

**РАЗДЕЛ 6.  
ОБЩАЯ И РЕГИОНАЛЬНАЯ ГЕОЛОГИЯ, ПАЛЕОНТОЛОГИЯ И  
СТРАТИГРАФИЯ**

УДК 551.24, 550.36, 530

DOI 10.37279/2413-1717-2021-7-3-279-291

**ОЦЕНКА НЕФТЕГАЗОВЫХ ПЕРСПЕКТИВ КРЫМСКОГО ПОЛУОСТРОВА  
КАК РЕЗУЛЬТАТ ГЕОДИНАМИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ЗОНЫ  
СУБДУКЦИИ ВОСТОЧНО-ЧЕРНОМОРСКОЙ ПЛИТЫ ПОД ЛИТОСФЕРУ  
СКИФСКОЙ ПЛИТЫ**

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

*<sup>1</sup>ФГБУН «Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта Российской академии наук», Москва, Российская Федерация; <sup>2</sup>ФГБУН «Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова Российской академии наук», Москва, Российская Федерация  
E-mail: ahariton@izmiran.ru*

В данной статье, на основе данных о конвективном выносе тепла из мантийного клина к 2D аномалии теплового потока, наблюдаемой в тылу Центрально-Крымского свода, произведена оценка угла наклона мантийного клина и скорости субдукции Восточно-Черноморской литосферной плиты под литосферу Скифской континентальной плиты (Крымский регион). Учитываются эффекты фазовых переходов протяженностью 410 км и 660 км. В рамках построенной геодинамической модели горизонтальная протяженность аномалии 2D теплового потока, наблюдаемой в задней части горного пояса Крыма, соответствует скорости субдукции ~ 39.5 мм в год, что близко к наблюдаемой с помощью геодезических средств. Восходящие конвективные движения в мантии могут выносить мантийные известково-щелочные магмы (с содержащимися в них углеводородными геофлюидами) в приповерхностные слои земной коры, и, следовательно, нефтяные и газовые месторождения должны быть приурочены к зонам, расположенным в верхней части литосферы, над конвективными вихрями Карига.

**Ключевые слова:** субдукция литосферы, территория Скифской плиты, Крымский полуостров, конвективные потоки, реология мантийных пород, тепловой поток, нефтегазовые зоны.

**ВВЕДЕНИЕ**

Некоторые российские геологи и геофизики [1, 2, 3] считают, что пространственное распределение нефтегазовых месторождений отражает гетерогенное распределение скоплений углеводородов в зонах развития конвективных вихрей Карига [4] субдуцирующей верхней мантии. Одним из районов субдукции субокеанической литосферы под континентальную литосферу является район Крымского полуострова [5], под который постепенно, в течение 165 миллионов лет, поддвигалась Восточно-Черноморская литосферная плита [3]. Рассмотрим тектоническое строение Черноморского и окружающих его регионов, представленных на рис. 1.

В соответствии с проведенными геофизическими исследованиями [1; 6], в мантийном клине возможны два типа мелкомасштабной термической конвекции, вызываемой диссипативным нагревом: 3D конвекция в виде струй, восходящих к вулканической



ОЦЕНКА НЕФТЕГАЗОВЫХ ПЕРСПЕКТИВ КРЫМСКОГО ПОЛУОСТРОВА КАК РЕЗУЛЬТАТ ГЕОДИНАМИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ЗОНЫ СУБДУКЦИИ ВОСТОЧНО-ЧЕРНОМОРСКОЙ ПЛИТЫ ПОД ЛИТОСФЕРУ СКИФСКОЙ ПЛИТЫ

$$\partial_t T = \Delta T - (\psi_z \times T_x) + (\psi_x \times T_z) + (Di / Ra) \times (\tau_{ik}^2 / 2 \times \eta) + Q, \quad (2)$$

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,  $\Gamma_x^{(410)}$  и  $\Gamma_x^{(660)}$  — 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 (ось  $x$  направлена против субдукции, вдоль основания переходной зоны мантии (ПЗМ) на глубине 660 км, ось  $z$  — вверх от ПЗМ).

