

## Численное моделирование трехмерной конвекции под кратонами Центральной Азии\*

В. В. ЧЕРВОВ

*Учреждение Российской академии наук  
Институт нефтегазовой геологии и геофизики  
им. А.А. Трофимука СО РАН, Новосибирск, Россия  
e-mail: elixirexp@yandex.ru*

Г. Г. ЧЕРНЫХ, А. В. ЧЕРВОВ

*Учреждение Российской академии наук  
Институт вычислительных технологий СО РАН, Новосибирск, Россия  
e-mail: chernykh@ict.nsc.ru*

Представлены результаты трехмерного моделирования конвекции под кратонами Центральной Азии. Численная модель основана на переменных завихренность—векторный потенциал и методе дробных шагов. Результаты расчетов демонстрируют структуру конвективных потоков.

*Ключевые слова:* тепловая конвекция в мантии Земли, кратоны Центральной Азии, численное моделирование.

### Введение

Данные о структуре недр, т. е. о пространственном положении мантийных неоднородностей, являются одним из важнейших источников информации о современных процессах в недрах, определяющих тектонический режим территорий. Центральная Азия включает в себя ряд платформенных областей, среди которых можно выделить Таримскую плиту, Северо-Китайский и Южно-Китайский кратоны. В северной части область включает Западно-Сибирскую палеозойскую платформу, или плиту, и древнюю Сибирскую платформу. Эти области существенно влияют на стиль деформирования и тектонический режим литосферы Центральной Азии. Структура континентальной литосферы исследуемой области весьма неоднородна. Значения толщины литосферы древних платформ, таких как Сибирская, Тарим и Китайская платформы, составляют 200...250 км, в то время как для палеозойской Западно-Сибирской плиты толщина литосферы не превышает 120...130 км. В рифтовых долинах имеет место утонение литосферы до 40 км. Подобные вариации мощности литосферы существенно влияют на характер мантийных течений [1–3] и поэтому имеют важное значение при проведении численного моделирования трехмерных конвективных течений в мантии Земли. Численное моделирование, которому посвящены многие работы (см., например, [3–9] и приведенную в

---

\*Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 08-05-00276-а) и СО РАН (интеграционные проекты № 116 и 44).

© ИВТ СО РАН, 2009.

них библиографию), позволяет построить тепловые и скоростные поля под обозначенными структурами. В [7] построена и детально протестирована численная модель тепловой конвекции в мантии Земли, основанная на переменных завихренности—векторный потенциал, методе дробных шагов, последовательности сеток и экстраполяции Ричардсона. Основанная на неявном методе расщепления по физическим процессам трехмерная численная модель конвекции в верхней мантии Земли предложена в [8]. В настоящей работе выполнено моделирование тепловой конвекции под азиатской внутриконтинентальной областью, в которую входят Западно-Сибирская плита, Сибирская платформа, Центрально-Азиатский складчатый пояс, Тарим и часть Северо-Китайской платформы. Работа является продолжением [9].

## 1. Математическая постановка задачи

Для описания течений в верхней мантии Земли привлекается хорошо известная математическая модель, включающая в себя безразмерные уравнения [2]:

$$\begin{aligned}\nabla \cdot \mathbf{V} &= 0, \\ \nabla \cdot p &= \mathbf{F} + \text{Ra} \cdot T \cdot \mathbf{e}, \\ \frac{\partial T}{\partial t} + \mathbf{V} \cdot \nabla T &= \nabla^2 T.\end{aligned}$$

Здесь  $p$  — давление,  $T$  — температура,  $t$  — время,  $\text{Ra} = \frac{\alpha \cdot \rho \cdot g_z \cdot d^3 \cdot \Delta T}{\eta_0 \cdot \chi}$  — число Рэлея,  $\mathbf{V} = (u, v, w)$  — вектор скорости,  $\mathbf{e} = (0, 0, 1)$ ,  $g_z$  — ускорение силы тяжести,  $d$  — вертикальный размер конвектирующей области,  $\Delta T = T_{\max} - T_{\min}$ ,  $\chi$  — коэффициент температуропроводности,  $\alpha$  — коэффициент теплового расширения,  $\rho$ ,  $\eta$  — характерные плотность и динамическая вязкость,  $\mathbf{F}$  — вектор:

