

Химическая граница литосферы под кратонами по геофизическим и петрологическим данным

В. А. Кронрод, О. Л. Кусков

Институт геохимии и аналитической химии РАН им. В. И. Вернадского, Москва

va_kronrod@mail.ru

Ключевые слова: мантия, кратон, состав, температура, литосферно-астеносферная граница.

Ссылка: Кронрод, В. А. О. Л. Кусков (2011), Химическая граница литосферы под кратонами по геофизическим и петрологическим данным, *Вестник ОНЗ РАН*, 3, NZ6057, doi:10.2205/2011NZ000187.

1. Введение

Литосферно-астеносферная граница (LAB) представляет собой основание Земной литосферы, твердой и сравнительно холодной, которая характеризуется кондуктивным режимом теплопередачи и изолирована от конвективной астеносферы. Литосферу можно описать, как твердый механический пограничный слой земной поверхности, лежащий над астеносферой, характеризующейся пластическими деформациями на масштабах времени порядка 10 000 лет. Литосфера состоит из дискретных плит и LAB отделяет каждую плиту от нижележащей конвективной мантии. По составу LAB разделяет обедненную базальтовыми компонентами литосферную мантию от более фертильной астеносферы. В кратонах состав ксенолитов в области нижней границы обедненной литосферы отмечается резким увеличением концентраций Fe, Ca, Al, Ti, Zr and Y с увеличением глубины и уменьшением среднего Mg# в оливине. Известны различные подходы для определения местоположения LAB. В зависимости от методов определения LAB в литературе обсуждаются термическая, петрологическая, сейсмическая, электрическая, реологическая границы.

В настоящей работе на основе методов физико-химического моделирования рассматриваются термическая (TLAB) и петрологическая границы литосферы (PLAB) для двух регионов архея – Каапваальского и Сибирского кратонов. Расположение по глубине (H_p) петрологическая границы литосферы определяется из предположения изостатического равновесия для Земной литосферы. Согласно принципу изостазии все регионы Земли с одинаковыми значениями геодезического возвышения над уровнем моря имеют одинаковую плавучесть относительно некоторого компенсационного уровня. Для определения возвышения необходимо знать распределения плотности по глубине $\rho(H)$ для кратона и некоторой референс колонны. С помощью методов, предложенных в работах [Kronrod and Kuskov, 2007, 2010], по составу ксенолитов из кимберлитовых трубок мы восстановили температуру в литосфере на глубинах 70-300 км и абсолютные величины сейсмических скоростей. Метод минимизации свободной энергии Гиббса и уравнения состояния мантийного вещества с учетом фазовых превращений, ангармонизма (учет термического расширения и сжимаемости) и эффектов затухания (неупругость вещества мантии при высоких температурах) применяются при решении прямой и обратной задач реконструкции температуры по сейсмическим волнам. Равновесный состав фазовых ассоциаций, скорости сейсмических волн и плотность рассчитываются с помощью комплекса THERMOSEISM [Kuskov et al., 2006, Kuskov and Kronrod, 2007].

Термическая структура континентальной литосферы (глубина термической литосферы, температура, тепловые потоки и генерация тепла в коре и литосфере) определяется по геотермическим, сейсмическим и петрологическим данным. На первом этапе решается задача по определению профиля температуры из абсолютных скоростей сейсмических волн (T_s). Затем производится согласование профиля T_s с теплофизической моделью кондуктивного переноса. Особенность метода решения обратной теплофизической задачи заключается в использовании ограничений, полученных из решения обратной задачи по восстановлению температуры из сейсмических данных. Находится аналитическая зависимость температуры от глубины, профили плотности, термическая граница литосферы.

Для определения возвышения необходимо знать распределение плотности по глубине в исследуемом регионе и в некоторой плотностной референс модели. Глубина расположения PLAB находится из условия равенства расчетной величины возвышения и реальной средней топографической высоты региона. Полученные результаты по расположению термических и петрологических границ литосферы сопоставлены с данными сейсмологии, геотермии и термобарометрии.

