

UDC 550.311

Gavrilov S.V., Kharitonov A.L. On the heat flow anomalies in the rear of subduction zones

Об аномалиях теплового потока в тылу зон субдукции

**Gavrilov Sergei Vladilenovich,**

Doctor of physical and mathematical sciences, Main scientist of the laboratory 102, Schmidt Institute of Physics of the Earth of the Russian Academy of Sciences

**Kharitonov Andrey Leonidovich,**

Candidate of physical and mathematical sciences, Leading scientist of the Main Earth's magnetic field laboratory, Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radio Waves Propagation of the Russian Academy of Sciences

Гаврилов Сергей Владиленович,  
Доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник лаборатории 102, Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН  
Харитонов Андрей Леонидович,  
кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории главного магнитного поля Земли, Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им.Н.В. Пушкова РАН

**Аннотация.** На основе полученного авторами ранее аналитического решения уравнения переноса диссипативного тепла в мантийном клине над полого субдуцирующей плитой выполнена оценка аномального теплового потока, выносимого к дневной поверхности из мантийного клина в тылу зон субдукции. В предположении постоянства эффективной вязкости материала мантии и кондуктивного механизма выноса диссипативного тепла выявлена зависимость величины аномального теплового потока от угла и скорости субдукции. На примере зон субдукции, для которых современными геодезическими методами определена скорость субдукции и из сейсмических данных известен угол субдукции, установлена справедливость полученной зависимости аномального теплового потока от угла и скорости субдукции. В тех зонах, например, у Южного Берега Крыма, где скорость субдукции не определялась по данным наблюдений, получены новые оценки этой скорости, равной в случае субдукции Черноморской микро-плиты 3 мм в год.

**Ключевые слова:** диссипативный нагрев в мантийном клине, молекулярная теплопроводность в мантийном клине, угол и скорость субдукции, аномалии теплового потока.

**Abstract.** Based on the previously obtained authors' analytical solutions of the equation of dissipative heat transfer in the mantle wedge above the flatly subducting plate the estimation is made of anomalous heat flow from the mantle wedge to the Earth's surface in the rear of subduction zone. On the assumption of the constant-viscosity fluid and conductive dissipation heat transport in the mantle wedge the anomalous heat flux dependence on the angle and velocity of subduction is revealed. In the cases the velocity of subduction is established by the modern geodetic means and the angle of subduction is known from seismological data the anomalous heat flux estimations obtained here are proved to be valid. In the zones, where the velocity of subduction was not thus far determined from geodetic observations, e.g. along the Crimea Southern Shore, the new estimations of this velocity are found, which for the Black Sea micro plate subduction velocity amounts to  $\sim 3$  mm par year.

**Keywords:** dissipative heating in the mantle wedge, conductive heat transfer, angle and velocity of subduction, heat flux anomalies.

---

## Введение

В тылу многих зон субдукции позади передовой дуги и вулканической цепи, формирующихся параллельно глубоководному желобу, обычно наблюдаются 2D зоны повышенного теплового потока, также параллельные глубоководным желобам [16; 15]. В этих зонах располагаются или центры окраинного раздвигания литосферы (и окраинные бассейны), или формируются грабены, т.е. зоны растяжения литосферы [12].

Поскольку субдуцирующие блоки экранируют тепловой поток из нижележащей мантии, можно предположить, что аномалии теплового потока в тылу зон субдукции формируются в мантийном клине за счет диссипативного тепловыделения в вязком течении, вызываемом в астеносфере поддвигающейся плитой. Диссипативный механизм генерации тепла более эффективен на меньших расстояниях от желоба, где встречные движения вещества астеносферы над поддвигающейся плитой сближены теснее и поэтому скорости деформации выше, чем на больших расстояниях от желоба, где диссипативный механизм теплогенерации слабее. Однако конвективный вынос диссипативного тепла более эффективен на больших расстояниях от желоба, так как конвекция легче возбуждается в более мощном слое, в котором локальное число Рэлея, пропорциональное кубу толщины слоя, оказывается сверхкритическим. Следовательно, можно ожидать, что кондуктивный 2D вынос тепла будет максимален на некотором определенном расстоянии от желоба, где и возможно формирование центра окраинного раздвигания и/или растяжения литосферы, характеризуемого максимумом 2D аномалии теплового потока. В настоящей работе рассмотрены полученные ранее авторами аналитические решения, описывающие термомеханическое состояние среды в приближении однородной вязкой жидкости в мантийном клине над полого субдуцирующей плитой и на основе этих решений получены оценки аномального теплового потока, выносимого кондуктивным течением, восходящим из мантийного клина к подошве настилающей литосферы и далее к дневной поверхности.

