

# Исследование величины аномалий теплового потока в тылу зон субдукции в зависимости от угла и скорости субдуцирующей плиты

С. В. Гаврилов<sup>1</sup>, А. Л. Харитонов<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Институт физики Земли им. О. Ю. Шмидта РАН, Москва  
gavrilov@ifz.ru

<sup>2</sup>Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н. В. Пушкова РАН, Москва  
ahariton@izmiran.ru

Актуальность материала, изложенного в этой статье, связана с выявлением зависимости величины аномального теплового потока от угла и скорости литосферной субдукции и предположением постоянства эффективной вязкости материала верхней мантии и кондуктивного механизма выноса диссипативного тепла. Метод, на основе которого получено аналитическое решение уравнения переноса диссипативного тепла в мантийном клине над полого субдуцирующей литосферной плитой, позволяет оценить величину аномального теплового потока, выносимого к дневной поверхности из мантийного клина в тылу зон литосферной субдукции. В результате на примере Амурской и Адриатической плит, для которых современными геодезическими методами определена скорость литосферной субдукции (порядка 10 мм в год) и по сейсмическим данным – углы субдукции (25–30 градусов), установлена справедливость полученной зависимости аномального теплового потока от угла и скорости субдукции и оценена ранее не определявшаяся скорость субдукции Черноморской микроплиты под Крымский полуостров (около 3 мм в год). При полученной скорости вещества в мантийном клине у кровли мантии восходящий кондуктивный поток может обеспечить наблюдаемый вынос тепла и углеводородов из мантии к дневной поверхности и формирование месторождений углеводородов.

**Ключевые слова:** угол, скорость субдукции, тепловой поток, диссипативный нагрев.

## Investigation of dependence of the heat flux anomalies in the rear of subduction zones on the angle and velocity of subduction

S. V. Gavrilov<sup>1</sup>, A. L. Kharitonov<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Schmidt Institute of Earth Physics RAS, Moscow

<sup>2</sup>Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radio Waves Propagation RAS, Moscow

The relevance of the material presented in this article is related to the identification of the dependence of the anomalous heat flux magnitude on the angle and velocity of lithospheric subduction, and assuming the constancy of the effective viscosity of the upper mantle material and the conductive mechanism of dissipative heat transfer. We analytically solved the equation of dissipative heat transport in a mantle wedge over a flatly subducting lithospheric plate on the basis of the method estimating the anomalous heat flux carried to the day surface from the mantle wedge in the rear of subduction zones. As a result, exemplified by Amur and Adriatic plates, for which the velocity of subduction is determined by modern geodetic methods (approximately 10 mm per year) and the angle of subduction – from seismological data (25–30 degrees), the obtained dependence of the anomalous heat flux on the angle and velocity of lithospheric subduction is proved valid. The previously unmeasured velocity of the Black Sea microplate subduction under the Crimea was estimated of 3 mm per year. With the obtained velocity of matter in the mantle wedge at the roof of the mantle, the upward conductive flow can provide the observed removal of heat and hydrocarbons from the mantle to the day surface and the formation of hydrocarbon deposits.

**Keywords:** angle, velocity of subduction, heat flux anomalies, dissipative heating.

### Введение

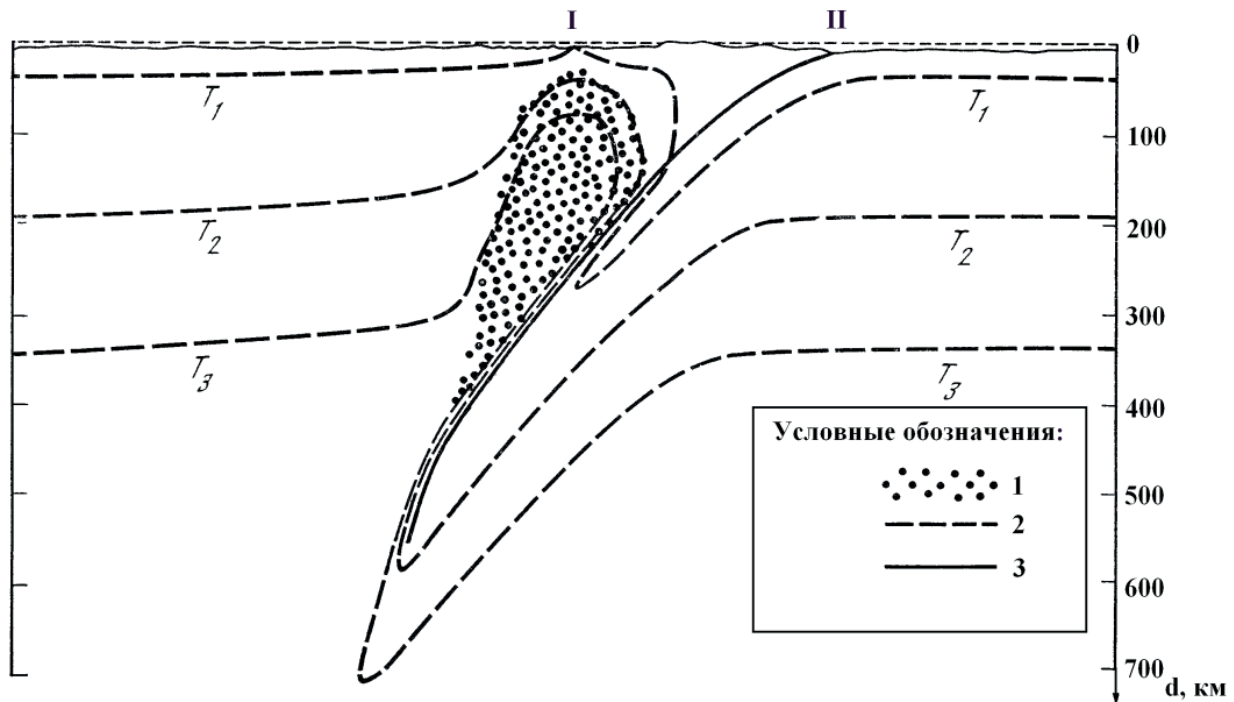
Рассматриваемая в данной статье проблема весьма актуальна среди геологов и геофизиков, изучающих проявления аномального кондуктивного теплового потока в конвергентных тектонических зонах. Термическое поле, наблюдаемое в зонах литосферной субдукции и палеосубдукции при различных углах наклона сейсмофокальной зоны, обсуждалось еще в начале 70-х годов прошлого века [10–12, 14, 16–22]. Известно, что в тылу многих зон литосферной субдукции, позади передовой островной вулканической цепи и параллельно глубоководному желобу обычно на-

