

# GEOLOGY AND GEOPHYSICS

UDC 550.311

## Gavrilov S.V., Kharitonov A.L. Determination of the geographical location of hydrocarbon-promising zones based on the analysis of subduction geodynamic processes

Определение географического месторасположения углеводород-перспективных зон на основе анализа субдукционных геодинамических процессов

**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

**Abstract.** *The aim of the study is to consider the effect of the subduction regime on the formation of heat flow, which is associated with a high water content in the mantle wedge in the Pakistani segment of the subduction zone due to the squeezing of water by seismicity from the rocks of the subducting Arabian Plate. The research method is the modeling of dissipative heat generation and convective removal of dissipative heat to the daytime surface. This shows that, taking into account the non-Newtonian rheology of the medium and phase transitions in the mantle, the water content in the Pakistani part of the mantle wedge is increased by 0.5 wt%, the activation energy is lower by 45 kJ mol<sup>-1</sup>, and the maximum anomalous heat flow is 102 km farther from the deepwater trough than in the Iranian part of the subduction zone. As a result, the viscosity in the mantle wedge and the power of dissipative heat release decrease, and the abnormal heat flow in the rear of the Pakistani part of the trench decreases. It can be concluded that as a result of geodynamic research and analysis of the heat flow in the Pakistani part of the Makran subduction zone, it is less than in the Iranian part of this zone by ~8%. At the same time, the rate of subduction of the Arabian Plate, on the contrary, is 1.5 times higher (and the angle of subduction is slightly lower) in the Pakistani segment. At first glance, this paradoxical distribution of the heat flow anomaly is associated with various subduction regimes: smooth aseismic sliding occurs in the Iranian part, and strong earthquakes with a period of about 102 years are observed in the Pakistani part.*

**Keywords:** *geodynamic studies, Makran tectonic zone, mantle wedge, angle and rate of subduction, hydrocarbon deposits.*

**Аннотация.** *Цель исследования – рассмотреть влияние режима субдукции на формирование теплового потока, которое связано с большим содержанием воды в мантийном клине в Пакистанском сегменте зоны субдукции вследствие выжимания сейсмичностью воды из пород субдуцирующей Аравийской плиты. Метод исследования – моделирование диссипативного тепловыделения и конвективного выноса диссипативного тепла к дневной поверхности. Это показывает, что с учетом неньютоновской реологии среды и фазовых переходов в мантии в*

*Пакистанской части мантийного клина содержание воды повышено на 0.5 весовых %, энергия активации ниже на ~ 45 кДж·моль<sup>-1</sup>, а максимум аномального теплового потока на ~ 10<sup>2</sup> км дальше от глубоководного желоба, чем в Иранской части зоны субдукции. В результате вязкость в мантийном клине и мощность диссипативного тепловыделения уменьшаются, и аномальный тепловой поток в тылу Пакистанской части желоба падает. Можно заключить, что в результате геодинамического исследования и анализа теплового потока в Пакистанской части зоны субдукции Макран, что он меньше, чем в Иранской части этой зоны на ~ 8%. При этом скорость субдукции Аравийской плиты, напротив, в 1.5 раза больше (а угол субдукции несколько меньше) в Пакистанском сегменте. Такое на первый взгляд парадоксальное распределение аномалии теплового потока связано с различными режимами субдукции: в Иранской части происходит плавное асейсмичное скольжение, а в Пакистанской наблюдаются сильные землетрясения с периодом ~10<sup>2</sup> лет.*

**Ключевые слова:** геодинамические исследования, тектоническая зона Макран, мантийный клин, угол и скорость субдукции, месторождения углеводородов.

---

## Введение

Опубликованы планы правительства Российской Федерации (РФ) о создании глобального транспортного коридора углеводородов (УВ) «Север-Юг» из нефтегазоносных регионов Татарстана, Башкортостана, Западной Сибири в страны глобального юга через территорию Ирана. В связи с этими планами правительства РФ авторами статьи были произведены региональные геолого-геофизические исследования на юге Ирана и Пакистана в зоне Макран, которые показывают, что в этом регионе могут быть найдены значительные месторождения УВ. Эти месторождения могут служить для дополнительного пополнения российских транспортных поставок УВ или в случае возникновения некоторых проблем с задержками транспортировки УВ из РФ в другие страны. Зона литосферной субдукции Макран имеет практически широтное простираение. Она расположена у южного побережья Ирана и Пакистана и уникальна в том, что скорости субдукции океанической части Аравийской литосферной плиты различны по обеим сторонам левостороннего тектонического разлома Зонне со смещением по простираению, расположенного вдоль меридиана на 59.5°E, и разделяющего зону субдукции Макран на две части. На Иранской (западной) части пододвигание происходит со скоростью 20.4 мм·год<sup>-1</sup>, а на Пакистанской (восточной – со скоростью 32.6 мм·год<sup>-1</sup>, причем на Иранской части желоба, процесс субдукции идет в режиме асейсмичного скольжения, а на Пакистанской части – в ходе последовательности сильных землетрясений, последнее из которых (с магнитудой  $M_w = 8.1$ ) произошло 27 ноября 1945 года. Предыдущие сильные землетрясения случились на Пакистанской части желоба Макран в 1851 году (западнее зоны землетрясения 1945