$$\begin{aligned}F_x &= 2 \frac{\partial}{\partial x} \eta \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} \eta \left( \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \eta \left( \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right), \\ F_y &= \frac{\partial}{\partial x} \eta \left( \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) + 2 \frac{\partial}{\partial y} \eta \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z} \eta \left( \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right), \\ F_z &= \frac{\partial}{\partial x} \eta \left( \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \eta \left( \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right) + 2 \frac{\partial}{\partial z} \eta \frac{\partial w}{\partial z}.\end{aligned}$$

Система уравнений устроена так, что в начальный момент времени  $t = t_0$  задаются начальные условия лишь для температуры:  $T(x, y, z, t_0) = T_0(x, y, z)$ .

Задача решалась в параллелепипеде  $0 \leq x \leq X$ ,  $0 \leq y \leq Y$ ,  $0 \leq z \leq Z$ . В качестве краевых условий на боковых границах задаются условия симметрии, а на нижней и верхней границах — условия прилипания и фиксированные значения температуры. На границах неоднородной литосферной плиты также задаются условия прилипания как в вертикальном, так и в латеральном направлениях. На нижней кромке литосферы, при постановке начального распределения температуры, учитывается первоначальное значение температуры:  $T = 1200^\circ\text{C}$ . Температура рассчитывалась во всем параллелепипеде: кондуктивно в пределах литосферных блоков и конвективно в остальной области. Таким образом, движение жидкости, т. е. поле скорости, рассчитывалось вне литосферы. Результаты получены на основе математической модели в декартовых координатах

с применением переменных завихренность—векторный потенциал [7]. Число Рэлея, характеризующее режим конвекции, было выбрано как  $Ra = 2.72 \cdot 10^5$ , что отвечает современным представлениям об условиях в недрах Земли. Основные параметры задачи в системе СИ, пригодные для верхней мантии, выбирались следующими:  $d = 700\,000$  м,  $\Delta T = 1800$  °С,  $\chi = 10^{-6}$  м<sup>2</sup>/с,  $\alpha = 10^{-5}$  °С<sup>-1</sup>,  $\rho = 3300$  кг/м<sup>3</sup>,  $g_z = 10$  м/с<sup>2</sup>,  $\eta_0 = 3 \cdot 10^{21}$  кг/(м·с).

Вязкость мантийного вещества задавалась в виде

$$\eta(x, y, z) = e^{bz - aT(x, y, z)}.$$

Здесь параметры  $a = 3.89$  и  $b = 5.84$  обеспечивают перепад вязкости  $\eta_{\max}/\eta_{\min}$  от 20 до 200, что присуще верхнемантийным характеристикам течений.

## 2. Результаты моделирования тектонических зон

В настоящей работе моделирование процессов в верхней мантии было ограничено внутриконтинентальной областью Азии (рис. 1), в которую вошли Сибирская платформа (лежащая восточнее реки Енисей и простирающаяся в этом направлении до гор Верхоянья, у подножия которых течет река Лена; на юге эта платформа ограничена озером Байкал, а на севере — Енисей-Хатангской низменностью), Западно-Сибирская плита (примыкающая с запада к Сибирской платформе), Центрально-Азиатский складчатый пояс, Тарим и часть Северо-Китайской платформы — они расположены южнее. Между Таримом и Сибирской платформой находится Тувинский комплекс из мелких кратонов. Вычисления проводились в параллелепипеде  $\Pi = [0, 4200] \times [0, 4200] \times [0, 700]$  км, на последовательности равномерных сеток  $67 \times 67 \times 36$ ,  $101 \times 101 \times 57$  и  $133 \times 133 \times 71$  ячеек; величина шагов по времени на соответствующих сетках — 5, 2.5 и 1.25 млн лет.

Значения температуры при этом на двух последних сетках различаются не более чем на 6 % в равномерной сеточной норме.

