



УДК 550.311

## НОВАЯ ОЦЕНКА СКОРОСТИ СУБДУКЦИИ ЧЕРНОМОРСКОЙ МИКРОПЛИТЫ В МОДЕЛИ ТЕРМИЧЕСКОЙ КОНВЕКЦИИ КАК ВОЗМОЖНОМ МЕХАНИЗМЕ ВЫНОСА УГЛЕВОДОРОДОВ В ТЫЛУ ГОРНОГО КРЫМА

●●●●●

### THE NEW ESTIMATION OF THE SUBDUCTION VELOCITY OF THE BLACK SEA MICROPLATE IN A THERMAL CONVECTION MODEL AS A MECHANISM OF HYDROCARBONS TRANSPORT IN THE REAR OF THE CRIMEA MOUNTAINS

**Гаврилов Сергей Владиленович**

доктор физико-математических наук,  
главный научный сотрудник, ст. науч. сотр.,  
Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН  
gavrilov@ifz.ru

**Харитонов Андрей Леонидович**

кандидат физико-математических наук,  
ведущий научный сотрудник, ст. науч. сотр.,  
Институт земного магнетизма,  
ионосферы и распространения радиоволн  
им. Н.В. Пушкова РАН  
ahariton@izmiran.ru

**Gavrilov Segei Vladilenovich**

Doctor physical and mathematical sciences,  
Chief researcher,  
Schmidt Institute of Physics of the Earth,  
RAS  
gavrilov@ifz.ru

**Kharitonov Andrey Leonidovich**

Candidate physical and mathematical sciences,  
Leading researcher,  
Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism,  
Ionosphere and Radio Wave Propagation,  
RAS  
ahariton@izmiran.ru

**Аннотация.** В предположении ньютоновской и неньютоновской реологии мантии выполнено численное моделирование 2D термической конвекции, возбуждаемой диссипативным тепловыделением в мантийном клине при субдукции Черноморской микроплиты под Крымский полуостров. В рамках построенной модели локализация аномалии теплового потока в тылу Крымских гор и протяженность зоны повышенного теплового потока соответствуют скорости субдукции  $\geq 10$  мм в год при концентрации воды  $\sim 1$  весовой %. В случае ньютоновской реологии конвекция, могущая выносить тепло и мантийные углеводороды к земной поверхности, возбуждается при скорости субдукции  $\sim 102$  мм/год. Такая скорость представляется чрезмерной, что, по-видимому, свидетельствует о преобладании роли неньютоновской реологии. Скорость субдукции Черноморской микроплиты может быть ниже 10 мм/год при концентрации воды в мантийном клине более 1 вес. %. Отмечается, что локализация 2D зоны повышенного теплового потока в тылу Горного Крыма совпадает с расположением нефтегазоносной зоны в этой области Крымского полуострова.

**Ключевые слова:** термическая конвекция в мантийном клине, угол и скорость субдукции, реологические параметры мантии, фазовые переходы в мантии.

**Annotation.** For both Newtonian and non-Newtonian mantle rheology laws the numerical model of the 2D dissipation-driven mantle wedge thermal convection is constructed for the case of subduction of the Black sea micro plate under the Crimea peninsula. Horizontal extent of the positive 2D heat flux anomaly zone localized in the rear of the Crimea mountains is shown to correspond to the model subduction velocity  $\geq 10$  mm per year for the water content of  $\sim 1$  weight %/. For Newtonian rheology upwelling convective flow transporting heat to the Earth's surface is formed at the subduction velocity of  $\sim 102$  mm per year which appears too excessive and probably evidences of that the non-Newtonian rheology dominates in the mantle wedge. The velocity in convective vortices in the mantle wedge exceeds  $\square 10$  m per year. the subduction velocity may be less than 10 mm a year. for the water content in the mantle wedge over  $\sim 1$  weight %. The upwelling convective flow is shown to transport mantle hydrocarbons to the Earth's surface since the zone of oil and gas accumulation coincides with the 2D zone of heat flux anomaly.

**Keywords:** mantle wedge thermal convection, subduction angle and velocity, mantle rheology constants, phase transitions in the mantle.

## Введение

Согласно [1, 112], взаимодействие литосферных плит в Крымско-Кавказском регионе приводит к процессу пододвигания Черноморской микроплиты под Крымский полуостров (под Скифскую плиту). Вследствие этого происходит образование сейсмофокальной плоскости, по которой в результате сейсмических толчков поднимается Крым. Скорости современных вертикальных движений – поднятия Горного Крыма и опускания прикрымской области Черноморской микроплиты – составляют соответственно  $\sim 4$  мм/год и  $\sim 10$  мм/год. Горный Крым – это складчато-надвиговая область в составе Альпийско-Гималайско-Индонезийского пояса [2, 37].



В [3, 934] по распределению осадочной толщи на дне Черного моря оценивается скорость субдукции Черноморской микроплиты под Крымский полуостров, равная ~1 мм/год. Об иных оценках скорости субдукции, насколько известно, в литературе не сообщается, однако полученная горизонтальная скорость ~1 мм/год представляется заниженной и не соответствующей наблюдаемым вертикальным скоростям Горного Крыма и Черноморской микроплиты ~4 мм/год и ~10 мм/год.

