\frac{2}{3}}(3A)^{-1},$$

де  $e_{ij}$  і  $\tau_{ij}$  – девіатори тензорів деформацій і напружень;  $t$  – час;  $K(t)$  – інтегральне ядро повзучості обрано так, що за сталого напруження деформація залежить від часу як  $t^{-\frac{2}{3}}$  ( $A$  – реологічний параметр Андраде). Для розглянутого реологічного середовища число Релея

$$R_a = \rho g \alpha \Delta T d \frac{(d^2/\kappa)^{1/3}}{A}.$$

Рівняння теплової конвекції для горизонтального шару, який підігрівається знизу, записані в наближенні Бусінеска. Дисперсійне співвідношення дає змогу знайти мінімальне критичне значення  $R_{am}$  числа Релея для реологічної моделі Андраде

$$R_{am} = \frac{2(k_m^2 + \pi^2)^{7/3}}{3^{1/3} k_m^2} \approx 150,$$

за якого не загасає тільки хвиля з хвильовим числом  $k^0 = k_m^0$  і частотою  $\omega^0 = \omega_m^0$ . Згідно з характеристиками реологічного параметра  $A$  та інших фізичних параметрів літосфери, число Релея  $R_a$ , яке характеризує літосферу Землі, виявляється того ж порядку, що і  $R_{am}$ .

Отже, літосфера перебуває в стані, близькому до режиму граничної нестійкості. Якщо  $R_a \gg R_{am}$ , то початкові збурення наростають з часом, і при великих  $t$  рівняння теплової конвекції, як і лінійне реологічне співвідношення, уже не можна застосовувати. Якщо ж  $R_a \leq R_{am}$ , то розв'язок системи рівнянь при не занадто великих початкових збуреннях температури повністю описує еволюцію збурень у розглянутому шарі, який моделює літосферу. Розв'язок для вертикального зсуву  $u_z$  верхньої межі шару за  $\alpha \Delta T$  знаходимо:

$$u_z = \alpha \Delta T \frac{\pi(\pi^2 + 3k^2)}{(k^2 + \pi^2)^2}.$$

Задача про тривимірний розподіл збурення температури в літосфері зводиться до розв'язування двовимірної задачі. Термоконвективні коливання створюють у літосфері систему конвективних комірок. Над кожною коміркою поверхня літосфери опускається (або піднімається), формуючи осадові басейни.

Рухи і деформації, що спостерігаються у тектоносфері, обумовлені, з одного боку, термомеханічними, фізико-хімічними процесами і гравітаційною диференціацією, а з іншого боку — прагненням неоднорідностей тектоносфери до їхнього ізостатичного вирівнювання (компенсації).

Аналіз цілого ряду геофізичних даних [Stein et al., 2004] дозволяє припустити, що в умовах надзвичайно повільного протікання в часі геологічних процесів і великих розмірів геологічних тіл тектоносферу Землі можна вважати дуже в'язким нестисливим рідким середовищем з в'язкістю  $\eta \sim 10^{19} \dots 10^{24} \text{ Па} \cdot \text{с}$ . Оскільки число Релея  $R_a$ , яке характеризує літосферу, не перевищує  $R_{am}$ , то форма комірок, а отже і форма басейнів, визначена початковими збуреннями. Термоконвективні коливання (стоячі хвилі) можна розглядати як механізм, що зумовлює утворення та еволюцію осадових басейнів на континентальних кратонах.

### Література

- Birger B.I. Rheology of the Earth and thermoconvective mechanism for sedimentary basins formation // Geophys. J. International. – 1998. Vol. 134. P. 1-12.
- Cammarano F., Goes S., Vacher P., Giardini D. Inferring upper-mantle temperatures from seismic velocities // Phys. of the Earth and Plan. Int. – 2003. – Vol. 138. – P. 197-222.
- Davaille A., Girard F., Bars M. Le. How to anchor hotspots in a convecting mantle//Earth Planet. Sci. Lett. – 2008. – Vol. 203. – P. 621-634.
- Dobretsov N., Kirdyashkin A, Valery A., Vernikovskiy J, Gladkov I. Modelling of thermochemical plumes and implications for the origin of the Siberian traps // Lithos. – 2008. – Vol. 100. – P. 66-92.

Garnero E.J. Heterogeneity of the lowermost mantle // *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.* – 2000. – Vol. 28. – P. 509-537.

Garnero J., McNamara A.K. Structure and Dynamics of Earth's Lower Mantle // *Science.* – 2008. – Vol. 320. – P. 626-628.

Heydari E., Arzani N., Hassanzadeh J. Mantle plume: The invisible serial killer — Application to the Permian–Triassic boundary mass extinction //

*Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology.* – 2008. – Vol. 264. – P. 147-162.

Loddoch et al. Temporal variations in the convective style of planetary mantles // *Earth and Planetary Science Letters.* 251 (2006). P. 79-89.

Stein C., Schmalz J., Hansen U. The effect of rheological parameters on plate behaviour in a self-consistent model of mantle convection. *Phys. Earth Planet. Inter.* – 2004, 142. P. 225-255.

### **МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ТЕРМОКОНВЕКТИВНЫХ КОЛЕБАНИЙ НА ГРАНИЦЕ КОРЫ И МАНТИИ ЗЕМЛИ**

**В.В. Фурман**

Задача о трехмерном распределении возмущения температуры в литосфере сводится к решению двумерной задачи. Полученные в результате проведенных исследований уравнения и алгоритмы их решений разрешают проводить численное моделирование развитой конвекции в условиях мантии Земли, исследовать тепловое взаимодействие конвектирующей мантии с литосферой, восстанавливать распределение температуры в верхней части литосферы региона.

**Ключевые слова:** геодинамическая модель; термодинамические параметры; термоконвективные процессы.

### **MODELLING THE PROCESS OF THERMOCONVECTIVE OSCILLATIONS ON THE BOUNDARY BETWEEN EARTH'S CRUST AND MANTLE**

**V.V. Fourman**

A task about three-dimensional distribution of indignation of temperature in a lithosphere is taken to the decision of two-dimensional task. The equalizations and algorithms of their decisions got as a result of undertaken studies let to conduct the numeral design of the developed convection in the conditions of mantle of Earth, to investigate the thermal cooperating of convective mantle with a lithosphere, to restore distribution of temperature in overhead part of lithosphere of region.

**Key words:** geodynamical models; thermodynamical parameters; thermoconvections processes.