

КОЛИЧЕСТВЕННАЯ МОДЕЛЬ ТЕРМАЛЬНОЙ МОЩНОСТИ ЛИТОСФЕРЫ ЗЕМЛИ

Коптев А.И., Ершов А.В.

*Московский Государственный Университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия
(koptev06@mail.ru)*

Введение

Под литосферой понимается внешняя, относительно более прочная оболочка твердой Земли, расположенная над менее вязкой и более пластичной астеносферой. Данный термин был впервые предложен американским геологом Дж. Барреллом в 1914 г. [8,9,10] Положение подошвы литосферы определяется по изменению механического поведения среды: нижняя граница литосферы маркирует переход от относительной твердой и прочной внешней оболочки Земли (литосферы) к астеносфере, характеризующейся большей степенью пластичности вследствие того, что в ней вещество находится в частично расплавленном состоянии. Таким образом, граница литосфера-астеносфера носит *реологический* характер.

Однако, на практике изменения реологических свойств мантии не доступны непосредственному определению, поэтому чаще всего подошва литосферы фиксируется по изменению в скоростях прохождения сейсмических волн (в этом случае используется термин «*сейсмическая литосфера*»). При количественных расчетах для приблизительного определения положения нижней границы литосферы часто полагают, что она проходит по некой заданной геотерме (обычно со значением около 1300°C, близким к солидусу мантийных пород). В таких случаях говорят о «*термальной литосфере*» и *термальной мощности* литосферы.

В настоящее время опубликованы фактические данные, позволяющие выполнить полноценную количественную оценку термальной мощности литосферы Земли в глобальном масштабе. В качестве таких данных в настоящей работе были использованы: топография (цифровая модель рельефа ETOPO5 [21]), структурно-вещественный состав земной коры (по

данным модели CRUST 2.0 [11,19]), гравитационные аномалии (гравитационная модель EGM96 [17]), возраст океанического дна [20], распределение среднегодовых температур на поверхности Земли [16,18].

Методика расчета

Термальная мощность литосферы в каждой точке земной поверхности определялась в данной работе как разница между глубиной расчетной изотермы 1300°C и абсолютной отметкой рельефа. Расчет выполнялся на сетке с размером ячейки 0,5°x0,5°; границы ячеек были ориентированы вдоль параллелей и меридианов.

Положение изотермы определялось из модели термального состояния литосферы. Расчет распределения температур с глубиной для океанической и континентальной литосферы производился различным образом.

Распределение температур $T(z)$ с глубиной (z) в континентальной литосфере принималось стационарным и рассчитывалось как

$$T(z) = T_0 + \int_{z_0}^z \frac{q(V)}{k(V)} dV, \quad (1)$$

где T_0 - температура на поверхности Земли (распределение по расчетной сетке бралось по данным [16,18]), z_0 - абсолютная отметка рельефа (значения для расчетов брались по данным [21]), $k(z)$ - коэффициент теплопроводности, рассчитывавшийся в зависимости от температуры согласно моделям [13,14], $q(z)$ - тепловой поток, определявшийся из поверхностного теплового потока и объемной теплогенерации пород литосферы.

В океанической литосфере распределение температур рассчитывалось в зависимости от ее возраста в рамках модели остывающего полупространства [1] по формуле

$$\frac{T(z) - T_0}{T_m - T_0} = \operatorname{erf} \left(\frac{z - z_0}{2\sqrt{c \cdot t}} \right) \quad (2)$$

где T_m - температура подлитосферной мантии (принималась равной 1444°C), c - коэффициент температуропроводности (принят $- 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$) [22], erf - функция ошибок, t - возраст литосферы. Возраст океанического дна был взят по данным [20].

Для корректировки термальной модели использовалась модель локальной изостатической компенсации, предполагающая, что веса любых двух вертикальных колонок литосферы от поверхности до глубины изостатической компенсации должны быть равны:

$$\int_{z_0(x_1, y_1)}^{z_1} r(x_1, y_1, z) dz = \int_{z_0(x_2, y_2)}^{z_1} r(x_2, y_2, z) dz, \quad (3)$$

где $z_0(x, y)$ - абсолютная отметка рельефа в точке с координатами (x, y) , z_1 - уровень изостатической компенсации, $r(x, y, z)$ - плотность слагающих литосферу пород в точке с координатами (x, y, z) .