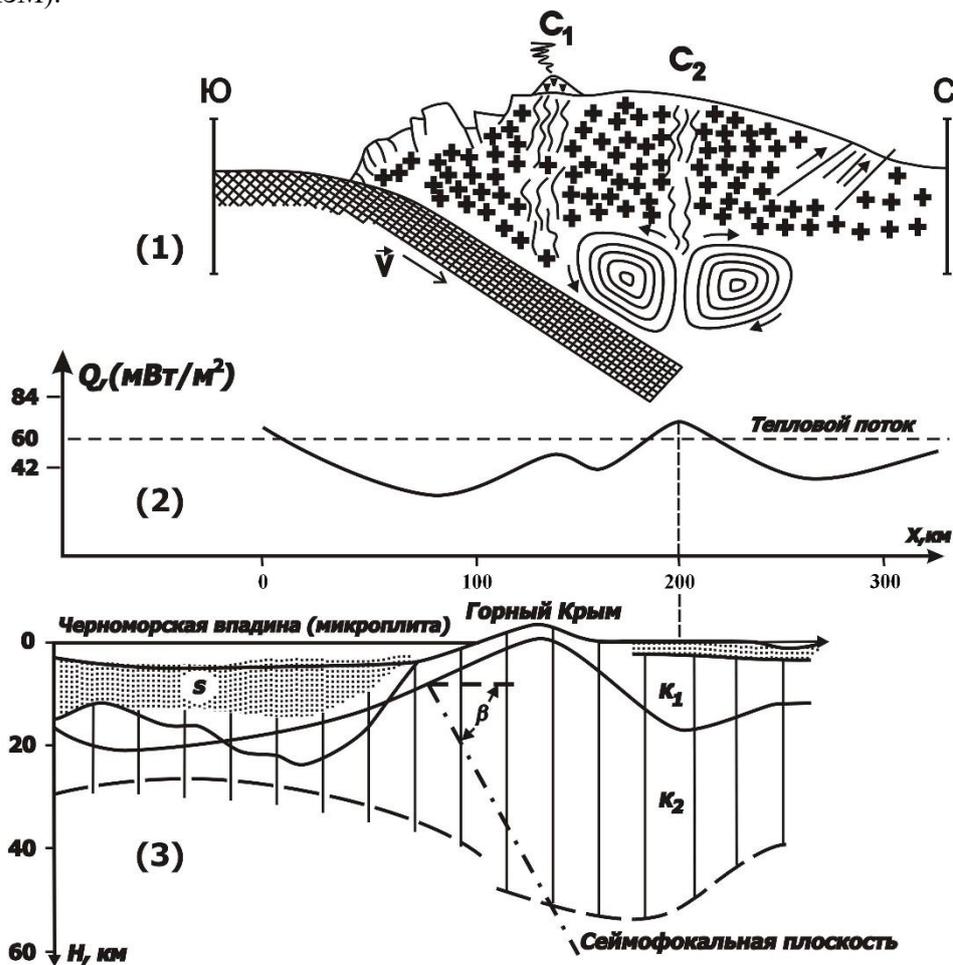


Рис. 2. Схематический глубинный геолого-геофизический разрез зоны субдукции в районе Крымского полуострова (по данным [5], с дополнениями) (1):  $C_2$  — зоны восходящих конвективных 3D и 2D потоков в областях максимумов теплового потока  $Q$ ; вихревые линии тока, соответствующие 2D конвекции в мантийном субдукционном клине;  $V$  — скорость субдукции Восточно-Черноморской плиты под литосферу Скифской плиты (Крымский полуостров).

Распределение теплового потока  $Q$  на территории Крымского полуострова (мВт/кв.м.) (2).

Расположение Восточно-Черноморской плиты, субдуцирующей под территорию Крымского полуострова (Скифская литосферная плита) и сейсмофокальной плоскости под ней, показанной штрих-пунктирной линией (3):  $S$  — осадочный слой Восточно-Черноморской впадины;  $K_1$  — гранито-диоритовый слой земной коры;  $K_2$  — «базальтовый» слой земной коры.

$$V_x = \psi_z, \quad V_z = -\psi_x, \quad (3)$$

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

$$Ra = [(a \times \rho \times g \times d^3 \times T_1) / (\eta_c \times \bar{\chi})] = 5.55 \times 10^8; \quad Ra^{(410)} = [(\delta\rho^{410} \times g \times d^3) / (\eta_c \times \bar{\chi})] = 6.60 \times 10^8; \\ Ra^{(660)} = [(\delta\rho^{660}) \times g \times d^3] / (\eta_c \times \bar{\chi}) = 8.50 \times 10^8; \quad Di = [(a \times g \times d) / c_p] = 0.165, \quad (4)$$

где  $a = 3 \times 10^{-5} K^{-1}$  — коэффициент теплового расширения,  $\rho = 3.3 \times 10^3 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3}$  — плотность мантии,  $g$  — ускорение силы тяжести,  $c_p = 1.2 \times 10^3 \text{ Дж} \cdot \text{кг}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$  — удельная теплоемкость при постоянном давлении,  $T_1 = 1950^\circ K$  — температура основания переходной зоны мантии (ПЗМ) на глубине 660 км, считающейся нижней границей модельной области,  $Q = 6.25 \times 10^{-4} \text{ мВт} \cdot \text{м}^{-3}$  — объемная мощность тепловыделения в коре,  $\tau_{ik}$  — тензор вязких напряжений,  $d = 800 \text{ км}$  — вертикальный размер модельной области,  $\eta_c = 10^{18} \text{ Па} \cdot \text{с}$  — масштабный множитель вязкости,  $\chi = 1 \text{ мм}^2 \cdot \text{с}^{-1}$  — коэффициент температуропроводности,  $\delta\rho^{410} = 0.07 \text{ с}$  и  $\delta\rho^{660} = 0.09 \text{ с}$  — скачки плотности на фазовых переходах на глубинах 410 км и 660 км. В формулах (1), (2) масштабными множителями для времени  $t$ , напряжений  $\tau_{ik}$  и функции тока  $\psi$  служат соответственно величины  $(d^2 \times \bar{\chi}^{-1})$ ,  $d$ ,  $(d^2 \times \eta_c \times \chi)$ . Выражение для неньютоновской вязкости принималась в виде [7]:

$$\eta = (.1/2 \times A \times C_w^r \times \tau^{r-1}) \times (h/b^*)^m \times \{\exp[(E^* + p \times V^*) / (R \times T)]\}, \quad (5)$$

