

А

**СИБИРСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК**

**НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ
ГЕОЛОГИЯ И ГЕОФИЗИКА**

Основан в январе 1960	Периодичность 12 раз в год	Том 55, № 7	Июль 2014
--------------------------	-------------------------------	-------------	--------------

СОДЕРЖАНИЕ

ГЕОДИНАМИКА И ГЕОТЕКТОНИКА

- Бобров А.М., Баранов А.А.** Структура мантийных течений и поля напряжений в двумерной модели конвекции с неньютоновской реологией 1015
- Донская Т.В., Гладкочуб Д.П., Мазукабзов А.М., Вингейт М.Т.Д.** Раннепротерозойские постколлизийные гранитоиды Бирюсинского блока Сибирского кратона 1028

МЕТАЛЛОГЕНИЯ

- Вилор Н.В., Казьмин Л.А., Павлова Л.А.** Формирование арсенопирит-пиритового парагенезиса на месторождениях золота (*термодинамическое моделирование*)..... 1044
- Хомич В.Г., Борискина Н.Г.** Особенности размещения платинометаллической минерализации на юго-востоке России..... 1065

ГЕОМАГНЕТИЗМ И ПАЛЕОМАГНЕТИЗМ

- Абрамова Д.Ю., Абрамова Л.М.** Литосферные магнитные аномалии на территории Сибири (*по измерениям спутника CHAMP*) 1081
- Шацилло А.В., Федюкин И.В., Паверман В.И.** Палеомагнетизм позднепалеозойских гранитов Ангара-Витимского батолита и вмещающих пород Байкало-Патомской складчатой области: тектонические следствия..... 1093
- Гнибиденко З.Н., Левичева А.В., Семаков Н.Н.** Палеомагнетизм континентальных палеоген-неогеновых отложений Омской впадины (*юг Западной Сибири*) 1112

ГЕОФИЗИКА

- Кусков О.Л., Кронрод В.А., Прокофьев А.А., Павленкова Н.И.** Структура литосферной мантии Сибирского кратона по сверхдлинным сейсмическим профилям Метеорит и Рифт 1124
- Плотников А.Е.** Оценка ограничений метода переходных процессов при исследовании малых глубин: численный эксперимент..... 1144
- Кринари Г.А., Храмченков М.Г., Рахматулина Ю.Ш.** Изменения структур смешанослойных фаз иллит—сметит в процессах обводнения терригенных коллекторов нефти..... 1153

SIBERIAN BRANCH
RUSSIAN ACADEMY OF SCIENCES
SCIENTIFIC JOURNAL
GEOLOGIYA I GEOFIZIKA

Founded in January 1960	Monthly	Vol. 55, № 7	July 2014
----------------------------	---------	--------------	--------------

CONTENTS

GEODYNAMICS AND GEOTECTONICS

- Bobrov A.M. and Baranov A.A.** The structure of mantle flows and stress fields in a two-dimensional convection model with non-Newtonian viscosity 1015
- Donskaya T.V., Gladkochub D.P., Mazukabzov A.M., and Wingate M.T.D.** Early Proterozoic postcollisional granitoids of the Biryusa block of the Siberian craton..... 1028

METALLOGENY

- Vilor N.V., Kaz'min L.A., and Pavlova L.A.** Aresenopyrite–pyrite paragenesis in gold deposits (*thermodynamic modeling*)..... 1044
- Khomich V.G. and Boriskina N.G.** Localization of PGE mineralization in southeastern Russia 1065

GEOMAGNETISM AND PALEOMAGNETISM

- Abramova D.Yu. and Abramova L.M.** Lithospheric magnetic anomalies in the territory of Siberia (*from measurements by the CHAMP satellite*) 1081
- Shatsillo A.V., Fedyukin I.V., and Paverman V.I.** Paleomagnetism of the Late Paleozoic granites of the Angara–Vitim batholith and the host rocks of the Baikal–Patom folded area: tectonic implications 1093
- Gnibidenko Z.N., Levicheva A.V., and Semakov N.N.** Paleomagnetism of the Paleogene–Neogene continental sediments of the Om' basin (*southern West Siberia*)..... 1112

GEOPHYSICS

- Kuskov O.L., Kronrod V.A., Prokof'ev A.A., and Pavlenkova N.I.** Lithospheric mantle structure of the Siberian craton inferred from the superlong Meteorite and Rift seismic profiles..... 1124
- Plotnikov A.E.** Evaluation of limitations of the transient electromagnetic method in shallow-depth studies: numerical experiment 1144
- Krinari G.A., Khramchenkov M.G., and Rakhmatulina Yu.Sh.** Changes in the structures of mixed-layer illite-smectite during flooding of terrigenous oil reservoirs 1153