года) и в 1765 году (восточнее этой зоны), так что в настоящее время на Пакистанской части желоба Макран, по-видимому, подготовлено очередное сильное землетрясение. Согласно [1], распределение фокусов землетрясений по глубине севернее  $27^{\circ}$  N свидетельствует, что средний угол субдукции составляет  $\sim 26^{\circ}$ , а из рис. 3 этой статьи [1] видно, что севернее широты  $\sim 29^{\circ}$ N угол субдукции  $\beta \approx 24^{\circ}$ . Прежние данные об отраженных сейсмических сигналах интерпретировались как свидетельства в пользу крайне пологой субдукции, происходящей под углом  $\beta \approx 2^{\circ} - 3^{\circ}$  до глубин в несколько десятков километров [1], однако этот вывод можно отнести только к неглубокой части субдуцирующего блока.

В [2] представлены сведения о расположенной на  $\sim 33^{\circ}$ N параллельной зоне субдукции Макран 2D-зоне аномального повышенного теплового потока с дневной поверхности. Максимум теплового потока  $\sim 67$  мВт·м<sup>-2</sup> расположен в тылу западной (Иранской) части желоба Макран, а позади восточной (Пакистанской) части желоба аномалия теплового потока менее  $\sim 63$  мВт·м<sup>-2</sup>. Поперечный размер зоны аномального теплового потока составляет  $\sim 200$  км, и происхождение этой зоны, по-видимому, связано с 2D конвективным потоком в мантийном клине, восходящим к подошве настиляющей Евразийской литосферы и локализирующим вынос диссипативного тепла. В [3], показывается, что 2D конвекция в мантийном клине, рассчитанная с учетом диссипативного тепловыделения, неньютоновской реологии мантии и влияния фазовых переходов на глубинах 410 км и 660 км, действительно обеспечивает вынос разогретого мантийного материала конвективным потоком шириной  $\sim 200$  км на расстоянии  $\sim 500$  км к северу от желоба Макран, где и наблюдается зона аномального теплового потока. Конвективный поток из мантии может выносить к поверхности Земли мантийные углеводороды и металлические (железосодержащие) руды. В [2] отмечается, что поверхностный тепловой поток является важным указателем наличия в недрах Земли углеводородных резервуаров и перспективных источников минеральных ресурсов. Меньший тепловой поток, вероятно, объясняется прерывистым режимом субдукции в восточной (Пакистанской) части желоба Макран, и, как следствие, более высоким содержанием кристаллизационной воды в мантийном клине. Согласно [4] содержание воды в мантийном клине, выжимаемой из погружающегося литосферного блока, достаточно велико, и может достигать нескольких весовых процентов. Вследствие этого в мантийных клиньях доминирует дислокационная неньютоновская ползучесть, при которой коэффициент эффективной вязкости обратно пропорционален степенной функции концентрации воды  $C_w$  и уменьшается с увеличением  $C_w$ . В [4] указывается, что наличие воды в мантийном клине провоцирует сейсмичность через механизм неустойчивости, но имеется и обратная связь сейсмичности и содержания воды через

механизм «встрягивания» субдущирующего блока и более активного выжимания воды. В силу этого вязкость в мантийном клине над литосферным блоком, субдущирующим в прерывистом режиме в ходе последовательности землетрясений понижается, кроме того, с ростом содержания воды (т.е. увеличением влажности материала мантийного клина) снижается энергия активации, что еще более уменьшает вязкость и, следовательно, уменьшается диссипативное тепловыделение в мантии. Совместное действие этих причин понижает аномальный тепловой поток с дневной поверхности. Описанный механизм понижения теплового потока в тылу зоны субдукции, в которой происходят землетрясения, альтернативен описанному в [5], где, на основе моделирования напряженного состояния в зоне трения субдущирующего блока с настилающей литосферой показывается, что фрикционное тепловыделение в зоне трения меньше в случае прерывистого режима субдукции, и, в силу этого тепловой поток диссипативного происхождения уменьшается.