## Описание аналитической модели

Простая термомеханическая модель мантийного клина между подошвой литосферы у континентальной окраины и субдуцирующей плитой, поддвигающейся под континентальную плиту под углом  $\beta$  со скоростью  $V$ , может быть построена как модель вязкого течения в мантийном клине  $AOB$  (рис. 1), вынужденного движением полуплоскости  $OB$ , моделирующей верхнюю границу субдуцирующей плиты.

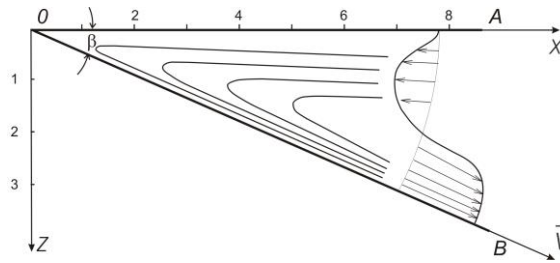


Рис. 1. Схематическое поперечное сечение области субдукции, происходящей под углом  $\beta$  со скоростью  $V$ . Линиями тока показано движение вещества в мантийном клине  $AOB$ , вызванное движением субдуцирующей плиты  $OB$ .

Материал мантийного клина считается однородной несжимаемой жидкостью с постоянным коэффициентом вязкости  $\eta$ . В приближении однородной среды движение вещества в мантийном клине определяется формулами в [14], согласно которым компоненты скорости  $U$  (горизонтальной) и  $W$  (вертикальной) равны ( $\psi$  – функция тока):

$$\begin{aligned} U = V_x &= - (d\psi/dz) = - D \operatorname{arctg} (x/z) + [(C_x + D_x)/(x^2 + z^2)] \times x - B, \\ W = V_z &= (d\psi/dx) = - C \operatorname{arctg} (x/z) + [(C_x + D_x)/(x^2 + z^2)] \times z + A, \end{aligned} \quad (1)$$

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

$$\begin{aligned} (A, B, C, D) &= V \times \{ [(\pi/2) \times \beta \times \sin \beta] / [\beta^2 - \sin^2 \beta], \\ &\{ [(\pi/2) - \beta] \times \sin \beta - [(\pi/2) \times \beta - \cos \beta] \} / [\beta^2 - \sin^2 \beta], \\ &- [\beta \times \sin \beta] / [\beta^2 - \sin^2 \beta], \\ &- [\beta \times \cos \beta - \sin \beta] / [\beta^2 - \sin^2 \beta] \} \end{aligned} \quad (2)$$

Уравнение, определяющее стационарное распределение абсолютной температуры  $T$  в мантийном клине при бесконечном числе Прандтля в приближении Буссинеска имеет вид ( $V_x, V_z$  – компоненты скорости вдоль осей  $x$  и  $z$  на рис. 1):

$$V_x \times d_x \times T + V_z \times d_z \times T = \chi \times \Delta T + \{ [1 / (\rho \times c_p)] \times [\tau_{ik}^2 / (2 \times \eta)] \}, \quad (3)$$

