

Сергей Владиленович Гаврилов

Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта Российской академии наук, главный научный сотрудник, доктор физико-математических наук, Москва, Россия. E-mail: gavrilov@ifz.ru,

Андрей Леонидович Харитонов

Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова Российской академии наук (ИЗМИРАН), ведущий научный сотрудник, кандидат физико-математических наук, Москва, Троицк, Россия. E-mail: ahariton@izmiran.ru,

Использование результатов глубинной геодинамической модели Черноморско-Кавказского региона для поисков перспективных нефтегазовых районов

Аннотация. Для устойчивого развития нефтегазовой промышленности Кавказского региона необходимо использовать все имеющиеся геолого-геофизические данные, в том числе и данные глубинных геодинамических исследований. На основе данных о конвективном выносе тепла из мантийного клина к 2D аномалии теплового потока, наблюдаемой на территории Кавказа, произведена оценка угла наклона мантийного клина и скорости субдукции Черноморской литосферной микроплиты под литосферу Кавказского региона). Восходящие конвективные движения в мантии могут выносить мантийные известково-щелочные магмы (с содержащимися в них углеводородами) в приповерхностные слои осадочного чехла, и, следовательно, месторождения нефти и газа, должны быть приурочены к зонам, расположенным над конвективными вихрями.

Ключевые слова: субдукция литосферы, конвективные вихри, тепловой поток, зоны месторождений нефти и газа.

Sergey V. Gavrilov

Schmidt Institute of Physics of the Earth of RAS, Senior Researcher, Dr., Moscow. E-mail: gavrilov@ifz.ru

Andrey L. Kharitonov

Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radio Wave Propagation of RAS (IZMIRAN), Leading Researcher, Ph.D., Moscow, Troitsk. E-mail: ahariton@izmiran.ru

Using the results of the deep geodynamic model of the Black Sea-Caucasus region for the search for promising oil and gas regions

Abstract. For the sustainable development of the oil and gas industry in the Caucasus region, it is necessary to use all available geological and geophysical data, including data from deep geodynamic studies. On the basis of data of convective carrying out of heat from a mantle wedge to 2D anomaly of a heat flux observed in the back of the territory of the Caucasus assessment of the angle of mantle wedge and speed of the subduction of the Black Sea the lithospheric micro plate under the lithosphere of the Caucasian region) is made. The ascending convective movements in the mantle can take out mantle calc-alkali magmas (with the metals which are contained in them) to a day surface, and, therefore, ore deposits probably have to be dated for zones of the raised heat flux, located over convective flows.

Keywords: subduction of lithosphere, convective flows, heat floor, oil and gas fields.

ВВЕДЕНИЕ

Некоторые российские геологи и геофизики [1, 2, 5, 6] считают, что пространственное распределение нефтегазовых месторождений отражает гетерогенное распределение скоплений углеводородов в зонах развития конвективных вихрей верхней мантии (рис. 1).

Опираясь на геологические данные, изложенные в работах [2, 11], необходимо показать, как

изменялось, в процессе эволюционного развития Земли (от 165 миллионов лет назад до настоящего времени), геодинамическое строение литосферы с постепенным формированием основных тектонических структур: вала Шатского и Малого Кавказа, а также параллельного им хребта Большого Кавказа (и соответственно прогибов между ними) в восточном секторе (Восточные Понтиды) палео-океанической литосферной плиты древнего океана Тетиса (1) (территория, куда помимо Черноморской

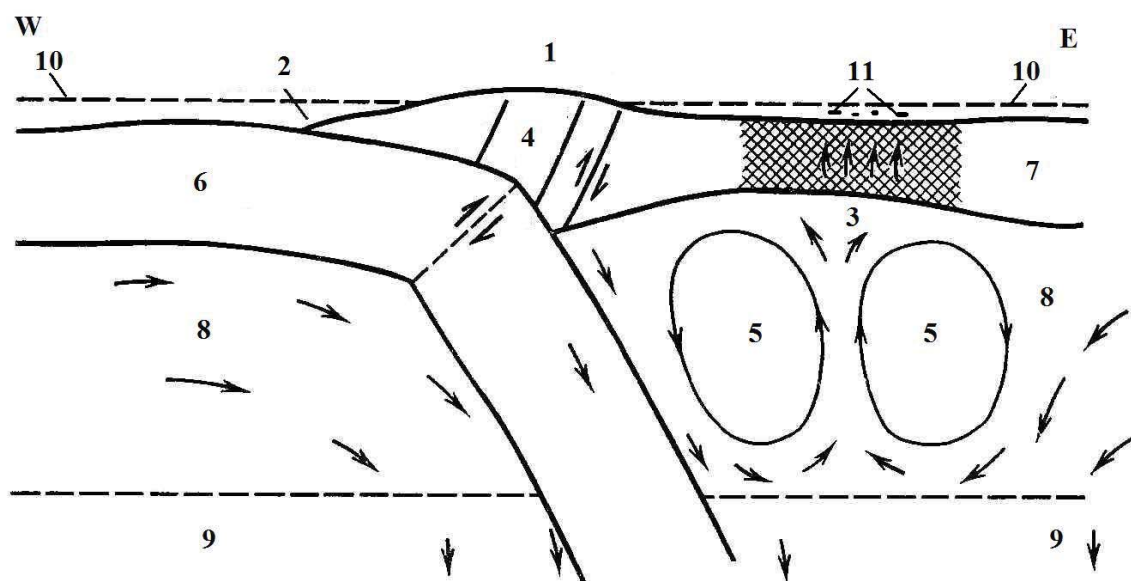


Рис. 1. Геодинамическая реконструкция Черноморско-Кавказской палео-субдукционной зоны [6]