### Методы

Геодинамическая модель мантийного клина вначале была построена для Иранской части зоны субдукции Макран, в которой имеет место асейсмичное скольжение. Новизна предлагаемой в данной статье методики геолого-геофизического моделирования связана с тем, что при расчетах сразу принимается неньютоновская реология среды в мантийном клине, поскольку высокое содержание воды, поступающей в мантийный клин из субдущирующего блока, кардинально понижает эффективную вязкость и приводит к доминированию дислокационного режима ползучести. Другим существенным отличием модели, предлагаемой в настоящей работе, является учет диссипативного тепловыделения в мантийном клине еще прежде, чем рассчитывается конвективный механизм выноса тепла к дневной поверхности Земли, и о влиянии режима субдукции (асейсмичный или прерывистый режимы) на формирование аномалии поверхностного теплового потока оказывается возможным судить по величине мощности диссипативного тепловыделения.

Предполагая, что в западной (Иранской) части зоны Макран происходит асейсмичная субдукция, примем модель мантийного клина в этой зоне, рассчитываемую при условии равномерного поддвигания Аравийской литосферной плиты, т.е. будем считать, что субдукция происходит не в процессе прерывистого движения в ходе последовательности сильных землетрясений, а квазиравномерно. Такое предположение, основывающееся на данных в [1], может быть существенным для обоснования используемых в модели граничных условий прилипания вязкого вещества мантийного клина как к подошве настилающей литосферы, так и к поверхности

субдуцирующей Аравийской литосферной плиты. При прерывистом (скачкообразном) режиме субдукции материал неньютоновской вязкой жидкости, моделирующей мантийный клин, может проскальзывать вдоль границ с литосферными плитами из-за повышения скоростей деформации в мантийном клине вблизи этих границ, и граничное условие прилипания может нарушаться. В качестве модели термомеханического состояния мантийного клина между подошвой Евроазиатской литосферной плиты, на которой находится тыловая зона западной (Иранской) части зоны субдукции Макран и поверхностью океанической части Аравийской литосферной плиты, поддвигающейся под побережье Ирана под углом  $\beta$  со скоростью  $V$ , примем модель, получаемую при бесконечном числе Прандтля ( $Pr \rightarrow \infty$ ) в приближении Буссинеска из системы двумерных безразмерных уравнений гидродинамики для функции тока  $\psi$  и температуры  $T$  [6]:

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

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

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,  $\Gamma^{(410)}$  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

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

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

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

где  $\alpha = 3 \times 10^{-5} \text{ K}^{-1}$  – коэффициент теплового расширения,  $\rho = 3.3 \times 10^3 \text{ кг м}^{-3}$  – 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,  $T_1 = 1950 \text{ K}$  – температура основания переходной зоны мантии (ПЗМ) на глубине 660 км, считающейся нижней границей модельной области,  $Q = 6.25 \times 10^{-4} \text{ мВт м}^{-3}$  – объемная мощность тепловыделения в коре,  $\tau_{ik}$  – тензор вязких напряжений,  $d = 660 \text{ км}$  – вертикальный размер модельной области,  $\tilde{\eta} = 10^{18} \text{ Па} \cdot \text{с}$  – масштабный множитель вязкости,  $\chi = 1 \text{ мм}^2 \cdot \text{с}^{-1}$  – коэффициент температуропроводности,  $\delta \rho^{(410)} = 0.07\rho$  и  $\delta \rho^{(660)} = 0.09\rho$  – 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  $d^2 \cdot \chi^{-1}$ ,  $\tilde{\eta} \chi \cdot d^{-2}$  и  $\chi$ . Хотя в [7] указывается, что на глубинах более  $\sim 200 \text{ км}$  в мантии Земли доминирует диффузионный механизм ползучести, и коэффициент вязкости  $\eta$

соответствует ньютоновской реологии среды, в мантийном клине из-за высокой концентрации воды, выжимаемой из субдуцирующего блока, преобладает дислокационная ползучесть, вследствие чего коэффициент вязкости зависит как от концентрации воды  $C_w$  так и от вязких напряжений  $\tau_{ik}$ , от температуры  $T$  и литостатического давления  $p$ . В этом случае формула для вязкости записывается в виде

$$\eta = (2AC^r_w \tau^{n-1})^{-1} \times (h/b)^m \times \exp[(E^* + pV)/RT], \quad (5)$$

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

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

безразмерная вязкость, нормированная на  $\tilde{\eta} = 10^{18} \text{ Па} \cdot \text{с}$  есть

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

где  $T$  – безразмерная температура, а безразмерная координата  $z$ , нормированная на  $d = 650 \text{ км}$ , отсчитывается вверх от основания ПЗМ (ось  $x$  направлена по нижней границе ПЗМ против субдукции). Отношение сторон модельной области примем равным 1:2.25, так что при субдукции по диагонали модельной области угол субдукции составит  $\beta = 24^\circ$ , а расчетная скорость  $V = 20 \text{ мм} \cdot \text{год}^{-1}$  в единицах  $\chi \cdot d^{-1}$  равна  $V = 0.416 \cdot 10^3$ , т.е. в Аравийской литосферной плите, субдуцирующей в Иранский сегмент желоба Макран, ее компоненты  $V_x = -0.380 \cdot 10^3$  и  $V_z = -0.170 \cdot 10^3$ . Подчеркнем, что в безразмерном равенстве (7) концентрация воды  $C_w = 10^{-3}$  вес. %, а при рассматриваемых в модели величинах  $C_w = 1$  весовых % безразмерная вязкость уменьшается в 3981 раз, т.е. в  $10^{3.6}$  раза.