2. Входные данные и метод расчета

Расчет равновесного состава фазовых ассоциаций, скоростей упругих волн и плотности (прямая задача) проводится с помощью программного комплекса THERMOSEISM [Kuskov *et al.*, 2006, Kuskov and Kronrod, 2007], база данных которого содержит внутренне согласованные термодинамические параметры по энтальпии, энтропии, теплоемкости, параметру Грюнайзена, термическому расширению, модулям сжатия и сдвига минералов, а также параметры смешения твердых растворов. Модельная система $\text{Na}_2\text{O-TiO}_2\text{-CaO-FeO-MgO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ (NaTiCFMAS) включает фазы: плагиоклаз, железомagneзиальные оливин, ильменит и шпинель; пироп-альмандин-гроссуляровый гранат; ортопироксен и клинопироксен – 5 и 6-компонентные растворы. Химический состав фаз и их пропорции находятся методом минимизации свободной энергии Гиббса. Расчет уравнения состояния (УРС) минералов осуществляется в квазигармоническом приближении Ми-Грюнайзена-Дебая [Kuskov *et al.*, 2006]. Отсюда находятся плотность и изотропные скорости $V_{p,s}(P, T, X)$ фазовой ассоциации, зависящие от химического и фазового состава породы, причем модуль сжатия и плотность находятся из УРС, а для модуля сдвига принята линейная зависимость; упругие модули определены по усреднению Фойгта-Реусса-Хилла.

Метод восстановления температуры по сейсмической информации подробно описан в работах [Kronrod and Kuskov, 2007; 2010]. Процедура обращения сейсмических профилей в термические в мультисистеме NaTiCFMAS с фазами переменного состава осуществляется на основе уравнений состояния мантийного вещества с учетом фазовых превращений, ангармонизма и эффектов неупругости. Профили температуры (T_S), согласованные с термодинамическими свойствами минералов и фазовым составом минеральной ассоциации на данной глубине, находятся в результате решения обратной задачи из абсолютных скоростей продольных (и/или поперечных) волн при фиксированном валовом составе породы. Решение обратной задачи основано на минимизации среднеквадратичных отклонений расчетных значений сейсмических скоростей, согласованных с диаграммой состояния системы (с поправками на ангармонизм и неупругость), от экспериментальных сейсмических скоростей. Минимизация производится методом Ньютона. В результате решения находятся профиль температуры (T_S) по глубине, а также равновесный фазовый состав минеральной ассоциации (пропорции фаз и их химический состав) при данных P – T условиях. Зависимость давления от глубины принята по глобальной модели PREM.

Обращение сейсмического профиля на глубинах 70–300 км производится по данным о составе ксенолитов в кимберлитовых трубках кратонов и сейсмическим скоростям региональных моделей [Simon *et al.*, 2002] и [Pavlenkova and Pavlenkova, 2006] для Каапваальского и Сибирского кратонов соответственно.

На основе метода определения температуры в литосфере по сейсмике (T_S) и 1-D модели кондуктивной модели теплопроводности ($T_{\text{конд}}(H)$) сформулируем следующую обратную задачу. По тепловому потоку на поверхности и профилю T_S требуется определить TLAB, теплогенерацию в верхней и средней мантии, тепловые потоки в коре и литосфере. Задача решается из условия минимизации функционала (f), характеризующего невязки между профилем температуры (T_S), полученным по сейсмическим данным, и температурой ($T_{\text{конд}}$), рассчитанной по кондуктивной модели теплопроводности [Kronrod, Kuskov, 2007].

При расчете возвышения в качестве референс колонны использовался средний океанический рифт (MOR) [Afonso, *et al.*, 2008], для которого структура литосферы известна с большей достоверностью, чем в других тектонических регионах. Расчет возвышения проводился по [Afonso *et al.*, 2008].