блюдаются 2D-зоны повышенного теплового потока [9, 10, 13–18, 20, 22]. В этих зонах располагаются центры окраинного раздвигания литосферы (и окраинные бассейны) или формируются грабены, то есть зоны растяжения литосферы [9, 11, 13–17, 18, 21, 22].

Судя по рис. 1, а также опираясь на данные [10], можно сказать, что кондуктивный тепловой поток, соответствующий сгущению изотерм у поверхности Земли, максимален на расстояниях порядка 100–300 км от зоны субдукции. Поскольку субдуцирующие блоки литосферы экранируют тепловой поток из нижележащей мантии, можно предположить, что аномалии те-

**Для цитирования:** Гаврилов С. В., Харитонов А. Л. Исследование величины аномалий теплового потока в тылу зон субдукции в зависимости от угла и скорости субдуцирующей плиты // Вестник геонаук. 2022. 12(336). С. 38–43. DOI: 10.19110/geov.2022.12.5

**For citation:** Gavrilov S. V., Kharitonov A. L. Investigation of dependence of the heat flux anomalies in the rear of subduction zones on the angle and velocity of subduction. Vestnik of Geosciences, 2022, 12(336), pp. 38–43, doi: 10.19110/geov.2022.12.5



**Рис. 1.** Схема тектонического строения зоны субдукции литосферной плиты с кондуктивным механизмом выноса диссипативного тепла [7]: I — междууговый бассейн, II — глубоководный желоб.

Условные обозначения: 1 — область зоны аномальных температур в зоне литосферной субдукции; 2 — изображение положения изотерм ( $T_1, T_2, T_3$ ) с кондуктивным механизмом выноса диссипативного тепла в мантийной среде зоны литосферной субдукции; 3 — обозначение зоны Заварицкого – Беньофа

**Fig. 1.** Scheme of the tectonic structure of the lithospheric plate subduction zone with the conductive mechanism of dissipative heat transfer [7]: I — long-distance pool, II — deep-water trough.

Symbols: 1 — area of the zone of abnormal temperatures in the lithospheric subduction zone; 2 — image of the position of isotherms ( $T_1, T_2, T_3$ ) with a conductive mechanism for dissipative heat removal in the mantle medium of the lithospheric subduction zone; 3 — designation of the Zavaritsky – Benioff zone

плового потока в тылу зон литосферной субдукции формируются в мантийном клине за счет диссипативного тепловыделения в вязком течении, вызываемом в астеносфере пододвигающейся плитой. Чтобы читателям-геологам было понятно, что такое число Рэлея ( $Ra$ ) [16, 24], используемое в данной статье, приведем его краткое определение. Это безразмерное число, определяющее поведение астеносферы как среды подобной жидкости под воздействием вертикального перепада температуры ( $\Delta T$ ).

$$Ra = (g \times \alpha \times \rho \times \Delta T \times L^3) / (\eta \times \chi), \quad (1)$$

где  $g$  — значение ускорения свободного падения в зоне литосферной субдукции;  $L$  — характеристический вертикальный размер области мантии в зоне литосферной субдукции;  $\Delta T$  — разность абсолютных температур (перепад температуры) в вертикальном сечении мантийного субдукционного клина;  $\eta$  — коэффициент динамической вязкости;  $\chi$  — коэффициент температуропроводности;  $\alpha$  — коэффициент теплового расширения мантийной среды;  $\rho$  — значение плотности горных пород мантийной среды.

Приведем некоторые пояснения относительно применяемых в этой статье терминов, которые обычно используются в работах, связанных с геодинамическим моделированием движений литосферных плит. Например, приближение бесконечного числа Прандтля и его численное значение, используемое авторами при расчетах в данной модели, имеет вид согласно [16, 24]:

$$Pr = [\eta / (\rho \times \chi)] > 10^{25}. \quad (2)$$

Физический смысл числа Прандтля ( $Pr$ ), если говорить простыми словами, состоит в приближении, при котором не учитываются силы инерции по сравнению с вязкими силами и силой тяжести ( $g$ ). Поэтому это приближение часто применяется при моделировании движений в верхней мантии. Число Прандтля — это один из критериев подобия тепловых процессов в жидкостях, который учитывает влияние физических свойств теплоносителя на теплоотдачу.