1 – горный палеовулканический пояс Кавказа; 2 – Восточно-Черноморская океаническая зона; 3 – конвективная зона переноса тепла и углеводородов вверх; 4 – зоны разломов литосферы Кавказа; 5 – вихри тепловой конвекции Карижа; 6 – субдукция Восточно-Черноморской литосферной микроплиты; 7 – предкавказская (Скифская) литосферная плита; 8 – верхний мантийный слой; 9 – средний мантийный слой; 10 – поверхность Земли; 11 – нефтегазоносный бассейн в Предкавказье

Fig. 1. Geodynamic framework reconstruction of the Black Sea-Caucasus paleo subduction zone [6]

1 – mountain paleo volcanic belt of Caucasus; 2 – East Black Sea oceanic zone; 3 – convective zone of transporting heat and hydrocarbons upwards; 4 – fault zones of lithosphere of Caucasus; 5 – Karig thermal convection vortices; 6 – the subduction of the East Black lithosphere micro-plate; 7 – pre-Caucasus (Scythian) lithosphere plate; 8 – upper mantle layer; 9 – middle mantle layer; 10 – the Earth's surface; 11 – oil- and gas-bearing basin in pre-Caucasus

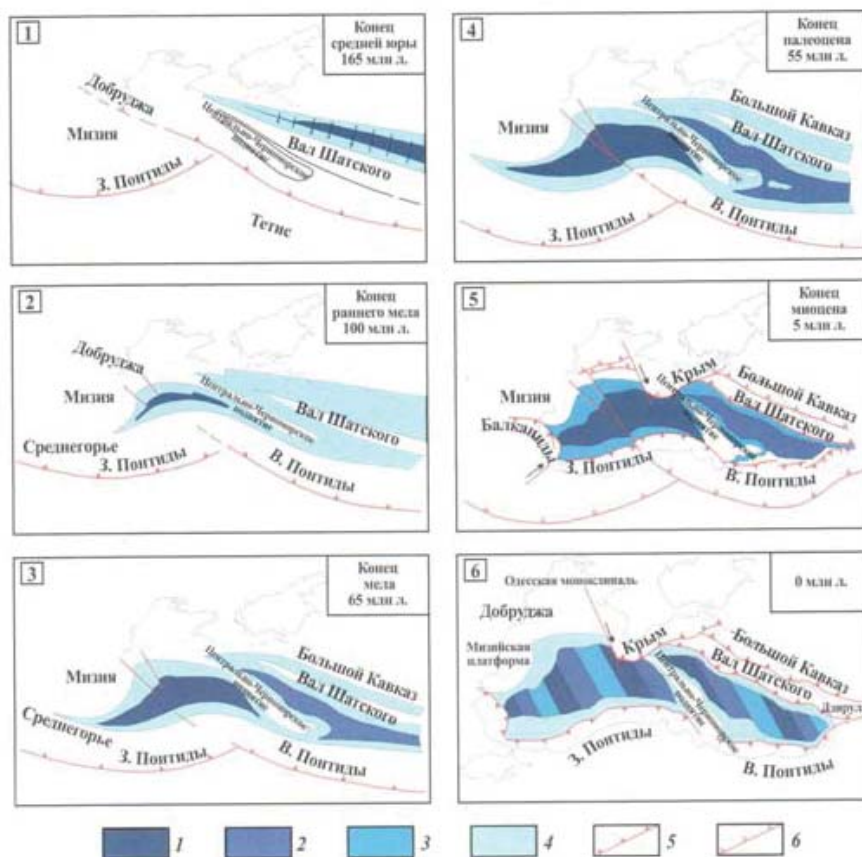


Рис. 2. Геодинамическая эволюция бассейнов Черноморской впадины в Мезозойско-Кайнозойский геохронологический период (165–0 млн лет) по [2, 11]

1 – океаническая кора; 2 – сильно тоненная континентальная кора; 3 – зона консервации древней коры; 4 – задуговые бассейны и континентальные окраины; 5 – зоны активной субдукции Черноморской микроплиты; 6 – зоны поддвиго-го склона Черноморской микро-плиты

Fig. 2. Geodynamic evolution of the Black Sea basin in the Mesozoic-Cenozoic geological and chronological period (165 – 0 m.y.) according to [2, 11].

1 – oceanic crust; 2 – highly thinned continental crust; 3 – zone of ancient crust conservation; 4 – back-arc basins and continental margins; 5 – active subduction zones of Black sea micro-plate; 6 – zones of subduction slope of Black sea micro-plate.

микроплиты, входили и валлообразные структуры Большого и Малого Кавказа), которая постепенно (2–6) пододвигалась (субдуцировала) под Скифскую палеолитосферную плиту, и при этом передовой регион Большого Кавказа испытывал сжимающие напряжения (рис. 2).

