

Н.Н. Христофорова, Г.Г. Куштанова, В.А. Чугунов

Казанский государственный университет

E-mail: Natalya.Khristoforova@ksu.ru, Galya.Kushtanova@ksu.ru

# СВЯЗЬ ТЕПЛООВОГО ПОТОКА С ДИНАМИКОЙ ЛИТОСФЕРЫ

Явления переноса массы и тепла в литосфере относятся к слабоизученным медленным крупномасштабным процессам. Рассматривая их связь совместно с конвекционными течениями в мантии, мы приходим к представлению, когда разнообразные экспериментальные и теоретические результаты складываются в единую непротиворечивую картину. Детальными исследованиями установлено, что вариации глубинных тепловых потоков тесно связаны с современными вертикальными движениями земной коры. С некоторыми допущениями зависимость трансформирована в адекватную математическую модель, и тепловые потоки, рассчитанные с ее помощью, в подавляющем большинстве близки к экспериментальным.

## 1. Введение

Касаясь современных вопросов геодинамики, мы сталкиваемся с проблемой исследования медленных и сверхмедленных крупномасштабных процессов, трудно поддающихся лабораторному моделированию. Многообразие действующих факторов, сложность граничных и внутренних условий приводят к тому, что наиболее эффективными оказываются практические подходы, когда явления или их следствия изучаются непосредственно в природных условиях, с последующим построением физической и математической моделей.

В настоящей статье речь идет о связи двух разнородных параметров, характеризующих тепло- и массоперенос в литосфере – глубинном тепловом потоке, идущем из недр ( $q$ ) и скорости современных вертикальных движений земной коры ( $V$ ), рис. 1–3.

Зависимость между тепловым потоком и вертикальными движениями земной коры рассматривалась рядом исследователей (Harnisch, 1975; Morgan, 1975; Vyskočil, 1979 и др.), которые приходили к весьма противоречивым выводам от полного ее отрицания (нулевая корреляция) до регрессии с высокими коэффициентами. По результатам простой корреляции между  $q$  и  $V$  был сделан вывод о существовании реальной, но недостаточно четкой и неоднозначной зависимости. Имеются явные различия в рассматриваемой корреляции определенных тектонических районов, например, платформ и орогенических областей; и коэффициенты корреляции варьируют при этом от 0 до  $\pm 0,65$ .

## 2. Связь теплового потока со скоростью неотектонических движений. Эксперимент.

Детальное изучение теплового потока мы проводили в пределах Восточно-Европейской платформы и окружающих регионов (Khristoforova et al., 1996). Подчеркнем, что большая часть полученных нами значений теплового потока была использована при построении карт в Геотермическом Атласе Европы (Geothermal..., 1991).

Скорости неотектонических поднятий и опусканий твердой оболочки Земли определяются по результатам повторного нивелирования. Массовые их значения снимались с Карты современных вертикальных движений земной коры Восточной Европы (Мещеряков, 1973).

Вывод о явной зависимости рассматриваемых пара-

метров был получен нами из сопоставления экспериментального материала по глубинному тепловому потоку и скорости вертикальных поднятий и опусканий земной коры, рис. 2. За неимением точных данных о скорости в пунктах определений потока, значения  $q$  отнесены в интервалы попадания точек на карте современных движений.

Мы не сочли нужным рассматривать раздельную корреляцию по отдельным структурно-тектоническим элементам. Во-первых, это свело бы до минимума количество точек в регрессии, так что ее результат в любом случае вызывал бы сомнение. Во-вторых, и это главное, именно обобщение разнородных структурных подразделений, обуславливающих широкий спектр значений  $V$  и  $q$ , позволяет выявить их закономерную связь. Иными словами, характер корреляции таков, что он будет проявляться именно в сочетании контрастных по величине  $V$  и  $q$  зон, поэтому мы рассматриваем корреляцию, общую для всех регионов.

Полученный график зависимости  $q = f(V)$  имеет достаточно высокое корреляционное отношение  $\tilde{K} = 0,85$  и коэффициент корреляции  $K = 0,8$ . Превышение  $\tilde{K}$  над  $K$  свидетельствует о нелинейности рассматриваемой связи.