Следуя [9], примем фазовые функции  $\Gamma^{(l)}$  в виде (напомним, что ось  $z$  здесь направлена вверх, поэтому знаки изменены):

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

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  $T_0^{(410)} = 1800 \text{ К}$ ,  $T_0^{(660)} = 1950 \text{ К}$  – средние температуры фазовых переходов. Теплоты фазовых переходов, как в [9], так и в формуле (2) не учитываются ввиду незначительности в случае развитой конвекции. Из формулы (8) получаем:

$$\Gamma_x^{(l)} = -\frac{1}{2} (\gamma^{(l)}/\rho g w^{(l)}) \times \text{ch}^{-2}\{[z - z_0^{(l)} + \gamma^{(l)}(T - T_0^{(l)})/\rho g]/w^{(l)}\} \times T_x, \quad (9)$$

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  $z_0^{(410)} = 0.38$ ,  $z_0^{(660)} = 0$ ,

$w^{(l)}=0.05$ ,  $\gamma^{(410)}=2.55 \times 10^9$ ,  $\gamma^{(660)}=-2.55 \times 10^9$ ,  $T_0^{(410)}=0.92$ ,  $T_0^{(660)}=1$ , и в формуле (1)

$$\Gamma_x^{(l)} = -\frac{1}{2} \delta \rho^{(l)} \gamma^{(l)} / (\rho Ra^{(l)} w^{(l)}) \times ch^{-2} \{ [z - z_0^{(l)} + \gamma^{(l)} \delta \rho^{(l)} (T - T_0^{(l)}) / \rho Ra^{(l)}] / w^{(l)} \} \times T_x. \quad (10)$$

В качестве граничных условий приняты изотермичность горизонтальных и 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 формуле (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 Евроазиатской литосферной плиты и 100 млн. лет для Аравийской литосферной плиты.

В модели рассчитывается распределение объемной мощности диссипативного тепловыделения  $\frac{1}{2}(\tau_{ik})^2 \times \eta^{-1}$ , которое согласно формуле (6) в безразмерном виде записывается как

$$W_{diss} = \frac{1}{2}(\tau_{ik})^2 \times \eta^{-1} = 2\eta \times [ \frac{1}{2} (\psi_{zz} - \psi_{xx})^2 + 2(\psi_{xz})^2 ], \quad (11)$$

и для перехода к размерной форме объемной мощности диссипативного тепловыделения используется коэффициент

$$(\tilde{\eta} \chi \cdot d^2)^2 \times \tilde{\eta}^{-1} = 0.53 \times 10^{-14} \text{ мВт} \times \text{м}^3, \quad (12)$$

на который должна быть умножена безразмерная величина в уравнении (11).

### Результаты исследования

Результаты численного моделирования квазистационарного термомеханического состояния верхней мантии в мантийном клине Иранского сегмента зоны субдукции Макран представлены на рис. 1.

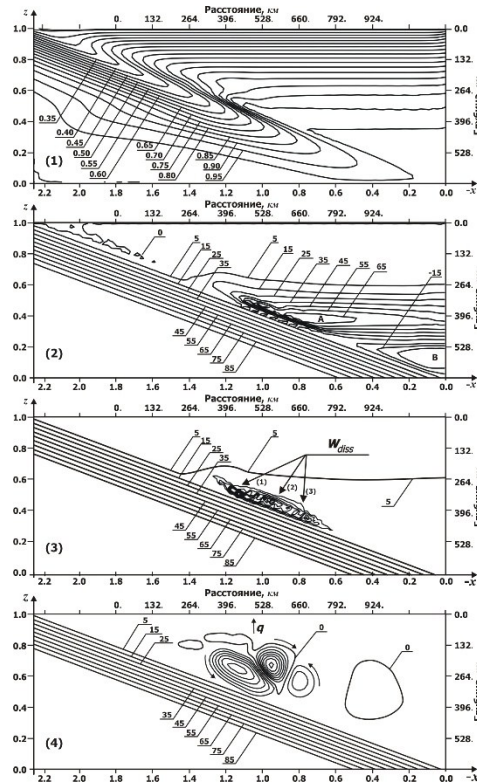


Рисунок 1. (1) – распределение температуры в Иранском сегменте мантийного клина зоны субдукции Макран без учета эффектов вязкой диссипации и конвекции.