Физический смысл приближения Буссинеска — это использование реально рассматриваемых физико-химических параметров среды верхней мантии как значений, соответствующих параметрам несжимаемой жидкости [16, 24]. Оно обычно применяется при геодинамическом моделировании процессов в верхней мантии до глубины 700 км. Например, уравнения движения жидкости в приближении Буссинеска — это часто применяемая модель для описания движений в жидкостях, которым уподобляется среда астеносферы. Основная идея приближения Буссинеска состоит в особенности учёта зависимости плотности ( $\rho$ ) только от абсолютной температуры ( $T$ ).

В настоящей работе рассмотрены полученные ранее авторами аналитические решения, описывающие термомеханическое состояние среды в приближении однородной вязкой жидкости в мантийном клине над полого субдуцирующей литосферной плитой, и на основе этих решений даны оценки аномального тепло-

вого потока, восходящего из мантийного клина к подошве настиляющей литосферы и далее к дневной поверхности.

### Описание аналитической модели

Простая термомеханическая модель мантийного клина между «подошвой» субдуцирующей океанической литосферной плиты, пододвигающейся под континентальную литосферную плиту под углом  $\beta$  со скоростью  $V$ , может быть построена как модель вязкого течения в мантийном клине  $AOB$  (рис. 2), вынужденного движением полуплоскости  $OB$ , моделирующей верхнюю границу субдуцирующей литосферной плиты.

Материал мантийного клина считается однородной несжимаемой жидкостью с постоянным коэффициентом вязкости  $\eta$ . В приближении однородной среды движение вещества в мантийном клине определяется формулами [20], согласно которым компоненты скорости  $U$  (горизонтальной) и  $W$  (вертикальной) равны ( $\psi$  — функция тока):

$$U = V_x = -\frac{\partial \psi}{\partial z} = -\text{Darctg} \frac{x}{z} + \frac{Cx + Dz}{x^2 + z^2} x - B,$$

$$W = V_z = \frac{\partial \psi}{\partial x} = \text{Carctg} \frac{x}{z} + \frac{Cx + Dz}{x^2 + z^2} z + A, \quad (3)$$

где при условиях невозможности проскальзывания на поверхностях  $OA$  и  $OB$ :

$$C = -V \frac{\beta \sin \beta}{\beta^2 - \sin^2 \beta}, \quad (4a)$$

$$D = V \frac{\beta \cos \beta - \sin \beta}{\beta^2 - \sin^2 \beta}, \quad (4б)$$

$$A = V \frac{\frac{\pi}{2} \beta \sin \beta}{\beta^2 - \sin^2 \beta}, \quad (4в)$$

$$B = V \frac{\left(\frac{\pi}{2} - \beta\right) \sin \beta - \frac{\pi}{2} \beta \cos \beta}{\beta^2 - \sin^2 \beta}. \quad (4г)$$

Константы  $A$  и  $B$  в формулах (3 и 4) выражаются через  $C$  и  $D$ , а сами величины  $C$  и  $D$  также определяются через граничные условия невозможности проскальзывания на поверхностях литосферных плит. Необходимо отметить, что обозначения  $A$  и  $B$  на рис. 2 соответствуют определенным точкам на оси  $x$  и оси  $V$  (рис. 2), а не константам в формулах 3 и 4. Стационарное уравнение переноса тепла можно представить в следующем виде:

$$V_x \frac{\partial T}{\partial x} + V_z \frac{\partial T}{\partial z} = \chi \Delta T + \frac{1}{\rho c_p} \tau_{ik}^2 / 2\eta, \quad (5)$$

где  $\tau_{ik}$  — тензор вязких напряжений,  $\eta$  — коэффициент вязкости пород мантийной среды,  $\rho$  — плотность пород мантийной среды,  $c_p$  — удельная теплоемкость пород мантийной среды при постоянном давлении,  $\chi$  — коэффициент температуропроводности пород мантийной среды,  $\Delta$  — оператор Лапласа в координатах  $x, z$ ,  $V_x$  и  $V_z$  — компоненты скорости вдоль осей  $x$  и  $z$  на рис. 2.

Смысл индексов  $i, k$  (принимающих обозначения координат  $x, z$ ) у тензора вязких напряжений ( $\tau_{ik}$ ) — это обозначение силы, действующей на единичный элемент поверхности, где сила направлена по оси  $i$ , причем нормаль к элементу поверхности направлена по оси  $k$ . Например,  $\tau_{xz}$  есть вязкая сила, действующая со стороны вязкой жидкости на единичный элемент поверхности в направлении координатной оси  $z$ , причем внешняя нормаль к этому элементу поверхности направлена по оси  $x$ . Величина  $\tau_{ik}^2$  есть сумма квадратов всех компонент тензора вязких напряжений, то есть в случае рассматриваемой в статье модели ее можно представить как:

$$\tau_{ik}^2 = \tau_{xx}^2 + \tau_{zz}^2 + 2\tau_{xz}^2. \quad (6)$$

В (5) не учитывается нагрев за счет радиоактивных источников в коре и предполагается, что тепло генерируется только благодаря вязкому трению в мантийном клине. Тепловой поток радиогенного происхождения может быть добавлен отдельно. Последнее слагаемое в правой части (5) описывает мощность диссипативного тепловыделения в единице объема. Уравнение (5) с учетом (3), (4), (6) приобретает вид:

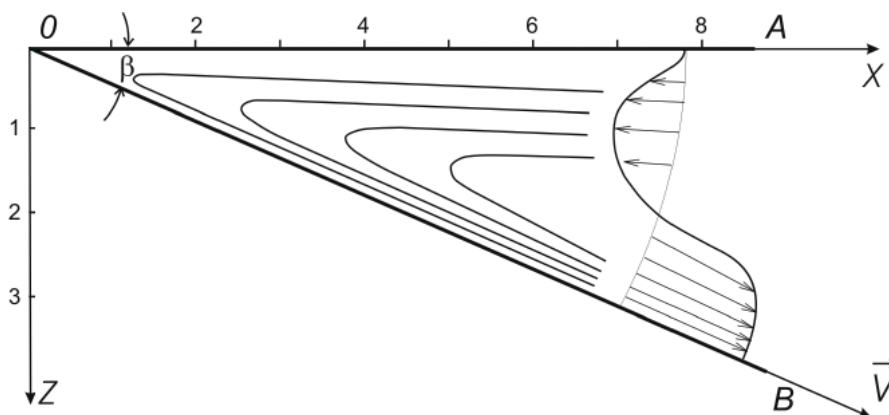


Рис. 2. Схематическое поперечное сечение области субдукции литосферной плиты, происходящей под углом  $\beta$  со скоростью  $V$ . Линиями тока показано движение вещества в мантийном клине  $AOB$ , вызванное движением субдуцирующей литосферной плиты  $OB$

Fig. 2. Schematic cross-section of a subduction of lithospheric plate region occurring at an angle  $\beta$  with a velocity  $V$ . The streamlines show the movement of matter in the  $AOB$  mantle wedge caused by the movement of the subducting lithospheric plate  $OB$



$$\begin{aligned} & \left( D \left( \frac{xz}{x^2+z^2} + \operatorname{arctg} \frac{z}{x} \right) - C \frac{z^2}{x^2+z^2} \right) \frac{\partial T}{\partial x} + \\ & + \left( C \left( \frac{xz}{x^2+z^2} - \operatorname{arctg} \frac{z}{x} \right) + D \frac{z^2}{x^2+z^2} \right) \frac{\partial T}{\partial z} = \\ & = \chi \Delta T + \frac{1}{\rho c_p} \frac{4\eta(Cz - Dx)^2}{(x^2+z^2)^2}, \end{aligned} \quad (7)$$

где учитываются значения из (6):  $\tau_{xx} = \eta \times (\partial V_x / \partial x)$ ;  $\tau_{zz} = \eta \times (\partial V_z / \partial z)$ ;  $\tau_{xz} = \tau_{zx} = \eta \times [(\partial V_x / \partial z) + (\partial V_z / \partial x)]$ .

Уравнение (7) решается при  $0 < x < \infty$ ,  $0 < z < x \times \operatorname{tg} \beta$  с граничными условиями для температуры  $T = T_m$  при  $z = 0$ ,  $z = x \times \operatorname{tg} \beta$ , где  $T_m$  — температура субсолидуса. Граничные условия  $T = T_m$  вдали от глубоководного желоба (т. е. на стороне  $AB$  при  $x \rightarrow \infty$  на рис. 2) также справедливы, поскольку тепловая энергия, соответствующая температуре, отличной от  $T_m$ , на стороне  $AB$ , достаточно удаленной от глубоководного желоба, передается литосферным плитам, так как диссипативное тепловыделение при  $x \rightarrow \infty$  спадает до нуля. Следует подчеркнуть, что все переменные в уравнениях настоящей статьи размерны, кроме оговоренных особо. Еще раз следует отметить, что константы  $A$  и  $B$  в формулах (3, 4а–4г), выражаются через  $C$  и  $D$  и через граничные условия невозможности проскальзывания на поверхностях литосферных плит.

Последнее слагаемое в правой части (7) пропорционально объемной мощности диссипативного тепловыделения и с константами  $C$  и  $D$  (4) при  $\beta < (\pi/4)$  максимально на нижней границе  $OB$  мантийного клина. В силу этого температура в мантийном клине достигает максимума  $T = T_{\max}(x)$  вблизи субдуцирующей литосферной плиты на расстоянии  $\delta(x)$  над ее поверхностью. В [6] получена безразмерная оценка квадрата этого расстояния для полезной субдуцирующей литосферной плиты при  $\beta < (\pi/5)$  (то есть  $\beta < 36^\circ$ ):

$$\delta^2 = \frac{2\eta(D - Ct/2)^2}{[D^2 - (D - Ct)^2 \cos^6 \beta] \cdot \left( t - 2t - \frac{x}{\chi} [(C + Dt/2) \operatorname{arctg}(t/2) - Ct/2] \right)}. \quad (8)$$