Более наглядно соответствие параметров можно видеть на профилях, рис. 3, где линии  $q = f(r)$  и  $V = f(r)$  – сглажены ( $r$  – расстояние от произвольной точки). Следует признать, что они имеют много общего. Это периодические кривые, на которых совпадают количество экстремумов и, в значительной степени, их пространственное расположение. В соответствии также находятся амплитуды максимумов и минимумов, их частота, общий наклон графиков и форма экстремумов.

На всех графиках меридионального направления прослеживается снижение амплитуды и увеличение периода кривых с юга на север, рис. 2, 3. Очевидно глубинные динамические процессы, отвечающие за подобную картину, подчиняются определенным закономерностям.

Анализ пространственных вариаций теплового потока позволяет нам подчеркнуть ячеистый характер поля  $q$ . Крупные положительные аномалии  $q$  окружают по периферии зоны минимумов округлой или вытянутой формы. Такая структура ячеек, названных тепловыми, или ячейками теплового потока, отражается и на карте современных вертикальных движений, но носит при этом более сложный характер из-за специфики параметра  $V$ .

Дело в том, что район исследований включает как область разнонаправленных перемещений – поднятия и опускания земной коры, так и однонаправленное движение. Если для южных ячеек различным по тепловому потоку участкам отвечают более или менее интенсивные поднятия литосферы, то для северных структур – это, соответственно, менее или более интенсивные опускания. И только для промежуточной аномалии Предкавказья высокие и низкие тепловые потоки коррелируют с положительными и отрицательными значениями  $V$ , обеспечивая тем самым ее эффективное визуальное наблюдение.

Выделенные ячейки теплового потока изучены с различной плотностью измерений. Предкавказская и Русская аномалии характеризуются высокой плотностью экспериментальных точек и детальным исследованием каждой ветви. Для северных ячеек – Гатчинской, Ярославской, Тэбук – это лишь единичные измерения  $q$ . Несколько замеров теплового потока выполнено на северо-восточном крыле аномальной структуры, приуроченной к Большому Кавказу. Поэтому при построении краевых ячеек на профилях, рис. 3, учтены данные и других авторов (Чермак и Рибак, 1982).

### 3. Теория

С учетом вертикальных движений  $V(x, y)$  задача переноса тепла в литосфере формулируется следующим образом.

Вводится система координат, так что плоскость  $(x, y)$  проходит через точки нулевой скорости, рис. 1, а ось  $z$  совмещена с направлением, где скорость наибольшая,  $V_{max}$

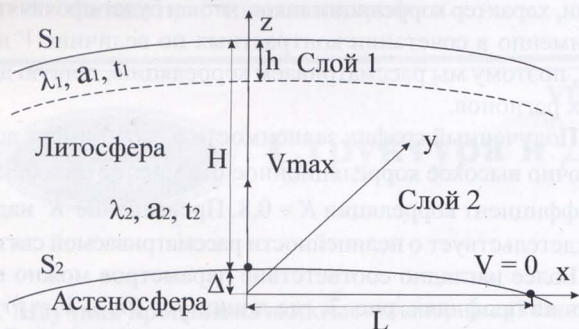


Рис. 1. Схематическая двухслойная модель литосферы (символы – см. текст).

На границах заданы температуры:

- на поверхности  $S_2$   $t = t_0$
- на поверхности  $S_1$   $t = B$ .

В силу того, что кривизна  $\frac{\Delta}{L} \ll 1$ , положим:

при  $z = 0$   $t = t_0$

при  $z = H$   $t = B$ .

Поскольку более-менее достоверно известны теплофизические параметры лишь в приповерхностном слое (до 2–5 км), то рассматривается двухслойная модель. Температуропроводность  $a_1$  и теплопроводность  $\lambda_1$  считаются известными, а параметры нижнего слоя  $a_2$  и  $\lambda_2$  – подлежащими определению. Кроме того, т.к.  $h \ll H$ , то распределение температуры в слое  $h$  аппроксимируем линейным законом:

$$t_1 = az + b \quad (1)$$

Обозначим температуру на срезе  $H - h$  через  $t_h$  и используя выражение  $t_1 = t_2 = t_h$  для среза  $H - h$ , имеем:

$$t_1 = \frac{t_h - B}{h}(H - z) + B \quad (2)$$

Учитывая равенство тепловых потоков на срезе  $H - h$ , получаем граничное условие для  $t_2$ . В этом случае задача, описывающая распределение тепла в нижнем слое, формулируется следующим образом:

$$V \frac{\partial t_2}{\partial z} = a_2 \frac{\partial^2 t_2}{\partial z^2} + a_2 \Delta_{xy} t_2 \quad (3)$$

$$z = 0, \quad t_2 = t_0$$

$$z = H - h, \quad \frac{\partial t_2}{\partial z} = \frac{K_\lambda}{h}(B - t_2)$$

где  $K_\lambda = \frac{\lambda_1}{\lambda_2}$

Будем искать  $t_2$  в виде  $t_2 = t_g + u$ .