Схема на рис. 2, где изображена область моделирования конвекции в верхней мантии под Центральной Азией, показывает расположение элементов литосферы в расчетной области. Сибирская платформа, как единый кратон мощностью 220 км, включает в себя два архейских кратона, мощность которых задавалась при моделировании

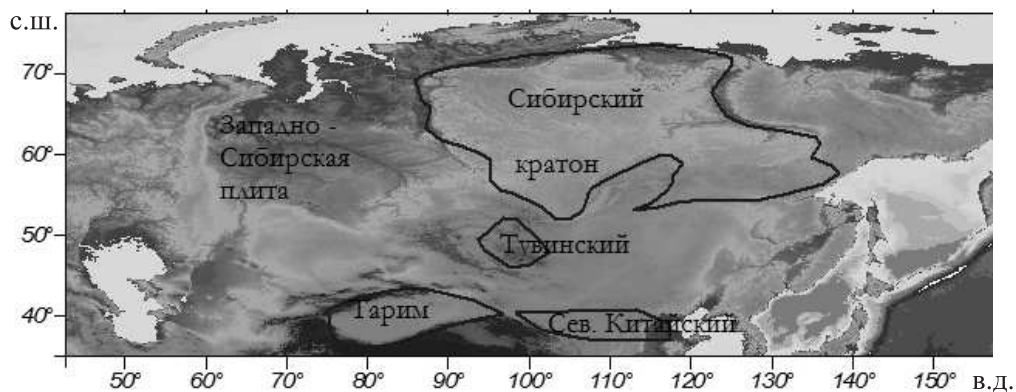


Рис. 1. Рельеф внутриконтинентальной области Азии. Черная сплошная линия — границы Сибирской платформы, Тарима, Тувинского комплекса и Северо-Китайского кратона

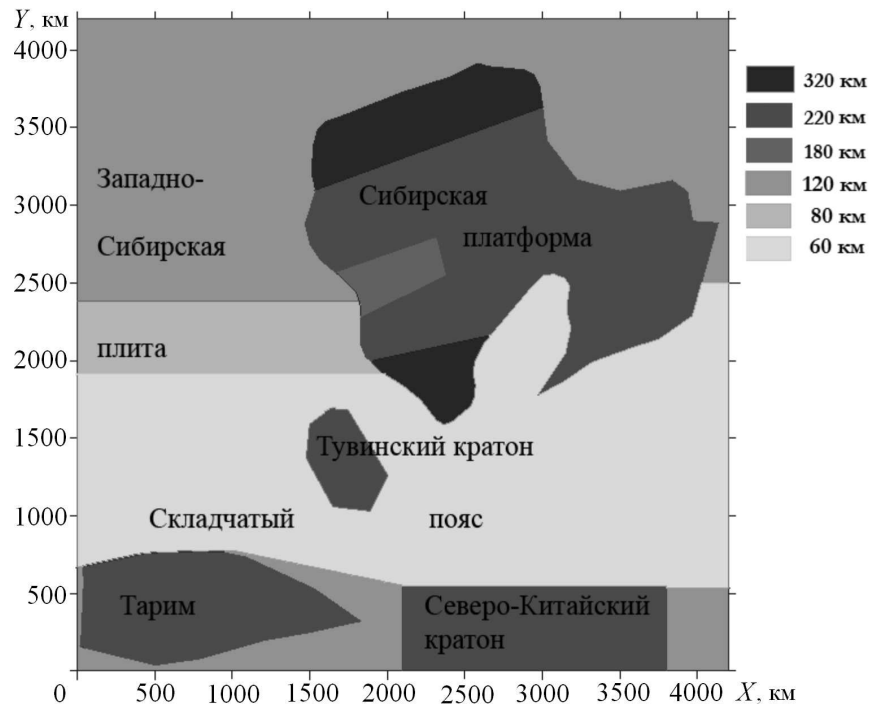


Рис. 2. Схема расположения кратонов и ловушки с указанием мощностей литосферных элементов; между Сибирской платформой и южными кратонами — ловушка, мощность литосферы над которой 60 км; мощность литосферы, не занятой кратонами и ловушкой, — 120 км

равной 320 км. В центральной части на западе платформы, в районе наибольших значений теплового потока, моделировалась ловушка, мощность литосферы над которой — 180 км.