SIBERIAN BRANCH OF THE RUSSIAN ACADEMY OF SCIENCES
NOVOSIBIRSK

© Сибирское отделение РАН, 2014
© ИГМ СО РАН, 2014
© ИНГ СО РАН, 2014

СТРУКТУРА МАНТИЙНЫХ ТЕЧЕНИЙ И ПОЛЯ НАПРЯЖЕНИЙ В ДВУМЕРНОЙ МОДЕЛИ КОНВЕКЦИИ С НЕНЬЮТОНОВСКОЙ РЕОЛОГИЕЙ

А.М. Бобров¹, А.А. Баранов^{1,2}

¹ Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, 123995, Москва, ул. Бол. Грузинская, 10, Россия

² Институт теории прогноза землетрясений и математической геофизики РАН,
117485, Москва, ул. Профсоюзная, 84/32, Россия

Исследуются структура мантийной конвекции и пространственные поля надлитостатического давления, вертикальных и горизонтальных напряжений в мантии Земли для двумерной численной модели с неньютоновской вязкостью и источниками тепла. Модель демонстрирует скачкообразное перемещение зон субдукции; обнаруживает резкие изменения в полях напряжений в зависимости от стадии отделения слэба. В областях, не содержащих погружающихся слэбов, напряжения сильно понижены.

Значения горизонтальных σ_{xx} напряжений, надлитостатического давления и вертикальных σ_{zz} напряжений в части мантии, где интенсивные субвертикальные течения отсутствуют, являются примерно одинаковыми, варьируя в пределах ± 6 , ± 8 , ± 10 МПа соответственно. Однако эти поля проявляют сильную концентрацию в областях нисходящих слэбов, где имеют значения приблизительно на порядок выше (± 50 МПа). Этот результат дает количественное подтверждение современных представлений об океанических слэбах как о наиболее важном факторе мантийной конвекции.

Найдены существенные различия между полями σ_{xx} , σ_{zz} и давления. Поле давления выявляет как вертикальные, так и горизонтальные черты слэбов и плюмов, ясно показывая их длинные тепловые каналы с более широкой головой. Распределения σ_{xx} чувствительны к субгоризонтальным чертам течений, в то время как поля σ_{zz} больше отображают вертикальные субструктуры течений.

Модель показывает наличие относительно холодных остатков литосферных слэбов в нижней части мантии над тепловым погранслоем. Многочисленные горячие плюмы, поднимающиеся сквозь эти сравнительно высоковязкие остатки, а также новые погружающиеся слэбы создают интенсивные поля напряжений в нижней мантии, которые сильно неоднородны в пространстве и времени.

Мантийная конвекция, слэбы, неньютоновская вязкость, поля напряжений, численный эксперимент, код Citcom.

THE STRUCTURE OF MANTLE FLOWS AND STRESS FIELDS IN A TWO-DIMENSIONAL CONVECTION MODEL WITH NON-NEWTONIAN VISCOSITY

A.M. Bobrov and A.A. Baranov

The structure of mantle convection and spatial fields of superlithostatic pressure and vertical and horizontal stresses in the Earth's mantle are studied in a 2D numerical model for the mantle with non-Newtonian viscosity and heat sources. The model demonstrates a jump-like motion of subduction zones and reveals abrupt changes in the stress fields depending on the stage of slab detachment. The stresses decrease dramatically in the areas without slabs.

The horizontal stresses σ_{xx} , superlithostatic pressure, and vertical stresses σ_{zz} in the part of the mantle lacking intense near-vertical flows are approximately equal, varying within ± 6 , ± 8 , and ± 10 MPa, respectively. However, these fields are stronger in the areas of descending slabs, where the values of the above parameters are about an order of magnitude higher (± 50 MPa). This result agrees with the current views of the oceanic slabs as the most important agent of mantle convection.

We have found significant differences between the σ_{xx} , σ_{zz} , and pressure fields. The pressure field reveals both the vertical and horizontal features of slabs and plumes, clearly showing their long thermal conduits with broader heads. The distributions of σ_{xx} are sensitive to the near-horizontal features of the flows, whereas the fields of σ_{zz} reveal mainly their vertical substructures.

The model shows the presence of cool remnants of lithospheric slabs in the lower mantle above the thermal boundary layer. Numerous hot plumes penetrating through these high-viscosity remnants, as well as the new descending slabs, induce intense stress fields in the lower mantle, which are strongly inhomogeneous in space and time.

