

**ВОССТАНОВЛЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ И СОСТАВА  
КОНТИНЕНТАЛЬНОЙ ЛИТОСФЕРЫ ПО ГЕОФИЗИЧЕСКИМ ДАННЫМ****Кронрод В.А., Кусков О.Л. (ГЕОХИ РАН)***va\_kronrod@mail.ru*

---

Ключевые слова: *моделирование, термодинамика, литосфера, температура, тепловой поток, сейсмические скорости*

Обсуждается метод восстановления температуры и валового состава на основе фундаментальной петрологической системы NaTiCFMAS из абсолютных скоростей P- и S-волн и тепловому потоку через поверхность Земли. Рассматривается область, включающая кору, состоящую из нескольких слоев, литосферу, в которой теплоперенос осуществляется по кондуктивному механизму и область верхней мантии с конвективным теплопереносом. В результате решения находится самосогласованная петролого-геофизическая модель, минимизирующая невязки между расчетной и «эталонными» петрологическими и геофизическими моделями.

**1. Введение**

Существует два подхода для получения информации о внутреннем строении планет по геофизическим данным. Первый – моделирование фазовых равновесий при высоких давлениях и температуре и сравнение расчетных величин сейсмических скоростей с экспериментальными данными.

Другой подход состоит в обращении исходной информации в температурные и композиционные модели оболочек планет [1-7]. В настоящей работе предлагается новый метод реконструкции тепловых и плотностных распределений, а также валового состава в верхней мантии Земли по геофизическим и петрологическим данным. Особенностью постановки задачи является восстановление температурных профилей, согласованных с одномерной теплофизической моделью. В результате находятся распределения температуры по глубине, интенсивность радиогенных источников в коре и литосфере, тепловые потоки в коре и мантии.

**2. Термодинамическое моделирование**

С термодинамической точки зрения состав и физические свойства коры и мантии описываются несколькими параметрами, определяемыми по геохимическим данным, и уравнениями состояния мультикомпонентных фазовых систем. Аппарат термодинамики позволяет по химическому составу определить фазовый состав стабильных фаз и их физические свойства при высоких температурах давлениях [8].

Мы используем метод минимизации свободной энергии Гиббса, адаптированный к расчетам фазовых равновесий в мультисистемах с фазами переменного состава, которые представляют собой твердые растворы минералов. Расчет уравнения состояния (УРС) минералов проводится в приближении Ми-Грюнайзена-Дебая с потенциалом Борна-Майера для аппроксимации потенциальной части УРС. Расчеты равновесного состава фазовых ассоциаций, скоростей упругих волн и плотности проведены с помощью программного комплекса и базы данных THERMOSEISM [8].

**3. Расчет состава и температуры по сейсмическим данным**

Метод реконструкции температуры и состава условно может быть разделен на два этапа. На первом по экспериментальным величинам P, S сейсмических скоростей определяются  $T_{P,S}$ ,  $C_m$ , ( $m=FeO, MgO, Al_2O_3, CaO$ ). Профиль  $T_{P,S}$  на втором шаге расчета используется в теплофизической модели кондуктивного переноса [6,7].

Процедура обращения сейсмических профилей в термические в мультисистеме  $Na_2O-TiO_2-CaO-FeO-MgO-Al_2O_3-SiO_2$  с фазами переменного состава осуществляется на основе уравнений состояния мантийного вещества с учетом фазовых превращений, ангармонизма и эффектов неупругости. Решение обратной задачи основывается на минимизации функционала:

$$\mathcal{Q} = \sum_{i=1}^N \sum_F \alpha_F (F_i^0 - F_i)^2,$$

$$(F=V_p, V_s, T_{\text{cond}}, C_m), (m=\text{FeO}, \text{MgO}, \text{Al}_2\text{O}_3),$$

Где  $F_i^0$  – параметры «эталонной модели»,  $F_i$  расчетные значения,  $T_{\text{cond}}$  находится на втором этапе расчета. Функционал минимизируется методом Монте Карло. При решении накладываются условия положительного градиента плотности по глубине ( $dp/dH > 0$ ) и фиксируется отношение  $C_{\text{Al}_2\text{O}_3}/C_{\text{CaO}}=1.25$  [9].