Согласно [4, 37; 5, 359; 6, 63] в мантийном клине возможны два типа мелкомасштабной термической конвекции, движимой диссипативным нагревом: 3D конвекция в виде струй, восходящих к вулканической цепи, и 2D конвекция в виде вихрей Карига, ориентированных поперек субдукции. В [4, 39] показано, что пространственное разделение этих двух типов термической конвекции возникает вследствие зависимости коэффициента эффективной вязкости мантии от температуры, причем вихри Карига, если они формируются, располагаются позади вулканической гряды. Скорость субдукции Черноморской микроплиты под Крымский полуостров оценивается, насколько известно, только в [3, 933], хотя сам факт субдукции очевиден и проявляется в регистрируемой сейсмичности и наблюдаемым вертикальным движениям поверхности. Не вполне ясно, играют ли существенную роль в формировании Горного Крыма вулканические процессы, или горные сооружения имеют надвиговую и/или складчатую природу. В [1, 112] указывается на противоречивость суждений о вулканизме Крыма в литературе, хотя на рис. 2.4 ее диссертации изображены извергающиеся вулканы в Горном Крыму. Логично предположить, что два максимума аномалии теплового потока, наблюдаемые в южной части полуострова ([7; 1, 111 рис. 2, 4]), обязаны своим происхождением конвективному соответственно 3D и 2D подводу тепла из мантийного клина. Второй из этих максимумов, расположенный в тылу Горного Крыма и намного более выраженный, имеет двумерную структуру и, видимо, связан с 2D конвекцией в мантийном клине. Численное моделирование 2D конвекции, происходящей в форме вихрей Карига и предположительно выносящей тепло, может позволить высказать суждение о средней скорости субдукции Черноморской микроплиты под Крымский полуостров и о реологических параметрах мантии. Показано, что поперечная протяженность зоны повышенного теплового потока соответствуют средней скорости субдукции  $V \geq 10$  мм в год в случае неньютоновской реологии при наблюдаемом угле субдукции ~15° и среднем содержании воды в мантийном клине ~1 весовой %.

**Описание модели**

В качестве модели термомеханического состояния мантийного клина между подошвой Скифской плиты, на которой находится Крымский полуостров, и поверхностью Черноморской микроплиты, пододвигающейся под Крым под углом  $\beta$  со скоростью  $V$ , примем модель, получаемую при  $Pr \rightarrow \infty$  в приближении Буссинеска из системы двумерных безразмерных уравнений гидродинамики для функции тока  $\psi$  и температуры  $T$  [8, 732]:

$$(\partial_{zz}^2 - \partial_{xx}^2)\eta(\partial_{zz}^2 - \partial_{xx}^2)\psi + 4\partial_{xz}^2\eta\partial_{xz}^2\psi = RaT_x - Ra^{(410)}\Gamma_x^{(410)} - Ra^{(660)}\Gamma_x^{(660)}, \tag{1}$$

$$\partial_t T = \Delta T - \psi_z T_x + \psi_x T_z + \frac{Di}{Ra} \times \frac{\tau_{ik}^2}{2\eta} + Q. \tag{2}$$

Здесь  $\eta$  – безразмерный коэффициент динамической вязкости, символ  $\partial$  и индексы означают частные производные по координатам  $x$  (горизонтальной),  $z$  (вертикальной) и времени  $t$ ,  $\Delta$  – оператор Лапласа,  $\Gamma^{(410)}$  и  $\Gamma^{(660)}$  – объемные доли тяжелой фазы на фазовых переходах на глубинах 410 км и 660 км, компоненты скорости  $V_x$  и  $V_z$  связаны с функцией тока как:

$$V_x = \psi_z, V_z = -\psi_x, \tag{3}$$

а безразмерные числа Рэлея  $Ra$ , фазовые  $Ra^{(410)}$ ,  $Ra^{(660)}$  и диссипативное  $Di$  есть:

$$Ra = \frac{\alpha \rho g d^3 T_1}{\bar{\eta} \chi} = 5.55 \times 10^8, Ra^{(410)} = \frac{\delta \rho^{(410)} g d^3}{\bar{\eta} \chi} = 6.6 \times 10^8, \\ Ra^{(660)} = \frac{\delta \rho^{(660)} g d^3}{\bar{\eta} \chi} = 8.5 \times 10^8, Di = \frac{\alpha g d}{c_p} = 0.165, \tag{4}$$

где  $\alpha = 3 \cdot 10^{-5} K^{-1}$  – коэффициент теплового расширения,  $\rho = 3.3 \cdot 10^3$  кг.м<sup>-3</sup> – плотность мантии,  $g$  – ускорение силы тяжести,  $c_p = 1.2 \cdot 10^3$  Дж . кг<sup>-1</sup>.K<sup>-1</sup> – удельная теплоемкость при постоянном давлении,  $T_1 = 1950 K$  – температура основания переходной зоны мантии (ПЗМ) на глубине 660 км, считающейся нижней границей модельной области,  $Q = 6.25 \cdot 10^{-4}$ .мВт.м<sup>-3</sup> – объемная мощность тепловыделения в коре,  $\tau_{ik}$  – тензор вязких напряжений,  $d = 660$  км – вертикальный размер модельной области,  $\bar{\eta} = 1018$  Па.с – масштабный множитель вязкости,  $\chi = 1$  мм<sup>2</sup>.с<sup>-1</sup> – ко-



эффицент температуропроводности,  $\delta\rho^{(410)} = 0.07\rho$  и  $\delta\rho^{(660)} = 0.09\rho$  – скачки плотности на фазовых переходах на глубинах 410 км и 660 км. В (1), (2) масштабными множителями для времени  $t$ , напряжений  $\tau_{ik}$  и функции тока  $\psi$  служат соответственно величины  $d^2 \cdot \chi^{-1}$ ,  $\bar{\eta}\chi \cdot d^{-2}$  и  $\chi$ .