На рис. 3 и 4 даны градусные сетки — параллели и меридианы. Границы расчетной области построены по геодезическим прямым. Прямое наложение на градусную  $(\theta, \phi)$  сетку изображено на рис. 5.

Величина и расположение кратонов приблизительно соответствуют реальным данным [10]. Моделирование показало, что, как и в случае прямоугольных в плане кратонов [7, 3, 11], реальные кратоны Центральной Азии порождают аналогичные структуры. Наблюдаются устойчивые восходящие потоки в виде плюмов; нисходящие потоки и прогретые области по периферии кратонов. Перенос мантийного вещества от оснований кратонов к верхним горизонтам (обтекание) проявляется в виде мелкомасштабной моды конвекции около бортов кратонов.

Реологические особенности Центральной Азии по данным геотермии и сейсмотомографии [10] достаточно хорошо прослеживаются на рассчитанных глубинных тепловых полях. Например, совпадают положения центрального плюма и восходящего потока в северо-западной части Сибирской платформы под архейским кратоном, ответственные за трапповый магматизм, который имел место в прошлом Сибирской платформы с середины пермского периода и до начала триасового. Предполагается, что в то время кратон проходил над нижнемантийным плюмом. Сложение температур верхне- и нижнемантийного плюмов привело к излиянию платобазальтов на западе Сибирской платформы. Участие нижнемантийного вещества в излияниях сейчас подтверждено геохимическими и изотопными исследованиями лав Сибири [12].

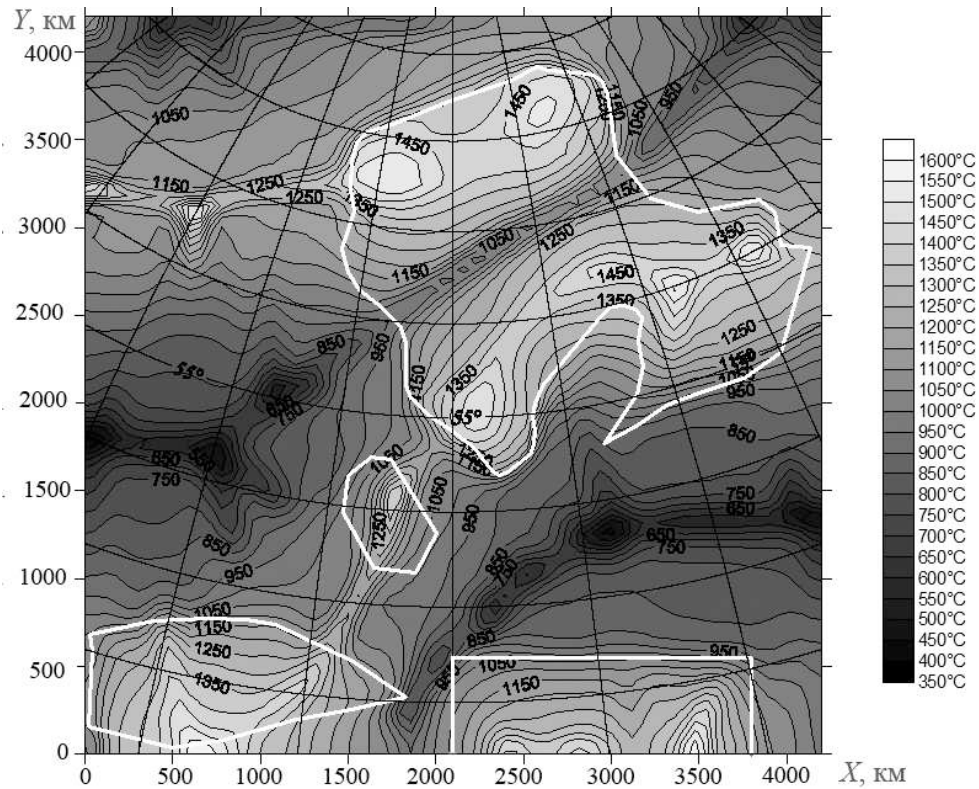


Рис. 3. Сечение температурного поля в плоскости (XY) на глубине 350 км в модели конвекции под литосферой Центральной Азии. Число Рэлея  $Ra = 271\ 656$