Величина  $\delta$  измеряется по оси  $\zeta = z/x$ , причем максимальная температура в вертикальном сечении мантийного клина составляет:

$$T_{\max}(x) = T_m + \frac{2\eta}{\kappa} \delta^2 (D - Ct)^2 \cos^6 \beta, \quad (9)$$

где  $t = \operatorname{tg} \beta$ ,  $\kappa = 3.2 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$  — коэффициент теплопроводности мантии [23]. Сравнение с численным решением уравнения (6) показывает, что точность оценок (7) и (8) при  $x > 100 \text{ км}$  не хуже 10 %. Согласно (8), квадрат безразмерной толщины  $\delta$  термического пограничного слоя при  $\beta = 30, 25$  и  $15^\circ$  составляет:

$$\begin{aligned} \delta^2(x, \beta = \pi/6) &= 1 / [7.27 + 0.0117 \times x(\text{км}) \times V(\text{мм/год})], \\ \delta^2(x, \beta = 25^\circ) &= 1 / [19.30 + 0.0189 \times x(\text{км}) \times V(\text{мм/год})], \\ \delta^2(x, \beta = \pi/12) &= 1 / [117.18 + 0.0348 \times x(\text{км}) \times V(\text{мм/год})], \end{aligned} \quad (10)$$

где  $\chi = 0.5 \text{ мм}^2 \cdot \text{с}^{-1}$  [24]. Приведенные в (10) углы субдукции соответствуют подвиганию Амурской литосферной микроплиты под Охотскую [3], Адриатической литосферной микроплиты под Евроазиатскую [2] и Черноморской литосферной микроплиты под Скифскую [4, 5, 17].

Согласно (9) перепад температуры  $\Delta T = T_{\max}(x) - T_m$  в вертикальном сечении мантийного клина  $[(2 \times (\eta/\kappa) \times \delta^2 \times [D - (C \times t)]^2 \times \cos^6 \beta)]$  пропорционален коэффициенту вязкости, и локальное число Рэлея  $Ra = [(g \times \alpha \times \rho \times \Delta T \times (x \times t)^3) / (\eta \times \chi)]$  в приближении однородной среды не зависит от вязкости. С учетом (10) получаем:

$$Ra = 2 \times \alpha \times \rho \times g \times (x \times t)^3 \times \delta^2 \times (D - C \times t)^2 \times \cos^6 \beta / (\kappa \times \chi), \quad (11)$$

где  $g$  — ускорение силы тяжести,  $\alpha$  — коэффициент теплового расширения,  $F(\pi/6) = 7.27$ ,  $G(\pi/6) = 0.0117$  и так далее согласно (10). Отсюда получаем:

$$\begin{aligned} Ra &= 4 \times 10^{-7} \times t^3 \times (D^* - C^* t)^2 \times \cos^6 \beta \times \\ &\times \frac{x^3(\text{км}) \times V^2(\text{мм/год})}{F(\beta) + G(\beta) \times x(\text{км}) \times V(\text{мм/год})}, \end{aligned} \quad (12)$$

где  $D^* = (D/V)$ ,  $C^* = (C/V)$  — безразмерные функции  $\beta$ , определяемые из (4а–4г) делением на скорость литосферной субдукции  $V$ . Соотношение (12) для числа Рэлея ( $Ra$ ) получается из (11) при численных значениях, принятых в модели, описываемой в данной статье:  $\rho = 3.3 \times 10^3 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3}$ ,  $c_p = 1.2 \times 10^3 \text{ Дж} \cdot \text{кг}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$ ,  $\kappa = 3.2 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$ ,  $\alpha = 3 \times 10^{-5} \text{ К}^{-1}$ ,  $\chi = 0.5 \text{ мм}^2 \cdot \text{с}^{-1}$  [24].

Следует отметить, что локальные числа Рэлея (12) при скорости субдукции  $V = 10 \text{ мм}$  в год оказываются ниже его критического значения  $Ra < 10^5$  при всех расстояниях  $x$ , следовательно, в рамках предлагаемой аналитической модели конвекция в мантийном клине не развивается, а перенос тепла оказывается чисто кондуктивным.

Согласно (10), диссипативный тепловой поток из мантийного клина  $q_c = (\kappa \times \Delta T) / (x \times t)$  и вертикальный перепад температуры  $\Delta T$  пропорциональны коэффициенту вязкости  $\eta$  и составляют:

$$\begin{aligned} q_c(\text{мВт} \cdot \text{м}^{-2}) &= 2 \times 10^{-21} \times \eta(\text{Па} \cdot \text{с}) \times \delta^2 \times \\ &\times (D^* - C^* \times t)^2 \times \cos^6 \beta \times V(\text{мм/год})^2 \times t^{-1} \times (x(\text{км}))^{-1}, \end{aligned} \quad (13)$$

$$\begin{aligned} \Delta T(\text{К}) &= 6 \times 10^{-22} \times \eta(\text{Па} \cdot \text{с}) \times \delta^2 \times (D^* - C^* \times t)^2 \times \\ &\times \cos^6 \beta \times V(\text{мм/год})^2, \end{aligned} \quad (14)$$

причем эти величины зависят от теплопроводности мантии только через зависимость (8).