Ранее в [9, 38] строилась модель термомеханического состояния мантийного клина под Тимано-Печерской плитой в предположении линейной реологии для диффузионного механизма ползучести, доминирующего в мантии на глубинах более ~200 км [10, 19304], зависимость коэффициента вязкости  $\eta$  от температуры  $T$  и литостатического давления  $p$  принималась в виде [11, 86]:

$$\eta = \frac{\mu}{2A} \left( \frac{h}{b^*} \right)^m \exp \frac{E^* + pV^*}{RT}, \quad (5)$$

где для «влажного» оливина  $A = 5.3 \cdot 10^{15} \text{ с}^{-1}$ ,  $m = 2.5$ , размер зерна  $h = 10^{-1} - 10^1 \text{ мм}$ , вектор Бюргера  $b^* = 5 \cdot 10^{-7} \text{ мм}$  [12, 275], энергия активации  $E^* = 240 \text{ кДж}\cdot\text{моль}^{-1}$ , объем активации  $V^* = 5 \cdot 10^3 \text{ мм}^3\cdot\text{моль}^{-1}$ ,  $\mu = 300 \text{ ГПа}$  – нормирующее значение модуля сдвига,  $R$  – универсальная газовая постоянная. При этих значениях констант, выбранном масштабном множителе  $\bar{\eta} = 1018 \text{ Па}\cdot\text{с}$  и размере зерна  $h = 1.6 \text{ мм}$  безразмерный коэффициент вязкости, который также обозначается через  $\eta$ , равен:

$$\eta = 5.0 \times 10^{-7} \exp \frac{14.8 + 6.72 \times (1 - z)}{T}, \quad (6)$$

где  $T$  – безразмерная температура, а безразмерная координата  $z$ , нормированная на  $d$ , отсчитывается вверх от основания ПЗМ (ось  $x$  направлена по нижней границе ПЗМ против субдукции).

Чтобы проверить, насколько для получаемых оценок скорости субдукции Черноморской микроплиты существенно предположение о линейной реологии мантии, в настоящей работе проведен расчет также для неньютоновской реологии, для которой формулы вязкости (5)–(6) переписываются в виде:

$$\eta = \frac{1}{2AC_w^r \tau^{n-1}} \left( \frac{h}{b^*} \right)^m \exp \frac{E^* + pV^*}{RT}, \quad (7)$$

где согласно [13, 7], для «влажного» оливина  $n = 3$ ,  $r = 1.2$ ,  $m = 0$ ,  $\tau = (\tau_{ik}^{(2)})^{1/2}$ ,  $E^* = 480 \text{ кДж}\cdot\text{моль}^{-1}$ ,  $V^* = 11 \cdot 10^3 \text{ мм}^3\cdot\text{моль}^{-1}$ ,  $A = 10^2 \text{ с}^{-1} \cdot (\text{МПа})^{-n}$ ,  $C_w > 10^{-3}$  для влажного оливина – весовая доля воды (в %).

Следует отметить, что значения констант в (7) у разных авторов, на которых приводятся ссылки в [13, 19], весьма разнятся, и выше приведены усредненные значения. При  $C_w = 10^{-3}$  с учетом:

$$\tau_{ik}^2 = 4\eta^2 [(\psi_{zz} - \psi_{xx})^2 / 2 + 2\psi_{xz}^2], \quad (8)$$

безразмерная вязкость есть:

$$\eta = \frac{1.00}{[(\psi_{zz} - \psi_{xx})^2 / 2 + 2\psi_{xz}^2]^{1/3}} \times \exp \frac{10.0 + 5.0 \times (1 - z)}{T}. \quad (9)$$

Отношение сторон модельной области примем равным 1:3/7, так что при субдукции по диагонали модельной области угол субдукции составит  $\beta \approx 15^\circ$ , а расчетная скорость  $V = 45 \text{ мм}\cdot\text{год}^{-1}$  в единицах  $\chi \cdot d^{-1}$  равна  $V = 0.938 \cdot 10^3$ , т.е. в субдуцирующей Черноморской микроплите ее компоненты  $V_x = -0.898 \cdot 10^3$  и  $V_z = -0.268 \cdot 10^3$ .

Следуя [14, 139], примем фазовые функции  $\Gamma^{(l)}$  в виде (напомним, что ось  $z$  здесь направлена вверх, поэтому знаки изменены):

$$\Gamma^{(l)} = \frac{1}{2} \left( 1 - th \frac{z - z^{(l)}(T)}{w^{(l)}} \right), \quad z^{(l)}(T) = z_0^{(l)} - \frac{\gamma^{(l)}}{\rho g} (T - T_0^{(l)}), \quad (10)$$

где  $z^{(l)}(T)$  – глубина  $l$ -го фазового перехода,  $z_0^{(l)}$  и  $T_0^{(l)}$  – усредненные глубина и температура фазового перехода,  $\gamma^{(410)} = 3 \text{ МПа}\cdot\text{К}^{-1}$  и  $\gamma^{(660)} = -3 \text{ МПа}\cdot\text{К}^{-1}$  – наклоны кривых фазового равновесия,  $w^{(l)}$  – характерная ширина  $l$ -го фазового перехода  $T_0^{(410)} = 1800 \text{ К}$ ,  $T_0^{(660)} = 1950 \text{ К}$  – средние температуры фазовых переходов.



Теплоты фазовых переходов, как и в [14, 142], в (2) не учитываются ввиду незначительности в случае развитой конвекции. Из (10) получаем:

$$\Gamma_x^{(l)} = -\frac{\gamma^{(l)}}{2\rho g w^{(l)}} ch^{-2} \frac{z - z_0^{(l)} + \gamma^{(l)}(T - T_0^{(l)})/\rho g}{w^{(l)}} \times T_x, \tag{11}$$