Из граничных условий

$$t_g = \frac{K_\lambda(B - t_0)}{h + K_\lambda(H - h)}z + t_0$$

Система для  $u$  решается методом интегральных отношений. В итоге тепловой поток на срезе  $H - h$  равен:

$$q(x) = q_0 \left( 1 + 5K_\lambda K_a \frac{(1 + 3K_\delta) \omega(x)}{(\delta + K_\lambda(1 - \delta))(1 + 5K_\delta + 10K_\delta^2)} \right) \quad (4)$$

где  $\omega$  определяется из соотношений:

$$\omega'' - 10K_L^2 A \omega = -Pe(x)K_L^2$$

$$X = 0, \quad \omega' = 0;$$

$$X = 1, \quad \omega' = 0.$$

$$K_L = \frac{2L}{H}; \quad X = \frac{x}{2L}; \quad Pe = \frac{V(x)H}{a_1};$$

$$K_\delta = \frac{\delta}{\delta + K_\lambda(1 - \delta)}; \quad K_a = \frac{a_1}{a_2}; \quad \delta = \frac{h}{H};$$

$$A = \frac{1 + 3K_\delta + 1.5Pe(x)K_a(1 - \delta)K_\delta^2}{(1 - \delta)^2(1 + 5K_\delta + 10K_\delta^2)}$$

Для температуры верхнего слоя получено выражение:

$$t_1(x, z) = \frac{q_0}{\lambda_1}(H - z) \times \left( 1 + \frac{5K_a K_\lambda (1 + 3K_\delta) \omega(x)}{(\delta + K_\lambda(1 - \delta))(1 + 5K_\delta + 10K_\delta^2)} \right) + B. \quad (5)$$

Значения параметров нижнего слоя  $a_2$  и  $\lambda_2$  определялись из условия совпадения тепловых потоков – экспериментальных и теоретических, при заданных скоростях  $V$ , т.е. решалась задача идентификации. При этом оказа-

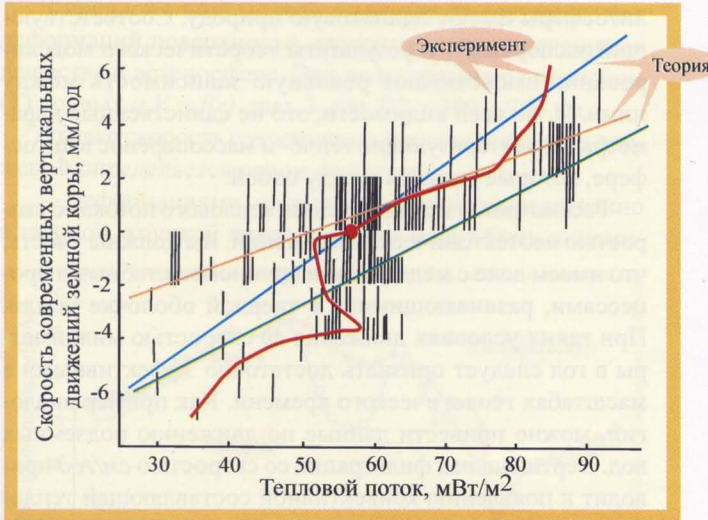


Рис. 2. Экспериментальная зависимость между тепловым потоком из недр и динамикой литосферы. Красным цветом показана линия 50 % отклонений.