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). Согласно [8], для «влажного» оливина  $n=3$ ,  $r=1.2$ ,  $m=0$ ,  $\tau = (\tau_{ik}^2)^{1/2}$ ,  $E^* = 480 \text{ кДж} \cdot \text{моль}^{-1}$ ,  $V^* = 11 \times 10^3 \text{ мм}^3 \cdot \text{моль}^{-1}$ ,  $A = 10^2 \text{ с}^{-1} \times (\text{МПа})^{-n}$ ,  $C_w > 10^{-3}$  для влажного оливина — весовая доля воды (в %) в этой горной породе. При  $C_w = 10^{-3}$  учетом формулы (6)

$$\tau_{ik}^2 = (4 \times \eta^2) \times [(\psi_{zz} - \psi_{xx})^2 / 2 + 2 \times \psi_{xz}^2] \quad (6)$$

безразмерная вязкость пород в субдукционном мантийном клине определяется как:

$$\eta = \{1.0 / [(\psi_{zz} - \psi_{xx})^2 / 2 + 2 \times \psi_{xz}^2]^{1/3}\} \times \exp\{[10.0 + 5.0 \times (1 - z)] / T\}. \quad (7)$$

Отношение сторон модельной области примем равным 1 : 0.4688, так что при субдукции по диагонали модельной области угол субдукции составит  $\beta = 65^\circ$ , а расчетная скорость  $V = 39.5 \text{ мм} \cdot \text{год}^{-1}$  в единицах  $(d^{-1} \times \chi)$  равна  $V = 0.914 \times 10^3$ , то есть в субдуцирующей Восточно-Черноморской плите ее компоненты  $V_x = -0.876 \times 10^3$  и  $V_z = -0.261 \times 10^3$ . Величина скорости субдукции подбиралась таким образом, чтобы в мантийном клине возбуждалась единственная 2D конвективная ячейка размером ~ 150 км (совпадающим с расстоянием между минимумами аномалии теплового потока

# ОЦЕНКА НЕФТЕГАЗОВЫХ ПЕРСПЕКТИВ КРЫМСКОГО ПОЛУОСТРОВА КАК РЕЗУЛЬТАТ ГЕОДИНАМИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ЗОНЫ СУБДУКЦИИ ВОСТОЧНО-ЧЕРНОМОРСКОЙ ПЛИТЫ ПОД ЛИТОСФЕРУ СКИФСКОЙ ПЛИТЫ

$Q$  под точкой  $C_2$  на рис. 2). Следуя [8], примем фазовые функции  $\Gamma^{(l)}$  в виде (напомним, что ось  $z$  здесь направлена вверх, поэтому знаки изменены):

$$\Gamma^{(l)} = (1/2) \times \{1 - th [z - z^{(l)}(T)]/w^{(l)}\}; z^{(l)}(T) = z_0^{(l)} - \{[\gamma^{(l)} \times (T - T_0^{(l)})]/(\rho \times g)\}, \quad (8)$$

где  $z^{(l)}(T)$  — глубина  $l$ -го фазового перехода,  $z_0^{(l)}$  и  $T_0^{(l)}$  — усредненные глубина и температура фазового перехода,  $\gamma^{(410)} = 3 \text{ МПа} \times \text{К}^{-1}$  и  $\gamma^{(660)} = -3 \text{ МПа} \times \text{К}^{-1}$  — наклоны кривых фазового равновесия,  $w^{(l)}$  — характерная ширина  $l$ -го фазового перехода  $T_0^{(410)} = 1800^\circ \text{К}$ ,  $T_0^{(660)} = 1950^\circ \text{К}$  — средние температуры фазовых переходов. Теплоты фазовых переходов, как и в [8], в (2) не учитываются ввиду несущественности в случае развитой конвекции. Из формулы (8) получаем:

$$\Gamma_x^{(l)} = -(\gamma^{(l)}/2 \times \rho \times g \times w^{(l)}) \times T_x \times ch^{-2} \{[(z - z_0^{(l)} + \gamma^{(l)} \times (T - T_0^{(l)}))/(\rho \times g)]/w^{(l)}\}, \quad (9)$$

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  $z_0^{(410)} = 0.38$ ,  $z_0^{(660)} = 0$ ,  $w^{(l)} = 0.05$ ,  $\gamma^{(410)} = 2.55 \times 10^9$ ,  $\gamma^{(660)} = -2.55 \times 10^9$ ,  $T_0^{(410)} = 0.92$ ,  $T_0^{(660)} = 1.00$

$$\Gamma_x^{(l)} = -(\delta\rho^l \times \gamma^{(l)}/2 \times \rho \times Ra^{(l)} \times w^{(l)}) \times T_x \times ch^{-2} \{[z - z_0^{(l)} + \gamma^{(l)} \times (\delta\rho^l/\rho \times Ra^{(l)}) \times (T - T_0^{(l)})]/w^{(l)}\}, \quad (10)$$

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).

## 2. АНАЛИЗ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ ЗОНЫ ВОСТОЧНО-ЧЕРНОМОРСКОЙ СУБДУКЦИИ

Для первоначальной оценки средней скорости субдукции Восточно-Черноморской плиты под литосферу Крымского полуострова (Скифскую плиту) рассмотрим зависимость от горизонтальной координаты  $x$  инкремента  $\gamma(x)$  конвективной неустойчивости в виде валов, 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  $\gamma(x)$ , вычисленные по аналитическим формулам в [1], приведены на рис. 3 для угла субдукции  $\beta = 65^\circ$ , размере конвективной ячейки 150 км и различных скоростей субдукции  $V$ , указанных на рисунке в мм в год.