3. Результаты

Кратко представим результаты по расчету петрологической и термической литосферно-астеносферной границ. Химический состав в системе NaTiCFMAS для применяемых в расчетах петрологических моделей приведен в табл. 1 [Afonso *et al.*, 2008, Gregoirea *et al.*, 2005, Griffin *et al.*, 2003, McDonough *et al.*, 1990, McDonough and Sun, 1995]. Для исследованных регионов по глубине задавались комбинированные петрологические модели, табл. 2: K1, K2 для Каапваальского кратона, K1, K2, C для Сибирского кратона, P для раннего и среднего Протерозоя. Температура регионов для раннего и среднего Протерозоя находилась из решения обратной задачи по исходным данным для температуры на глубинах 50, 100, 150 км и поверхностному тепловому потоку, приведенным в [Artemieva, 2006]. В Табл. 2 приведены восстановленные в соответствии с петрологическими моделями петрологические и термические литосферно-астеносферные границы а также их сравнение с данными термобарометрии.

КРОНРОД И КУСКОВ: ХИМИЧЕСКАЯ ГРАНИЦА ЛИТОСФЕРЫ ПОД КРАТОНАМИ

Таблица 1. Химический состав (мас.%) петрологических моделей в пересчете на систему NaTiCFMAS

Химический состав	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	MgO	CaO	Na ₂ O
Гранатовый перидотит ^a (GP)	45.42	0.08	1.32	7.03	45.28	0.78	0.09
Примитивная мантия ^b (PM)	45.2	0.2	4.51	8.13	37.6	3.6	0.36
Гранатовый лерцолит (Далдын) ^c (GL)	46.15	0.05	1.21	6.55	45.25	0.71	0.08
Крупнозернистые гранатовые перидотиты (Премьер) ^d (CGP)	46.23	0.08	1.64	6.83	44.12	0.98	0.12
Крупнозернистые шпинелевые перидотиты (Премьер) ^d (CSP)	45.32	0.03	1.27	6.97	45.55	0.77	0.09
Высокотемпературные лерцолиты (Каапваал) ^c (HTL)	44.76	0.17	1.76	8.17	43.74	1.28	0.12
Протон (средний состав) ^c (P)	45.0	0.07	1.91	8.1	43.1	1.7	0.12

Примечания: ^a состав по [McDonough, 1990]; ^b состав по [McDonough and Sun, 1995]; ^c состав по [Griffin et al., 2003]; ^d состав по [Gregoirea et al., 2005]; ^e состав по [Afonso et al., 2008].

Таблица 2. Глубина петрологической (PLAB) и термической границ (TLAB) по геофизическим и петрологическим данным

Регион	Каапваальский кратон		Сибирский кратон			Ранний Протерозой	Средний Протерозой
	K1	K2	K1	K2	C	P	P
Петрологическая модель	K1	K2	K1	K2	C	P	P
0 – Мохо ^a	34 км	34 км	40 км	40 км	40 км	37.7 км	39.3 км
Мохо – PLAB	кора	кора	кора	кора	кора	кора	кора
PLAB +10 – 400 км	GP	----	GP	----	GL	P	P
Мохо – 75 км	PM	----	PM	----	----	PM	PM
80 км – PLAB	----	CSP	----	CSP	----	----	----
PLAB - PLAB + 35 км	----	CGP	----	CGP	----	----	----
PLAB + 35 – 400 км	----	HTL	----	HTL	HTL	----	----
	----	PM	----	PM	PM	----	----
Петрологическая граница, расчетная, км	173	160	210	205	197	155	110
Петрологическая граница по данным термобарометрии ^b , км	~ 170		~190–205			~150	----
Термическая граница, расчетная, км	220		300			186	165

Примечания: Состав петрологических моделей GP, GL, CSP, CGP, HTL, PM, P приведен в табл. 1; ^a плотность и мощность коры по [Afonso et al., 2008, Artemieva, 2006]; ^b петрологическая граница по [O'Reilly, Griffin, 2006, Griffin et al., 2003].