Цель данной работы – попытаться с позиции концепции тектоники литосферных плит объяснить происхождение линейных зон месторождений нефти и газа в пределах Кавказского и Предкавказского (Таманская (4) и Индоло-Кубанская впадины) и Восточно-Черноморского регионов. В соответствии с работами [2, 11], взаимодействие литосферных плит в Черноморском регионе приводило к процессу постепенного поддвигания (субдукции) Черноморской субокеанической палеолитосферной микроплиты (остатков древнего океана Тетиса) (рис. 2), в ее восточном секторе (Восточные Понтиды), под литосферу Кавказского региона. Судя по данным о пространственном расположении основных валлообразных тектонических структур Черноморского палеоокеанического бассейна и прилегающих территорий (Большого и Малого Кавказа), ранее являвшихся его частями, можно сказать, что тектоническая структура Черноморского бассейна мало изменилась за последние 65 миллионов лет (рис. 2, карты под номерами 3–6). Поэтому, исходя из анализа имеющихся геолого-геофизических данных, можно смоделировать реликтовые геодинамические процессы и глубинные геолого-геофизические параметры палеосубдукционной зоны, издревле существующей в Черноморском регионе.

РАСЧЕТЫ ПАРАМЕТРОВ ГЕОДИНАМИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ЗОНЫ СУБДУКЦИИ ПОД ТЕРРИТОРИЕЙ КАВКАЗА

В качестве геодинамической модели термомеханического состояния субдукционного мантийного клина между подошвой литосферы Кавказского региона, и поверхностью Восточно-Черноморской литосферной субокеанической микроплиты, поддвигающейся под этот регион, под углом β со скоростью V , примем модель, получаемую при $Pr \rightarrow \infty$, в приближении Буссинеска из системы двумерных безразмерных уравнений гидродинамики для функции тока ψ и температуры T [15]:

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

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

Здесь η – безразмерный коэффициент динамической вязкости, символ ∂ и индексы означают частные производные по координатам x (горизонтальной), z (вертикальной) и времени t , Δ – 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 направления субдукции, вдоль основания переходной зоны мантии (ПЗМ) на глубине 660 км, ось z – вверх от ПЗМ),

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

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

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

где $\alpha = 3 \times 10^{-5} \text{ K}^{-1}$ – коэффициент теплового расширения, $\rho = 3.3 \times 10^3 \text{ (кг} \times \text{м}^{-3})$ – плотность мантии, g – ускорение силы тяжести, $c_p = 1.2 \times 10^3 \text{ Дж} \times \text{кг}^{-1} \times \text{K}^{-1}$ – удельная теплоемкость при постоянном давлении, $T_1 = 1950^\circ \text{ K}$ – температура основания переходной зоны мантии (ПЗМ) на глубине 660 км, считающейся нижней границей модельной области, $Q = 6.25 \times 10^{-4} \text{ мВт} \times \text{м}^{-3}$ – объемная мощность тепловыделения в коре, τ_{ik} – тензор вязких напряжений, $d = 660 \text{ км}$ – вертикальный размер модельной области, $\eta_c = 10^{18} \text{ (Па} \times \text{с)}$ – масштабный множитель вязкости, $\chi = 1 \text{ (мм}^2 \times \text{с}^{-1})$ – 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 (1), (2) масштабными множителями для времени t , напряжений τ_{ik} и функции тока ψ служат соответственно величины $(d^2 \times \chi^{-1})$, d , $(d^2 \times \eta_c \times \chi)$. Выражение для неньютоновской вязкости принималось в виде [3, 16]

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

где T – безразмерная температура, а безразмерная координата z , нормированная на d , отсчитывается вверх от основания ПЗМ (ось x направлена по нижней границе ПЗМ против направления субдукции). Согласно [7], 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 %) [17]. При $C_w = 10^{-3}$ с учетом

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

безразмерная вязкость есть

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

Отношение сторон модельной области примем равным 1 : (1.14) так, что при субдукции по диагонали модельной области угол субдукции составит $\beta=41^\circ$, близкий к результатам реальных сейсмических измерений [18], а расчетная скорость $V = 40.5$ (мм/год-1) в единицах $(d^{-1} \times \chi)$ равна $V = 0.938 \times 10^3$, т. е. в субдуцирующей Восточно-Черноморской микроплите ее компоненты $V_x = -0.898 \times 10^3$ и $V_z = -0.268 \times 10^3$ [11]. Величина скорости субдукции подбиралась таким образом, чтобы в мантийном клине возбуждались 2D-конвективные ячейки размером ~ 250 км (судя по почти одинаковому расстоянию между валообразными структурами в палеоокеане Тетис на рис. 2, карты от 3-й до 6-й, т. е. от конца Мелового периода 65 млн лет назад до настоящего времени).