Следует подчеркнуть, что  $\gamma(x)$  не зависит от вязкости пород мантии, так как движущей силой конвекции служит диссипативное тепловыделение, пропорциональное вязкости, но, с другой стороны, чем больше вязкость, тем труднее возбудить конвекцию. Из рисунка 3 видно, что размер конвективной зоны с  $\gamma(x) > 0$  достигает  $x_2 - x_1 = 150$  км (т.е. основная конвективная ячейка размером 150 км действительно возбуждается), при скорости  $V = 39.5$  мм в год, что и может служить первоначальной оценкой скорости субдукции.

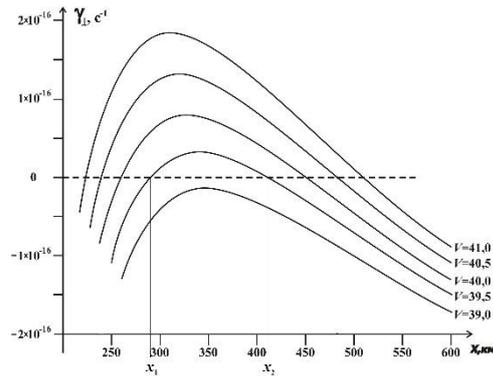


Рис. 3. График распределения инкрементов конвективной неустойчивости  $\gamma(x)$  как функции горизонтального расстояния  $x$  при различных скоростях субдукции  $V$ , указанных в мм в год. В зоне ( $x_1 < x < x_2$ ) с  $\gamma(x) > 0$ , протяженностью приблизительно 150 км при  $V = 39.5$  мм/год возбуждается конвекция, обеспечивающая аномальный 2D тепловой поток.

Для построения согласованной более точной модели мелкомасштабной термической конвекции в мантийном клине между настиляющей Скифской и субдуцирующей Восточно-Черноморской плитой, ради повышения точности вычислений вначале необходимо положить в (1)–(2)  $Ra = 0$ ,  $Di = 0$ , т.е. рассчитать модель погружающейся плиты, мантийного клина и настиляющей плиты без учета вязкой диссипации и конвекции. Это связано с тем, что при  $Ra$  и  $Di$ , приведенных в формуле (4) конвекция в модели проходит стадии с большими скоростями, и для обеспечения устойчивости расчета стационарного состояния требуются крайне малые шаги по времени. При этом трудно рассчитать термическое состояние погружающейся плиты, настиляющей плиты и индуцированного возвратного потока. Полагая вначале в формулах (1) – (2)  $Ra \rightarrow 0$ ,  $Di = 0$ , т.е. учитывая только теплопроводность и адвекцию тепла, и интегрируя значения в формулах (1)–(2) по пространственным координатам методом конечных элементов на сетке  $104 \times 104$  и по временной координате методом Рунге-Кутты 3-го порядка при  $V = 39.5$  мм в год, получим квазистационарные безразмерные  $\psi$  и  $T - T_R$ , изображенные на рис. 4, где линии тока на рисунке показаны с интервалом 0.25, а изотермы — с интервалом 0.05.

На рис. 4 показаны результаты расчета для неньютоновской реологии (формулы (7)–(9) для вязкости горных пород), причем на рис. 4 (а, б) приведены результаты для  $C_w = 10^{-3}$  весовых %, а на рис. 4 (в, г) для  $C_w = 3 \times 10^{-1}$  весовых %.

ОЦЕНКА НЕФТЕГАЗОВЫХ ПЕРСПЕКТИВ КРЫМСКОГО ПОЛУОСТРОВА КАК РЕЗУЛЬТАТ ГЕОДИНАМИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ЗОНЫ СУБДУКЦИИ ВОСТОЧНО-ЧЕРНОМОРСКОЙ ПЛИТЫ ПОД ЛИТОСФЕРУ СКИФСКОЙ ПЛИТЫ

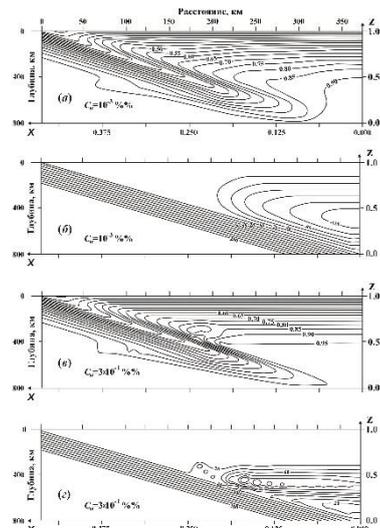


Рис. 4. Глубинные геофизические разрезы квазистационарных распределений безразмерных функций тока и температуры в области субдукции Восточно-Черноморской плиты под литосферу Крымского полуострова (Скифской плиты) без учета эффектов диссипативного нагрева и конвекции в случае неньютоновской реологии мантии для (а, б) — концентрации воды  $C_w = 10^{-3}$  весовых % и (в, г) — концентрации воды  $C_w = 3 \times 10^{-1}$  весовых %. Параллельные эквидистантные линии тока соответствуют субдуцирующей Восточно-Черноморской плитой, линии тока над плитой – вынужденному мантийному движению, вызванному субдукцией.

