

UDC 550.311

Gavrilov S.V. Semiempiric estimate of locations of prospective oil- and gas-bearing and metallogenic zones in the Northern Caucasus

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

Abstract. Assuming mantle oil- and gas-bearing rocks and metallogenic solutions being transported from the mantle wedge to the Earth's surface by the local upwelling convective flows prospective oil- and gas-bearing and metallogenic zones in the Northern Caucasus are estimated to be localized at certain 'hot spots' opposite to the main presently extinct volcanoes, these 'hot spots' being shifted by $\sim(1-2)\times 10^2$ km northward off the Great Caucasus ridge. Semi-empiric formula for the modeled separation between a Caucasus summit, like Elbrus, and corresponding opposite 'hot spot', like that at Pyatigorsk, is derived on the basis of analytical solution of the linear mantle convective instability problem in the mantle wedge previously investigated by the authors taking account of the averaged temperature and pressure dependence of viscosity. The observed Elbrus – Pyatigorsk distance coincides with the model one within the accuracy of $\sim 20\%$, thus the formula for the volcano-hot spot separation derived here can be used for prospecting new oil- and gas-bearing and metallogenic zones opposing extinct or active volcanoes of island or continental margins volcanic chains. Calculation of convective perturbations growth rates in the Caucasia mantle wedge allows concluding the subduction velocity to previously (prior to ~ 10 Myr) be equal to ~ 70 mm a year, to subsequently be reduced to less than ~ 60 mm a year, which reduction was the probable cause for the volcanoes extinction. Adequacy of the model proposed here to observations serves the Caucasian rheological mantle wedge parameters (activation energy ~ 240 kJ \times mol $^{-1}$, mean viscosity $\sim 2 \times 10^{20}$ Pa \cdot s) to be close to realistic.

Keywords: dissipative heating in the mantle wedge, conductive heat and mass transfer, angle and velocity of subduction, oil- and gas-bearing and metallogenic zones.

Рецензент: Торопцев Василий Владимирович - кандидат технических наук, доцент.
ФГБОУ ВО «РГАУ-МСХА им. К.А. Тимирязева»

Введение

В тылу зон субдукции позади передовой дуги и вулканической цепи, параллельных желобу, наблюдаются 2D зоны окраинного раздвигания или растяжения литосферы, характеризующиеся повышенным тепловым потоком на дневной поверхности [1, рис. 4.57]; [2]. В зонах окраинного раздвигания образуются окраинные бассейны или грабены [3]. С зонами повышенного теплового потока, как правило, связаны нефтегазоносные (и, возможно, металлоносные) зоны [4]. Субдуцирующие блоки экранируют тепловой поток из нижележащей мантии, в силу чего термические и конвективные аномалии формируются в мантийном клине за счет диссипативного тепловыделения в вязком течении, вызываемом в астеносфере поддвигающейся плитой. На меньших расстояниях от «острия» мантийного клина встречные движения вещества в астеносфере сближены, скорости деформации и диссипативное тепловыделение выше, а на больших расстояниях последнее падает. Конвективный же механизм выноса диссипативного тепла более эффективен на больших расстояниях от желоба, где

мощность слоя, охваченного конвекцией больше, и больше локальное число Рэлея. В силу этого конвективный вынос тепла восходящими конвективными течениями (в виде продольных валов переменной толщины и поперечных к субдукции вихрях Карига) максимальны на некоторых определенных расстояниях от желоба. При этом, с учетом зависимости вязкости от температуры и давления, расстояние от желоба до зоны максимального 2D выноса диссипативного тепла превышает расстояние от желоба до 3D зоны максимального выноса диссипативного тепла, в которой (3D зоне) формируется вулканическая цепь. Можно ожидать, что 3D конвекция «модулирует» 2D конвективный вихрь Карига таким образом, что против каждой вулканической постройки в тылу зоны субдукции формируется «горячая точка», в которой локализуется вынос мантийных углеводородов и металлоносных растворов из мантийного клина.