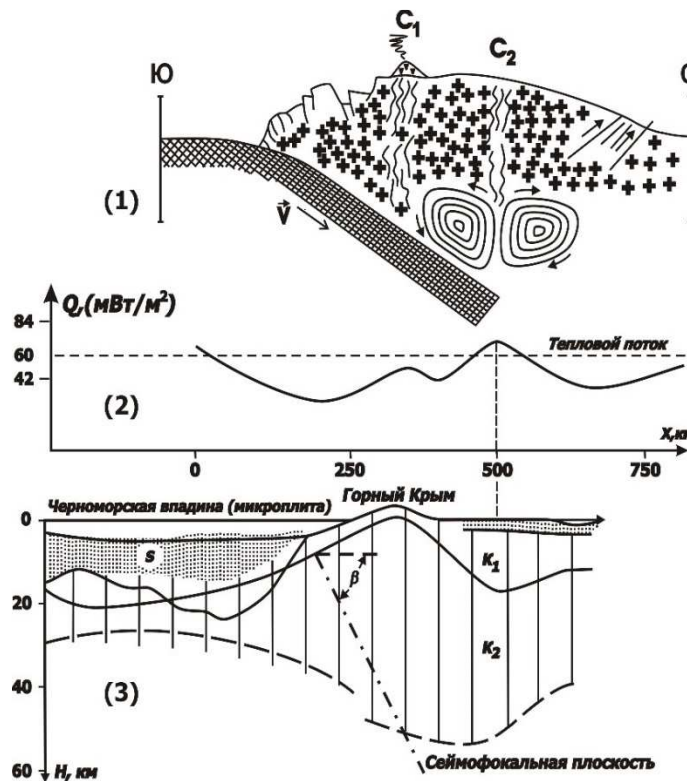
откуда видно, что фазовый переход с  $\gamma^{(l)} > 0$  усиливает конвекцию (при  $l = 410$ ), а фазовый переход с  $\gamma^{(l)} < 0$  (при  $l = 660$ ) – ослабляет. В безразмерном виде  $z_0^{(410)} = 0.38$ ,  $z_0^{(660)} = 0$ ,  $w^{(l)} = 0.05$ ,  $\gamma^{(410)} = 2.55 \cdot 10^9$ ,  $\gamma^{(660)} = -2.55 \cdot 10^9$ ,  $T_0^{(410)} = 0.92$ ,  $T_0^{(660)} = 1$ , и в (1):

$$\Gamma_x^{(l)} = -\frac{\delta\rho^{(l)}}{\rho Ra^{(l)}} \frac{\gamma^{(l)}}{2w^{(l)}} ch^{-2} \frac{z - z_0^{(l)} + \gamma^{(l)} \frac{\delta\rho^{(l)}}{\rho Ra^{(l)}} (T - T_0^{(l)})}{w^{(l)}} \times T_x. \tag{12}$$

В качестве граничных условий приняты изотермичность горизонтальных и адиабатичность вертикальных границ, условия прилипания и непроницаемости границ (кроме «окон» внедрения и выхода субдуцирующей плиты, в которых задана скорость субдукции, и проницаемости удаленной от зоны субдукции границы под прямым углом, близким к углу выхода вынужденного мантийного потока при пологой субдукции). Величина  $Q$  в (2) отлична от нуля в континентальной и океанической коре мощностью 40 км и 7 км соответственно. Начальная температура вертикальных границ принята по модели охлаждения полупространства в течение 1 млрд лет для Скифской плиты и 100 млн лет для Черноморской микроплиты.

**Результаты и обсуждение**

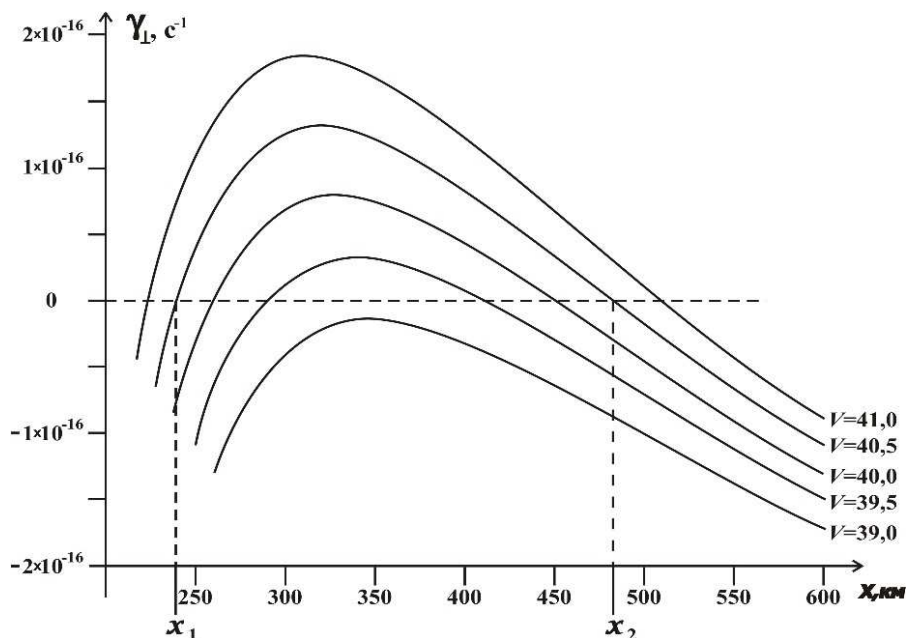
Предполагая, что второй, более удаленный от желоба, максимум теплового потока  $Q$  возникает над конвективным течением, восходящим к области  $C_2$  на рисунке 1, и размер конвективной ячейки равен расстоянию между минимумами  $Q$ , расположенными по обе стороны максимума  $Q$  (т.е. минимумы  $Q$  расположены над нисходящими конвективными течениями), можно оценить размер конвективной ячейки ~250 км.



**Рисунок 1** – (1) – Схематическое поперечное сечение области субдукции Черноморской микроплиты под Крымский полуостров (Скифскую плиту);  $C_1$  и  $C_2$  – зоны восходящих конвективных 3D и 2D потоков в областях максимумов теплового потока; вихревые линии тока – возможные вихри Карига, соответствующие 2D конвекции в мантийном клине; (2) – распределение теплового потока в южной части Крыма; (3) – положение Черноморской микроплиты, субдуцирующей под Крымский полуостров, и сейсмофокальной плоскости под Горным Крымом, S – осадочные породы; по [1, 111]



Для первоначальной оценки средней скорости субдукции Черноморской микроплиты рассмотрим зависимость от горизонтальной координаты  $x$  инкремента  $\gamma_{\perp}(x)$  конвективной неустойчивости в виде валлов, ориентированных поперек субдукции для модели мантии с постоянной вязкостью, зависимость которой от температуры и давления учитывается усредненным образом, а именно, множитель, описывающий зависимость вязкости от температуры и давления, считается равным его среднему значению. Зависимости  $\gamma_{\perp}(x)$ , вычисленные по аналитическим формулам в [4, 42], приведены на рисунке 2 для угла субдукции  $\beta \approx 15^\circ$  и различных скоростей субдукции  $V$ , указанных на рисунке в мм в год.