Скорость субдукции Восточно-Черноморской плиты  $V=39.5$  мм в год выбрана как наиболее соответствующая наблюдаемому распределению теплового потока. Восточно-Черноморская плита, субдуцирующая с заданной скоростью  $V$ , показанная равноотстоящими диагональными линиями тока, считается жесткой, а коэффициент вязкости в зоне трения литосферных плит при температурах ниже  $1200^\circ K$  понижается по сравнению с формулой (5) на два порядка величины. Последним действием учтен эффект смазки литосферной плиты за счет субдуцирующих осадков, которые частично затягиваются погружающейся плитой и препятствуют прилипанию к ней настилающей литосферы [6]. Из сравнения рис. 4 (б) и (г) видно, что возвратный поток, индуцируется в виде единого вихря при  $C_w = 10^{-3}$  весовых %, и в виде 2-х расположенных один над другим вихрей при  $C_w = 3 \times 10^{-1}$  весовых %, причем эти вихри сильно сжаты в вертикальном направлении, и верхний (с  $\psi > 0$ ) вращается против часовой стрелки, а нижний (с  $\psi < 0$ ) – по часовой стрелке. Микро-вихри размером  $10^2$  км, формирующиеся между встречными потоками внутри верхнего вынужденного течения, очевидно, обязаны своим происхождением неустойчивости типа тангенциального разрыва (неустойчивости Кельвина-Гельмгольца). Полагая затем безразмерные параметры в формулах (1) – (2) согласно формулы (4), то есть включая эффекты диссипации и конвекции, и интегрируя значения в формулах (1) – (2), находим, что в случае неньютоновской реологии при  $C_w=10^{-3}$  весовых % конвекция не возбуждается, а при  $C_w=3 \times 10^{-1}$  весовых % вынужденный мантийный

поток над субдуцирующей Восточно-Черноморской плитой за безразмерное время  $0.6 \times 10^{-6}$  (в размерном виде  $10^5$  лет) разрушается конвекцией, которая, по достижении стадии развитой конвекции, принимает вид, изображенный на рис. 5. Видно, что вихревые линии тока, показанные с интервалом  $4 \times 10^4$ , действительно соответствуют одной конвективной ячейке, возбуждающейся при скорости субдукции  $V = 39.5$  мм/год. Размер конвективных ячеек порядка 50–130 км, а расстояние между экстремумами теплового потока под зонами  $C_1$  и  $C_2$  около 130–150 км. Густота линий тока соответствует скорости конвективных движений более  $10 \text{ м} \times \text{год}^{-1}$ . Таким образом, расчет для неньютоновской реологии с вязкостью в формулах (7) – (9) показывает, что при снижении вязкости пород мантии на три порядка по сравнению со значениями в формулах (7) – (9), т.е. при  $C_w = 3 \times 10^{-1}$  весовых % [9], в мантийном клине развивается конвекция в виде двух микро вихрей, могущая обеспечить аномальный 2D тепловой поток. Альтернативой столь существенному повышению концентрации кристаллизационной воды может быть повышение константы  $A$  и/или снижение энергии активации  $E^*$  по сравнению с указанными в [8]. Значительная скорость конвективных движений объясняется локальным снижением вязкости за счет повышения напряжений в мантии в зоне, охваченной конвекцией.

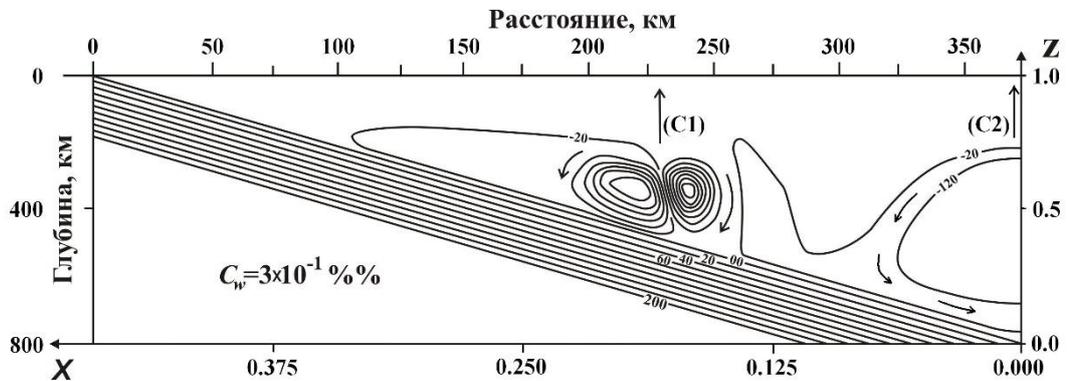


Рис. 5. Глубинный геофизический разрез квазистационарного распределения безразмерной функции тока в мантийном субдукционном клине, расположенном на прибрежной акватории северного склона северо-восточного ответвления вала Андрусова, непосредственно перед территорией Крымского полуострова ( $C_1$ ), а также на территории Крымского полуострова, в районе Степного Крыма ( $C_2$ ), с учетом эффектов диссипативного нагрева и конвективной неустойчивости для неньютоновской реологии мантии и концентрации воды  $C_w = 3 \times 10^{-1}$  весовых %.

При рассмотренном угле субдукции  $\beta = 65^\circ$  конвекция не возникает только при скорости  $V < 39 \text{ мм} \times \text{год}^{-1}$ . 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  $V = 39.5 \text{ мм} \times \text{год}^{-1}$  возникает при концентрации воды  $C_w = 3 \times 10^{-1}$  весовых %.