Описание аналитической модели

Простая термомеханическая модель мантийного клина между подошвой литосферы у континентальной окраины и субдуцирующей плитой, поддвигающейся под континентальную плиту под углом β со скоростью V , может быть построена как модель вязкого течения, вынужденного движением субдуцирующей плиты. Считая материал мантийного клина однородной несжимаемой жидкостью с постоянным коэффициентом вязкости η , движение вещества в мантийном клине определяется формулами в [5], согласно которым компоненты скорости U (горизонтальной) и W (вертикальной) равны (ψ – функция тока, x – горизонтальная, z – вертикальная координаты):

$$\begin{aligned}U &= V_x = -\partial\psi/\partial z = -D\arctg(x/z) + (Cx + Dz)x/(x^2 + z^2) - B, \\W &= V_z = \partial\psi/\partial x = C\arctg(x/z) + (Cx + Dz)z/(x^2 + z^2) + A,\end{aligned}\quad (1)$$

где при условиях прилипания (непроскальзывания) на верхней границе субдуцирующего блока и подошве настилающей континентальной литосферы (ось z направлена вниз):

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

В [6] показано, что термическая и конвективная неустойчивости, возникающие в мантийном клине благодаря диссипативному тепловыделению, определяются в линейном приближении инкрементами γ_{\perp} и γ_{\parallel} , зависящими от горизонтального расстояния x , отсчитываемого от «ребра» мантийного клина в направлении субдукции и волновыми числами k_x и k_y , определяющими пространственные горизонтальные периоды $2\pi/k_x$ и $2\pi/k_y$ в направлениях вдоль и поперек субдукции (ось u перпендикулярна субдукции, $t = tg\beta$, $\lambda = \pi/t$):

$$\gamma_{\perp}=\gamma_{\perp}(k_y=0)=4\eta\xi D^2/(\rho c_p T x^2)+\alpha\rho g x^3 T k_x^2/(\eta(x^2 k_x^2+\lambda^2)^2)+ \\ +16\eta\xi U' k_x^2 \lambda^2 D/\rho c_p T(x^2 k_x^2+\lambda^2)^2 - (x^2 k_x^2+\lambda^2)\chi/x^2, \quad (3)$$

$$\gamma_{\parallel}=\gamma_{\parallel}(k_x=0)=4\eta\xi D^2/(\rho c_p T x^2)+\alpha\rho g x^3 T k_y^2/(\eta(x^2 k_y^2+\lambda^2)^2)+ \\ +4\eta\xi U' k_y^2 D/\rho c_p T(x^2 k_y^2+\lambda^2)- (x^2 k_y^2+\lambda^2)\chi/x^2, \quad (4)$$

Инкремент $\gamma_{\parallel}(k_x=0)$ описывает нарастание во времени продольных конвективных валов переменной толщины горизонтального размера $2\pi/k_y$, ориентированных вдоль субдукции, а инкремент $\gamma_{\perp}=\gamma_{\perp}(k_y=0)$ соответствует поперечным валам (вихрям Карига) горизонтального размера $2\pi/k_x$. Горизонтальное расстояние $x=x_1$, соответствующее максимуму инкремента $\gamma_{\parallel}(k_x=0)$, как функции x , определяет положение вулканической цепи, а максимум $\gamma_{\perp}=\gamma_{\perp}(k_y=0)$ при некотором $x=x_2$ соответствует локализации поперечного восходящего конвективного потока, налагающегося на конвективную систему в виде продольных валов и определяющего положение «горячих точек», формирующихся в тылу зон субдукции. Мощность диссипативного тепловыделения в мантийном клине

$$\frac{1}{2} \times \tau_{ik}^2/\eta=4\eta(Cz-Dx)^2/(x^2+z^2)^2 \quad (5)$$

при $\beta < \pi/4$ и C и D (2) максимальна у нижней границы мантийного клина, где также максимальна температура в вертикальном сечении мантийного клина. В (3), (4) $\chi=1 \text{ мм}^2 \times \text{с}^{-1}$ – коэффициент температуропроводности, $\rho = 3.3 \times 10^3 \text{ кг} \times \text{м}^{-3}$ – плотность, g – ускорение силы тяжести, $c_p = 1.2 \text{ Дж} \times \text{кг}^{-1} \times \text{К}^{-1}$ – удельная теплоемкость при постоянном давлении, $\alpha = 3 \times 10^{-5} \text{ К}^{-1}$ – коэффициент теплового расширения. Температура на границах мантийного клина принимается равной температуре $T_m = 1500 \text{ К}$ субсолидуса, а температура внутри мантийного клина получается решением уравнения теплопроводности с учетом молекулярного и адвективного переноса тепла, причем максимум температуры в вертикальном сечении мантийного клина находится у поверхности субдуцирующего блока

$$T_{\max} = T_m + \eta \times V^2 \times (\rho c_p \chi)^{-1} \times (F + GVx/\chi)^{-1} \quad (6)$$

где $\kappa = 4 \text{ Дж} \times \text{м}^{-1} \times \text{с}^{-1} \times \text{К}^{-1}$ – коэффициент теплопроводности, $\chi = \kappa/\rho c_p = 1 \text{ мм}^2/\text{с}$, а