Теоретический расчет (ф-ла 4) выполнен при различных значениях тепловых параметров нижнего слоя литосферы:

зеленая линия –  $\alpha_2 = 2 \times 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ ,  $\lambda_2 = 8 \text{ Вт/м К}$ ,  $q_{\text{фон}} = 70 \text{ мВт/м}^2$ ;  
 желтая линия –  $\alpha_2 = 4 \times 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ ,  $\lambda_2 = 9 \text{ Вт/м К}$ ,  $q_{\text{фон}} = 52 \text{ мВт/м}^2$ ;  
 голубая линия –  $\alpha_2 = 6 \times 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ ,  $\lambda_2 = 30 \text{ Вт/м К}$ ,  $q_{\text{фон}} = 57 \text{ мВт/м}^2$ .

лось, что подобранные величины теплофизических параметров в нижней толще значительно превышают характерные для приповерхностного слоя.

#### 4. Сопоставление теории и эксперимента

Сравнивая рассчитанные значения теплового потока с измеренными, мы убеждаемся в их соответствии, рис. 4.

Методически расчет теплового потока проводился по формуле (4), с подбором глубинных теплофизических параметров. Детальный расчет проведен для двух наиболее изученных аномалий теплового потока – Предкавказской и Русской, ассоциируемых с наличием конвективных ячеек в мантии (Khrstoforova et al., 1996).

На каждой из них выделялись произвольные направления, вдоль которых через равные расстояния снимались значения  $V$  с карты современных вертикальных движений земной коры (Мещеряков, 1973). Значения скоро-

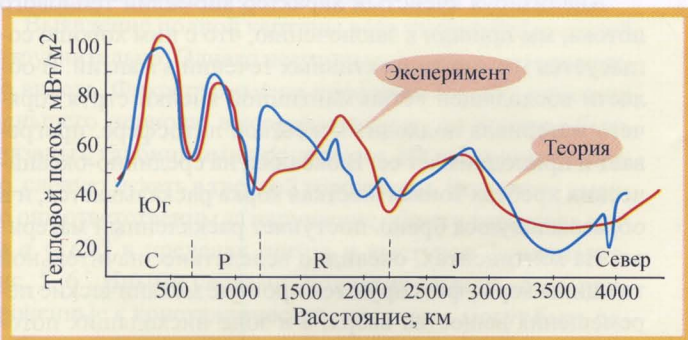


Рис. 4. Экспериментальное и теоретическое (при наличии вертикальных движений литосферы – ф-ла 4) распределение теплового потока вдоль профиля: Московская синеклиза – Кавказ.

Выделены ячейки теплового потока: J – Ярославская ( $\alpha_2 = 8 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ ,  $\lambda_2 = 28 \text{ Вт/м К}$ ,  $q_{\text{фон}} = 68 \text{ мВт/м}^2$ ); R – Русская ( $\alpha_2 = 8 \cdot 10^{-6}$ ,  $\lambda_2 = 20$ ,  $q_{\text{фон}} = 67$ ); P – Предкавказская ( $\alpha_2 = 4 \cdot 10^{-6}$ ,  $\lambda_2 = 9$ ,  $q_{\text{фон}} = 40$ ); C – Большого Кавказа ( $\alpha_2 = 7 \cdot 10^{-6}$ ,  $\lambda_2 = 9$ ,  $q_{\text{фон}} = 55$ ).

сти вводились в расчет. Теплопроводность верхнего слоя до 5 км  $\lambda_1 = 2.8 \text{ Вт/м К}$ . Подошва литосферы – 70 км для Предкавказской и 80 км для Русской ячеек. Фоновый тепловой поток определялся по графикам  $q = f(r)$ .

На рисунках 4 – 6 приведены экспериментальные и рассчитанные значения тепловых потоков. Независимо от величины подобранных коэффициентов, на всех графиках фиксируется их синхронное изменение.

Однако, добиваясь совпадения параметров по абсолютной величине, мы вынуждены вводить теплофизические константы, явно завышенные по сравнению с приповерхностными. Заданная теплопроводность нижнего слоя литосферы изменяется от 8 до 20 Вт/м К. Варьируя некоторые параметры, например, мощность литосферы, или вводя вариации фонового потока при фиксированном значении скорости, мы можем добиться уменьшения  $\alpha_2$  и  $\lambda_2$ ; но, с другой стороны, не кажутся ли нам значения  $\lambda_2$  порядка 8 – 13 Вт/м К такими уж нереальными?