Следуя [7], примем фазовые функции $\Gamma^{(l)}$ в виде (напомним, что ось z здесь направлена вверх, поэтому знаки изменены):

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

где $z^{(l)}(T)$ – глубина l -го фазового перехода, $z_0^{(l)}$ и $T_0^{(l)}$ – усредненные глубина и температура фазового пе-

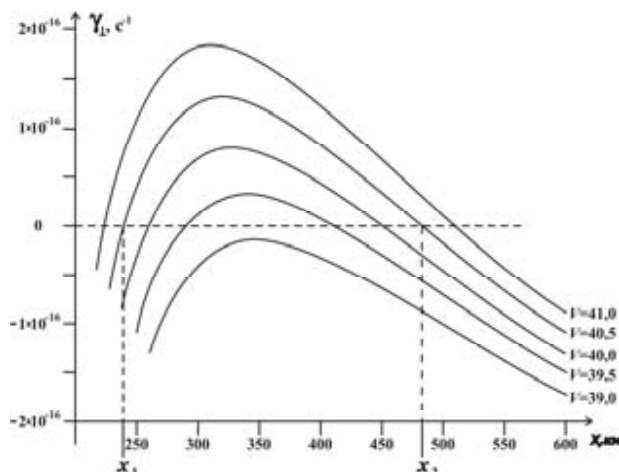


Рис. 3. Распределение $\gamma(x)$ инкрементов конвективной неустойчивости как функции горизонтального расстояния x , при различных скоростях субдукции V , указанных в мм в год. В зоне ($x_1 < x < x_2$) с $\gamma(x) > 0$, протяженностью 250 км при $V = 40.5$ мм/год возбуждается конвекция, обеспечивающая аномальный 2D тепловой поток.

Fig. 3. Growth rate $\gamma(x)$ of convective instability vs. horizontal distance x , for subduction velocities V in mm per year. In the zone ($x_1 < x < x_2$), approximately 250 km long single 2D convection cell with $\gamma(x) > 0$ is aroused at $V = 40.5$ mm/yr-1 in the zone of heat flux maximum.

рехода, $\gamma^{(410)}=3$ (МПа $\times$ К $^{-1}$) и $\gamma^{(660)}=-3$ (МПа $\times$ К $^{-1}$) – наклоны кривых фазового равновесия, $w^{(l)}$ – характер-

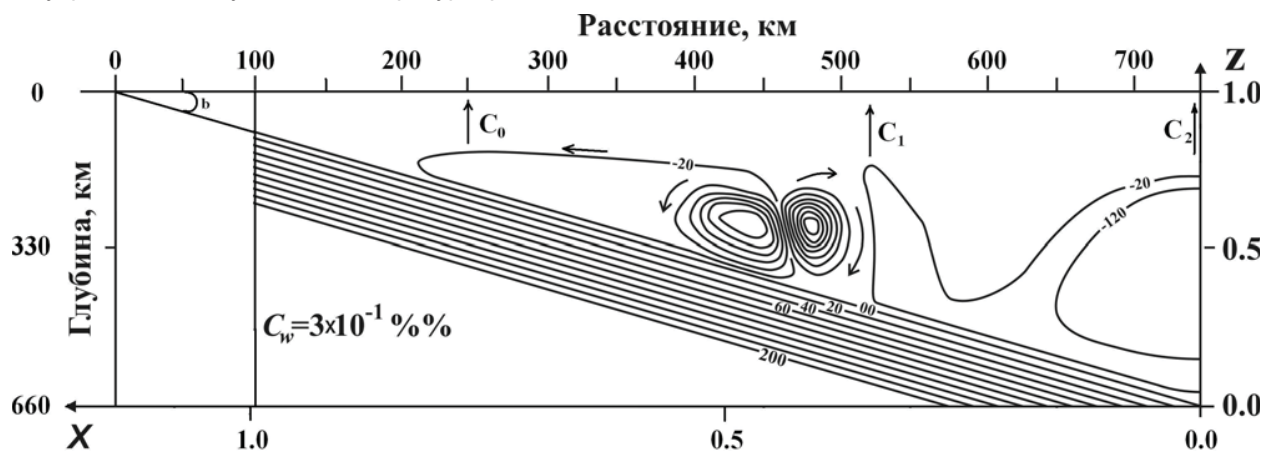


Рис. 4. Квазистационарные распределения безразмерной функции тока, в мантийном субдукционном клине Восточно-Черноморской литосферной субокеанической микроплиты, погружающейся под литосферу Кавказского региона под углом ($\beta = 41^\circ$), с учетом эффектов диссипативного нагрева и конвективной неустойчивости для неньютоновской реологии мантии и концентрации воды $C_w = 3 \times 10^{-1}$ весовых %%. Восходящие конвективные потоки, направление которых показано стрелками (C_0), (C_1), (C_2), могут выносить известково-щелочные магмы (с содержащимися в них растворенными углеводородами) в зонах: C_0 (северный борт вала Архангельского), C_1 (северный борт вала Шатского), C_2 (северный борт Большого Кавказского хребта)

Fig. 4. Quasi-stationary distributions of the dimensionless current function in the mantle subduction wedge of the East Black Sea lithospheric sub-oceanic micro plate sinking under the lithosphere of the Caucasus region at an angle ($\beta = 41^\circ$), with the effects of dissipative heating and convective instability for the case of non-Newtonian rheology and the water content $C_w = 3 \times 10^{-1}$ weight %%. Arrow (C_0), (C_1), (C_2) shows ascending convective flow transporting calc-alkali magmas (with the hydrocarbons which are contained in them) at the point C_0 (north border of Archangelsky uplift), at the point C_1 (north border of Shatsky uplift), at the point C_2 (north border of Greater Caucasian region)

ная ширина l -го фазового перехода $T_o^{(410)}=1800^\circ\text{K}$, $T_o^{(660)}=1950^\circ\text{K}$ – средние температуры фазовых переходов. Теплоты фазовых переходов, как и в [7], в (2) не учитываются ввиду незначительности в случае развитой конвекции. Из формулы (10) получаем:

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

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 $z_o^{(410)} = 0.38$, $z_o^{(660)} = 0$, $w^{(l)} = 0.05$, $\gamma^{(410)} = 2.55 \times 10^9$, $\gamma^{(660)} = -2.55 \times 10^9$, $T_o^{(410)} = 0.92$, $T_o^{(660)} = 1.00$, и в (1)

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

В качестве граничных условий принята изотермичность горизонтальных и адиабатичность вертикальных границ, условия прилипания и непроницаемости границ (кроме «окон» внедрения и выхода Восточно-Черноморской субдуцирующей микроплиты, 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).