где  $\tau_{ik}$  – тензор вязких напряжений,  $\eta$  – коэффициент вязкости, символы  $\partial$  с индексом  $i$  и индексы обозначает частные производные по координатам,  $\rho$  – плотность,  $c_p$  – удельная теплоемкость при постоянном давлении,  $\chi$  – коэффициент температуропроводности,  $\Delta$  – оператор Лапласа в координатах  $(x, z)$ . В (3) 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 (3) описывает мощность

диссипативного тепловыделения в единице объема. С учетом (1), (2) уравнение (3) приобретает вид:

$$\{D \times \{[(x \times z)/(x^2+z^2)] + \arctg(z/x)\} - C \times [z^2/(x^2+z^2)]\} \times (d_x \times T) + \{C \times \{[(x \times z)/(x^2+z^2)] - \arctg(z/x)\} + D \times [z^2/(x^2+z^2)]\} \times (d_x \times T) \quad (4)$$

Уравнение (4) 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. 1) также справедливы, поскольку тепловая энергия, соответствующая температуре, отличной от  $T_m$ , на стороне  $AB$ , достаточно удаленной от желоба, передается к литосферным плитам, так как диссипативное тепловыделение при  $x \rightarrow \infty$  спадает до нуля. Следует подчеркнуть, что все переменные в уравнениях настоящей работы размерны, кроме оговоренных особо. Константы  $A$  и  $B$  в формуле (2) выражаются через  $C$  и  $D$  через граничные условия невозможности проскальзывания на поверхностях плит.

Последнее слагаемое в правой части (4) пропорционально объемной мощности диссипативного тепловыделения, и с константами  $C$  и  $D$  (2) 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 плиты на расстоянии  $\delta(x)$  над ее поверхностью. В [8] получена безразмерная оценка квадрата этого расстояния для полого субдуцирующей плиты при  $\beta < \pi/5$  (т.е.  $\beta < 36^\circ$ ):

$$\delta^2 = \{2 \times t \times [D - (C \times t/2)^2]\} / \{[D - (D - C \times t)^2 \times \cos^6 \beta] \times \{t - (2/t) - (x/\gamma) \times [C + (D \times t/2) \times \arctg(t/2) - (C \times t/2)]\}\}. \quad (5)$$

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

$$T_{\max}(x) = T_m + [(2 \times \eta) / \kappa] \times \delta^2 \times (D - C \times t)^2 \times \cos^6 \beta, \quad (6)$$

где  $t = \operatorname{tg} \beta$ ,  $\kappa = 3.2 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$  – коэффициент теплопроводности мантии [9, с. 123]. Сравнение с численным решением уравнения (4) показывает, что точность оценок (5) и (6) при  $x > 100$  км не хуже 10%. Согласно (5) квадрат безразмерной толщины  $\delta$  термического пограничного слоя при  $\beta = 30^\circ$ ,  $25^\circ$  и  $15^\circ$  составляет:

$$\begin{aligned} \delta^2(x, \beta = \pi/6) &= 1 / [7.27 + 0.0117 \times x(\text{км}) \times I(\text{мм/год})], \\ \delta^2(x, \beta = 25^\circ) &= 1 / [19.30 + 0.0189 \times x(\text{км}) \times I(\text{мм/год})], \\ \delta^2(x, \beta = \pi/12) &= 1 / [117.18 + 0.0348 \times x(\text{км}) \times I(\text{мм/год})] \end{aligned} \quad (7)$$

где  $\chi = 0.5 \text{ мм}^2 \cdot \text{с}^{-1}$  [9, с. 170]. Приведенные в (7) углы субдукции соответствуют поддвиганию Амурской микро-плиты под Охотскую [4-7], Адриатической микро-плиты под Евразийскую [2] и Черноморской микро-плиты под Скифскую [3; 7] соответственно.