Геофизические оценки теплопроводности в литосфере базируются, в основном, на лабораторном эксперименте. Например, для оливинов  $\lambda_2 = 2 - 3 \text{ Вт/м К}$ . Однако, отождествление лабораторных условий изучения минералов с природными, даже с учетом высоких давлений и температур, может привести к значительным ошибкам. Размер образцов, на шесть порядков отличающийся от

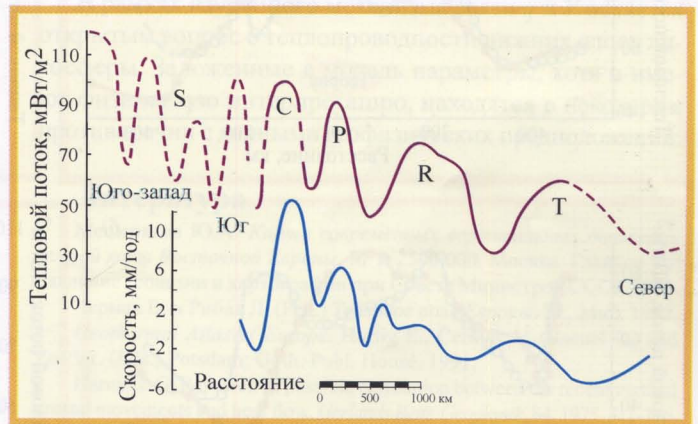


Рис. 3. Распределение теплового потока и скорости современных вертикальных движений земной коры вдоль профиля: Печорская синеклиза – Волго-Уральская антеклизы – Кавказ – Апшерон – Средиземное море. Выделены ячейки теплового потока: Т – Северная, R – Русская, P – Предкавказская, С – Большого Кавказа, S – Средиземноморские. Данные для построения S-ячеек взяты из работы (Чермак и Рибак, 1982). Данные скорости взяты с карты (Мещеряков, 1973). Здесь и далее привязку профилей см. в статье Н. Христофоровой, Конвективные ячейки в мантии..., рис. 2 (Георесурсы, 1/5, 2001).

мощности исследуемой толщи, приводит к совершенно иным краевым условиям. (Такого рода эффекты хорошо известны в физике фононов – эффект «узкого горла», или в химических технологических процессах). Иные условия могут быть также обусловлены наложением необратимых процессов, происходящих в керновом материале.

Заметим, что резкое увеличение теплопроводности некоторых типов горных пород, например, оливинов, наблюдается и в лабораторном эксперименте при высоких температурах, которые характерны для верхней мантии (Kawada, 1964; Kanamori et al., 1968; May, 1976).

Используем для нижней литосферы метод определе-

ния  $\lambda$  по скорости распространения сейсмических волн (Khristorova et al., 1996):

$$\lambda = 1/3 c \rho \tau V^2$$

где  $c$  – теплоемкость,  $\rho$  – плотность,  $\tau$  – время релаксации фононов. Скорость продольных сейсмических волн достигает в нижних слоях литосферы 8500 м/с.

Подобрана модель со следующими параметрами:  $c = 0.8 \cdot 10^3$  Дж/кгК,  $\rho = 3.5 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>,  $\tau = 1.4 \cdot 10^{-13}$  с (среднее для минералов). В этом случае  $\lambda_2 = 9$  Вт/мК.

Несмотря на некоторую неопределенность в подборе данных, на глубине существует анизотропия теплофизических свойств. Так, теплопроводность нижнего слоя литосферы в южных районах Предкавказья стабильно выше, чем в северных, на 2–5 Вт/мК.

На фоне хорошей коррелируемости рассчитанных и экспериментальных параметров особый интерес вызывают немногие исключения, наблюдаемые на участках сравнительно небольших размеров. Это, как правило, зоны с резким увеличением скорости поднятий земной коры при нормальных тепловых потоках, соответствующих об-

литосферы имеют одинаковую природу. Соответствующий эксперимент и результаты теоретического моделирования высвечивают реальную зависимость между ними. И, по всей видимости, это не единственные параметры, характеризующие тепло- и массоперенос в литосфере, которые связаны между собой.