#### 4. Расчет температуры в коре и литосфере по поверхностным тепловым потокам

Процедура расчета геотермы и тепловых потоков основывается на модели кондуктивного переноса в коре и литосфере. Области с конвективным переносом в данной модели не рассматриваются, в них априори задается адиабатический градиент температуры. Формально модель работает в области от поверхности до термической границы литосферы, которая определяется пересечением расчетного профиля с потенциальной адиабатой. Область кондуктивного переноса разделяется на пять зон: верхняя кора ( $i=1, 2$ ), средняя кора ( $i=3$ ), нижняя кора ( $i=4$ ) и литосфера ( $i=5$ ). Верхняя кора включает D слой ( $i=1$ ), в котором выделяется основная энергия от радиогенных источников. В D слое задается экспоненциальное распределение мощности источников по глубине  $H$  [10]. Предполагается, что нестационарные эффекты и влияние невертикальных потоков малы по сравнению с другими погрешностями модели. Таким образом, следуя [10], мы рассматриваем одномерную модель теплопроводности. Граничные условия на поверхности задаются по известным значениям температуры и тепловых потоков. Профили температуры в зонах ( $i = 1-5$ ) определяются из простых алгебраических уравнений, которые позволяют получить зависимости температуры и тепловых потоков от глубины  $T_{\text{cond}}(H)$ .

#### 5. Определение температуры, тепловых потоков и мощности радиогенных источников в коре и литосфере

В пунктах 2-4 мы рассмотрели методы расчета температуры ( $T_{p,s}$ ) в коре и литосфере по сейсмическим данным и 1-D модели кондуктивной теплопроводности ( $T_{\text{cond}}(H)$ ). На основе этих результатов сформулируем следующую обратную задачу. На основе поверхностных тепловых потоков и  $T_{p,s}$  профлям требуется определить мощность D слоя, теплопроизводительность D слоя, теплогенерацию в верхней и средней коре, тепловые потоки в коре и литосфере. Задача решается минимизацией функционала  $F$ , характеризующего невязки между температурным профилем  $T_{p,s}$ , определенным по сейсмическим данным и температурным профилем  $T_{\text{cond}}$ , рассчитанным по 1-D модели кондуктивного теплопереноса. Функционал  $F$  минимизируется методом Монте Карло. Входными параметрами для обратной задачи служат коэффициенты теплопроводности во всех расчетных зонах, теплогенерация в нижней мантии и литосфере, температура и поток на поверхности, а также температурный профиль  $T_{p,s}$ , определенный по сейсмическим данным. В результате находится геотерма  $T_{\text{geoth}}$  и тепловой поток во всех расчетных зонах, теплогенерация в верхней и средней коре.

#### 6. Результаты

Предложенный метод реконструкции температурного режима и состава в верхней мантии тестировался на модели осредненной континентальной литосферы. Мы рассматривали следующую «эталонную модель» верхней мантии Земли. «Эталонный сейсмический профиль» задавался по референс модели IASP 91 [11], отражающей средние распределения сейсмических скоростей под континентами. «Эталонный состав» на глубинах 80-200 км задавался по модели среднего состава гранатовых перидотитов [9], на глубинах 200-370 км - средний состав примитивной мантии [9].

Состав, скорректированные профили скоростей, температурные профили, мощность радиогенных источников определялись по методике, описанной выше. Расчетные величины скоростей близки к «эталонному профилю» [11]. Восстановленная геотерма находится в согласии с геофизическими моделями [10, 12]. Наши результаты по исследованию строения и состава верхней мантии Земли, приводят к выводу, что модель верхней мантии состоящей из двух зон с границей, находящейся в среднем на глубине порядка 200 км, наилучшим образом отвечает геофизическим и петрологиче-

ским моделям. Верхняя область имеет состав близкий к гранатовым перидотитам [9], нижняя – к примитивной мантии [9].