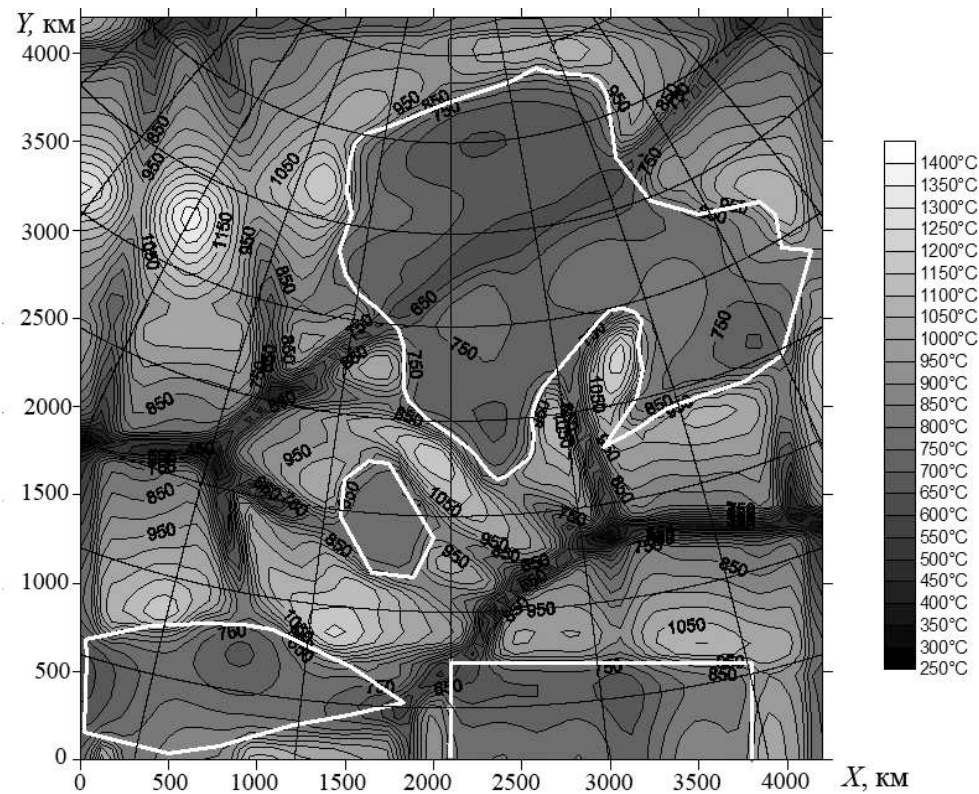


Рис. 4. Сечение температурного поля в плоскости (XY) на глубине 150 км в модели конвекции под литосферой Центральной Азии.  $Ra = 271\ 656$

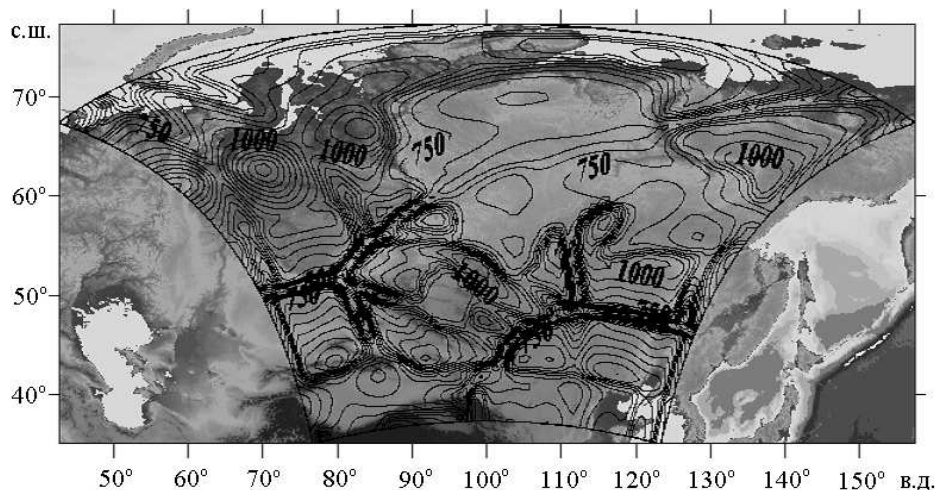


Рис. 5. Сечение температурного поля в плоскости  $(\theta, \varphi)$  на глубине 150 км в модели конвекции под литосферой Центральной Азии с наложением на физическую карту