РЕЗУЛЬТАТЫ ПРОВЕДЕННЫХ РАСЧЕТОВ ГЕОДИНАМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ СУБДУКЦИОННОЙ ЗОНЫ ПОД ТЕРРИТОРИЕЙ КАВКАЗА

Для первоначальной оценки средней скорости субдукции Восточно-Черноморской литосферной микроплиты рассмотрим зависимость от горизонтальной координаты x инкремента $\gamma(x)$ конвективной неустойчивости в виде тектонических валообразных структур, ориентированных поперек направления зоны 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 суб-

дукции $\beta=41^\circ$, размера конвективной ячейки 250 км и различных скоростей субдукции V , указанных на рисунке в мм в год.

Следует подчеркнуть, что $\gamma(x)$ 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 рис. 3 видно, что размер конвективной зоны с $\gamma(x) > 0$ достигает $x_2 - x_1 = 250$ км (т. е. единственная конвективная ячейка размером 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 настиляющей литосферой Кавказского региона и субдуцирующей Восточно-Черноморской субокеанической литосферной микроплитой, ради повышения точности вычислений, вначале необходимо положить в формулах (1) – (2) $Ra = 0$, $Di = 0$, т. е. рассчитать модель погружающейся Восточно-Черноморской субокеанической

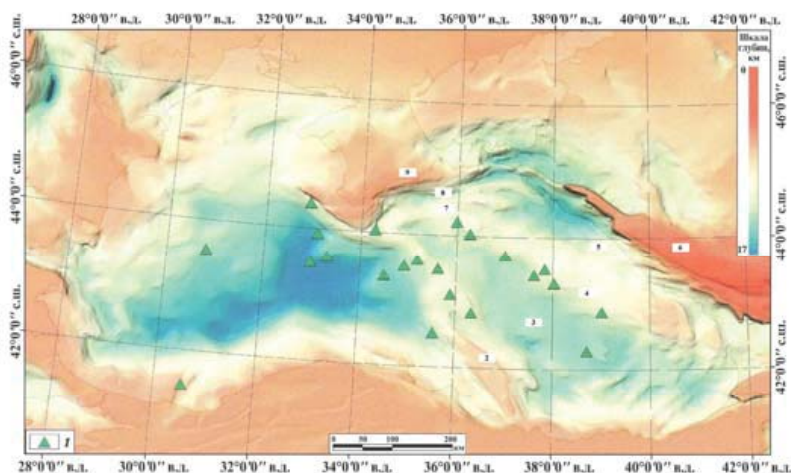


Рис. 5. Карта рельефа твердой поверхности Земли Азово-Черноморского региона [2]

1 – зелеными треугольниками обозначены линейные области разгрузки газо- и гидрофлюидных потоков на морском дне в зонах подъема известково-щелочных магм по глубинным тектоническим разломам; 2 – линейно вытянутое тектоническое поднятие Архангельского; 3 – линейно вытянутый прогиб рельефа поверхности дна моря, связанный с впадиной Восточно-Черноморского бассейна; 4 – тектоническая валообразная структура хребта Шатского; 5 – Туапсинский прогиб; 6 – линейно вытянутое поднятие орогенической области Большого Кавказа; 7 – тектоническая валообразная структура хребта Сорокина; 8 – Прикрымский прогиб; 9 – Крымская орогеническая область.

Fig. 5. Map of the relief of the hard surface of the Earth of the Azov-Black Sea region [2]

1 – green triangles indicate the lineal areas of discharge of gas and hydro fluid flows on the sea floor in the zones of rise of calcareous-alkaline magmas along deep tectonic faults; 2 – linearly elongated Archangelsky tectonic uplift structure; 3 – linearly elongated trough of the sea bottom surface relief associated with the depression of the East Black Sea basin; 4 – tectonic uplift structure of Shatsky ridge; 5 – Tuapse trough; 6 – linearly elongated uplift orogenic region of the Greater Caucasus; 7 – tectonic uplift structure of Sorokin ridge; 8 – pre-Crimean trough; 9 – Crimean orogenic region.

литосферной микроплиты, мантийного клина и настилающей плиты без учета вязкой диссипации и конвекции. Это связано с тем, что при Ra и Di в формуле (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 микроплиты, настилающей плиты и индуцированного возвратного потока.