## 7. Заключение

Разработан метод реконструкции состава и термического режима (температуры, тепловых потоков, мощность радиогенных источников) континентальной литосферы. Метод тестирован на осредненной модели континентальной литосферы. Получена самосогласованная модель состава, термического режима и сейсмических скоростей в верхней мантии. Наши результаты показали хорошее согласие с современными геофизическими и петрологическими моделями.

## Литература

1. *Kronrod V.A., Kuskov O.L.*, Determination of upper mantle bulk composition and temperature from seismic data // *Geokhimiya*. 1996. 1: P. 80-85
2. *Kronrod V.A., Kuskov O.L.* Chemical composition, temperature, and radius of the lunar core from geophysical evidence // *Geochem. Int.* 1997. V. 35. P. 4-12.
3. *Kuskov O.L., Kronrod V.A., Annersten H.* Inferring Upper-Mantle Temperatures from Seismic and Geochemical Constraints: Implications for Kaapvaal Craton // *Earth Planet. Sci. Lett.* 2006. 244. P. 133-154.
4. *Kuskov O.L., Kronrod V.A.* Constitution of the Moon: 5. Constraints on composition, density, temperature, and radius of a core // *Phys. Earth Planet. Inter.* 1998. 107. P. 285-306.
5. *Kuskov O.L., Kronrod V.A.* Determining the Temperature of the Earth's Continental Upper Mantle from Geochemical and Seismic Data // *Geokhimiya*. 2006. No 3. P. 267-283 [*Geochem. Int.* 44. P. 232-248].
6. *Kronrod V.A., Kuskov O.L.* Determining Heat Flows and Radiogenic Heat Generation in the Crust and Lithosphere Based on Seismic Data and Surface Heat Flows // *Geokhimiya*. 2006. No 10 [*Geochem. Int.* 44. P. 1035-1040].
7. *Kronrod V.A., Kuskov O.L.* Modeling of the Thermal Structure of Continental Lithosphere. *Izvestiya. Physics of the Solid Earth*. 2007. V. 43. No 1. P. 91-101.
8. *Kuskov O.L., Kronrod V.A.* Core sizes and internal structure of the Earth's and Jupiter's satellites // *Icarus*. 2001. V. 151. P. 204-227.
9. *McDonough W.F.* Constraints on the composition of the continental lithospheric mantle // *Earth Planet. Sci. Lett.* 1990. V. 101. P. 1-18.
10. *Artemieva I.M., Mooney W.D.* Thermal Thickness and Evolution of Precambrian Lithosphere: A Global Study // *J. Geophys. Res.* 2001. 106. P. 16387-16414.
11. *Kennet B.L.N., Engdahl E.R.* Traveltimes for global earthquake location and phase identification // *Geophys. J. Int.* 1991. 105. P. 429-465.
12. *Rudnick R.L., McDonough W.F., O'Connell R.J.* Thermal structure, thickness and composition of continental lithosphere // *Chem. Geol.* 1998. V. 145. P. 395-411.

---

*Вестник Отделения наук о Земле РАН - №1(27) 2009*

*Информационный бюллетень Ежегодного семинара по экспериментальной минералогии, петрологии и геохимии 2009 года (ЕСЭМПГ-2009)*

URL: [http://www.scgis.ru/russian/cp1251/h\\_dgggms/1-2009/informbul-1\\_2009/planet-16.pdf](http://www.scgis.ru/russian/cp1251/h_dgggms/1-2009/informbul-1_2009/planet-16.pdf)

*Опубликовано 1 сентября 2009 г.*

© *Вестник Отделения наук о Земле РАН, 1997 (год основания), 2009*

*При полном или частичном использовании материалов публикаций журнала, ссылка на «Вестник Отделения наук о Земле РАН» обязательна*