4. Заключение

Предлагается метод расчета методами математического моделирования термической и петрологических литосферно-астеносферных границ. Определены PLAB и TLAB для Каапваальского и Сибирского архейских кратонов. Особенность разработанного метода решения обратной теплофизической задачи заключается в наложении ограничений, полученных из решения обратной задачи по восстановлению температуры из сейсмических данных. В качестве входных данных использованы скорости сейсмических волн, тепловые потоки на поверхности и петрологические модели деплетированного вещества литосферы и фертильного вещества примитивной мантии. Решение основано на согласовании профилей температуры, выведенных из скоростей сейсмических волн, с кондуктивной моделью теплопереноса в коре и литосфере. Процедура обращения

КРОНРОД И КУСКОВ: ХИМИЧЕСКАЯ ГРАНИЦА ЛИТОСФЕРЫ ПОД КРАТОНАМИ

сейсмических профилей в термические осуществлена на основе уравнений состояния мантийного вещества с учетом фазовых превращений, ангармонических эффектов и эффектов неупругости. Петрологическая литосферно-астеносферная граница рассчитывается из условий изостатического равновесия. Получено хорошее согласие результатов настоящего моделирования с современными баротермическими данными.

Исследования поддержаны РАН (программа 25) и РФФИ (гранты 09-05-00254, 09-05-00115).

Литература

Afonso, J. C., M. Ferna'ndez, G. Ranalli, W. L. Griffin, J. A. D. Connolly (2008), Geophysical-petrological modeling of the lithosphere, *Geochemistry Geophysics Geosystems*, v. 9, № 5, doi:10.1029/2007GC001834.

Artemieva, I. M. (2006), Global 1°-1° thermal model TC1 for the continental lithosphere: Implications for lithosphere secular evolution, *Tectonophysics*, v. 416, p. 245–277.

Gregoirea, M. T., C. Tinguelya, D. R. Bellb, A. P. le Roexc (2005), Spinel lherzolite xenoliths from the Premier kimberlite (Kaapvaal craton, South Africa): Nature and evolution of the shallow upper mantle beneath the Bushveld complex, *Lithos*, v. 84, p. 185–205.

Griffin, W. L., S. Y. O'Reilly, N. Abea, S. Aulbach, R. M. Davies, N. J. Pearson, B. J. Doyle, K. Kivid (2003), The origin and evolution of Archean lithospheric mantle, *Precambrian Research*, v. 127, p. 19–41.

Kronrod, V. A. and O. L. Kuskov (2007), Modeling Thermal Structure of Continental Lithosphere, *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*, vol. 43, No. 1, pp. 91–101.

Kronrod, V. A., O. L. Kuskov, and A. A. Prokof'ev (2010), Temperature Distribution in the Lithospheric Mantle of the Siberian Craton: Evidence from Regional Seismic Models, *Geochemistry International* vol. 48, No. 8, p. 801–807.

Kuskov, O. L., V. A. Kronrod (2007), Composition, temperature, and thickness of the lithosphere of the Archean Kaapvaal Craton, *Izvestiya. Phys. Solid Earth*, v. 43, p. 42–62.

Kuskov, O. L., V. A. Kronrod, H. Annersten (2006), Inferring upper-mantle temperatures from seismic and geochemical constraints: Implications for Kaapvaal craton, *Earth Planet. Sci. Lett.*, v. 244, p. 133–154.

McDonough, W. F. (1990), Constraints on the Composition of the Continental Lithospheric Mantle, *Earth Planet. Sci. Lett.*, v. 101, p. 1–18.

McDonough, W. F., and S. Sun (1995), The composition of the Earth, *Chem. Geol.*, v. 120, p. 223–253.

O'Reilly, S. Y., W. L. Griffin (2006), Imaging global chemical and thermal heterogeneity in the subcontinental lithospheric mantle with garnets and xenoliths: Geophysical implications, *Tectonophysics*, v. 416, p. 289–309.

Pavlenkova, G. A. and N. I. Pavlenkova (2006), Upper Mantle Structure of the Northern Eurasia from Peaceful Nuclear Explosion Data, *Tectonophysics*, v. 416, p. 33–52.

Simon, R. E., C. Wright, E. M. Kgaswane, M. T. O. Kwadiba (2002), The P wave speed structure below and around the Kaapvaal craton to depths of 800 km, from travel times and waveforms of local and regional earthquakes and mining-induced tremors, *Geophys. J. Int.*, v. 151, p. 132–145.