Полагая затем безразмерные параметры в формулах (1) – (2) и в соответствии с формулой (4), т. е. включая эффекты диссипации и конвекции и интегрируя параметры 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 микроплитой за безразмерное время 0.6×10^{-6} (в размерном виде 105 лет) разрушается конвекцией, которая, по достижении стадии развитой конвекции, принимает вид, изображенный на рис. 4. Видно, что вихревые линии

тока, показанные с интервалом 4×10^4 , действительно соответствуют одной конвективной ячейке, возбуждающейся при скорости субдукции $V = 40.5$ (мм/год). Необходимо акцентировать внимание на том, что размер конвективной ячейки Карига [14] составляет порядка 250 км. Таким образом, расчет для неньютоновской реологии с вязкостью, рассчитанной в формулах (7)–(9) показывает, что при снижении вязкости на три порядка по сравнению с результатами формул (7)–(9), т. е. при $C_w = 3 \times 10^{-1}$ весовых %, в мантийном клине развивается конвекция в виде двух микровихрей, 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 [7]. Значительная скорость конвективных движений объясняется локальным снижением вязкости за счет повышения напряжений в мантии, в зоне, охваченной конвекцией. В результате проведенных расчетов на рис. 4 показано квазистационарное распределение безразмерной функции тока, в мантийном субдукционном клине характерное для малых углов субдукции Восточно-Черноморской субокеанической микроплиты под континентальную

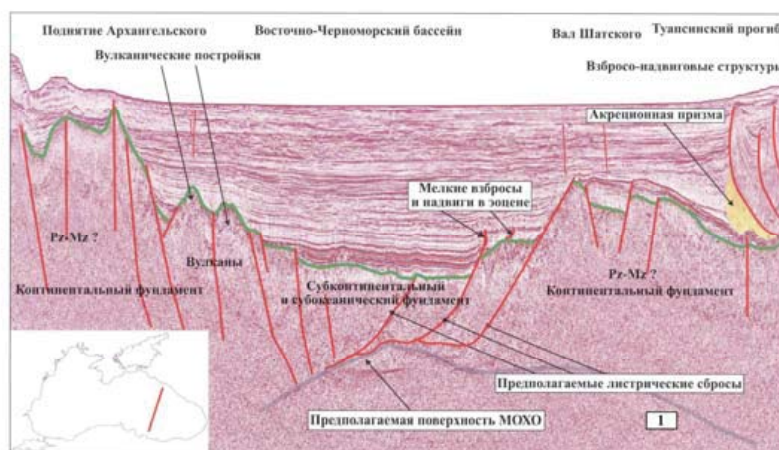


Рис. 6. Временной сейсмический разрез по профилю BC-060 [2]:

1 – линией серого цвета сделано обозначение поверхности Мохоровичича (МОХО) – верхней кромки субдуцирующей Восточно-Черноморской литосферной микроплиты; 2 – линией зеленого цвета сделано обозначение верхней кромки консолидированного континентального и субокеанического фундамента; 3 – линиями красного цвета сделано обозначение субвертикальных тектонических разломов и связанных с ними дистрикционных сбросов, по которым от Мезозойского периода до настоящего времени происходило поднятие щелочных растворов, приводящих к образованию металлогенических зон на валлообразных тектонических структурах Азово-Черноморского региона

Fig. 6. Temporary seismic section along the BC-060 profile [2].

1 – the line of the gray color indicates the Mokhorovic surface (MOHO) – the upper edge of the subducting East Black Sea lithospheric micro plate; 2 – the line of the green color indicates the upper edge of the consolidated continental and suboceanic basement; 3 – lines of the red color indicates the sub-vertical tectonic faults and associated listric discharges, which from the Mesozoic period to the present time were used to raise alkaline solutions, leading to the formation of metal-genesis zones on the wave-like tectonic structures of the Azov-Black Sea region.

литосферу Кавказского региона.

Установлено также, что уже при угле наклона ($\beta > 45^\circ$) субдуцирующей Восточно-Черноморской микроплиты поперечные валлообразные структуры вообще не возникают [1, 7, 10]. При рассмотренном угле субдукции ($\beta = 41^\circ$) конвекция не возникает только при скорости ниже $V = 10$ мм/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 $V = 40.5$ (мм/год⁻¹) возникает при концентрации воды $C_w = 3 \times 10^{-1}$ весовых %.

ОБСУЖДЕНИЕ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Как показали проведенные исследования и расчеты, в результате длительных (165 миллионов лет) геодинамических и тектонических процессов субдукции Восточно-Черноморской субокеанической микроплиты (рис. 2) произошло образование перемежающихся линейно вытянутых параллельных друг другу впадин и поднятий (поднятия вала

Архангельского (2), вала Шатского (4)) и глубоководных линейно вытянутых прогибов (впадина Восточно-Черноморского бассейна (3) и Туапсинский прогиб (5)) перед орогенической областью Большого Кавказа (6), представленных на карте рельефа твердой поверхности Земли Азово-Черноморского региона (рис. 5).

Также эти перемежающиеся линейно вытянутые поднятия и прогибы показаны на сейсмическом временном разрезе (рис. 6), проходящем через восточную часть акватории Черного моря (врезка внизу слева на рис. 6).

Из рисунка 6 видно, что поверхность Мохоровичича (1), являющаяся верхней кромкой литосферы Восточно-Черноморской микроплиты, показанная в нижней правой части этого сейсмического разреза, имеет определенный наклон на север, под орогенические (валообразные) тектонические структуры вала Шатского и Большого Кавказа. Этот наклон верхней кромки литосферы показывает, что и в современный геохронологический период также происходит субдукция литосферы Восточно-Черноморской микроплиты под эти орогенические структуры. Однако скорость субдукции Восточно-Черноморской микроплиты пока остается неопределенной, и в литературе о ней пока нет точных данных.

