

## АНАЛИЗ ЗАВИСИМОСТИ КОНДУКТИВНОГО ТЕПЛОВОГО ПОТОКА ОТ ВРЕМЕНИ И ГЛУБИНЫ ИЗМЕРЕНИЙ

**Е.А. Тевелева, М.Д. Хуторской**

*Экологический факультет, Российский университет дружбы народов,  
Подольское ш., 8/5, 113093, Москва, Россия*

В данной статье обосновывается необходимость исследования зависимости величины кондуктивного теплового потока от времени и глубины измерения. С помощью закона Фурье доказывается независимость величины кондуктивного теплового потока от времени. Статистическими методами доказывается независимость данной величины от глубины измерения.

Плотность кондуктивного теплового потока (или, как часто называют, «тепловой поток») — это самая информативная геотермическая характеристика, так как он характеризует мощность теплового источника и величину теплопотерь с поверхности Земли [3]. Он имеет также большое значение при изучении геологических задач, связанных с эволюцией становления континентальной коры, гранитно-метаморфического слоя, а также новообразованных формационных комплексов.

Тепловой поток на континентах измеряется в скважинах, которые бурятся на разную глубину в зависимости от геологической структуры участка. Кроме того, измерения теплового потока приурочены к различным моментам времени.

Таким образом, при межрегиональных сопоставлениях, картировании и профилировании данные о величине кондуктивного теплового потока могут быть использованы лишь тогда, когда они, во-первых, однородны в том или ином геологическом блоке по всему его разрезу, и во-вторых, не испытывают закономерных изменений от времени измерения. Поэтому возникает необходимость доказательства независимости данных от времени и глубины.

Для анализа зависимости теплового потока от времени мы воспользовались законом Фурье [2]:

$$q = -Q \left( i \frac{dT}{dx} + j \frac{dT}{dy} + k \frac{dT}{dz} \right) \quad (1),$$

где  $q$  — вектор теплового потока, а  $Q$  — коэффициент теплопроводности. Учитывая, что перенос тепла по горизонтальной составляющей несоизмеримо мал по сравнению с переносом тепла по вертикали, то есть

$$i \frac{dT}{dx} \ll k \frac{dT}{dz} \quad \text{и} \quad j \frac{dT}{dy} \ll k \frac{dT}{dz}, \quad \text{формулу (1) можно переписать в виде:}$$

$$q = -Q \frac{dT}{dz} \quad \text{или} \quad q = -Q \cdot \text{grad}T \quad (2).$$

Учитывая, что  $Q = a \cdot c \cdot \rho$  и  $a = \frac{H^2}{4t}$ , где  $a$  — температуропроводность,  $c$  — теплоемкость,  $\rho$  — плотность вещества, а  $t$  — время возникновения теплового фронта на глубине  $H$ , формулу (2) можно переписать в следующем виде:

$$q = -\frac{H^2}{4t} \cdot c \cdot \rho \cdot \text{grad}T \quad (3).$$

Подставляя в формулу (3) средние значения теплоемкости и плотности для литосферы:  $c \cong 800$  Дж/(кг·К),  $\rho \cong 2600$  кг/м<sup>3</sup>,  $\text{grad}T \cong 0.02$  К/м и  $H \cong 1.7 \cdot 10^5$  м, получим:

$$q = \frac{30056 \cdot 10^{10}}{t} \text{ (мВт/м}^2\text{)} \quad (4),$$

где  $\tau$  — время, исчисляемое в млн. лет.

На основании формулы (4) получим следующую зависимость изменения теплового потока от времени:

$$\Delta q = 9540 \cdot \left( \frac{1}{\tau_0} - \frac{1}{\tau_0 + \Delta \tau} \right) \text{ (мВт/м}^2\text{)},$$

где  $\tau_0$  — время становления континентальной коры (млн. лет назад), а  $\Delta \tau$  — время, необходимое для уменьшения теплового потока на  $\Delta q$ .

На рис. 1 представлены графики зависимости  $\Delta q$  от  $\Delta \tau$  при  $\tau_0 = 200$ , 400 и 3000 млн. лет, соответствующие возрасту континентальной коры, сформированной соответственно 200, 600, и 3000 млн. лет назад.

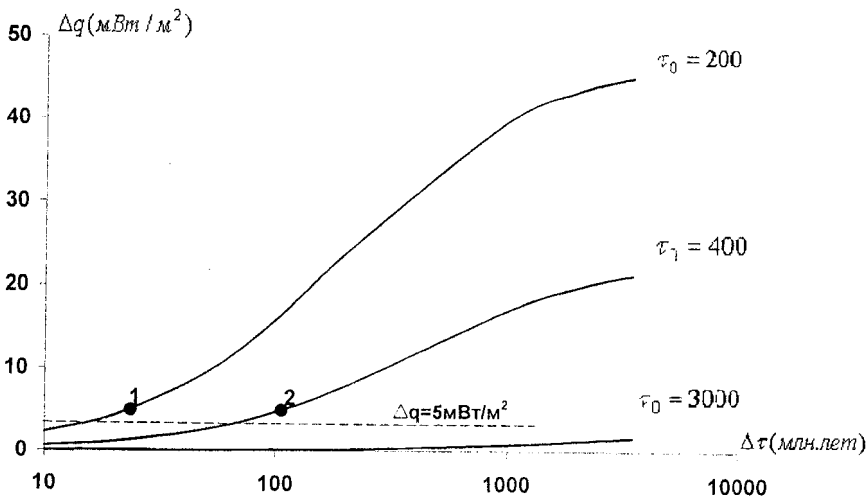


Рис. 1. Графики зависимости  $\Delta q$  от  $\Delta \tau$

Из графика видно, что для уменьшения  $q$  на величину 5 мВт/м<sup>2</sup>, определяемую точностью измерения, необходимо:

- 23 млн. лет для континентальной коры, сформированной 200 млн. лет назад (значение абсциссы точки 1);
- 106 млн. лет для континентальной коры, сформированной 400 млн. лет назад (значение абсциссы точки 2).

И заметим, что если континентальная кора сформирована 3000 млн. лет назад, то тепловой поток уже не уменьшится на 5 мВт/м<sup>2</sup>.

Таким образом, можно считать, что величина кондуктивного теплового потока не зависит от времени, в пределах которого велись все исследования, а зависит от геологического времени, измеряемого миллионами лет.

Для исследования зависимости теплового потока от глубины измерения нами использовался выборочный ранговый коэффициент корреляции Спирмена [1].

По формуле (5) находится выборочный ранговый коэффициент корреляции Спирмена и сравнивается с его критическим значением по формуле (6). Если выполняется условие (7), то принимается гипотеза о независимости рассматриваемых величин [1].

$$\rho_B = 1 - \frac{6 \cdot \sum_{i=1}^n d_i^2}{n^3 - n} \quad (5).$$

$$\rho_{кр} = t_{кр}(\alpha, k) \cdot \sqrt{\frac{(1 - \rho_{\alpha}^2)}{(n - 2)}} \quad (6).$$

$$|\rho_{\alpha}| < \rho_{\epsilon\delta} \quad (7),$$

где  $n$  — объем выборочной совокупности, а  $t_{\epsilon\delta}(\alpha; k)$  — критическая точка, которую находят по таблице распределения Стьюдента при числе степеней свободы  $k = n - 2$  при заданном уровне значимости  $\alpha$ .

Для выяснения зависимости величины теплового потока от глубины с помощью рангового коэффициента корреляции Спирмена были проанализированы 20 скважин, относящиеся к различным участкам Центрально-Азиатского складчатого пояса.

Из рис. 2 видно, что для всех рассмотренных случаев  $|\rho_B| < \rho_{кр}$ , то есть выполняется условие (7). Следовательно, принимается гипотеза о независимости величин изотопного отношения гелия и времени измерения.

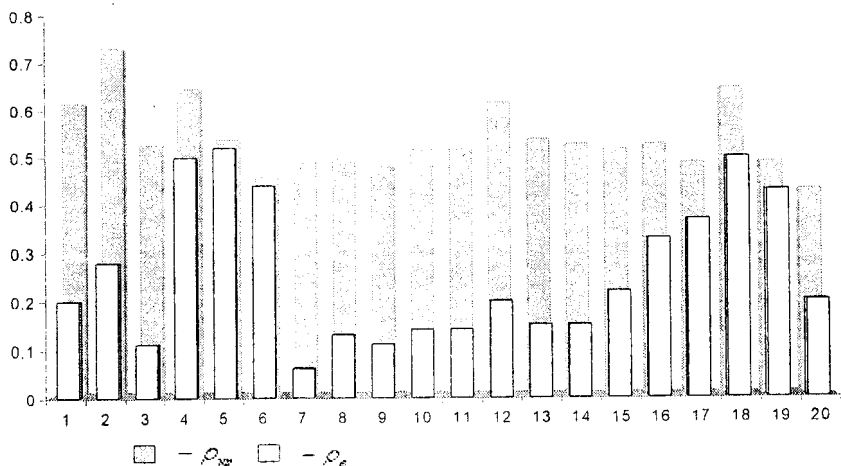


Рис. 2. Зависимость величины теплового потока от глубины

Следовательно, величина кондуктивного теплового потока не зависит от времени и глубины измерения и является представительной региональной

меткой, что позволяет ее использовать в различных исследованиях, в том числе при решении задач картирования и профилирования.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Гмурман В.Е. Теория вероятностей и математическая статистика // М.: Высшая школа, 2005. - С. 327-349.
2. Тихонов А.Н., Самарский А.А. Уравнения математической физики // М.: Наука, 1977. - С. 735.
3. Хуторской М.Д. Введение в геотермию // М.: Изд-во РУДН, 1996. - С. 156.

### ANALYSIS DEPENDENCE OF THE CONDUCTIVE HEAT FLOW FROM TIME AND DEPTH MEASURING

**E.A. Teveleva, M.D. Khutorskoy**

*Ecological Faculty, Russian Peoples' Friendship University,  
Podolskoye shosse, 8/5, 113093, Moscow, Russia*

Substantiating the necessary research of the analysis dependence of the conductive heat flow from time and depth measuring. By the Furrye' law demonstrated dependently conductive heat flow from time and by statistical methods – from depth measuring.

---