**Рисунок 2** – Распределение  $\gamma_{\perp}(x)$  инкрементов конвективной неустойчивости как функции горизонтального расстояния  $x$  при различных скоростях субдукции  $V$ , указанных в мм в год; в зоне  $(x_1, x_2)$  с  $\gamma_{\perp}(x) > 0$  протяженностью  $\sim 250$  км при  $V = 40.5$  мм/год возбуждается конвекция, обеспечивающая аномальный 2D тепловой поток

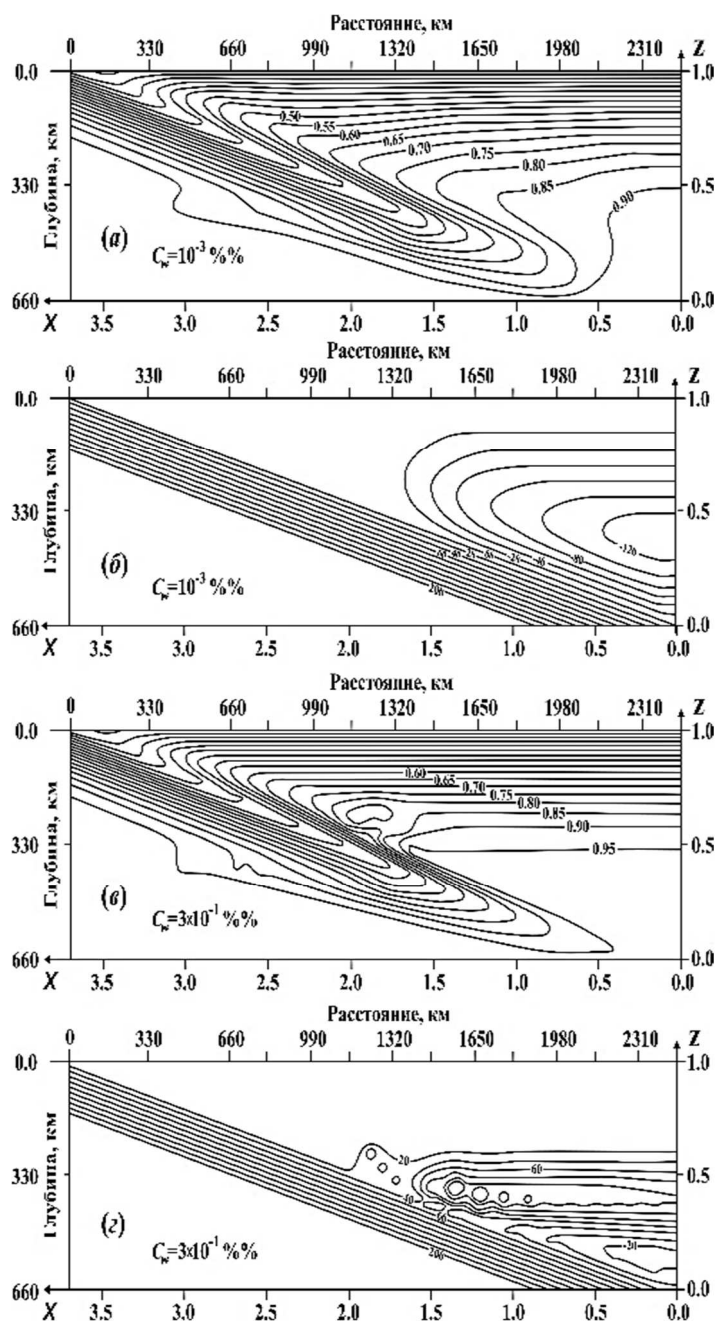
Следует подчеркнуть, что  $\gamma_{\perp}(x)$  не зависит от вязкости, так как движущей силой конвекции служит диссипативное тепловыделение, пропорциональное вязкости, но, с другой стороны, чем больше вязкость, тем труднее возбудить конвекцию. Из рисунка 2 видно, что размер конвективной зоны с  $\gamma_{\perp}(x) > 0$  достигает  $x_1 - x_2 \approx 250$  км (т.е. единственная конвективная ячейка размером  $\sim 250$  км действительно возбуждается), при скорости  $V = 40.5$  мм в год, что и может служить первоначальной оценкой скорости субдукции.

Для построения согласованной более точной модели мелкомасштабной термической конвекции в мантийном клине между настилающей Скифской плитой и субдуцирующей Черноморской микроплитой, ради повышения точности вычислений вначале необходимо положить в (1)–(2)  $Ra \rightarrow 0$ ,  $Di = 0$ , т.е. рассчитать модель погружающейся влиты, мантийного клина и настилающей плиты без учета вязкой диссипации и конвекции. Это связано с тем, что при  $Ra$  и  $Di$  (4) конвекция в модели проходит стадии с большими скоростями, и для обеспечения устойчивости расчета квазистационарного состояния требуются крайне малые шаги по времени. При этом трудно рассчитать термическое состояние погружающейся плиты, настилающей плиты и индуцированного возвратного потока. Полагая вначале в (1)–(2)  $Ra \rightarrow 0$ ,  $Di = 0$ , т.е. учитывая только теплопроводность и адвекцию тепла, и интегрируя (1)–(2) по пространственным координатам методом конечных элементов на сетке  $104 \times 104$  и по временной координате методом Рунге-Кутты 3-го порядка при  $V = 45$  мм в год, получим квазистационарные безразмерные  $\psi$  и  $T = T_R$ , изображенные на рисунке 3, где линии тока на рисунке показаны с интервалом 0.25, а изотермы – с интервалом 0.05.