Рассматривая механизм связи теплового потока со скоростью неотектонических движений, мы должны учесть, что имеем дело с медленными крупномасштабными процессами, развивающимися в твердой оболочке Земли. При таких условиях движения со скоростью миллиметры в год следует признать достаточно эффективными в масштабах геологического времени. Как пример аналогии, можно привести данные по движению подземных вод. Вертикальная фильтрация со скоростью см/год приводит к появлению конвективной составляющей теплового потока, которая существенно искажает его глубинную компоненту, на 30–70% (Neprimerov et al., 1989). Перенос тепла, вызванный перемещением литосферной плиты со скоростью мм/год при наблюдаемых вертикальных градиентах  $T$  также может быть весьма значитель-

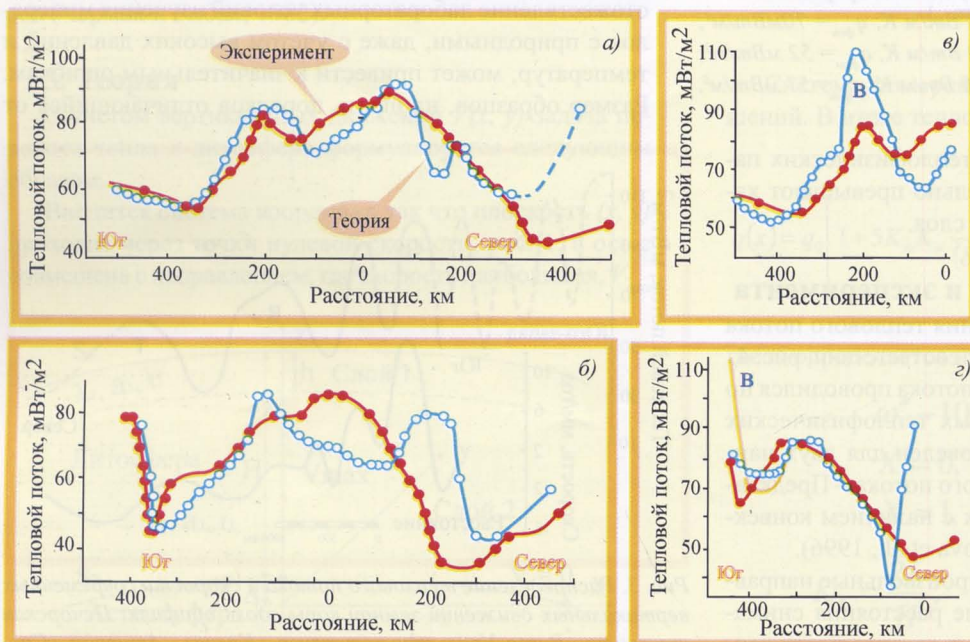


Рис. 5. Экспериментальное (красные линии) и теоретическое (синие линии) при наличии вертикальных движений литосферы, ф-ла (4) распределения теплового потока через Предкавказскую ячейку.  
 а) Черное море – Ставропольский свод – Прикаспийская впадина. Южная ветвь:  $a_2 = 4.5 \cdot 10^{-6}$  м<sup>2</sup>/с,  $\lambda_2 = 15$  Вт/мК,  $q_{\text{фон}} = 60$  мВт/м<sup>2</sup>. Северная ветвь:  $3.5 \cdot 10^{-6}$ ; 12; 55.  
 б) Каспийское море – Ставропольский свод – Донецкий бассейн. Южная ветвь:  $3.5 \cdot 10^{-6}$ ; 10; 57. Северная ветвь:  $2.7 \cdot 10^{-6}$ ; 10; 50.  
 в) Адыгейский выступ – Ставропольский свод – Вал Карпинского. Южная ветвь:  $2 \cdot 10^{-6}$ ; 8; 70;  $7.4 \cdot 10^{-6}$ ; 25; 70. Северная ветвь:  $3.9 \cdot 10^{-6}$ ; 15; 57.5. В – выступы фундамента.

щей, региональной картине изменения  $q$ . Такая ситуация характерна для выступов кристаллического фундамента: Азовского, Минераловодского, Адыгейского, рис. 5

Аналогичные результаты получены для Русской аномалии. Здесь серьезное отклонение теории от эксперимента наблюдается только по юго-западному профилю ячейки, проходящему через Воронежский кристаллический массив, рис. 6б. Обилие частых, разнонаправленных движений на фоне плавного, регионального изменения теплового потока могло бы заставить усомниться в правильности определения того или другого параметра, если бы не характерное вообще для всех щитов и выступов фундамента отклонение от закономерной связи  $V = f(q)$ .

