

# Численное моделирование трехмерной конвекции под кратонами Восточной Европы и Центральной Азии

В.В. ЧЕРВОВ, Н.А. БУШЕНКОВА, Е.В. ДЕЕВ  
*Институт нефтегазовой геологии и геофизики*  
*им. А.А. Трофимука СО РАН, Новосибирск, Россия*  
e-mail: elixirexp@yandex.ru, bushenkova@yandex.ru

Г.Г. ЧЕРНЫХ  
*Институт вычислительных технологий СО РАН, Новосибирск, Россия*  
e-mail: chernykh@ict.nsc.ru

Представлены результаты трехмерного моделирования конвекции под кратонами Восточной Европы и Центральной Азии. Численная модель основана на методах расщепления по физическим процессам и пространственным переменным. Результаты расчетов демонстрируют структуру конвективных потоков. Дана их геолого-геофизическая интерпретация.

## 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 оказывают существенное влияние 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 значения толщины 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, 2, 3] и поэтому имеют важное значение при проведении численного моделирования. Численное моделирование трехмерных конвективных течений в мантии Земли, которому посвящено большое количество работ (см., например, [3, 4, 5, 6, 7, 8, 9] и приведенную в 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 "завихренность - векторный потенциал", методе дробных шагов, последовательности сеток и экстраполяции Ричардсона. Основанная на неявном методе расщепления по физическим процессам трехмерная численная модель конвекции в

---

<sup>1</sup>Работа выполнена при поддержке СО РАН (интеграционный проект 44) и РФФИ (09-05-91321 СИГ-а).

верхней мантии Земли предложена в [8]. В настоящей работе выполнено моделирование тепловой конвекции под внутриконтинентальной областью Азии, 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 обезразмеренные уравнения [2]:

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

Здесь  $p$  — давление,  $T$  — температура,  $t$  — время,

$$Ra = \frac{\alpha \cdot \rho \cdot g_z \cdot d^3 \cdot \Delta T}{\eta_0 \cdot \chi}$$

- 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 — 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:  $T = 1200^\circ C$ . 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:  $d = 700000$  м,  $\Delta T = 1800^\circ\text{C}$ ,  $\chi = 10^{-6}$  м<sup>2</sup>/сек,  $\alpha = 10^{-5}$  °C,  $\rho = 3300$  кг/м<sup>3</sup>,  $g_z = 10$  м/сек<sup>2</sup>,  $\eta_0 = 3 \cdot 10^{21}$  кг/(м·сек).

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, расположенная восточнее реки Енисей и простирающаяся в этом направлении до гор Верхоянья, у подножия которых течет река Лена.

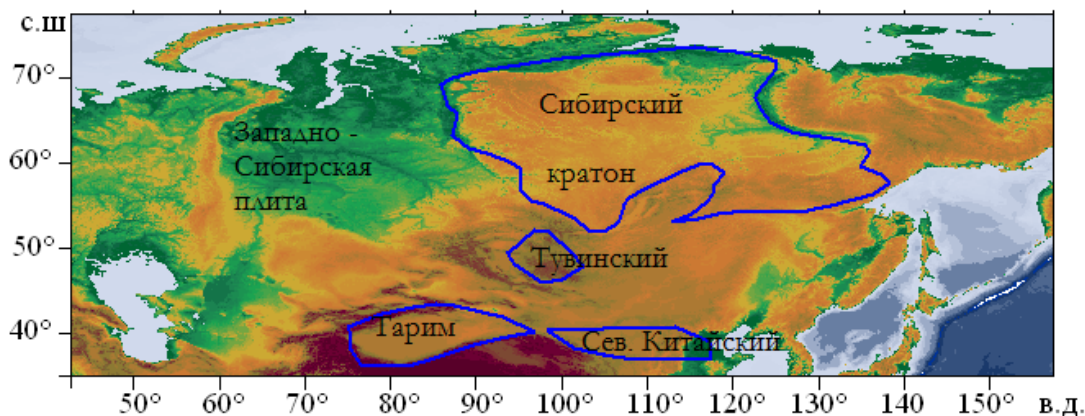


Рис. 1. Рельеф внутриконтинентальной области Азии. Черная сплошная линия — границы Сибирской платформы, Тарима, Тувинского комплекса и Северо-Китайского кратона

На юге эта платформа ограничена озером Байкал, а на севере - Енисей-Хатангской низменностью; Западно-Сибирская платформа, примыкающая с запада к Сибирской платформе, Центрально-Азиатский складчатый пояс, Тарим и часть Северо-Китайской платформы, расположенные 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<sup>3</sup>, 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.

Сибирская платформа, как единый кратон мощностью 220 км, включает в себя два архейских кратона, мощность которых задавалась при моделировании равной 320 км. В центральной части на западе платформы, в районе наибольших значений теплового потока, моделировалась ловушка, мощность литосферы над которой - 180 км.

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) проявляются 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 трапзовый магматизм, который имел место в прошлом Сибирской платформы с середины пермского периода и до начала триасового. Предполагается, что в это 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].

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.

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 ( $650^{\circ}\text{C} - 750^{\circ}\text{C}$ ) мантийное вещество. 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.

Для описания течения в верхней мантии Земли так же привлекалась модификация численной модели, учитывающая сферическую геометрию течения и основанная на применении неявного метода расщепления по физическим процессам и метода слабой сжимаемости. Вычисления проводились в сферическом секторе  $0^{\circ} \leq \phi \leq 150^{\circ}$ ,  $10^{\circ} \leq \theta \leq 80^{\circ}$ ,  $5671\text{км} \leq R \leq 6371\text{км}$  на равномерных сетках  $170 \times 70 \times 35$ ,  $220 \times 98 \times 53$  и  $321 \times 127 \times 41$  ячеек; величина шага по времени - 2.5 млн лет, 1.0 млн лет и 0,50 млн. лет. Глубина кондуктивного слоя (литосферы) задавалась согласно данным о расположении

кратонов, скомпилированным из литературных данных и сейсмотомографических результатов, но усовершенствованной путем модернизации блоков отбора данных и инверсии. Были использованы все имеющиеся данные по телесеismicким и региональным лучам Р-волн, а также отраженным РР-лучам с точками отражения, расположенными в изучаемой области, из мирового каталога данных ISC за 1964-2001 годы. Полученная сейсмическая модель, в целом, согласуется с существующими региональными и глобальными моделями, однако она обеспечивает более высокое разрешение и количественные оценки для амплитуд сейсмических аномалий.

Основные результаты работы сводятся к следующему. Построена численная модель трехмерной конвекции под кратонами Восточной Европы и Центральной Азии как в декартовых, так и в сферических координатах. Приведены результаты численного моделирования и их геолого-геофизическая интерпретация.

## 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] ТУШКОВ S.A., ШЕРВОВ V.V., ШЕРНЫКН G.G. 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 Совещания 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.