## Результаты и обсуждение

Согласно приведенным формулам, модельный тепловой поток  $q_c$  при  $\beta = 30^\circ$ ,  $V = 10 \text{ мм} \cdot \text{год}^{-1}$ ,  $x = 250 \text{ км}$ ,  $\eta = 2 \times 10^{23} \text{ Па} \cdot \text{с}$  и прочих параметрах, указанных выше, составляет  $q_c = 60 \text{ мВт} \cdot \text{м}^{-2}$ , что соответствует расположению зоны аномального теплового потока и величине его мантийной составляющей в Охотском море к востоку от острова Сахалин [3]. В этой области происходит субдукция Амурской литосферной микроплиты под Охотскую [3]. Локальное число Рэлея в данной простой модели оказывается ниже критического, то есть конвекция не развивается. Для случая субдукции Адриатической литосферной микроплиты под Евроазиатскую [2],  $\beta = 25^\circ$ ,  $V = 10 \text{ мм} \cdot \text{год}^{-1}$ ,  $x = 250 \text{ км}$ ,  $\eta = 2 \cdot 10^{23} \text{ Па} \cdot \text{с}$ , находим  $q_c = 71 \text{ мВт} \cdot \text{м}^{-2}$ , что соответствует условиям в тылу зоны субдукции Адриатической литосферной микроплиты [2] в области нефтегазонос-

ной провинции Паннония и зоны растяжения Вардар. Наконец, при  $\beta = 15^\circ$ ,  $V = 3$  мм-год<sup>-1</sup>,  $x = 250$  км,  $\eta = 2 \cdot 10^{23}$  Па·с и прочих вышеуказанных параметрах находим  $q_c = 20$  мВт·м<sup>-2</sup>, что согласно [8] соответствует условиям в тылу Горного Крыма, где наблюдается 2D-зона аномального теплового потока, вытянутая параллельно Южному берегу Крыма [7].

В последнем случае перепад температуры в вертикальном сечении мантийного клина равен  $\Delta T \sim 380$  К. Следует отметить, что в неньютоновской модели мантийного клина в зонах субдукции Адриатической [2], Амурской [3] и Черноморской [4, 5, 17] литосферных микроплит происходит конвекция в мантийном клине и зоны аномального теплового потока оказываются более локализованными, а средний коэффициент вязкости ниже [2–5, 17], чем полученный в настоящей работе. Оценка скорости субдукции Черноморской литосферной микроплиты под Крымский полуостров ( $V = 3$  мм-год<sup>-1</sup>) приблизительно в три раза превышает полученную оценку в работе [12].

## Выводы

В случае пологой субдукции предложенная простая аналитическая модель выноса диссипативного тепла из мантийного клина к дневной поверхности позволяет объяснить наблюдаемое расположение зоны 2D аномального теплового потока и величину его мантийной составляющей. При средней вязкости  $2 \cdot 10^{23}$  Па·с модельные скорости субдукции Амурской и Адриатической плит хорошо согласуются со скоростями субдукции, определенными современными геодезическими наблюдениями. Скорость субдукции Черноморской микроплиты под Крымский полуостров, которая ранее наблюдениями не определялась, в предложенной модели составляет в 3 мм в год. В приближении жидкости с постоянной вязкостью модель позволяет оценить средний коэффициент вязкости материала мантии в  $2 \cdot 10^{23}$  Па·с. Значение скорости субдукции Черноморской литосферной микроплиты приблизительно в три раза превышает единственное независимое значение, полученное другими авторами по распределению осадков на дне Черного моря.

Авторы искренне благодарят анонимных рецензентов журнала за большой труд по исправлению недостатков этой статьи.