Согласно (6) перепад температуры  $\Delta T = T_{\max}(x) - T_m$  в вертикальном сечении мантийного клина,  $\propto \delta^2 [D - (C \times t)]^2 \times \cos^6 \beta$ , пропорционален коэффициенту вязкости, и локальное число Рэлея  $Ra = \alpha \times \rho \times g \times (\chi \times t)^3 \times \Delta T / (\eta \times \chi)$  в приближении однородной среды не зависит от вязкости. С учетом (7) получаем:

$$Ra = 2 \times \alpha \times \rho \times g \times (\chi \times t)^3 \times \delta^2 \times (D - C \times t)^2 \times \cos^6 \beta / (\kappa \times \chi), \quad (8)$$

где  $g$  – ускорение силы тяжести,  $\alpha$  – коэффициент теплового расширения,  $F(\pi/6) = 7.27$ ,  $G(\pi/6) = 0.0117$  и так далее согласно (7). Отсюда получаем:

$$Ra = 4 \times 10^{-7} \times t^3 \times (D - C \times t)^2 \times \cos^6 \beta \times (x(\text{км}))^3 \times (V(\text{мм/год}))^2 / [F(\beta) + G(\beta) \times x(\text{км}) \times V(\text{мм/год})], \quad (9)$$

где  $D = (D / V)$ ,  $C = C / V$  – безразмерные функции  $\beta$ , определяемые из (2) делением на скорость субдукции  $V$ . Соотношение (9) получается из (8) при  $\rho = 3.3 \times 10^3 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3}$ ,  $c_p = 1.2 \times 10^3 \text{ Дж} \cdot \text{кг}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$ ,  $\kappa = 3.2 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$ ,  $\alpha = 3 \times 10^{-5} \text{ К}^{-1}$ ,  $\chi = 0.5 \text{ мм}^2 \cdot \text{с}^{-1}$  [9, с. 123].

Согласно (6) диссипативный тепловой поток из мантийного клина  $q_c = (\kappa \times \Delta T) / (\chi \times t)$  и вертикальный перепад температуры  $\Delta T$  пропорциональны коэффициенту вязкости  $\eta$  и составляют:

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

$$\Delta T (\text{К}) = 6 \times 10^{-22} \times \eta (\text{Па} \cdot \text{с}) \times \delta^2 \times (D - C \times t)^2 \times \cos^6 \beta \times V (\text{мм/год})^2, \quad (11)$$

причем эти величины зависят от теплопроводности мантии только через зависимость (5).

## 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 [4] к востоку от о-ва Сахалин [5]. В этой области происходит субдукция Амурской микро-плиты под Охотскую [4]. Локальное число Рэлея в данной простой модели оказывается ниже критического, т.е. конвекция не развивается. Для случая субдукции Адриатической микро-плиты под Евро-

Азиатскую [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 микро-плиты в области нефтегазоносной провинции Паннония и зоны растяжения Вардар. Наконец, при  $\beta = 15^\circ$ ,  $V = 3 \text{ мм} \cdot \text{год}^{-1}$ ,  $x = 250 \text{ км}$ ,  $\eta = 2 \cdot 10^{23} \text{ Па} \cdot \text{с}$  и прочих вышеуказанных параметрах находим  $q_c = 20 \text{ мВт} \cdot \text{м}^{-2}$ , что, согласно [10], соответствует условиям в тылу горного Крыма, где наблюдается 2D зона аномального теплового потока, вытянутая параллельно южному берегу Крыма [11]. В последнем случае перепад температуры в вертикальном сечении мантийного клина равен  $\sim 380 \text{ К}$ . Следует отметить, что в неньютоновской модели мантийного клина в зонах субдукции Адриатической [2], Черноморской [3; 17; 20; 21], Амурской [4; 5; 19], Уральской [6], Скифской [7], северо-восточный блок Восточно-Сибирской [18] микро-плит происходит конвекция в мантийном клине, и зоны аномального теплового потока оказываются более локализованными, а средний коэффициент вязкости ниже, чем получается в настоящей работе [2-7]. Оценка скорости субдукции Черноморской микро-плиты под Крымский полуостров,  $V = 3 \text{ мм} \cdot \text{год}^{-1}$ , приблизительно в три раза превышает полученную оценку в работе [13].