Mantle convection, slabs, non-Newtonian viscosity, stress fields, numerical experiment, CitCom code

ВВЕДЕНИЕ

За последние годы выполнены многочисленные исследования моделей мантийной конвекции с различной реологией. Были рассчитаны модели с разными эффективными числами Рэлея, с вязкостью, зависящей от напряжения и деформации, рассмотрены различные значения энергии и объема активации, которые определяют связь вязкости с температурой и давлением, тепловые режимы, аспектные соотношения, размерности (2D, 3D, 3S), а также механические граничные условия. В этих работах изучались главным образом поля температуры и скоростей мантийных течений, а также перемещение вещества. При этом полям мантийных напряжений было уделено, на наш взгляд, недостаточное внимание. Лишь относительно небольшое число публикаций адресовано напряжениям. В работе [Steinberger et al., 2001] поля напряжений были рассчитаны в литосфере для различных профилей вязкости по глубине для сферической модели с плитами на поверхности. Было установлено, что в зависимости от выбираемых граничных условий напряжения в литосфере изменялись от ± 50 до ± 140 МПа. В статьях [Баранов, Бобров, 2011; Бобров, Баранов, 2011] были исследованы двумерные (2D) модели мантийной конвекции с различными распределениями вязкости (постоянная вязкость, слоистая и PT -зависимая модели). Для случая PT -зависимой вязкости напряжения в основной части мантии лежат в диапазоне ± 5 МПа. Имеются, однако, области (высоковязкие верхние части зон субдукции), где надлитостатическое давление может достигать значений на порядок выше. А.М. Бобров, А.П. Трубицын [Bobrov, Trubitsyn, 2008] изучали двумерные сдвиговые напряжения в присутствии плавающих континентов. В ходе суперконтинентального цикла сдвиговые напряжения в верхней части плит достигают 40 МПа. Более сложная реология была использована в работе [Nakakuki et al., 2008], где авторами проведено 2D динамическое моделирование асимметричной субдукционной структуры в комплексной системе литосфера—мантия. Для генерирования границы плит авторы вводят зависящую от истории реологию с пределом прочности, который определяется предшествующими разломами. Результаты показывают горизонтальные напряжения, изменяющиеся в диапазоне приблизительно ± 100 МПа. В статье [Yoshida, 2010] были исследованы сферические модели с безразмерной мощностью теплогенерации $H = 10$, мантийной вязкостью с более простой PT -зависимостью и с высоковязкой областью, имитирующей суперконтинент. После того, как конвекция установилась, максимальное девиаторное растягивающее напряжение, генерируемое в области неподвижного суперконтинента, составило 30—90 МПа в зависимости от параметров модели. В нашей предыдущей публикации [Бобров, Баранов, 2011] для 2D случая с континентом (моделируемым маркерами), который движется самосогласованно с мантийными течениями, мы нашли, что максимальное напряжение сжатия под континентом составляет около 35 МПа. В работе [Butler, Jarvis, 2004] была использована модель мантийной конвекции в осесимметричной сферической оболочке для расчета величины девиаторных напряжений, возникающих в неподвижном континенте с субдукцией океанической плиты вблизи активной континентальной окраины. Серия расчетов с различными параметрами дала типичные растягивающие напряжения в континентальной литосфере в диапазоне 30—70 МПа.

Из приведенного видно, что поля напряжений рассчитывались почти исключительно в области литосферы, в то время как моделирование распределения величин напряжений в мантии Земли почти не проводилось. Возможно, это связано с нехваткой фактических данных о напряжениях в мантии. Не рассматривались и различия между разными полями напряжений в мантии.

В настоящей работе мы исследуем, как неньютоновский характер реологии влияет на структуру конвекции и на порождаемые ею поля мантийных напряжений, а также на эволюцию этих величин во времени. В нашей модели конвекция обусловлена только температурными аномалиями в мантии. Процесс субдукции развивается самосогласованным образом при вязкости, зависящей от давления, температуры и скорости деформации. Фазовые переходы в модели не учитываются. Следует, конечно, помнить, что в реальной мантии Земли имеет место значительно более сложная картина [Turcotte, Schubert, 2002; Добрецов, 2010].

Необходимо отметить, что имеющиеся данные экспериментального моделирования представляют трехмерную структуру конвекции в мантии в виде нестационарных крупномасштабных течений с размерами порядка толщины слоя и мелкомасштабных валиковых течений, возникающих вблизи поверхностей теплообмена в области неустойчивой стратификации и имеющих направление, перпендикулярное к крупномасштабным течениям [Добрецов и др., 2001; Кирдяшкин, Кирдяшкин, 2008]. Эти данные указывают на существенное отличие результатов для двумерной численной модели от результатов трехмерного экспериментального моделирования.

В нашей модели мы не вводим каких-либо предписанных искусственно условий, таких как закрепление положений зон субдукции (путем введения ослабленных зон), задание наклона субдуцирующего слэба и т.д. Модель с реологией, принятой в нашем исследовании, создает эффективные плиты и ослабленные зоны между ними самосогласованным образом. Такая модель является более реалистичной, чем модели простой ньютоновской вязкости. В то же время отметим, что и для модели вязкой

ньютоновской жидкости многие особенности течений остаются неисследованными до сих пор [Бобров, 2010]. Для решения такой задачи требуется детальное трехмерное моделирование как численное, так и экспериментальное.