## Литература

1. Гаврилов С. В. Исследование механизма формирования островных дуг и тылового раздвигания литосферы // Геофизические исследования. 2014. Т. 15. № 4. С. 35–43.
2. Гаврилов С. В., Харитонов А. Л. О формировании аномального теплового потока в бассейне Паннония и зоне Вардар при субдукции Адриатической плиты под Евроазиатскую плиту // International Journal of Professional Science. 2021. № 9. С. 27–39. DOI: 10.54092/25421085\_2021\_9\_27
3. Гаврилов С. В., Харитонов А. Л. О субдукции Амурской микроплиты и конвективном механизме выноса диссипативного тепла и углеводородов из мантийного клина в Охотском море к востоку от острова Сахалин // Вестник Академии наук Республики Башкортостан. 2022. Т. 42. № 1(105). С. 5–12. DOI: 10.24412/1728-5283\_2022\_1\_5-12
4. Гаврилов С. В., Харитонов А. Л. Оценка нефтегазовых перспектив Крымского полуострова как результат геодинамического моделирования зоны субдукции Восточно-Черноморской плиты под литосферу Скифской плиты // Ученые записки Крымского федерального университета имени В. И. Вернадского. Сер. География, Геология. 2021. Т. 7. № 3. С. 279–291. DOI: 10.37279/2413-1717-2021-7-3-279-291
5. Гаврилов С. В., Харитонов А. Л. Геотермодинамическая модель предполагаемой палеозоны литосферной субдукции в районе Черноморской впадины и ее связь с металлогенической зональностью Крыма и Кавказа // Региональная геология и металлогения. 2021. № 87. С. 4–16. DOI: 10.52349/0869-7892-2021-87-04-16
6. Гаврилов С. В., Абботт Д. Х. Термомеханическая модель тепло- и массопереноса в окрестности зоны субдукции // Физика Земли. 1999. № 12. С. 3–12.
7. Карта теплового потока территории СССР и сопредельных районов / Я. Б. Смирнов (ред.). М.: ГУТК, 1980.
8. Г. Ш. Ниметулаева Особенности воздействия природных факторов и их влияние на формирование оползневых процессов Крыма // Культура народов Причерноморья. 2006. № 83. С. 110–113.
9. Сорохтин О. Г., Ушаков С. А. Развитие Земли. Москва: Изд-во Московского университета, 2002. 506 с.
10. Теркотт Д. Л., Шуберт Дж. Геодинамика. М.: Мир, 1985. 732 с
11. Уэда С. Новый взгляд на Землю. М.: Мир, 1980. 216 с.
12. Ушаков С. А., Галушкин Ю. И., Иванов О. П. Природа складчатости осадков на дне Черного моря в зоне перехода к Крыму и Кавказу // Доклады АН СССР. 1977. Т. 233. № 5. С. 932–935.
13. Хуторской М. Д., Поляк Б. Г. Геотермические модели геодинамических обстановок разного типа // Геотектоника. 2014. № 1. С. 77–96.
14. Хуторской М. Д. Тепловой поток в областях структурно-геологических неоднородностей. М.: Наука, 1982. 77 с.
15. Хуторской М. Д., Абизгильдин И. Х., Падучих В. И. Тепловой поток Мугоджар — продолжение Южно-Уральской геотермической аномалии // Геотермия сейсмичных и асейсмичных зон. М.: Наука, 1993. 400 с.
16. Chandrasekhar S. Hydrodynamic and hydromagnetic stability. Oxford, Clarendon, 1961. 654 p.
17. Gavrilov S. V., Kharitonov A. L. Distribution of metallogenic zones of the Caucasus region originated as a result of the subduction of the lithosphere of the Tethys paleo-oceanic plate under the East-European paleo-continental plate // Acta Geodynamica et Geomaterialia. 2021. V. 18. № 2(202). pp. 199-208. DOI: 10.13168/AGG.2021/0014
18. House L. S. and Jacob K. H. Thermal stresses in subducting lithosphere can explain double seismic zones // Nature. 1982. V. 295. pp. 587–589.
19. Khutorskoy M. D., Yarmoluk V. V. Heat flow, structure and evolution of the lithosphere of Mongolia // Tectonophysics. 1989. V. 164. pp. 315–322.
20. MacKenzie D. P. Speculations on the consequences and causes of plate motion // Geophys. J. of Roy. Astron. Soc. 1969. V. 18. pp. 1–32.
21. Pollack B. N., Hurter S., Johnson J. R. The New Global Heat Flow Data Compilation. EOS Trans, AGU. 1990. № 71. pp. 1604.
22. Sawkins F. J. Sulfide ore deposits in relation to plate tectonics // Journ. Geol. 1972. V. 80. No. 4. pp. 377-397.



23. Toksoz M. N., Sleep N. H., Smith A. T. Evolution of the downgoing lithosphere and the mechanisms of deep focus earthquakes // *Geophys. J. R. Astron. Soc.* 1973. V. 35. pp. 285–310.

24. Zharkov V. N. *Physics of the Earth's Interiors*. Duesseldorf: Lambert Academic Publishing, 2019. 438 p.

## References

1. Gavrilov S. V. *Issledovanie mehanizma formirovaniya ostrovnykh dug i tyloвого razdviganiya litosfery* (Investigation of the island arc formation mechanism and the back-arc lithosphere spreading). *Geofizicheskie Issledovaniya* (Geophysical Researches), 2014, V. 15, No. 4, pp. 35–43.

2. Gavrilov S. V., Kharitonov A. L. *O formirovaniy anomal'nogo teplovogo potoka v bassejne Pannonia i v zone Vardar pri subdukcii Adriaticeskoy plity pod Evraziyskuyu plitu* (On the formation of abnormal heat flow in the Pannonia basin and the Vardar zone during subduction of the Adriatic plate under the Eurasian plate). *International Journal of Professional Science*, 2021, No. 9, pp. 27–39. DOI: 10.54092/25421085\_2021\_9\_27

3. Gavrilov S. V., Kharitonov A. L. *O subdukcii Amurskoy mikroplity i konvektivnom mekhanizme vynosa dissipativnogo tepla i uglevodorodov iz mantiynogo klina v Okhotskom more k vostoku ot ostrova Sakhalin* (On the subduction of the Amur micro plate and the convective mechanism of dissipative heat and hydrocarbons removal from the mantle wedge in the Sea of Okhotsk east of Sakhalin Island). *Bulletin of the Academy of Sciences of the Republic of Bashkortostan*, 2022, V. 42, No. 1(105), pp. 5–12. DOI: 10.24412/1728-5283\_2022\_1\_5-12

4. Gavrilov S. V., Kharitonov A. L. *Otsenka neftegazovykh perspektiv Krymskogo poluostrova kak rezul'tat geodinamicheskogo modelirovaniya zony subdukcii Vostochno-Chernomorskoy plity pod litosferu Skifskoy plity* (Assessment of oil and gas prospects of the Crimean Peninsula as a result of geodynamic modeling of the subduction zone of the East Black Sea plate under the lithosphere of the Scythian plate). *Scientific notes of the V.I. Vernardsky Crimean Federal University. Ser. Geography, Geology*, 2021, V.7, No. 3, pp. 279–291. DOI: 10.37279/2413-1717-2021-7-3-279-291