## 5. Механизм связи $V$ и $q$

Рассмотренный материал исследований свидетельствует о том, что процессы, формирующие пространственно-периодическую структуру поля глубинного теплового потока и современных вертикальных движений

ним и сопоставим с кондуктивной теплопередачей.

Анализируя ячеистый характер аномалий теплового потока, мы пришли к заключению, что с ним хорошо согласуется модель конвективных течений в мантии. В области восходящей ветви мантийной ячейки струя горячего материала подходит к жесткой литосфере, прогревает и приподнимает ее. В океанах, на срединно-океанических хребтах тонкая жесткая корка раскалывается, и в образовавшуюся брешь поступает раскаленный материал. На континентах, очевидно вследствие значительной толщины коры, фиксируются простые механические перемещения вещества вверх, а в зоне нисходящих потоков – вниз. Прогрев масс приводит к тепловому расширению частиц, т.е. уменьшению их плотности и, как следствие, поднятию литосферы. Увеличение плотности частиц в зонах охлаждения сопровождается их опусканием. Заметим, что модель, рассмотренная в данной работе, не учитывает иные механизмы выделения тепла, связанные с движением масс, например, эффект Джоуля–Томпсона.

В предложенной модели выделена та составляющая деформаций поверхности, которая связана с течениями вещества в астеносфере. Это подтверждается периодом ( $T$ ) кривых  $q, V = f(r)$ , рис. 3, где  $T/2 = 300 - 700$  км.

Однако скорость современных неотектонических движений определяется рядом факторов:

— деформациями, происходящими непосредственно в твердой, хрупкой литосфере, это могут быть динами-

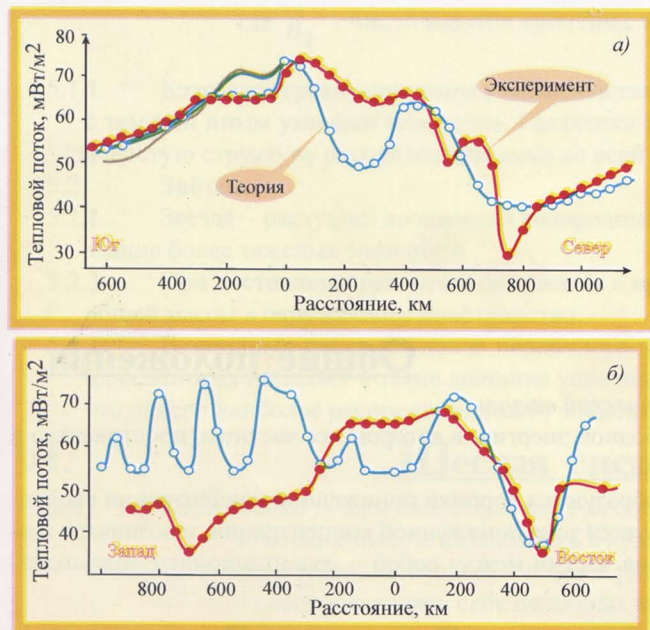


Рис. 6. Экспериментальное (красные линии) и теоретическое (при наличии вертикальных движений литосферы – ф-ла 4) распределения теплового потока через Русскую ячейку.

а) Каспийское море – Прикаспийская впадина – Пермско-Башкирский свод. Южная ветвь: 1)  $\alpha_2 = 6 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ ,  $\lambda_2 = 18 \text{ Вт/м К}$ ,  $q_{\text{фон}} = 61 \text{ мВт/м}^2$ ; 2)  $5 \cdot 10^{-6}$ ; 9; 59; 3)  $8 \cdot 10^{-6}$ ; 18; 59. Северная ветвь:  $8 \cdot 10^{-6}$ ; 28; 64. б) Воронежский свод – Прикаспийская впадина – Предуральский прогиб. Западная ветвь:  $1 \cdot 10^{-6}$ ; 9; 54. Восточная ветвь:  $6 \cdot 10^{-6}$ ; 9; 54.

ческие процессы, которые развиваются обособленно в осадочной толще, фундаменте, или земной коре в целом;

— деформациями нижней границы литосферы, которая подвергается динамическому воздействию вязкопластичной мантии;

— деформациями всей толщи коры и мантии, связанными с динамикой жидкого ядра.