На рисунке 3 показаны результаты расчета для неньютоновской реологии (формулы (7)–(9) для вязкости), причем на рисунке 3 (а, б) приведены результаты для  $C_w = 10^{-3}$  весовых %% а на рисунке 3 (в, г) для  $C_w = 3 \cdot 10^{-1}$  весовых %% . Скорость  $V = 45$  мм в год выбрана как наиболее соответствующая наблюдаемому распределению теплового потока. Плита, субдуцирующая с заданной скоростью  $V$ , показанная равноотстоящими диагональными линиями тока, считается жесткой, а коэффициент вязкости в зоне трения литосферных плит при температурах ниже 1200 К понижается по сравнению с (5) на два порядка величины. Последним учтен эффект смазки за счет субдуцирующих осадков, которые частично затягиваются погружающейся плитой и препятствуют прилипанию к ней настилающей литосферы [5, 349]. Из сравнения рисунка 3 (б) и (г) видно, что возвратный поток, индуцируется в виде единого вихря при

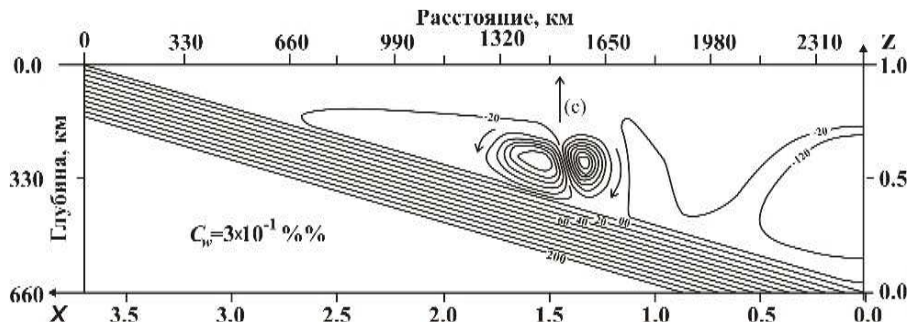


$C_w = 10^{-3}$  весовых %%, и в виде 2 расположенных один над другим вихрей при  $C_w = 3 \cdot 10^{-1}$  весовых %%, причем эти вихри сильно сжаты в вертикальной направлении, и верхний (с  $\psi > 0$ ) вращается по часовой стрелке, а нижний (с  $\psi < 0$ ) – против часовой стрелки. Микровихри размером  $\sim 10^2$  км, формирующиеся между встречными потоками внутри верхнего вынужденного течения, очевидно, обязаны своим происхождением неустойчивости типа тангенциального разрыва (неустойчивости Кельвина-Гельмгольца).



**Рисунок 3** – Квазистационарные распределения безразмерных функции тока и температуры в области субдукции Черноморской микроплиты под Скифскую плиту без учета эффектов диссипативного нагрева и конвекции в случае неньютоновской реологии мантии для (а, б) – концентрации воды  $C_w = 10^{-3}$  весовых %% и (в, г) – концентрации воды  $C_w = 3 \cdot 10^{-1}$  весовых %%. Параллельные эквидистантные линии тока соответствуют субдуцирующей Черноморской микроплите, линии тока над литой – вынужденному мантийному движению, вызванному субдукцией

Полагая затем безразмерные параметры в (1)–(2) согласно (4), т.е. включая эффекты диссипации и конвекции, и интегрируя (1)–(2), находим, что в случае неньютоновской реологии при  $C_w = 10^{-3}$  весовых % конвекция не возбуждается, а при  $C_w = 3 \cdot 10^{-1}$  весовых %% вынужденный мантийный поток над субдуцирующей плитой за безразмерное время  $\sim 0.6 \cdot 10^{-6}$  (в размерном виде  $\sim 10^5$  лет) разрушается конвекцией, которая, по достижении стадии развитой конвекции, принимает вид, изображенный на рисунке 4.

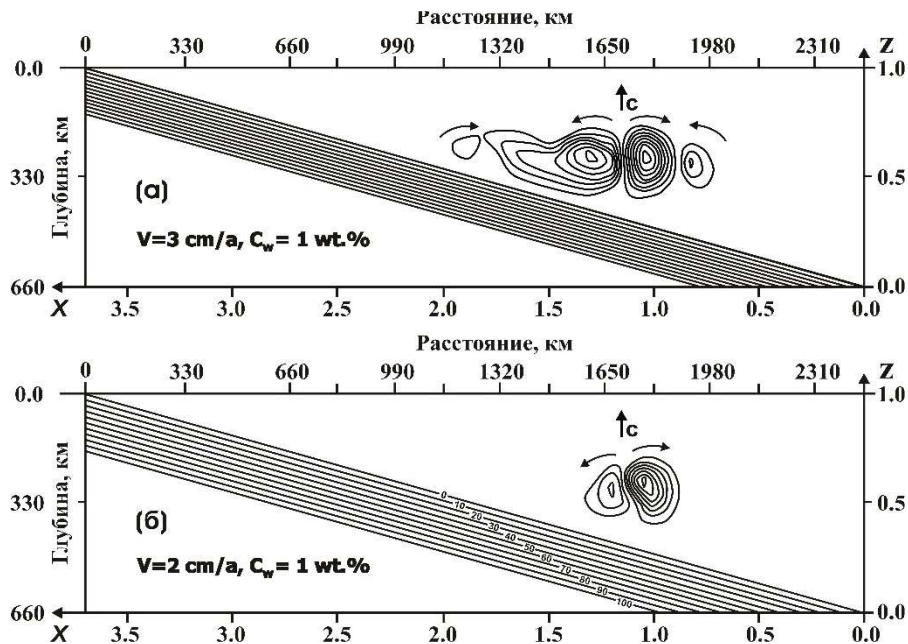


**Рисунок 4** – Квазистационарные распределения безразмерной функции тока в мантийном клине с учетом эффектов диссипативного нагрева и конвективной неустойчивости для неньютоновской реологии и концентрации воды  $C_w = 3 \cdot 10^{-1}$  весовых  $\% \%$ . Восходящий конвективный поток показанный стрелкой (с), может выносить мантийные углеводороды к области  $C_2$  на рисунке 1 на дневной поверхности Крыма