5. Gavrilov S. V., Kharitonov A. L. *Geotermodynamicheskaya model predpolagaemoy paleozony litosfernoy subdukcii v rayone Chernomorskoy vpadiny i ee svyaz s metallogenicheskoy zonal'nostyu Krima i Kavkaza* (Geothermodynamic model of the proposed paleozone of lithospheric subduction in the area of the Black Sea basin and its relationship with the metallogenetic zonality of the Crimea and the Caucasus). *Regional geology and metallogeny*, 2021, No. 87, pp. 4–16. DOI: 10.52349/0869-7892-2021-87-04-16

6. Gavrilov S. V., Abbott D. H. *Termo-mekhanicheskaya model' teplo- i massoperenosa v okrestnosti zony subdukcii* (Thermo-mechanical model of heat- and mass-transfer in the vicinity of subduction zone). *Physics of the Earth*, 1999, V. 35, No. 12, pp. 967–976.

7. *Karta teplovogo potoka territorii SSSR i sopredel'nykh regionov* (Heat flow map of the territory of the USSR and adjacent areas). Smirnov Ya. B. (ed.). Moscow: GUGK, 1980.

8. Nimelulayeva G. Sh. *Osobennosti vozdeystviya prirodnykh faktorov i ih vliyanie na formirovanie opolznevykh protsessov Krima* (Peculiarities of the influence of natural factors and their bear-

ing on formation of the land-slide processes in Crimea). *Culture of the near Black Sea people*, 2006, No. 83, pp. 110–113.

9. Sorokhtin O.G., Ushakov S.A. *Razvitie Zemli* (Development of the Earth). Moscow: Publishing House of Moscow University, 2002, 506 p.

10. Turcott D. L., Schubert J. *Geodinamika* (Geodynamics). Moscow: Science, 1985. 732 p.

11. Uyeda S. *Novyy vzglyad na Zemlyu* (The New View of the Earth). San Francisco: W. H. Freeman Company, 1978, 217 p.

12. Ushakov S. A., Galushkin Yu. I., Ivanov O. P. *Priroda skladchatosti osadkov. na dne Chernogo morya v zone perekhoda k Krymu i Kavkazu* (The nature of folding of the sediments at the Black Sea floor in the zone of transition to Crimea and Caucasus). *Reports of the USSR Academy of Sciences*, 1977, V. 233, No. 5, pp. 932–935.

13. Khutorskoy M. D., Polyak B. G. *Geotermicheskie modeli geodinamicheskikh obstanovok raznogo tipa* (Geothermal models of geodynamic environments of different types). *Geotectonics*, 2014, No. 1, pp. 77–96.

14. Khutorskoy M. D. *Teplovoy potok v oblastiakh strukturalno-geologicheskikh neodnorodnostey* (Heat flow in the areas of structural and geological heterogeneities). Moscow: Nauka, 1982, 79 p.

15. Khutorskoy M. D., Abizgil'din I.Kh., Paduchikh V. I. *Teplovoy potok Mugodjar — prodoljenie Yujno-Uralskoy geotermicheskoy anomalii. Geotermya seysmichnikh i aseismichnikh zon* (Thermal flow Mugodjar — continuation of South Ural geothermal anomaly. Geothermy of seismic and aseismic zones). Moscow: Nauka, 1993, 400 p.

16. Chandrasekhar S. *Hydrodynamic and hydromagnetic stability*. Oxford, Clarendon, 1961, 654 p.

17. Gavrilov S. V., Kharitonov A. L. *Distribution of metallogenic zones of the Caucasus region originated as a result of the subduction of the lithosphere of the Tethys paleo-oceanic plate under the East-European paleo-continental plate*. *Acta Geodinamica et Geomaterialia*, 2021, V. 18, No. 2(202), pp. 199–208. DOI: 10.13168/AGG.2021/0014

18. House L. S. and Jacob K. H. *Thermal stresses in subducting lithosphere can explain double seismic zones*. *Nature*, 1982, V. 295, pp. 587–589.

19. Khutorskoy M. D., Yarmoluk V. V. *Heat flow, structure and evolution of the lithosphere of Mongolia*. *Tectonophysics*, 1989, V. 164, pp. 315–322.

20. MacKenzie D. P. *Speculations on the consequences and causes of plate motion*. *Geophys. J. of Roy., Astron. Soc.*, 1969, V. 18, pp. 1–32.

21. Pollack B. N., Hurter S., Johnson J. R. *The New Global Heat Flow Data Compilation*. *EOS Trans, AGU*, 1990, No. 71, pp. 1604.

22. Sawkins F. J. *Sulfide ore deposits in relation to plate tectonics*. *Journ. Geol.*, 1972, V. 80, No. 4, pp. 377–397.

23. Toksoz M. N., Sleep N. H., Smith A. T. Evolution of the downgoing lithosphere and the mechanisms of deep focus earthquakes. *Geophys. J. R. Astron. Soc.* 1973, V. 35, pp. 285–310.

24. Zharkov V. N. *Physics of the Earth's Interiors*. Duesseldorf: Lambert Academic Publishing, 2019, 438 p.

Поступила в редакцию / Received 07.11.2022