Выявление полной картины всех структурных связей затруднительно. Однако некоторые закономерности можно видеть. Фиксируемые на профилях  $V = f(r)$  вариации меньшего периода, высокочастотные, не должны быть связаны с глубинными процессами. Их причину, очевидно, следует искать в твердой толще коры. Возможно именно они ответственны за нарушение общего характера связи  $q = f(V)$  в пределах щитов и выступов фундамента, рис. 5, 6. Иными словами, поднятия земной коры, приуроченные к кристаллическим массивам, могут быть результатом процессов (например, интрузий), развивающихся в гранитной или базальтовой толщах.

Изменения теплового потока и скорости, выраженные на графиках 3, 4 как постоянная наклонная составляющая кривых  $q, V = f(r)$ , являются крупнопериодными вариациями, которые могут быть связаны с динамикой внешнего ядра.

## Заключение

Проведенные исследования несколько проясняют вопрос, связанный с пространственной неоднородностью поля глубинного теплового потока. Оно имеет периодическую структуру и хорошо коррелирует со скоростью современных вертикальных движений земной коры. Для его описания предложена адекватная математическая модель, которая учитывает конвективный перенос тепла при непосредственном перемещении литосферной плиты.

Из сравнения теоретических и экспериментальных результатов следует, что основные вариации теплового потока могут быть обусловлены вертикальными движениями литосферы. По всей вероятности, они являются следствием деформации ее нижней поверхности, связанной с динамическим воздействием глубинных пластичных слоев. Этот вывод хорошо согласуется с моделью конвективных течений в мантии. Они представляются в виде поднимающихся и опускающихся потоков вещества, которые формируют пространственную структуру ячеек с характерным размером 300 – 700 км, сопоставимым с размером главных вариаций неотектонических движений.

Как исключение, рассматривается несоответствие теплового потока и скорости вертикальных поднятий на щитах и выступах фундамента, которое может свидетельствовать о наложенных движениях в толще земной коры.

В рамках изученного механизма связи  $q$  и  $V$  остается открытым вопрос о теплопроводности нижних слоев литосферы. Заложенные в модель параметры, хотя и имеют физическую интерпретацию, находятся в некотором противоречии с данными геофизических предположений.

## Литература

- Мещеряков Ю.А. Карта современных вертикальных движений земной коры Восточной Европы. М 1: 2500 000. Москва. Главное управление геодезии и картографии при Совете Министров СССР. 1973.
- Чермак В. и Рибак Л. (Ред.) *Тепловое поле Европы*. М., Мир. 1982.
- Geothermal Atlas of Europe*. Hurtig E., Čermák V., Haenel R., and Zui V.I. (Eds.) Potsdam: Goth. Publ. House. 1991.
- Harnisch G. Research of possible correlation between the recent vertical crustal movements and heat flow. *Gerlands Beitr. Geophysik*, 84. 1975. 311-316.
- Kawada K. Studies of the thermal state of the Earth. Variation of thermal conductivity of rocks. *Bull. Earthquake Res. Inst. Tokyo*. 42. 1964. 631-638.
- Kanamori H., Mizutani H. and Fujii N. Thermal diffusivity measurement of rock-forming minerals from 300 to 1100 K. *J. Geophys. Res.*, 73. 1968. 595-605
- Христофорова Н.Н., Непримеров Н.Н. и Куштанова Г.Г. Heat flow and mantle convection: geometry of flows. *Proc. Int. Conf. Geometrization of Physics II*, Kazan State University, Kazan. 1996. 104-118.
- May S. Thermal conductivity and temperature in the upper mantle of the Earth. *Acta Geophys. Polonica*, 24. 1976. 25-49.
- Morgan W. J. Heat flow and vertical crustal movements. *Petroleum and Global Tectonics*. Princeton University Press. 1975.
- Непримеров Н. Н., Христофорова Н. Н., Куштанова Г. Г. Correlation of heat flow with tectonics (convective cells) and hydrogeological fields. *Revista Brasileira de Geofisica*. 7 (2), 1989. 129-139.
- Vyskočil P. Heat flow, crustal thickness and recent vertical movements. *Terrestrial Heat Flow in Europe*. Springer-Verlag, New York. 1979.

Галия  
Гатинишна  
Куштанова