# ОЦЕНКА НЕФТЕГАЗОВЫХ ПЕРСПЕКТИВ КРЫМСКОГО ПОЛУОСТРОВА КАК РЕЗУЛЬТАТ ГЕОДИНАМИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ЗОНЫ СУБДУКЦИИ ВОСТОЧНО-ЧЕРНОМОРСКОЙ ПЛИТЫ ПОД ЛИТОСФЕРУ СКИФСКОЙ ПЛИТЫ

## ВЫВОДЫ

В результате, можно заключить, что при проведении поисково-разведочных работ на месторождения нефти и газа в регионе Крымского полуострова и прибрежных акваторий Крыма важно понимать, что расстояние между образовавшимися нефтегазоперспективными линейными зонами зависит от соотношения многих физико-химических факторов в глубинном разрезе литосферы: угла наклона зоны субдукции ( $\beta$ ), скорости ( $V$ ) западного блока субдуцирующей Восточно-Черноморской микро-плиты, температуры ( $T$ ) пород мантии, давления ( $p$ ) в мантии, вязкости ( $\eta$ ) горных пород и концентрации воды ( $C_w$ ) в горных породах мантийного клина, скорости вращательного движения частично-расплавленных известково-щелочных магм в конвективных вихрях Карига ( $\omega$ ), их размеров и других менее значимых реологических параметров среды в около-мантийном клине Крымского блока Восточно-Черноморской зоны субдукции. Например, в случае неньютоновской реологии характерный размер конвективных ячеек вихрей Карига, полученных в модели мантийного клина, сформировавшихся при субдукции западного блока Восточно-Черноморской плиты под литосферу Крымского полуострова (Скифская плита), составляет  $\sim 70\text{--}150$  км, что при скорости субдукции  $V = 39.5$  мм в год приблизительно совпадает с характерным пространственным размером 2D аномалий температуры (в градусах Цельсия) в земной коре Крымского полуострова (рис. 6).

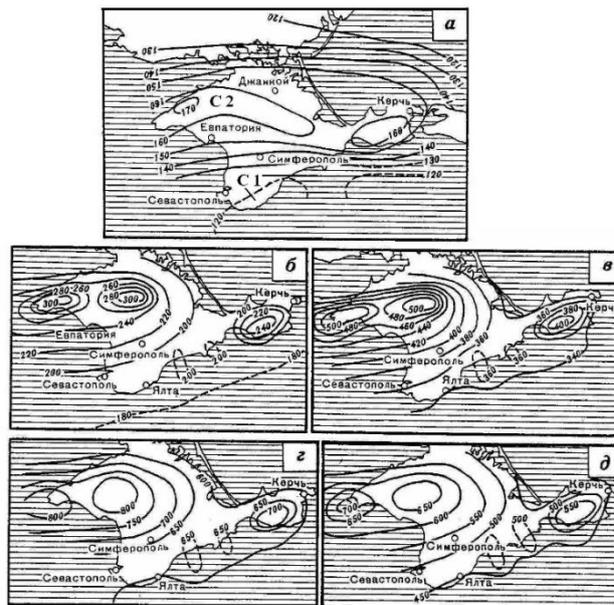


Рис. 6. Карта аномалий температуры (в градусах Цельсия) в глубинах земной коры Крымского полуострова на глубинах: 5 км (а), 10 км (б), 20 км (в), 30 км (г), 40 км (д) [10]. С<sub>1</sub> и С<sub>2</sub> — пространственное месторасположение конвективных зон в глубинах мантии на территории Крымского полуострова.

Средняя концентрация воды в мантийном клине  $C_w = 3 \times 10^{-1}$  весовых %% [9]. Скорость движения ( $\omega$ ) в конвективных вихрях Карига, в этом регионе, может превышать 10 метров в год, что, может быть достаточно для обеспечения эффективного выноса щелочных магм (вместе с растворенными в них углеводородами) к дневной поверхности и образования приповерхностных месторождений нефти и газа. Последовательное периодическое распределение линейно вытянутых месторождений нефти и газа, располагающихся через определенный интервал расстояния от кромки субдуцирующей Восточно-Черноморской плиты, отмеченное в работах ряда исследователей [1, 3], подтверждается наличием первой цепочки залежей нефти и газа на территории и частично акватории южного побережья Крымского полуострова в районе северного склона северо-восточного ответвления вала Андрусова и прогиба Сорокина, а затем второй цепочки месторождений нефти и газа, протягивающейся на территории северного склона Центрально-Крымского свода, что хорошо видно на (рис. 7).

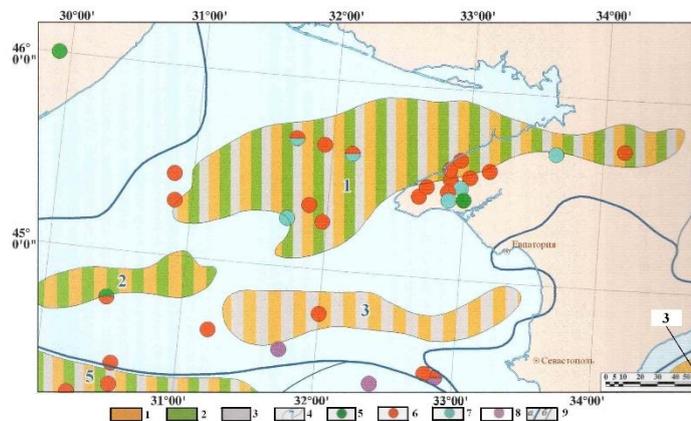


Рис. 7. Карта потенциальных нефтегазогенерирующих бассейнов Черноморско-Крымского региона [3]: нефтегазогенерирующие бассейны и возраст нефтегазоматеринских толщ: 1 — кайнозойский; 2 — мезозойский; 3 — палеозойский; 4 — контуры нефтегазогенерирующих бассейнов и их индексы; месторождения углеводородов: 5 — нефти; 6 — газа; 7 — конденсата; 8 — газогидратов; 9 — контуры нефтегазовых провинций (а) и областей (б). Фактические и потенциальные нефтегазогенерирующие бассейны: 1 — Каркинитско-Тарханкутско-Новоселовский ( $C_2$  — конвективная зона); 2 — Южно-Каркинитский; 3 — Альминско-Прикрымско-Таманский ( $C_1$  — конвективная зона); 5 — Истрийский.