Введение поправки за счет локальной изостазии заключалось в том, что поверхностный тепловой поток и возраст литосферы t не полагались независимыми входными параметрами при расчетах распределения температур в континентальной и океанической литосфере соответственно, но рассчитывались из положения изотермы 1300°C (подошвы литосферы), которое определялось из условия локальной изостазии по формуле (3).

Использование изостатической поправки, применяемое в настоящей работе, является главным отличием от ранее опубликованных глобальных [5,3] и региональных [4,7,2,15,6] моделей

термальной мощности литосферы. Данный подход позволил снизить степень влияния на итоговый результат таких факторов как нестационарность теплового режима, неточность знаний о величине поверхностного теплового потока, коэффициента теплопроводности и параметров, определяющих теплогенерацию пород.

Результаты

Представленная на рис.1 расчетная термальная мощность литосферы характеризуется тем, что в ней находят свое отражение все главные тектонические структуры Земли. Границы литосферных плит, показанные на этом рисунке, взяты по данным цифровой модели П.Берда [12].

Вдоль срединно-океанических хребтов, где, как известно, происходит формирование новой океанической литосферы, наблюдается значительное ее утонение вплоть до нулевых значений. Данную особенность можно видеть на профиле Б1-Б2 (рис.2) для Срединно-Атлантического и Аравийско-Индийского срединных хребтов. По мере удаления от срединно-океанических хребтов возраст океанической литосферы постепенно увеличивается, а вместе с ним и ее мощность. На границе континент-океан она может достигать величин 120-140 км. Закономерное утолщение литосферы от центральной части к периферии для Индийского океана показано на разрезе Б1-Б2, а для Атлантического - на разрезах Б1-Б2 и В1-В2.

Важно отметить, что в областях развития плюмового океанического магматизма (Гавайские, Азорские о-ва, хребет Девяностого градуса, поднятие Рио-Гранде и пр.) вопреки приведенной выше закономерности наблюдается значительное уменьшение мощности литосферы. На профиле В1-В2 хорошо проявлена Гавайская горячая точка, а на профиле Б1-Б2 - плюмы Азорских островов и Маскеранского хребта. Для расположенного на срединно-океаническом хребте Исландского плюма (профиль В1-В2) расчетные мощности мантийной литосферы вообще принимают отрицательные значения. Технически это

соответствует не выполнению условия локальной изостазии даже в случае полного отсутствия мантийного прослоя в литосфере, а физический смысл данного явления состоит в том, что литосфера на данном участке находится в крайне разогретом состоянии.

В целом, для большей части океанов мощность литосферы не превышает 150 км.

В пределах континентов минимальные значения мощности литосферы (от 40 до 0 км) фиксируются под континентальными рифтовыми системами (Восточно-Африканская, Калифорнийская, Байкальская, Момская, Красноморская и пр.). Так, например, североамериканская структура провинция Бассейнов и Хребтов четко отражается в утонении литосферы на

разрезах В1-В2, а на разрезе Б1-Б2 хорошо идентифицируются две ветви (Западная и Восточная) Восточно-Африканской рифтовой системы.

Области развития древних платформ (Восточно-Европейская, Восточно-Сибирская, Африканская, Северо-Американская и пр.) характеризуются мощностью литосферы в 150-200 км. Для более молодых горно-складчатых систем в целом свойственна литосфера меньшей мощности. Например, для каледонских Аппалачей она составляет 120-130 км (профиль В1-В2), а для мезозойской Верхояно-Чукотской складчатой системы - 50-70 км при почти полном выклинивании мантийного слоя (профиль А1-А2).