Изотермы показаны с интервалом 0.05; (2) – распределение безразмерной невозмущенной функции тока в мантии над субдуцирующей Аравийской плитой без учета эффектов вязкой диссипации и конвекции. Линии тока показаны с интервалом 5;

Диагональные эквидистантные линии тока соответствуют жесткой субдуцирующей плите, вынужденные течения (A) и (B) индуцируются субдуцирующей плитой и, отчасти, конвективным механизмом. Расстояние отсчитывается в меридиональном направлении от расположенного при 29°N «краевого угла» мантийного клина; (3) –

квазистационарное распределение безразмерной функции тока в Иранском сегменте мантийного клина, совмещенное с распределением объемной мощности  $W_{diss}$

диссипативного тепловыделения, указанным стрелками (1), (2), (3); (4) –

квазистационарное распределение безразмерной функции тока в Иранском сегменте мантийного клина с учетом развитой конвекции. Вектор  $q$  указывает зону аномального теплового потока, подводимого конвективным механизмом от области максимального диссипативного тепловыделения  $W_{diss}$  к дневной поверхности.

Уравнения (1)–(2) интегрировались по времени методом Рунге-Кутты 3-го порядка и на сетке 104×104 по пространственным координатам методом конечных элементов. На рис. 1 обозначениями (1)–(2) показаны распределения стационарных безразмерных температуры и функции тока без учета конвективной неустойчивости и диссипативного тепловыделения. Прямолинейные диагональные линии тока на рис. 1(2) соответствуют субдуцирующей Аравийской литосферной плите, а течения (A) и (B) индуцированы



погружающимся литосферным блоком Аравийской литосферной плиты. На рис. 1(3) стрелками (1), (2), (3) в изолиниях показана безразмерная объемная мощность диссипативного тепловыделения  $W_{diss}$  в мантийном клине. Тепловыделение сосредоточено в зоне трения субдуцирующего блока и встречного индуцированного потока (А) на рис. 1(2). Толщина этой зоны  $\Delta d \sim 10^2$  км, а максимальная безразмерная мощность тепловыделения  $\sim 9 \times 10^9$  (в размерном виде, согласно формулы (12), получаем  $W_{diss\ max} \sim 5 \times 10^{-4}$  мВт×м<sup>-3</sup>). Если в качестве грубой оценки аномального теплового потока  $\Delta q$  с дневной поверхности принять (без учета конвективного механизма теплопереноса)  $\Delta q = \Delta d \times W_{diss\ max}$ , то получится  $\Delta q \sim 50$  мВт×м<sup>-2</sup>, т.е. величина порядка наблюдаемого теплового потока. На рис. 1(4) приведена безразмерная функция тока, соответствующая квазистационарной конвекции, происходящей со скоростью  $\sim 1$  м×год<sup>-1</sup> и канализирующей теплопередачу от зоны максимального диссипативного тепловыделения к зоне, указанной вектором  $q$  на расстоянии  $\sim 500$  км от глубоководного желоба Макран на территории Ирана. На этом расстоянии действительно наблюдается параллельная желобу 2D зона повышенного теплового потока на дневной поверхности.

Для первоначальной оценки того, насколько характеристики термомеханического состояния мантийного клина в Пакистанской части желоба Макран отличаются от характеристик, относящихся к Иранской части желоба, примем параметры среды равными их средним значениям, т.е. усредненным по горизонтальному и вертикальному размерам области максимального диссипативного тепловыделения. В этом случае можно считать, что коэффициент вязкости  $\eta$ , температура  $T$ , вязкое напряжение  $\tau = \eta V \cdot d^{-1}$  ( $V$  – скорость субдукции,  $d$  – вертикальный размер рассматриваемой области мантийного клина) являются константами. При этом зависимость коэффициента вязкости от температуры, концентрации воды и других параметров среды учитывается усреднено, т.е. множители, входящие в реологический закон вязкости, считаются равными их средним значениям. По сравнению с Иранской частью мантийного клина, в Пакистанской его части концентрация воды повышается вследствие связи сейсмичности с наличием воды, а величины  $T$ ,  $\tau^2 \cdot \eta^{-1}$  должны быть уменьшены на  $\sim 8\%$ , т.е. настолько, насколько тепловой поток, наблюдаемый в тылу Пакистанской части желоба меньше наблюдаемого в тылу Иранской части желоба. Как видно из дальнейшей оценки, увеличение концентрации воды  $C_w$  влияет на тепловой поток преимущественно через уменьшение энергии активации среды, а не напрямую, поэтому в качестве первоначальной оценки содержания воды в Пакистанской части мантийного клина примем величину  $C_w = 1.5$  вес. %, т.е. на 0.5 вес. % больше, чем в Иранской части. С учетом формулы (5) для дислокационной вязкости в Пакистанской части зоны субдукции