F и G – безразмерные функции угла субдукции β , которые при $\pi/6 < \beta < \pi/4$ могут быть представленными приближенными интерполяционными формулами, вытекающими из численного решения:

$$F = -2.70 + 15.75 \times \beta, \quad G = -2.35 \times 10^{-3} + 1.27 \times 10^{-2} \times \beta. \quad (7)$$

В (3),(4) $T = T_m + T_{\max}/2$ – температура, средняя по вертикальному сечению мантийного клина, $T' = (T_{\max} - T_m)/(tg\beta)$, $U' = (D(\sin\beta \cos\beta + \beta) - C \sin^2\beta)/tg\beta$. Например, при $\eta = 10^{21} \text{ Па} \cdot \text{с} = 10^{22} \text{ П}$, $\beta = \pi/6$, $V = 100 \text{ мм/год}$, $x = 100 \text{ км}$ согласно (6)–(7) величина $T_{\max} - T_m \sim 400 \text{ К}$. В (3), (4)

коэффициент вязкости считается равным $\eta = \eta_0 \times \exp \xi$, где

$$\xi = (E^* + pV) / RT \quad (8)$$

(E^* и V – энергия и объем активации, p – давление, R – универсальная газовая постоянная), и считается равным среднему значению, т.е. зависимость вязкости от температуры и давления учитывается усредненным образом. При энергии активации $E^* = 240$ кДж/моль и активационном объеме $V = 8 \times 10^3$ мм³/моль, характерных для «влажного» оливина в мантийном клине [7], получаем $\xi \sim 20$.

Вычисление $\gamma_{||} = \gamma_{||}(k_x = 0)$ по формуле (4) при различных углах и скорости субдукции β и V показывает, что с точностью $\sim 10^{-2}$ максимум $\gamma_{||}$ располагается на расстоянии $x_1 \sim 2\pi/k_y$ от «острия» мантийного клина. Это расстояние практически точно совпадает с пространственным периодом расположения вулканов (или групп вулканов) на вулканической цепи в зонах субдукции. Из (3), (4) следует, что при $\xi = 0$, т.е. при отсутствии зависимости вязкости от температуры и давления, оказывается $\gamma_{\perp} = \gamma_{||}$, и, значит, восходящий (поперечный) 2D поток, связанный с вихрем Карига, поднимается непосредственно под вулканической цепью. Если же $\xi > 0$, т.е. с учетом зависимости вязкости от температуры и давления, восходящий 2D конвективный поток на расстоянии $x = x_2$, соответствующем максимуму инкремента $\gamma_{\perp} = \gamma_{\perp}(k_y = 0)$, располагается в тылу зоны субдукции дальше от «ребра» мантийного клина, т.е. $x_2 > x_1$. Таким образом, можно утверждать, что расположение зоны окраинного раздвигания позади вулканической цепи обязано своей локализацией зависимости вязкости материала мантии от температуры и давления. Расстояние $\delta x = x_2 - x_1$ находится из равенств $\partial \gamma_{||} / \partial x = 0$, $\partial \gamma_{\perp} / \partial x = 0$, справедливых соответственно при $x = x_1$ и $x = x_2$. Для оценки $\delta x \ll x_1, x_2$ используем следующую формулу:

$$\begin{aligned} \delta x &= - \partial \gamma_{\perp}(x = x_1) / \partial x / \partial^2 \gamma_{\perp}(x = x_1) / \partial x^2, \\ \partial \gamma_{\perp}(x = x_1) / \partial x &= R[(T_{\max} - T_m) + x dT_{\max} / dx] + S[-(dT_{\max} / dx) / (T_{\max} - T_m)^2] + 2H / x^3, \\ \partial^2 \gamma_{\perp} / \partial x^2 &= R[2dT_{\max} / dx + x d^2 T_{\max} / dx^2] + S[2(dT_{\max} / dx)^2 / (T_{\max} - T_m)^3 - (d^2 T_{\max} / dx^2) / (T_{\max} - T_m)^2] - 6H / x^4, \\ R &= 4\pi^2 \alpha \rho g / (\eta t (4\pi^2 + \lambda^2)^2), \quad S = 32\eta \xi U^2 k_x^2 \lambda^2 D / (\rho c_p (4\pi^2 + \lambda^2)^2), \quad H = \chi (4\pi^2 + \lambda^2), \\ T_{\max} - T_m &= \eta \times V^2 \times (\rho c_p \chi)^{-1} \times (F + GVx / \chi)^{-1}, \quad dT_{\max} / dx = -\eta \times V^2 \times (\rho c_p \chi)^{-1} (GV / \chi) \times (F + GVx / \chi)^{-2}, \\ d^2 T_{\max} / dx^2 &= 2\eta \times V^2 \times (\rho c_p \chi)^{-1} (GV / \chi)^2 \times (F + GVx / \chi)^{-3}, \end{aligned} \quad (9)$$

где учитывается $k_x \cong k_y$ вблизи максимумов инкрементов γ_{\perp} и $\gamma_{||}$, и первым слагаемым в (3), (4), соответствующим термической неустойчивости, можно пренебречь благодаря тому, что из-за присутствия воды в мантийном клине, средняя вязкость его материала может быть достаточно мала [7].