Согласно [1, 10], в мантийном клине возможны

два типа мелкомасштабной термической конвекции, вызываемой диссипативным нагревом: 3D конвекция в виде магматических струй, восходящих к палеовулканическим цепям Кавказа, валам Шатского и Архангельского, и 2D конвекция в виде так называемых ролловых (квазицилиндрических) вихрей Карига [14] в зонах Большого Кавказа, ориентированных поперек направления зоны субдукции (поддвига) Восточно-Черноморской микроплиты. В [1] показано, что пространственное разделение этих двух типов термической конвекции возникает вследствие зависимости коэффициента эффективной вязкости мантии от температуры, причем конвективные вихри Карига, если они формируются, то они располагаются на северных предгорьях Кавказа (Таманская (4) и Индоло-Кубанская впадины), то есть севернее основной палеовулканической гряды Кавказского региона.

Для подтверждения проведенных модельных расчетов по профильным данным теплового потока в восточной части Черноморского региона (рис. 4) приводим также независимые данные [4] по пространственному распределению теплового потока на исследуемой акватории Черноморской впадины и территории Большого и Малого Кавказских линейно вытянутых горных регионов (рис. 8), которые не противоречат данным, использо-

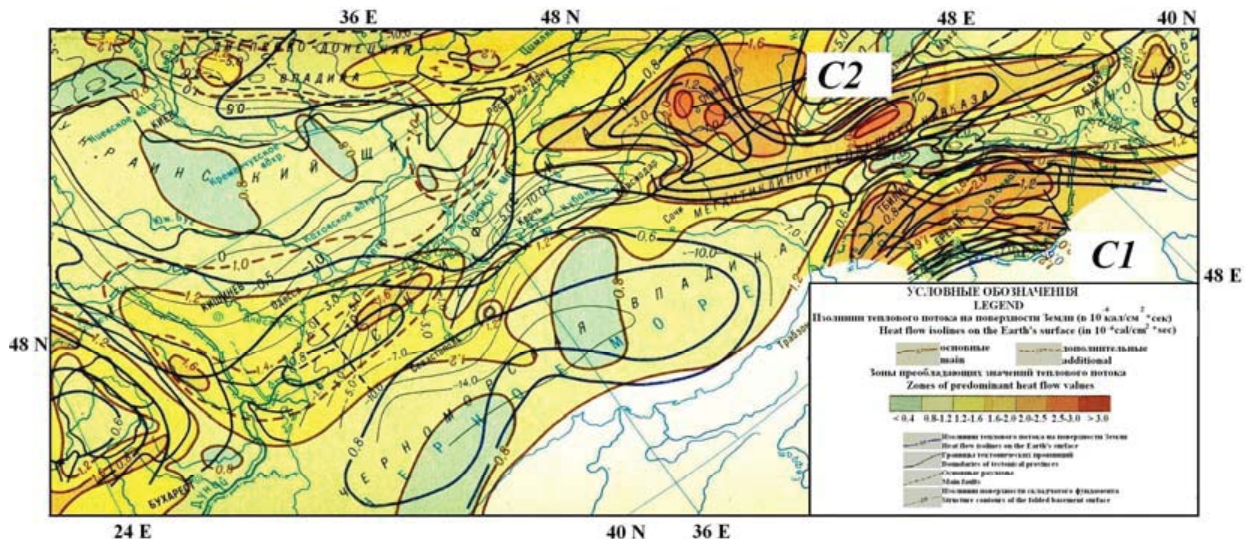


Рис. 7. Фрагмент карты значений теплового потока q (1×41.8 мВт / m^2) в Кавказском регионе [4]

Линейная зона теплового потока Малого Кавказа (C_2) является зоной 2D конвективных вихрей, связанных с максимальными значениями теплового потока q , а линейная зона теплового потока Большого Кавказа C_3 ассоциируется с 3D конвективным вихрем Кариба.

Fig. 7. Fragment of the map of heat flux values q ($1 \times 41.8 \text{ mW} / \text{m}^2$) in the Caucasus region [4]

The Minor Caucasus heat flux linear zone (C_1) are the zones of 2D convective flows ascending to the heat flux q maxima and the Great Caucasus heat flux linear zone the whirls under C_2 are the 3D Karig convective flows.