рассмотрим величину

$$\eta^3 V^2 \cdot d^2 = (1/(2A(C_w)^n)) \exp((H^* - \delta E^*)/R(T - \delta T)), \quad (13)$$

где  $H^*$  – энтальпия активации, а  $\delta E^*$  и  $\delta T$  – положительные величины возмущений энергии активации и средней температуры по сравнению с Иранской частью зоны субдукции. Так как  $\eta \cdot V^2 \cdot d^2$  (диссипативное тепловыделение) должно быть уменьшено на 8%, то, с учетом того, что  $V^2 \cdot d^2$  в Пакистанской части желоба выше в 2.25 раза, чем в Иранской (скорость субдукции в Пакистанской части выше в 1.5 раза), средний коэффициент вязкости оказывается меньше 2.43 раза, а левая часть (13) в 6.4 раза меньше в Пакистанской части зоны судукции. Поэтому величина  $\exp((H^* - \delta E^*)/R(T - \delta T))$  в Пакистанской части зоны субдукции меньше, чем в Иранской части  $\exp(H^*/RT)$  в 14.67 раз. Принимая  $\delta T = 0.08T$ , т.е что средний «температурный фон» на 8% ниже в Пакистанской части зоны субдукции, находим, что при  $T = 1700 \text{ K}$  оказывается  $\delta E^* = 43.6 \text{ кДж}\cdot\text{моль}^{-1}$ . Этот пример показывает, что понижение диссипативного теплового потока из мантийного клина может определяться не самим увеличением содержания воды, а связанным с ним понижением энергии активации. Хотя, точных формул, описывающих уменьшение энергии активации при увеличении  $C_w$  не существует (о чем указывается в [4] на с.274, где говорится, что энергия активации  $E^*$  принимает лишь два значения: одно – для сухих пород и другое, меньшее, – для влажных), представляется вполне разумным найденное уменьшение энергии активации на ~ 8% – 9% при увеличении концентрации воды на 0.5 вес. %, уменьшении теплового потока на 8% и увеличении скорости субдукции в 1.5 раза в Пакистанской части зоны субдукции по сравнению с Иранской.

Принимая для Пакистанской части зоны Макран скорость субдукции равной  $32.6 \text{ мм}\cdot\text{год}^{-1}$  (безразмерные компоненты скорости Аравийской литосферной плиты  $V_x = -0.620 \cdot 10^3$  и  $V_z = -0.280 \cdot 10^3$ ), угол субдукции приблизительно таким же, как в Иранской части зоны субдукции, энергию активации в (7)  $E^* = 440 \text{ кДж}\cdot\text{моль}^{-1}$  и  $C_w = 1.5 \text{ вес. \%}$ , находим из формул (1) – (2) модельные распределения термомеханических параметров верхней мантии, показанные на рис. 2.

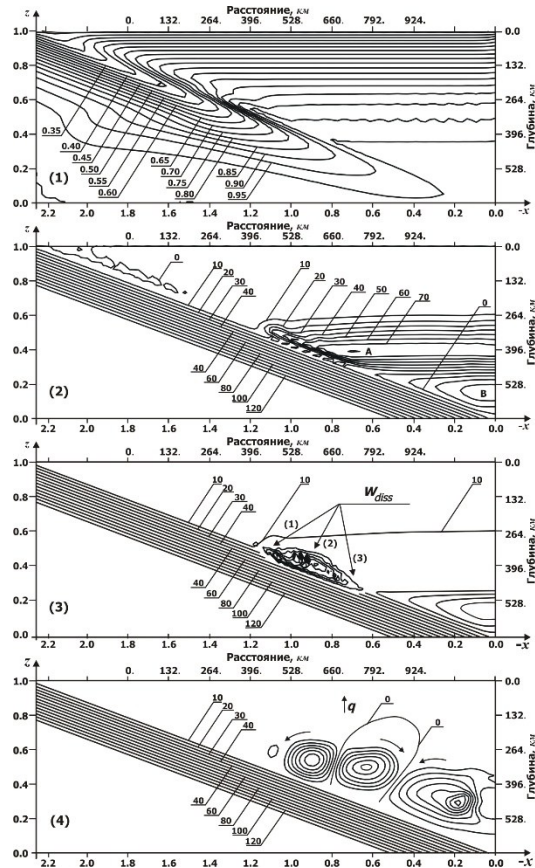


Рисунок 2. (1) – распределение температуры в Пакистанском сегменте мантийного клина зоны субдукции Макран без учета эффектов вязкой диссипации и конвекции. Изотермы показаны с интервалом 0.05; (2) – распределение безразмерной невозмущенной функции тока в мантии над субдуцирующей Аравийской литосферной плитой без учета эффектов вязкой диссипации и конвекции. Линии тока показаны с интервалом 5. Диагональные эквидистантные линии тока соответствуют жесткой субдуцирующей плите, вынужденные течения (А) и (В) индуцируются субдуцирующей плитой и, отчасти, конвективным механизмом. Расстояние отсчитывается в меридиональном направлении от расположенного при 29°N «краевого угла» мантийного клина; (3) – квазистационарное распределение безразмерной функции тока в Пакистанском сегменте мантийного клина, совмещенное с распределением объемной мощности  $W_{diss}$  диссипативного тепловыделения, указанным стрелками (1), (2), (3); (4) – квазистационарное распределение безразмерной функции тока в Пакистанском сегменте мантийного клина с учетом развитой конвекции. Вектор  $q$  указывает зону аномального теплового потока, подводимого конвективным механизмом от области максимального диссипативного тепловыделения  $W_{diss}$  к дневной поверхности.