### Заключение

В случае пологой субдукции предложенная простая (кондуктивная) модель выноса диссипативного тепла из мантийного клина к дневной поверхности позволяет объяснить наблюдаемое расположение зоны 2D аномального теплового потока и величину его мантийной составляющей. В областях, где скорость субдукции ранее не определялась из наблюдательных данных, например у южного берега Крыма, предложенная модель позволяет оценить скорость субдукции. В приближении жидкости с постоянной вязкостью предлагаемая модель позволяет оценить средний коэффициент вязкости. Оценка скорости субдукции Черноморской микро-плиты приблизительно в три раза превышает единственную независимую оценку, полученную другими авторами по распределению осадков на дне Черного моря.

### References

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. 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
4. Gavrillov S.V., Kharitonov A.L. A plate tectonic model for the origin of metal provinces in Amur region of Asian lithospheric plate and subduction convective mechanism of the dissipative heat and calcareous-alkaline magmas upward transport from the mantle wedge // International Journal of Professional Science. 2022. № 9. pp. 80-85. doi: 10.54092/25421085\_2022\_9\_80.
5. 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
6. Гаврилов С.В., Харитонов А.Л. Моделирование глубинного геодинамического строения зоны субдукции Русской палеоплиты под литосферу Уральского палеоокеана и связанное с субдукцией распределение месторождений углеводородов // Уральский геологический журнал. 2021. No. 5(143). С. 3-19.
7. 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
8. Гаврилов С.В., Абботт Д.Х. Термомеханическая модель тепло- и массопереноса в окрестности зоны субдукции // Физика Земли. 1999. № 12. С. 3-12.
9. Жарков В.Н. Физика земных недр. М.: Наука и образование, 2012. 384 с.
10. Ниметулаева Г.Ш. Обеспечение экологической безопасности территории Бахчисарайского района Крыма при оползневых явлениях на основе геодинамического районирования недр. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук М.: Московский государственный горный университет. 2004. 200 с.
11. Смирнов Я.Б. (ред.). Карта теплового потока территории СССР и сопредельных районов. Москва: ГУГК, 1980.
12. Уеда С. Новый взгляд на Землю. Москва: Мир, 1980. 216 с.
13. 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.

14. MacKenzie D.P. Speculations on the consequences and causes of plate motion // *Geophys. J. of Roy. Astron. Soc.* 1969. V. 18. pp. 1–32.
15. Pollack B.N., Hurter S., Johnson J.R. The New Global Heat Flow Data Compilation. *EOS Trans, AGU.* 1990. № 71. pp. 1604.
16. Turcott D.L., Schubert J. *Geodynamics.* Moscow: Mir, 1985. 732 p.
17. Гаврилов С.В., Харитонов А.Л. Использование результатов глубинной геодинамической модели Черноморско-Кавказского региона для поисков перспективных нефтегазовых районов // *Вестник Владикавказского научного центра.* 2021. Т. 21. № 4. С. 54-63.
18. Гаврилов С.В., Харитонов А.Л. Роль сублитосферной термической конвекции в выносе углеводородов на северо-западной окраине Сибирского кратона (Россия) // *Газовая промышленность.* 2018. № 5(768). С. 48-52.
19. Гаврилов С.В., Харитонов А.Л. Обеспечение экономической и энергетической безопасности дальневосточных регионов России как результат поиска новых месторождений углеводородов на основе использования механизма термодинамического моделирования // *Вестник образования и развития науки Российской академии естественных наук.* 2022. Т. 26. № 2. С. 77-86. doi: 10.26163/RAEN.2022.19.64.010
20. Gavrilo S.V., Kharitonov A.L. New estimation of the subduction velocity of the Black Sea microplate and the model of the thermal convection in the mantle wedge as a mechanism of heat and mantle hydrocarbons transport in the rear of the Crimea mountains // *Modern Science.* 2021. № 10-1. С. 38-45.
21. Kharitonov A.L., Gavrilo S.V. 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