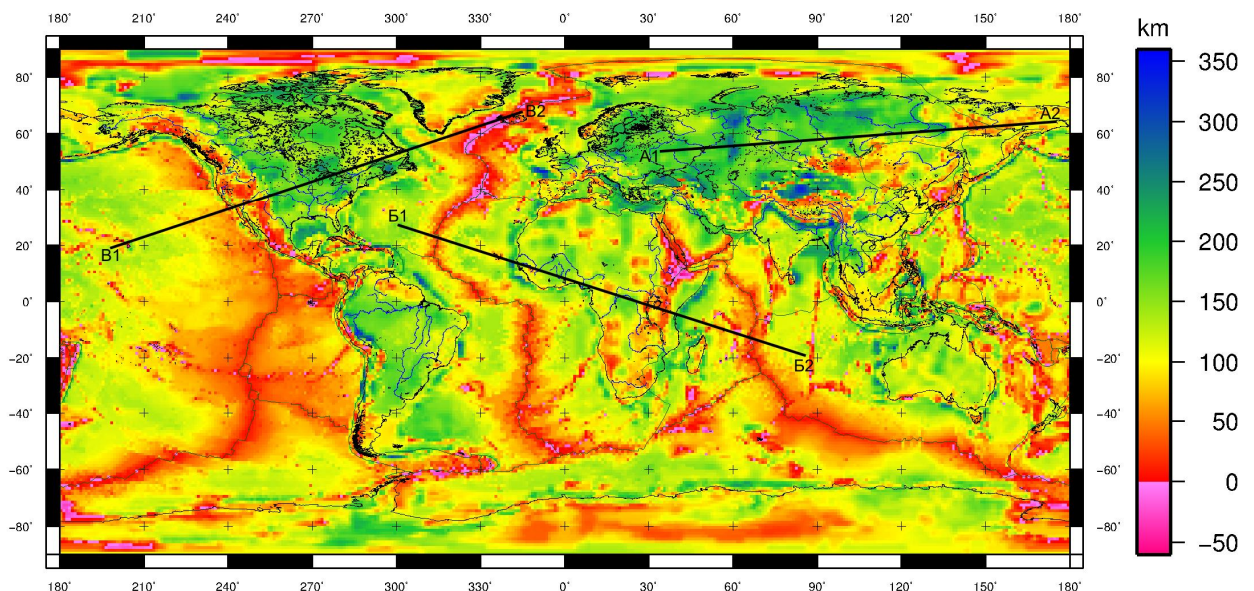


Рис. 1. Расчетная термальность литосферы
Линиями показано положение линий разреза А1-А2, Б1-Б2, В1-В2, Г1-Г2, приведенных на рис.2

На фоне вышесказанного, интересной особенностью, отраженной на разрезе А1-А2, стоит признать малое отличие в мощности древних Восточно-Сибирской и Восточно-Европейской платформ и молодой эпигерцинской Западно-Сибирской плиты, а также аномальное утолщение (до 200-250 км) под герцинским складчатым сооружением Урала. Формально большие значения мантийной литосферы под Уралом может быть объяснено наличием более толстой и легкой коры в этом регионе по данным CRUST 2.0.

Таким образом, приведенные результаты расчетов говорят о том, что, с одной стороны, полученная термальность литосферы хорошо согласуется с представлениями о том, какая она должна быть под такими глобальными структурами как континентальные и океанические рифтовые системы, области внутриплитного океанического магматизма, древние платформы и пр. Тот факт, что рассчитанная мощность литосферы принимает ожидаемые значения в тех местах, где она считается хорошо известной, может считаться критерием

правильности принятой в настоящей работе модели. С другой стороны, некоторые другие особенности распределения мощности литосферы, такие как соотношение между мощностями древних и молодых платформ на Евразийском континенте, значительное увеличение

мощности литосферы под Уральским орогеном, остаточными впадинами Черного, Средиземноморского и Каспийского бассейнов и пр., не вполне очевидны и должны стать предметом дальнейшего изучения и обсуждения.