Мощность диссипативного тепловыделения и соответствующий тепловой поток в Пакистанской части желоба на ~ 5–10% меньше, чем в Иранской части, а локализация конвективного теплового потока, выносящего диссипативное тепло из мантийного клина

к дневной поверхности сдвигается на  $\sim 10^2$  км дальше вглубь континента по сравнению с рис. 2. Найденная модельная величина уменьшения мощности диссипативного тепловыделения и связанного с ним снижения аномального теплового потока с дневной поверхности удовлетворительно соответствует данным наблюдений в [2].

### Заключение

Предполагая, что максимум теплового потока  $q$  на территории Ирана возникает над конвективным течением, восходящим к зоне аномального теплового потока на Иранском плато на широте  $\sim 33^\circ\text{N}$  [2], и размер конвективной ячейки равен характерной ширине зоны повышенного теплового потока, можно оценить размер конвективной ячейки  $\sim 200$  км. При этом трудно рассчитать термическое состояние погружающейся плиты, настилающей плиты и индуцированного возвратного потока. Полагая вначале в уравнениях (1)–(2)  $Ra \rightarrow 0$ ,  $Di = 0$ , т.е. учитывая только теплопроводность, адвекцию тепла и эффекты фазовых переходов, и интегрируя значения формул (1)–(2) при  $V = 20$  мм в год для Иранской части зоны субдукции, получим квазистационарные безразмерные  $T = T_R$  и  $\psi$ , изображенные на рис. 1(1–2), где изотермы на рис. 1(1) показаны с интервалом 0.05, а линии тока – с интервалом 5. Из рис. 1(2) видно, что возвратный поток, индуцируется в виде двух расположенных один над другим вихрей «А» и «В», верхний из которых (вихрь «А» с  $\psi > 0$ ) вращается по часовой стрелке, а нижний («В» с  $\psi < 0$ ) – против часовой стрелки. Вихрь «А» вызывается в мантийном клине отчасти вынужденным субдукцией вихрем «В», а отчасти конвективным механизмом, который нельзя полностью исключить, так как в уравнениях (1)–(2) число Рэлея не может быть положено в точности равным нулю (так как число Рэлея стоит в уравнении (2) в знаменателе). Из рис. 1(2) видно, что в зоне «трения» индуцированного течения «А» и субдуцирующей плиты, движущихся навстречу друг другу, велик градиент скорости (т.е. скорость деформации), благодаря чему локализуется зона диссипативного тепловыделения и возможна инициация восходящего потока конвективного вихря Карига. На рис. 1(3) показана безразмерная мощность диссипативного тепловыделения  $W_{diss}$  в уравнении (11). Микро-вихри в зоне трения течения (А) о субдуцирующую Аравийскую литосферную плиту объясняются неустойчивостью типа тангенциального разрыва, причем видно, что конвективный вихрь (А) отрывает от субдуцирующей Аравийской литосферной плиты поверхностный слой мощностью  $\sim 30$  км. Невозмущенное конвекцией состояние на рис. 1(1–2) возникает за безразмерное время  $t = 0.23 \times 10^{-2}$ .

Полагая безразмерные параметры в уравнениях (1)–(2) согласно формуле (4), т.е. включая эффекты диссипации и конвекции, и интегрируя параметры уравнений (1)–(2),

находим, что в случае неньютоновской реологии при  $C_w = 1$  вес. % вынужденный мантийный поток над субдуцирующей Аравийской литосферной плитой за безразмерное время  $\sim 0.33 \times 10^{-6}$  (в размерном виде  $\sim 3 \times 10^4$  лет) разрушается конвекцией, которая, по достижении стадии развитой конвекции, принимает вид, изображенный на рис. 1(4). Видно, что вихревые линии тока, показанные с интервалом  $\sim 1.0 \times 10^5$ , действительно соответствуют одной доминирующей конвективной ячейке, возбуждающейся при скорости субдукции  $V=20$  мм/год. Размер конвективной ячейки близок к наблюдаемой поперечной протяженности аномалии теплового потока на Иранском плато на широте  $\sim 33^\circ\text{N}$ . Расположение конвективной ячейки на расстоянии около 500 км от «острия» мантийного клина приблизительно соответствует  $4^\circ$  по долготе между широтой  $29^\circ\text{N}$ , при которой угол субдукции резко возрастает до  $24^\circ$ , и широтой  $\sim 33^\circ\text{N}$ , на которой расположена зона повышенного теплового потока. Густота линий тока соответствует скорости конвективных движений более  $\sim 1$  м/год<sup>1</sup>.