В Черноморско-Крымском регионе (рис. 7) видны две, уже частично разведанные геолого-геофизическими методами [3, 10], линейные почти параллельные друг другу валообразные тектонические зоны (вал Андрусова и Центрально-Крымское сводовое поднятие), северные бортовые зоны которых связаны с месторождениями нефти и газа (Каркинитско-Тарханкутская ( $C_2$ ) конвективная зона и Альминско-Прикрымско-Таманская ( $C_1$ ) конвективная зона), расположенных на расстоянии между максимумами аномалий около 130–150 км на

## ОЦЕНКА НЕФТЕГАЗОВЫХ ПЕРСПЕКТИВ КРЫМСКОГО ПОЛУОСТРОВА КАК РЕЗУЛЬТАТ ГЕОДИНАМИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ЗОНЫ СУБДУКЦИИ ВОСТОЧНО-ЧЕРНОМОРСКОЙ ПЛИТЫ ПОД ЛИТОСФЕРУ СКИФСКОЙ ПЛИТЫ

территории северного борта вала Центрально-Крымского свода (Каркинитско-Тарханкутский нефтегазовый бассейн — 1) и северного борта ЮЗ-СВ ответвления вала Андрусова (Альминско-Прикрымско-Таманский нефтегазовый бассейн (3)) (рис. 7), что соответствует проведенным в статье расчетам (рис. 5). Образованию месторождений нефти и газа на территории северного борта Центрально-Крымского свода и северо-восточного ответвления вала Андрусова способствовали многофазная магматическая деятельность, вулканизм и подъем щелочных магм с растворенными в них углеводородами, мигрировавших в течение длительного (165 млн лет) эволюционного геолого-тектонического (субдукционного) преобразования Восточно-Черноморского региона, возникавших над мантийными конвективными вихрями Карига в западном блоке Восточно-Черноморской субдукционной зоны. В течение многих миллионов лет расплавленная магма периодически внедрялась по многочисленным трещинам и разломам в породы Крымского полуострова и окружающих акваторий. Периодические магматические интрузии (с растворенными в них углеводородными геофлюидами), возникшие над мантийными конвективными вихрями, внедрились в породы земной коры, которые постепенно образовали залежи углеводородов в вышележащих осадочных породах коры с хорошими коллекторскими свойствами. Субширотное линейное распределение различных месторождений нефти и газа, параллельных друг другу на акватории около побережья Крыма (северный борт северо-восточного ответвления вала Андрусова – Альминско-Прикрымско-Таманский нефтегазовый бассейн (3)) и территория северного борта Центрально-Крымского свода (Каркинитско-Тарханкутско-Новоселовский нефтегазовый бассейн (1)) с расстоянием между ними около 130–150 км (рис. 7), подтверждает результаты проведенных исследований, связанных с субширотным расположением конвективных вихрей Карига, возникавших в процессе геологической эволюции в зоне субдукции Восточно-Черноморской литосферной плиты под Скифскую плиту. В качестве новых регионов, перспективных на залежи нефти и газа, которые могут быть рекомендованы из результатов, проведенных авторами глубинных геодинамических исследований, могут быть пока слабо изученные районы Черного моря, расположенные позади основных вулканических сооружений северо-восточного ответвления вала Андрусова (Альминско-Прикрымско-Таманский нефтегазовый бассейн (рис. 7 (3)), где также наблюдается повышенный тепловой поток [10].

### БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы искренне благодарят докторов геолого-минералогических наук А. И. Тимурзиева, Р. Б. Сейфуль-Мулюкова, В. Л. Сывороткина — организаторов Всероссийских ежегодных научных конференций «Кудрявцевские чтения» за их огромную работу и за предоставленную возможность участвовать в работе этих конференций.

**Список литературы**

1. Гаврилов С. В. Исследование механизма формирования островных дуг и тылового раздвигания литосферы // Геофизические исследования. 2014. Т. 15. № 4. С. 35–43.
2. Тимурзиев А. И. К созданию новой парадигмы нефтегазовой геологии на основе глубинно-фильтрационной модели нефтегазообразования и нефтегазоаккумуляции // Геофизика. 2007. № 4. С. 49–60.
3. Глумов И. Ф., Гулев В. Л., Сенин Б. В., Карнаухов С. М. Региональная геология и перспективы нефтегазоносности Черноморской глубоководной впадины и прилегающих шельфовых зон. М.: Недра, 2014. 181 с
4. Karig D. E. Origin and development of marginal basins in the Western Pacific. *Journal Geophysical Researches*, 1971, Vol. 76, no. 11, P. 2542–2561.
5. Ниметулаева Г. Ш. Особенности воздействия природных факторов и их влияние на формирование оползневых процессов Крыма // Культура народов Причерноморья. 2006. № 83. С. 110–113.
6. Gerya T. V. Future directions in subduction modeling // *Journal of Geodynamics*. 2011. Vol. 52. pp. 344–378.
7. Жарков В. Н. Физика земных недр. М.: Наука и образование, 2012. 384 с.
8. 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.
9. 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.
10. Кутас Р. И., Цвященко В. А. Геотермический режим и сейсмичность Крымского полуострова // В кн.: Геотермия сейсмичных и асейсмичных зон. М.: Наука, 1993. С. 15–26.