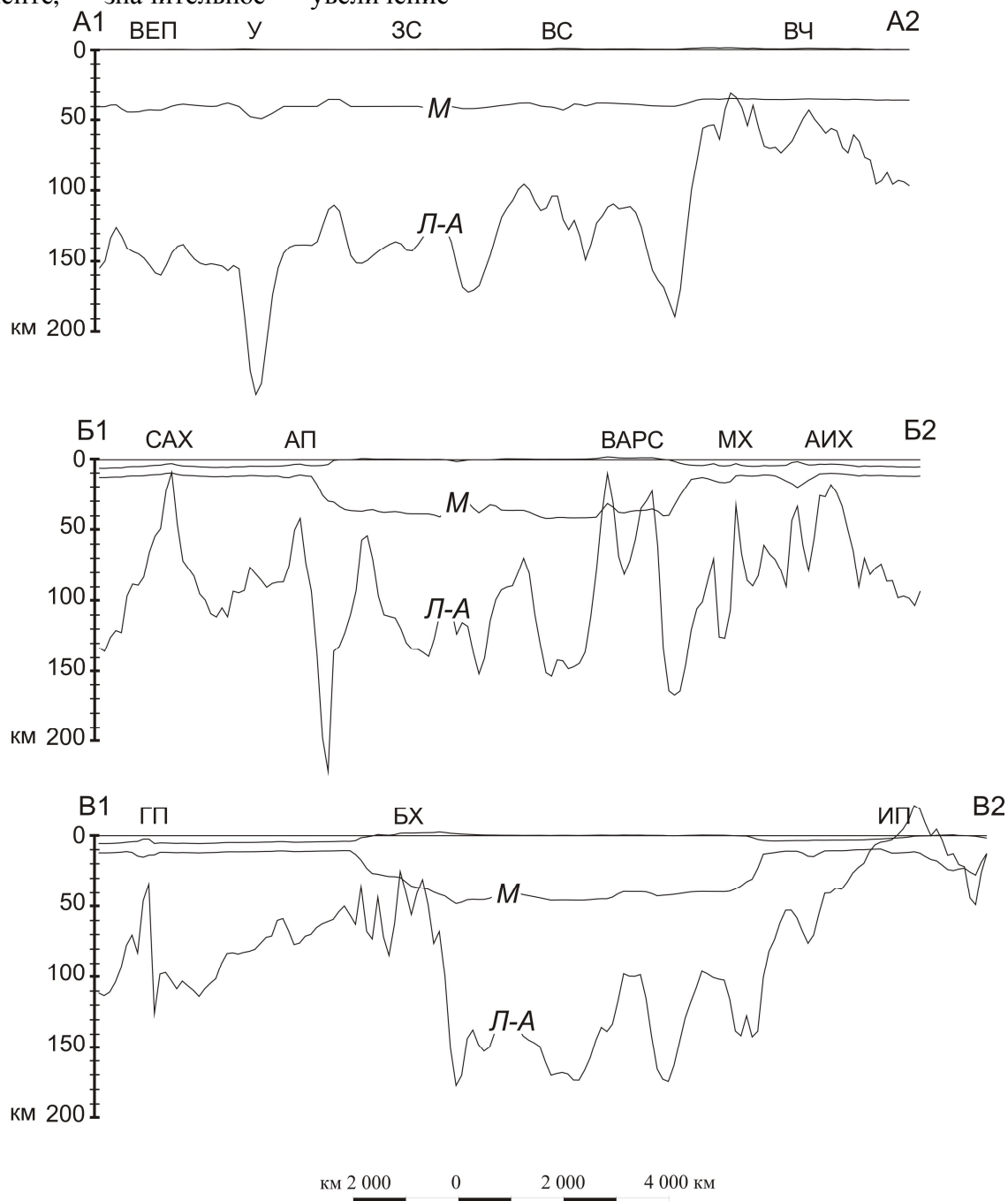


Рис. 2. Разрезы по линиям А1-А2, Б1-Б2, В1-В2

М – граница Мохоровичича, *Л-А* – граница между литосферой и астеносферой;

ВЕП – Восточно-Европейская платформа, ЗС – Западно-Сибирская плита, ВС – Восточно-Сибирская платформа, ВЧ – Верхояно-Чукотская складчатая область, САХ – Срединно-Атлантический хребет, АП – Азорский плюм, ВАРС – Восточно-Африканская рифтовая система, МХ – Маскаренский хребет, АИХ – Аравийско-Индийский хребет, ГП – Гавайский плюм, БХ – провинция Бассейнов и Хребтов, ИП – Исландский плюм

Данные о термальной мощности литосферы могут быть использованы при сравнительном геодинамическом анализе различных тектонических структур, а также как исходные данные для численных расчетов в области геодинамики литосферы, таких как, например, расчет глобального поля напряжений и деформации литосферы.