Видно, что вихревые линии тока, показанные с интервалом  $4 \cdot 10^4$ , действительно соответствуют одной конвективной ячейке, возбуждающейся при скорости субдукции  $V = 45$  мм/год. Размер конвективной ячейки порядка 300 км, т.е. близок к наблюдаемому расстоянию между минимумами теплового потока под зоной  $C_2$  на рисунке 1, хотя конвективные вихри располагаются приблизительно в 2 раза дальше от глубоководного желоба, чем наблюдается в действительности, что, по-видимому, связано с тем, что в реальном мантийном клине нет острого угла при вершине. Густота линий тока соответствует скорости конвективных движений более  $10$  м·год $^{-1}$ .

Таким образом, расчет для неньютоновской реологии с вязкостью (7)–(9) показывает, что при снижении вязкости на три порядка по сравнению с (7)–(9), т.е. при  $C_w = 3 \cdot 10^{-1}$  весовых  $\% \%$ , в мантийном клине развивается конвекция в виде двух микровихрей, могущая обеспечить аномальный 2D тепловой поток. В случае ньютоновской реологии с вязкостью (5)–(6) конвекция подобного типа возбуждается только при чрезмерно высокой скорости субдукции  $>10^2$  мм в год, что, видимо, свидетельствует о доминировании в мантийном клине неньютоновской реологии.

Согласно [11, 131] содержание воды в переходной зоне в мантийном клине может достигать  $\sim 3$  весовых  $\%$ . Для выяснения роли воды, поступающей в мантийный клин из субдуцирующего блока, выполнены расчеты конвекции для среднего содержания воды  $\sim 1$  весовой  $\% \%$  и скоростей субдукции, равных 30, 20 и 10 мм/год. Результаты расчета конвекции показаны на рисунке 5, где безразмерные прямые линии тока, соответствующие субдуцирующей Черноморской микроплите, показаны с интервалом 10, а линии тока в конвективных микровихрях – с интервалом  $10^6$ , для скоростей субдукции 30 мм/год (рис. 5а) и 20 мм/год (рис. 5б).



**Рисунок 5** – Квазистационарные распределения безразмерной функции тока в мантийном клине с учетом эффектов диссипативного нагрева и конвективной неустойчивости для неньютоновской реологии и концентрации воды  $C_w = 1$  весовой  $\% \%$  при скоростях субдукции (а) – 30 мм/год и (б) – 20 мм/год. Восходящие конвективные потоки показанные стрелками (с), могут выносить мантийные углеводороды к области  $C_2$  на рисунке 1 на дневной поверхности Крыма



Средние безразмерные скорости конвективных движений в левом микровихре составляют  $\sim 15.2 \cdot 10^7$ ,  $\sim 7.1 \cdot 10^7$  и  $\sim 0.05 \cdot 10^7$  соответственно при скоростях субдукции 30, 20 и 10 мм/год. Таким образом, можно считать, что 2D конвекция возникает при скорости субдукции более  $\sim 10$  мм/год при концентрации воды  $C_w \cong 1$  весовой %%. Поскольку среднее содержание воды в мантийном клине едва ли может быть более  $\sim 1$  весовой %% даже при содержании воды в переходной зоне мантии  $\sim 3$  весовых %, полученную скорость субдукции Черноморской микроплиты  $\sim 10$  мм/год можно считать минимальной оценкой скорости субдукции.

Отметим, что в случае ньютоновской реологии образование в мантийном клине конвективных валов, ориентированных поперек субдукции, как на рисунке 3, характерно для малых углов субдукции, и уже при  $\beta = 30^\circ$  поперечные валы не возникают [15, 8; 5, 375]. При рассмотренном угле субдукции  $\beta = 15^\circ$  конвекция не возникает при скорости  $V < 10$  см·год<sup>-1</sup>. Очевидно, наличие двумерной конвекции в узком мантийном клине связано с большими, чем в широком клине, вязкими напряжениями и, следовательно, с большим диссипативным нагревом. Для неньютоновской реологии мантии конвекция при  $V = 45$  мм·год<sup>-1</sup> возникает при концентрации воды  $C_w \sim 3 \cdot 10^{-1}$  весовых %, и  $V = 10$  мм·год<sup>-1</sup> при  $C_w \sim 1$  весовой %%. Следует отметить, что в многочисленных исследованиях термомеханического состояния мантии в зонах субдукции (см., например, [6, 69; 5, 352] и обширную библиографию в этих статьях) не получалось конвекции в виде валов, поперечных к направлению субдукции, так как модели с крайне малыми углами (и достаточно большой скоростью) субдукции не рассматривались.

### Выводы

В случае неньютоновской реологии характерный размер конвективной ячейки, полученной в модели мантийного клина, сформировавшегося при субдукции Черноморской микроплиты под Крымский полуостров, составляет  $\sim 300$  км, что при скорости субдукции 10 мм в год при среднем содержании воды  $\sim 1$  весовой %% приблизительно совпадает с характерным пространственным размером 2D аномалии теплового потока в тылу Горного Крыма. Скорость движения в конвективных вихрях может превышать  $\sim 10$  метров в год, что, может быть достаточно для обеспечения эффективного выноса мантийных углеводородов из мантийного клина к дневной поверхности. В [16, 274] отмечается, что потенциально нефтегазоносная зона в предгорном Крыму располагается приблизительно в той же области, где наблюдается положительная 2D аномалия теплового потока в тылу Горного Крыма в зоне  $S_2$  на рисунке 1 настоящей работы.