МОДЕЛЬ И УРАВНЕНИЯ

Мы используем декартову двумерную модель, чтобы минимизировать счетное время численных (в том числе пробных) расчетов и обеспечить разрешение, соответствующее высоким числам Рэлея. Предполагается, что мантия нагревается от ядра, а также от распада равномерно распределенных в ней радиоактивных элементов. Мантия моделируется несжимаемой вязкой жидкостью с бесконечным числом Прандтля. Силы плавучести, связанные с составом, и фазовые переходы не учитываются. В этом случае имеет место приближение Буссинеска для плотности ($\rho = \rho_0(1 - \alpha T)$) в члене плавучести уравнения Стокса и $\rho = \rho_0$ во всех остальных уравнениях, где α — коэффициент теплового расширения, T — температура. При таких предположениях тепловая конвекция определяется обычными уравнениями сохранения массы, импульса и энергии. В этом приближении двумерные уравнения конвекции жидкости для координат x и z (с осью z , направленной вверх) имеют следующую безразмерную форму [Schubert et al., 2001]:

уравнение неразрывности

$$\partial v_x / \partial x + \partial v_z / \partial z = 0, \quad (1)$$

уравнения переноса импульса

$$-\partial p / \partial x + \partial \tau_{xx} / \partial x + \partial \tau_{xz} / \partial z = 0 \quad (2)$$

и

$$-\partial p / \partial z + \partial \tau_{xz} / \partial x + \partial \tau_{zz} / \partial z + RaT = 0, \quad (3)$$

уравнение переноса тепла

$$\partial T / \partial t + v_x \partial T / \partial x + v_z \partial T / \partial z = \partial^2 T / \partial x^2 + \partial^2 T / \partial z^2 + H. \quad (4)$$

Здесь $Ra = (\alpha g \Delta T D^3) / (\kappa \nu_0)$ — число Рэлея, определенное по значению отсчетной кинематической вязкости ν_0 (κ — коэффициент тепловой диффузии). Неизвестными переменными в уравнениях (1)–(4) являются компоненты скорости v_x и v_z ; надлитостатическое давление p (возмущение литостатического давления P , вызванное конвекцией); надиабатическая (потенциальная) температура T ; тензор девиаторных вязких напряжений τ_{ij} . Мы используем здесь безразмерные переменные, принимая следующие коэффициенты масштабирования: толщина мантии D для длины; κ/D для скорости; D^2/κ для времени; $\Delta T = T_2 - T_1$ для температуры; η_0 для динамической вязкости; $\eta_0 \kappa / D^2$ для давления и напряжений и $\kappa \Delta T / D^2$ для перехода к безразмерной термометрической плотности тепловых источников H . Компонентами тензора девиаторных вязких напряжений являются

$$\tau_{xx} = 2\eta \partial v_x / \partial x, \quad (5)$$

$$\tau_{zz} = 2\eta \partial v_z / \partial z, \quad (6)$$

$$\tau_{xz} = \eta (\partial v_x / \partial z + \partial v_z / \partial x), \quad (7)$$

где η — безразмерная динамическая вязкость в данной точке.

С девиаторными напряжениями τ_{ij} связаны полные вязкие напряжения σ_{ij} . В частности, полное нормальное горизонтальное и полное нормальное вертикальное напряжения имеют вид

$$\sigma_{xx} = p - 2\eta \partial v_x / \partial x, \quad (8)$$

$$\sigma_{zz} = p - 2\eta \partial v_z / \partial z. \quad (9)$$

При таком определении сжимающие напряжения считаются положительными. Знак напряжения здесь соответствует определению в геофизике и технике и противоположен применяемому в физике. Следующие средние значения параметров могут быть использованы для описания мантии Земли в целом [Schubert et al., 2001]: коэффициент теплового расширения $\alpha = 2 \cdot 10^{-5} \text{ K}^{-1}$; ускорение силы тяжести $g = 9.8 \text{ м/с}^2$; $\rho = 4600 \text{ кг/м}^3$; коэффициент тепловой диффузии $\kappa = 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$; отсчетная кинематическая вязкость $\nu_0 = \eta_0 / \rho = 0.5 \cdot 10^{18} \text{ м}^2/\text{с}$; безразмерная термометрическая плотность тепловых источников $H = 15$ [Lowman et al., 2004] и ΔT — перепад сверхадиабатической (потенциальной) температуры между границей ядро—мантия и поверхностью, взятый здесь равным 2000 К. Для мантии единицы измерения составляют $D = 2850 \text{ км}$ для длины и $\kappa/D = 1.08 \cdot 10^{-3} \text{ см/год}$ для скорости, $t_0 = D^2/\kappa = 266 \text{ млрд лет}$ и