Литература

1. Теркот Д., Шуберт Дж. Геодинамика Геологическое приложение физики сплошных сред. М: Мир. 1985. 727с.
2. Artemieva I.M. Dynamic topography of the East European craton: Shedding light upon lithospheric structure: Composition and mantle dynamics // *Glob. Planet. Change*. 2007. doi: 10.1016/j.gloplacha.2007.02.013.
3. Artemieva I.M. Global $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ thermal model TC1 for the continental lithosphere: Implications for lithosphere secular evolution // *Tectonophysics*. 2006. V. 416. P. 245-277.
4. Artemieva I.M. Lithospheric structure, composition, and thermal regime of the East European Craton: implications for the subsidence of the Russian platform // *Earth Planet. Sci. Lett.* 2003. V. 213. P. 413-446.
5. Artemieva I. M., Mooney W.D. Thermal thickness and evolution of Precambrian lithosphere: A global study // *J. Geophys. Res.* 2001. V. 106 (B8). P. 16,387-16,144.
6. Artemieva I.M., Thybo H. Deep Norden: Highlights of the lithospheric structure of Northern Europe, Iceland, and Greenland // *Episodes*. 2008. V. 31 (N1). P. 98-106.
7. Artemieva I.M., Thybo H., Kaban M.K. Deep Europe today: geophysical synthesis of the upper mantle structure and lithospheric processes over 3.5Ga // In: Gee D.S., Stephenson R.A. (Ed.) *European Lithosphere Dynamics*. 2006. Geological Society. London. Memoirs. 32,11-41.0435-4052/06/\$15.00.
8. Barrell J. The strength of the Earth's crust. // *J. of Geology*. 1914. V. 22. P. 425-433.
9. Barrell J. The strength of the Earth's crust. // *J. of Geology*. 1914. V. 22. P. 441-468.
10. Barrell J. The strength of the Earth's crust. // *J. of Geology*. 1914. V. 22. P. 655-683.
11. Bassin C., Laske G., Masters G. The Current Limits of Resolution for Surface Wave Tomography in North America // *EOS Trans AGU*. 2000. 81. F. 897.
12. Bird P. An updated digital model of plates boundaries // *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*. An electronic journal of the Earth sciences. 2003. Vol. 4 (N3). 1027. doi: 10.1029/2001GC000252. ISSN: 1525-2027.
13. Cermak V., Rybach L. Thermal conductivity and specific heat of minerals and rocks // In Angenheister G. (Ed.). *Landolt-Bornstein Numerical Data and Functional Relationships in Science and Technology*. Springer-Verlag. New York. 1982. P. 213-256.
14. Clauser C., Huenges E. Thermal Conductivity of Rock and Mineral // In: Ahrens T.J. (Ed.). *AGU Reference Shelf*. V. 3. *Rock Physics & Phase Relations: A Handbook of Physical Constants*. Washington. DC. American Geophysical Union. 1995. P. 105-126.
15. Cloetingh S.A.P.L., Ziegler P.A., Bogaard P.J.F., Andriessen P.A.M., Artemieva M., Bada G., vanBalen R.T., Beekman F., Ben-Avraham Z., Brun J.-P., Bunge H.P., Burov E.B., Carbonell R., Facenna C., Friedrich A., Gallart J., Green A.G., Heidbach O., Jones A.G., Matenco L., Mosar J., Oncken O., Pascal C., Peters G., Sliupa S., Soesoo A., Spakman W., Stephenson R.A., Thybo H., Torsvik T., deVicente G., Wenzel F., Wortel M.J.R. TOPO-EUROPE: The geoscience of coupled deep Earth-surface processes // *Glob. Planet. Change*. 2007. doi: 10.1016/j.gloplacha.2007.02.008.
16. Leemans R., Cramer W. The IIASA database for mean monthly values of temperature, precipitation and cloudiness on a global terrestrial grid // *Research Report RR-91-18*. International Institute of Applied Systems Analyses. Laxenburg. November 1991. P. 61.
17. Lemoine F.G., Kenyon S.C., Factor J.K., Trimmer R.G., Pavlis N.K., Chinn D.S., Cox C.M., Klosko S.M., Luthcke S.B., Torrence M.H., Wang Y.M., Williamson R.G., Pavlis E.C., Rapp R.H., Olson T.R. The Development of the Joint NASA GSFC and NIMA Geopotential Model EGM96 // *NASA Goddard Space Flight Center*. Greenbelt. Maryland. 20771. USA. July 1998.
18. Lieth H. Modelling the primary productivity of the earth. *Nature and resources* // UNESCO. 1972. VIII. 2:5-10.
19. Mooney A., Laske G., Masters G. Crust 5.1: a global crustal model at 5x5 degrees // *J. Geophys. Res.* 1998. V. 103. P. 727-747.
20. Muller R.D., Roest W.R., Royer J.-Y., Gahagan L.M., Sclater J.G. Digital isochrons

- of the ocean age. // *J. Geophys. Res.* 1997. V. 102 (B2). P. 3211-3214.
21. *National Geophysical Data Center*. ETOPO-5 bathymetry and topography data. // *Data Announc.* 88-MGG-02. NOAA. Boulder. Colorado. 1988.
22. *Stein C.A.* Heat flow of the Earth. // In: *Ahrens T.J. (Ed.). AGU Reference Shelf. V. 1. Global Earth Physics: A Handbook of Physical Constants.* Washington, DC. American Geophysical Union. 1995. P.144-158.