### Литература

1. Ниметулаева Г.Ш. Обеспечение экологической безопасности территории Бахчисарайского района Крыма при оползневых явлениях на основе геодинамического районирования недр: дис. ... кандидата технических наук. – М. : Московский государственный горный университет, – 2004. – 200 с.
2. Юдин В.В. Геология Крыма на геодинамической основе. – Симферополь. – 2001. – 46 с.
3. 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.
4. Гаврилов С.В. Исследование механизма формирования островных дуг и тылового раздвигания литосферы // Геофизические исследования. – 2014. – Т. 15. – № 4. – С. 35–43.
5. Gerya T.V. Future directions in subduction modeling // J. of Geodynamics. – 2011. – Vol. 52. – P. 344–378.
6. Gerya T.V., Connolly J.A.D., Yuen D.A., Górczyk W., Cape A.M.I. Seismic implications of mantle wedge plumes // Phys. Earth Planet. Inter. – 2006. – Vol. 156. – P. 59–74.
7. Смирнов Я.Б. (ред.). Карта теплового потока территории СССР и сопредельных районов. – М. : ГУГК, – 1980.
8. Schubert G., Turcotte D.L., Olson P. Mantle Convection in the Earth and Planets. – New York : Cambridge University Press, – 2001. – 940 p.
9. Гаврилов С.В., Харитонов А.Л. Оценка скорости субдукции Русской платформы под Сибирскую в палеозое по распределению зон выноса мантийных углеводородов в Западной Сибири // Геофизические Исследования. – 2015. – Т. 16. – № 4. – С. 36–40.
10. Billen M., Hirth G. Newtonian versus non-Newtonian Upper Mantle Viscosity: Implications for Subduction Initiation // Geophys. Res. Lett. – 2005. – Vol. 32. (L19304). – Doi: 10.1029/2005GL023458
11. Жарков В.Н. Геофизические исследования планет и спутников. – М. : ОИФЗ РАН. – 2003. – 102 с.
12. Zharkov V.N. Physics of the Earth's Interiors. – Duesseldorf : Lambert Academic Publishing, 2019. – 438 p.
13. Трубицын В.П. Реология мантии и тектоника океанических литосферных плит // Физика Земли. – 2012. – № 6. – С. 3–22.
14. Трубицын В.П., Трубицын А.П. Численная модель образования совокупности литосферных плит и их прохождения через границу 660 км // Физика Земли. – 2014. – № 6. – С. 138–147.
15. Гаврилов С.В., Абботт Д.Х. Термомеханическая модель тепло- и массопереноса в окрестности зоны субдукции // Физика Земли. – 1999. – № 12. – С. 3–12.
16. Юдин В.В. Потенциально нефтегазоносные структуры Предгорного Крыма / Сборник докладов IV Международной конференции Крым-2002 «Геодинамика и нефтегазоносные структуры Черноморско-Каспийского региона». – Симферополь, 2003. – С. 271–279.





## References

1. Nimetulaeva G.Sh. Ensuring environmental safety of the territory of Bakhchisarayskiy rayon of Crimea in case of landslides based on geodynamic zoning of mineral resources : Dissertation. ... candidate of technical sciences. – Moscow State Mining University, – 2004. – 200 p.
2. Yudin V.V. Geology of Crimea on the Geodynamic Basis. – Simferopol. – 2001. – 46 p.
3. Ushakov S.A., Galushkin Yu.I., Ivanov O.P. Folding nature of precipitation at the bottom of the Black Sea in the transition zone to the Crimea and Caucasus // Reports of the USSR Academy of Sciences. – 1977. – Vol. 233. – № 5. – P. 932–935.
4. Gavrilov S.V. Investigation of the island arc formation mechanism and the rear lithosphere rear extension // Geophysical investigations. – 2014. – Vol. 15. – № 4. – P. 35–43.
5. Gerya T.V. Future directions in subduction modeling // J. of Geodynamics. – 2011. – Vol. 52. – P. 344–378.
6. Gerya T.V., Connolly J.A.D., Yuen D.A., Gorczyk W., Cape A.M.I. Seismic implications of mantle wedge plumes // Phys. Earth Planet. Inter. – 2006. – Vol. 156. – P. 59–74.
7. Smirnov Ya.B. (ed.). Heat flow map of the USSR territory and neighboring regions. – M. : GUGGK, – 1980.
8. Schubert G., Turcotte D.L., Olson P. Mantle Convection in the Earth and Planets. – New York : Cambridge University Press, – 2001. – 940 p.
9. Gavrilov S.V., Kharitonov A.L. Estimation of Subduction Rate of the Russian Platform under Siberian in Paleozoic Distribution of Mantle Hydrocarbon Export Zones in Western Siberia // Geophysical Investigations. – 2015. – Vol. 16. – № 4. – P. 36–40.
10. Billen M., Hirth G. Newtonian versus non-Newtonian Upper Mantle Viscosity: Implications for Subduction Initiation // Geophys. Res. Geophys. Lett. – 2005. – Vol. 32. (L19304). – Doi: 10.1029/2005GL023458
11. Zharkov V.N. Geophysical research of planets and satellites. – M. : OIFS OF WOUNDS. – 2003. – 102 p.
12. Zharkov V.N. Physics of the Earth's Interiors. – Duesseldorf : Lambert Academic Publishing, 2019. – 438 p.
13. Trubitsyn V.P. Mantle and tectonics rheology of the ocean lithospheric plates // Physics of the Earth. – 2012. – № 6. – P. 3–22.
14. Trubitsyn V.P., Trubitsyn, A.P. Numerical model of the lithospheric plate aggregate formation and its passing through the 660 km border // Physics of the Earth. – 2014. – № 6. – P. 138–147.
15. Gavrilov S.V., Abbott D.H. Thermomechanical model of a heat- and mass transfer in the vicinity of the subduction zone // Physics of the Earth. – 1999. – № 12. – P. 3–12.
16. Yudin V.V. Potentially oil-and-gas bearing structures of the Piedmont Crimea / Collection of reports of the IV International Conference of Crimea-2002 «Geodynamics and oil-and-gas bearing structures of the Black Sea-Caspian region». – Simferopol, 2003. – P. 271–279.