На рис. 4 показаны сечения на глубинах 150 км. Видно, что северо-западный плюм под архейским кратоном мощностью 320 км (см. рис. 3) изменил направление, обтекая подошву кратона, породив восходящий поток около северо-западного угла Сибирской платформы. Под другим архейским кратоном, расположенным на юге Сибирской платформы, также наблюдается восходящий поток, который обтекает кратон и порождает разогретую область у борта кратона, в районе озера Байкал, а также между Тувинским комплексом кратонов и Сибирской платформой. Здесь скорее всего происходит сложение восходящих обтекающих потоков. Ареалы гранитного и бимодального магматизма по периферии кратонов напрямую связаны с восходящими потоками в этих областях, что и подтверждает численный эксперимент.

Ранее, в работе [13], обсуждался эффект верхнемантийной конвекции в геофизических полях и рельефе по результатам двухмерного моделирования конвекции под кратоном. Было показано, что наличие толстой химически отличной кондуктивной литосферы ответственно за формирование более горячей мантии под кратоном, что обеспечивало соответствие рассчитанных и наблюдаемых гравитационных аномалий и рельефа.

Представленная здесь трехмерная численная модель конвекции также обнаруживает повышение средней мантийной температуры под кратоном на  $100^\circ\text{C}$ , но вместе с тем показывает более сложные формы рельефа кратона, обусловленные динамическим воздействием конвекции.

Для сравнения рельефа Сибирской платформы (см. рис. 1) с результатами вычислений воспользуемся картой распределения температуры в литосфере кратона на глубине 150 км (см. рис. 4). Как было показано в [13], более высокая температура в литосфере соответствует приподнятым участкам литосферы, а пониженная температура — относительно опущенным участкам поверхности. Из сопоставления рельефа платформы с полем температур видно что на платформе, как и в модели, существуют два региональных поднятия — плато Путорана на северо-западе и Патомское нагорье, Алданский щит на юго-востоке Сибирской платформы. Эти два поднятия разделены вытянутой в центральной части низменностью Вилюйской синеклизы (вдоль реки Вилюй) и низменностью вдоль рек Нижняя Тунгуска и Подкаменная Тунгуска. На рис. 4 как следствие

численного эксперимента можно видеть протяженную зону нисходящего потока: темная холодная область (примерно  $650^{\circ}\text{C}$ ) в центральной части Сибирской платформы с направлением от северо-восточной части к юго-западной, между архейским кратоном под плато Путорана и южным архейским кратоном. Таким образом, обнаруживается соответствие существующего рельефа Сибирской платформы результатам трехмерного моделирования конвекции под Сибирским кратоном.

По геолого-геофизическим данным [10], в районе южнее Сибирского кратона и севернее Тарима и Северо-Китайской платформы мощность литосферы составляет от 40 до 75 км. В численной модели толщина литосферного блока в указанном районе принималась равной 60 км. В результате численного моделирования было показано, что в зоне ловушки, как правило, преобладают нисходящие потоки холодного мантийного материала. И в конкретной геологической обстановке, а именно, в случае взаимодействия четырех кратонов, в самой ловушке также наблюдаются цепи классических нисходящих потоков. На глубине 350 км обнаруживается достаточно холодное ( $650 \dots 750^{\circ}\text{C}$ ) мантийное вещество (см. рис. 3). Следует заметить, что под территорией Западно-Сибирской плиты, где мощность литосферы составляет 120 км, комплекс нисходящих потоков в среднем на  $100^{\circ}\text{C}$  выше. В районе озера Байкал, в области ловушки (мощность литосферы 60 км), в непосредственной близости от Сибирского кратона (мощность литосферы 320 км), наблюдается тепловая аномалия в виде мелкомасштабной конвективной ячейки, которая имеет вытянутую форму и может в какой-то степени объяснить повышенный тепловой поток в Байкальском регионе (рис. 3).