**ASSESSMENT OF THE 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**

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

<sup>1</sup> *Shmidt Institute of the Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation;*

<sup>2</sup> *Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radio Wave Propagation, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation.*

<sup>2</sup>*E-mail: ahariton@izmiran.ru*

In this article, based on the data on the convective heat transfer from the mantle wedge to the 2D heat flow anomaly observed in the rear of the Central Crimean arch, the angle of inclination of the mantle wedge and the rate of subduction of the East Black Sea lithospheric plate under the lithosphere of the Scythian continental plate (Crimean region) are estimated. The effects of the 410 km and 660 km phase transitions are taken into account. Within the framework of the geodynamic model constructed the horizontal extent of the 2D heat flux anomaly observed in the rear of the Crimea mountain belt corresponds to subduction velocity of ~ 40 mm per year which is close to that observed with the help of geodetic means. Ascending convective movements in the mantle can carry mantle calcareous-alkaline magmas (with hydrocarbon geo-fluids contained in them) into the near-surface

## ОЦЕНКА НЕФТЕГАЗОВЫХ ПЕРСПЕКТИВ КРЫМСКОГО ПОЛУОСТРОВА КАК РЕЗУЛЬТАТ ГЕОДИНАМИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ЗОНЫ СУБДУКЦИИ ВОСТОЧНО-ЧЕРНОМОРСКОЙ ПЛИТЫ ПОД ЛИТОСФЕРУ СКИФСКОЙ ПЛИТЫ

layers of the Earth's crust, and, consequently, oil and gas fields should be confined to zones located in the upper part of the lithosphere, above the convective vortices of the Karig.

As a result, it can be concluded that when conducting prospecting and exploration for oil and gas fields in the region of the Crimean Peninsula and coastal waters of the Crimea, it is important to understand that the distance between the formed oil and gas prospective linear zones depends on the ratio of many physico-chemical factors in the deep section of the lithosphere: the angle of inclination of the subduction zone, the velocity of the western block of the subducting East Black Sea microplate, the temperature of mantle rocks, pressure in the mantle, viscosity of rocks and water concentrations in rocks of the mantle wedge, the rotational velocity of partially-molten calcareous-alkaline magmas in convective vortices of the Karig, their sizes and other less significant rheological parameters of the medium in the near-mantle wedge of the Crimean block of the East Black Sea Subduction zone.

As new regions promising for oil and gas deposits, which can be recommended from the results of deep geodynamic studies conducted by the authors, there may be still poorly studied areas of the Black Sea located behind the main volcanic structures of the northeastern branch of the Andrusov shaft (Alminsko-Pokrymsko-Taman oil and gas basin).

**Keywords:** lithospheric subduction, the territory of the Scythian Plate, the Crimean Peninsula, convective flows, rheology of mantle rocks, heat flow, oil and gas zones.

### References

1. Gavrilov S. V. Subduksiya Issledovanie mekhanizma formirovaniya ostrovnih dug. Geofizicheskie Issledovaniya, 2014, vol. 15, no. 4, pp. 3543. (in Russian).
2. Timurziyev A. I. K sozdaniyu novoy paradigmy neftegazovoy geologii na osnove glubinno-fil'tratsionnoy modeli neftegazoobrazovaniya i neftegazonakopleniya. Geofizika, 2007, no. 4, pp. 49–60. (In Russian).
3. Glumov T. V., Gulev V. L., Senin B. V., Karnaukhov S. M. Regional'naya geologiya I perspektivy neftegazonosnosti Chernomorskoy glubokovodnoy vpadiny I privileyushih shel'fovih zon. Moscow: Nedra, 2014. 181 p. (in Russian).
4. Karig D.E. Origin and development of marginal basins in the Western Pacific. Journal Geophysical Researches, 1971, vol. 76, no. 11, pp. 2542–2561.
5. Nimetulayeva G.Sh. Osobennosti vozdeystviya prirodnykh faktorov I ikh vliyaniya na formirovanie opolznevikh protsessov Kryma. Culture of the near Black Sea people, 2006, vol. 83, pp. 110–113. (in Russian).
6. Gerya T. V. Future directions in subduction modeling. Journal of Geodynamics, 2011, vol. 52, pp. 4–378.
7. Zharkov V. N. Fizika zemnyh neдр. Moscow: Nauka i obrazovanie (Publ.), 2012. 384 p. (in Russian).
8. Trubutsyn V. P., Trubitsyn A. P. Chislennaya model' obrazovaniya sovokupnosti litosfernikh plit I ikh prokhozheniya cherez granitsu 660 km, Fizika Zemli, 2014, no. 6, pp. 138–147. (in Russian).
9. 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.
10. Kutas R. I., Tsviyashenko V. A. Geotermicheskiy rejim I seysmichnost' Krimskogo poluostrova. In the book: Geotermya seysmichnih I aseysmichnih zon. Moscow: Nauka, 1993. pp. 15–26. (in Russian).

*Поступила в редакцию 08.08.2021 г..*