Следует отметить, что течение, индуцируемое в мантийном клине субдуцирующей Аравийской литосферной плиты не возмущенное конвекцией, состоит из двух расположенных одно над другим течений, обозначенных как А и В (рис. 1(1) и рис. 2(1)) только в случае неньютоновской реологии мантии, и именно в этом случае формируется локализованная зона трения в области контакта встречного течения (А) и субдуцирующей Аравийской литосферной плиты. В этой зоне велико диссипативное тепловыделение, порождающее восходящий конвективный поток (показанный векторами  $q$  на рис. 1(4), рис. 2(4)). Кроме тепла, этот поток может выносить к поверхности Земли металлические руды и способствовать формированию залежей железа и других металлов.

В Пакистанской части зоны субдукции Макран аномальный тепловой поток в тылу зоны субдукции может быть понижен в сравнении с Иранской частью зоны субдукции вследствие повышения содержания воды до 1.5 вес. % и уменьшения энергии активации на  $45$  кДж·моль<sup>-1</sup> по сравнению с Иранской частью. Считается общепринятым, что с ростом «влажности» среды энергия активации слагающих пород уменьшается, хотя формул, связывающих энергию активации с концентрацией воды не существует. Рассчитанная авторами математическая модель глубинного строения зоны субдукции Макран показывает, насколько по величине аномального теплового потока можно оценить уменьшение энергии активации с ростом содержания воды в поровом пространстве горных пород этого региона. Подъем конвективного потока, восходящего из мантийного клина в направлении к дневной поверхности, может выносить (апвеллинг) мантийные УВ-геофлюиды в верхние слои осадочного слоя земной коры и

способствовать формированию нефте-газоносного района на юге Ирана в областях повышенного теплового потока в соответствии с теоретическими исследованиями [10; 11].

## References

1. Penney S., Tavakoli F., Saadat A., Nankali H.R., Sedighi M., Khorrami F., Sobouti F., Rafi Z., Copley A., Jackson J., Priestley K. Megathrust and accretionary wedge properties and behavior in the Makran subduction zone // *Geophysical Journal International*. 2017. V. 209. pp. 1800 – 1830. DOI: 10.1093/gji/ggx126.
2. Mousavi N., Ebrahimzadeh A.V. 3D Surface Heat Flow, Low-Temperature Basins and Curie Point Depth of the Iranian Plateau: Hydrocarbon Reservoirs and Iron Deposits // *Journal of the Earth and Space Physics*. 2023. V. 48. No. 4. pp. 137-150. DOI: <http://doi.org/10.22059/jesphys.2023.348000.1007453>
3. Gavrilov S.V., Kharitonov A.L. Geodynamic modeling of the deep structure and processes of convective removal of hydrocarbons from the mantle wedge in the rear of the Makran subduction zone for prospecting for oil and gas fields in Iran // *Geology, geography and global energy*. 2024. No. 2(93). pp. 19-28.
4. Zharkov V.N. *Physics of the Earth's interior*. Moscow: Nauka i prosveshchenie, 2012. 384 p.
5. Gao X., Wang K. Strength of stick-slip and creeping subduction megathrusts from heat flow observations // *Science*. 2014. No. 345(6200). pp. 1038–1041. DOI:10.1126/science.1255487.
6. Schubert G., Turcotte D.L., Olson P. *Mantle Convection in the Earth and Planets*. New York: Cambridge University Press, 2001. 940 p.
7. Billen M., Hirth G. Newtonian versus non-Newtonian Upper Mantle Viscosity: Implications for Subduction Initiation // *Geophys. Res. Lett.* 2005. V. 32. (L19304). DOI: 10.1029/2005GL023458.
8. Trubitsyn V.P. Rheology of the mantle and tectonics of oceanic lithospheric plates // *Physics of the Earth*. 2012. No. 6. pp. 3-22.
9. Trubitsyn V.P., Trubitsyn A.P. Numerical model of the formation of a set of lithospheric plates and their passage through the boundary of 660 km // *Physics of the Earth*. 2014. No. 6. pp. 138-147.
10. Timurzиеv A.I. Substantiation of the structural and geomorphological method of forecasting local zones of recent stretching // *Soviet geology*. 1989. No. 1. pp. 69-79.
11. Seiful-Mulyukov R. *Oil and gas: deep nature and its applied significance*. Moscow: Torus Press, 2012. 216 p.