Основные результаты работы сводятся к следующему. Построена численная модель трехмерной конвекции под кратонами Центральной Азии. Приведены результаты численного моделирования и их геолого-геофизическая интерпретация. Дальнейшее совершенствование численной модели представляет задачу ближайших исследований.

Авторы благодарят Н.А. Бушенкову за полезные обсуждения.

## Список литературы

- [1] ДОБРЕЦОВ Н.Л. Пермотриасовый магматизм и осадконакопление в Евразии как отражение суперплюма // Докл. РАН. 1997. Т. 354, № 2. С. 220–223.
- [2] ДОБРЕЦОВ Н.Л., КИРДЯШКИН А.Г., КИРДЯШКИН А.А. Глубинная геодинамика. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2001. 409 с.
- [3] ТЫЧКОВ С.А., ЧЕРВОВ В.В., ЧЕРНЫХ Г.Г. Численная модель трехмерной конвекции в верхней мантии Земли // Физика Земли. 2005. № 5. С. 48–64.
- [4] РЫКОВ В.В., ТРУБИЦИН В.П. Численное моделирование трехмерной мантийной конвекции и тектоника литосферных плит // Вычисл. сейсмология. 1994. Вып. 26. С. 94–102.
- [5] BUSSE F.H., CHRISTENSEN U., CLEVER R. ET AL. 3D Convection at infinite Prandtl number in cartesian geometry — a benchmark comparison // Geophys. Astrophys. Fluid Dynamics. 1993. Vol. 75. P. 39–59.
- [6] ZHONG S., ZUBER M. Role of temperature-dependent viscosity and surface plates in spherical shell models of mantle convection // J. Geophys. Research. 2000. Vol. 105, N B5. P. 11063–11082.
- [7] ТУЧКОВ С.А., ЧЕРВОВ В.В., ЧЕРНЫХ Г.Г. Numerical modeling of 3D convection in the Earth mantle // Russ. J. Numer. Anal. Math. Modelling. 2005. Vol. 20, N 5. P. 483–500.

- [8] ЧЕРВОВ В.В. Моделирование трехмерной конвекции в мантии Земли с применением неявного метода расщепления по физическим процессам // Вычисл. технологии. 2006. Т. 11, № 4. С. 73–86.
- [9] ТЫЧКОВ С.А., ЧЕРНЫХ Г.Г., ЧЕРВОВ В.В. Трехмерное моделирование конвекции под кратонами Центральной Азии // Вычисл. технологии. 2007. Т. 12. Спец. выпуск 4: Труды V Сопещания российско-казахстанской рабочей группы по вычислительным и информационным технологиям, Новосибирск, 6–8 февраля 2007 г. С. 85–95.
- [10] БУШЕНКОВА Н.А. Неоднородности верхней мантии и современная структура литосферы центральной Сибири по данным сейсмотомографии на отраженных волнах: Автореферат дис. ... к.г.-м.н. Новосибирск, 2004. 20 с.
- [11] ТЫЧКОВ С.А., ЧЕРВОВ В.В., ЧЕРНЫХ Г.Г. О численном моделировании тепловой конвекции в мантии Земли // Докл. РАН. 2005. Т. 402, № 2. С. 248–254.
- [12] BASU A.R., POREDA R.J., RENNE P.R. ET AL. High  $^3\text{He}$  plume origin and temporal-spatial evolution of the Siberian flood basalts // Science. 1995. Vol. 269. P. 822–825.
- [13] ТЫЧКОВ С.А., РЫЧКОВА Е.В., ВАСИЛЕВСКИЙ А.Н., ЧЕРВОВ В.В. Тепловая конвекция в верхней мантии континентов и ее эффект в геофизических полях // Геология и геофизика. 1999. Т. 40, № 9. С. 1275–1290.

*Поступила в редакцию 11 января 2009 г.,  
в переработанном виде — 30 марта 2009 г.*