Результаты и обсуждение

Принимая скорость субдукции V под Восточно-Европейскую плиту на Северном Кавказе равной, согласно [8], $V=40 \text{ мм} \times \text{год}^{-1}$, и угол субдукции $\beta=28^\circ$, находим по формуле (9) расстояние от цепи Большого Кавказа до «горячих точек», противостоящих потухшим вулканам Кавказа, $\delta x \sim 10^2 \text{ км}$ при среднем коэффициенте вязкости $\eta=2 \times 10^{20} \text{ Па} \cdot \text{с}$ и величине $2\pi/k_y=300 \text{ км}$ порядка расстояния между главными вулканическими постройками Кавказа – Эльбрусом и Казбеком. Однако при такой скорости субдукции инкременты γ_{\parallel} и γ_{\perp} (3), (4) конвективной неустойчивости отрицательны, т.е. конвекция не развивается. При $k_x \sim k_y$ величины γ_{\parallel} и γ_{\perp} становятся положительными только при $V=60 \text{ мм} \times \text{год}^{-1}$, но в максимуме не превышают $\sim 10^{-17} \text{ с}^{-1}$, т.е. конвекция развивается слабо. Лишь при скорости $V=70 \text{ мм} \times \text{год}^{-1}$ конвективные возмущения становятся существенными, и получающиеся значения γ_{\parallel} и γ_{\perp} как функции горизонтального расстояния x показаны на рис.1.

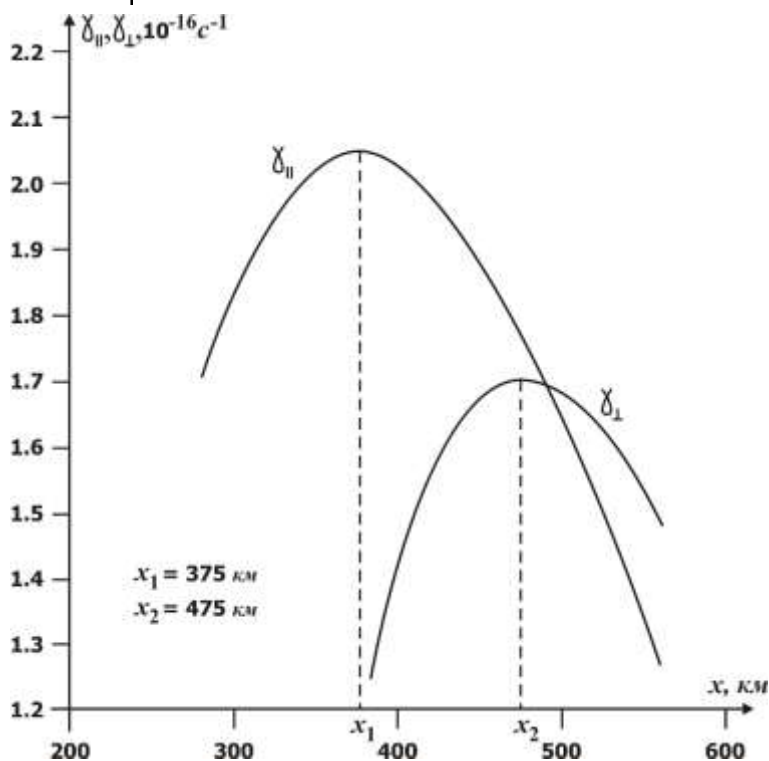


Рисунок 1. Распределения инкрементов конвективной неустойчивости γ_{\parallel} и γ_{\perp} как функций горизонтального расстояния x , отсчитываемого к северу в направлении, перпендикулярном простираению Большого Кавказского хребта. Расстояния x_1 и x_2 максимальных значений инкрементов от «ребра» мантийного клина соответствуют положениям вулканической цепи Большого Кавказа и «горячих точек», противостоящих ближайшей вулканической постройке. Расстояние $x_2 - x_1$ для горячей точки Пятигорска ($\sim 10^2 \text{ км}$) практически точно совпадает с расстоянием до Эльбруса.

На рисунке видно, что модельное расстояние $x_2 - x_1$ между, например, Эльбрусом и противостоящей горячей точкой в Пятигорске составляет 100 км, что хорошо согласуется с наблюдаемым расстоянием ~ 80 км. Согласно (9) это расстояние равно $\delta x = 107$ км, что свидетельствует о достаточной точности формулы (9). Следует отметить, что район Пятигорска характеризуется наличием горячих водных источников и залежей металлических руд, приуроченных к многочисленным компактно расположенным лакколлитам относительной высотой до $\sim 10^3$ м. Близость модельной и наблюдаемой локализаций горячей точки в Пятигорске относительно Эльбруса свидетельствует о реалистичности принятых реологических характеристик мантии в мантийном клине (средней вязкости 2×10^{20} Па·с и энергии активации 240 кДж·моль $^{-1}$) и обоснованности предположения о более высокой в прошлом (ранее ~ 10 млн. лет назад) скорости субдукции под район Северного Кавказа, составлявшей, согласно предложенной модели, ~ 70 мм·год $^{-1}$. Последующее снижение скорости субдукции, по-видимому, и привело к затуханию вулканической активности на Кавказе. Согласно [9]; [10] район горячей точки в Пятигорске характеризуется аномально высоким тепловым потоком с дневной поверхности, превышающим ~ 100 мВт·м $^{-2}$, что служит указанием на перспективность этого района как потенциально нефтегазоносного и металлоносного. Следует отметить, что нефтегазоносный район у г. Нефтекумск расположен к северу от горы Казбек на расстоянии ~ 200 км, что, возможно, свидетельствует о более пологой субдукции в этой области под углом менее 28° .

Выводы

В предположении о конвективном выносе диссипативного тепла из мантийного клина к подошве Восточно-Европейской литосферной плиты в Северокавказском регионе выводится полуэмпирическая формула для расстояния от крупной вершины Большого Кавказа до перспективной нефтегазоносной и металлоносной зоны, противостоящей данной вершине. На примере «горячей точки» с центром в Пятигорске, отстоящей к северу от Эльбруса на расстояние $\sim 10^2$ км, видно, что при стандартных реологических характеристиках сублитосферной мантии в мантийном клине полученная формула достаточно точно описывает локализацию горячей точки при скорости субдукции ~ 70 мм в год. Формирование горячей точки в Пятигорске ранее ~ 10 млн. лет назад произошло параллельно формированию активной вулканической цепи Большого Кавказа при такой достаточно высокой скорости субдукции, которая впоследствии замедлилась, что, очевидно, привело к затуханию вулканической активности на Кавказе.

References

1. Turcotte D.L., Schubert G. *Geodynamics: Applications of Continuum Physics to Geological Problems*. New York: John Wiley & Sons. 1982. p. 732.
2. Pollack B.N., Hurter S., Johnson J.R. The New Global Heat Flow Data Compilation. *EOS Trans, AGU*. 1990. No. 71. p. 1604.
3. Uyeda S. *The New View of the Earth*. San Francisco: W.H. Freeman Company. 1978. 217 p.
4. Isayev V.I., Lobova G.A., Fomin A.N., Bulatov V.I., Kuzmenkov S.G., Galieva M.F., Krutenko D.S. Teplovoy potok I neftegazonosnost (poluostrov Yamal, Tomskaya oblast) // *Georesursy*. 2019. No.: 21(3). pp. 125–135. DOI: <https://doi.org/10.18599/grs/2019.3.125-135>.
5. MacKenzie D.P. Speculations on the consequences and causes of plate motion // *Geophys. J. of Roy. Astron Soc*. 1969. V.18. pp. 1–32.
6. Gavrilov S.V. Issledovanie mehanizma formirovaniya ostrovnyh dug i tylovogo 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.
7. Zharkov V.N. *Physics of the Earth's Interiors*. Duesseldorf: Lambert Academic Publishing. 2019. 438 p.
8. Kharitonov A.L., Gavrilov 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. No. 2(202). pp. 199-208. DOI: <https://doi.org/10.13168/AGG.2021.0014>
9. Smirnov Ya.B. (editor). *Karta Teplovogo Potoka Territorii SSSR I Sopredelnykh Rayonov*. Moscow: GUGK. 1980. (The Map of the Heat Flow at the USSR Territory and Adjacent Regions. Moscow: MAGC. 1980.
10. (Heat flow and oil- and gas-bearing capacities (peninsula Yamal, Tome Region) // *Geo Resources*. 2019. No.: 21(3). pp. 125 – 135. DOI: <https://doi.org/10.18599/grs/2019.3.125-135>.