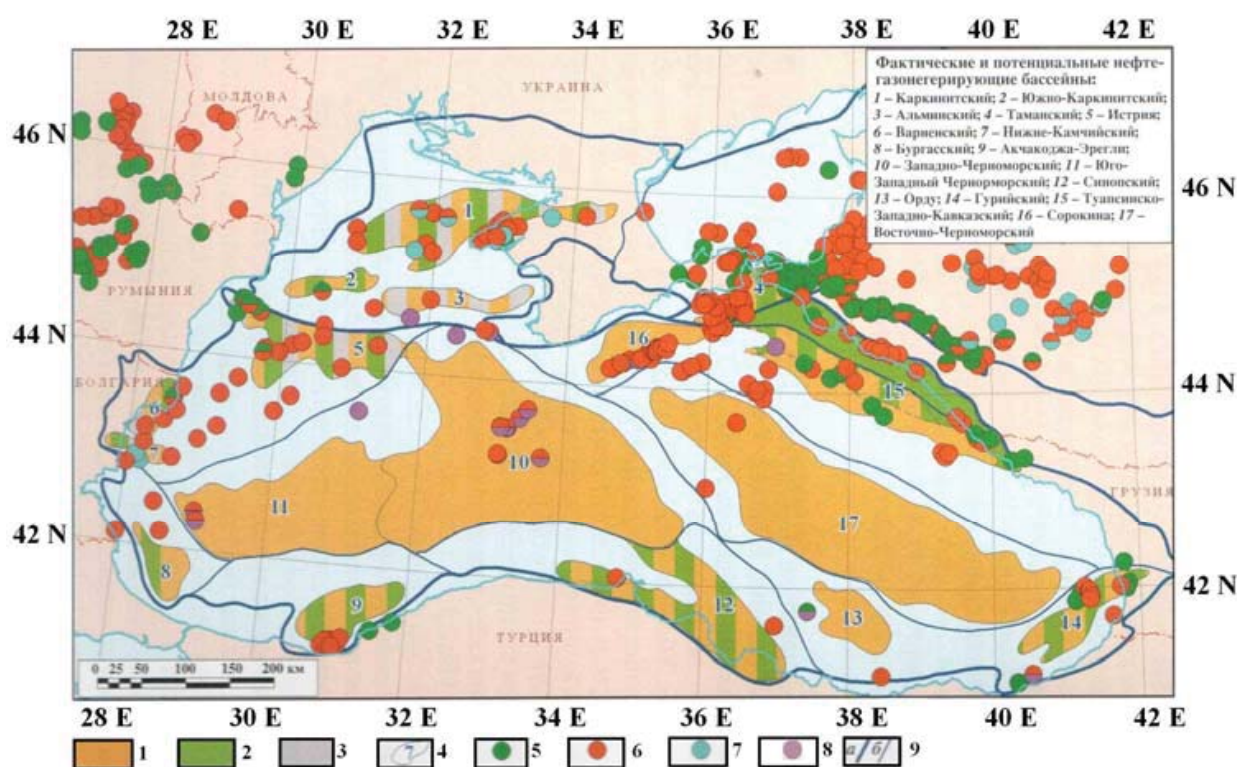


Рис. 8. Карта фактических и потенциальных нефтегазогенерирующих бассейнов и признаков нефтегазоносности осадочного разреза Черноморско-Кавказского региона [4]

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 – Каркинитский; 2 – Южно-Каркинитский; 3 – Альминский; 4 – Таманский; 5 – Истрия; 6 – Варьенский; 7 – Нижне-Камчийский; 8 – Бургасский; 9 – Акчакоджа-Эрегли; 10 – Западно-Черноморский; 11 – Юго-Западно-Черноморский; 12 – Синопский; 13 – Орду; 14 – Гурийский; 15 – Туапсинско-Западно-Кавказский; 16 – Сорокина; 17 – Восточно-Черноморский.

Fig. 8. Map of actual and potential oil and gas generating basins and signs of oil and gas potential of the sedimentary section of the Black Sea-Caucasus region [4]

Oil and gas generating basins and the age of oil and gas – producing strata: 1 – Cenozoic; 2 – Mesozoic; 3 – Paleozoic; 4 – contours of oil and gas generating basins and their indices; hydrocarbon deposits: 5 – oil; 6 – gas; 7 – condensate; 8 – gas hydrates; 9 – contours of oil and gas provinces (a) and regions (b). Actual and potential oil and gas generating basins: 1 – Karkinitzky; 2 – Yuzhno-Karkinitzky; 3 – Alminsky; 4 – Taman; 5 – Istria; 6 – Variensky; 7 – Nizhne-Kamchiysky; 8 – Burgas; 9 – Akchakoja-Eregli; 10 – West Black Sea; 11 – South-West Black Sea; 12 – Sinop; 13 – Ordu; 14 – Guri; 15 – Tuapse-West Caucasian; 16 – Sorokina; 17 – East Black Sea.

ванным для модельных расчетов по профилям (рис. 4).

Из рисунка 7 видно, что на карте пространственного распределения теплового потока имеются две основные линейные зоны высоких значений теплового потока на территориях валлообразных структур Малого Кавказа и Большого Кавказа, расположенные на расстоянии около 250 км, как и следует из проведенных в статье расчетов. Это подтверждает приведенные выше расчеты о повышенном выделении эндогенной энергии из мантии в зонах внедрения щелочных магматических образований (с содержащимися в них углеводородами) в основных провинциях Черноморско-Кавказского региона (северные склоны вала Шатского и хребтов Большого Кавказа).

ВЫВОДЫ

Таким образом, можно заключить, что при проведении поисково-разведочных работ на месторождения нефти и газа в Кавказском регионе важно понимать, что расстояние между образовавшимися линейными нефтегазовыми зонами зависит от соотношения многих физико-химических факторов: угла наклона зоны субдукции и скорости субдуцирующей Восточно-Черноморской микроплиты, температуры, давления, вязкости и концентрации воды в горных породах мантийного клина, скорости вращательного движения частично-расплавленных известково-щелочных магм в конвективных вихрях Кари́га, их размеров и других менее значимых реологических параметров среды в около-мантийном

клине зоны Восточно-Черноморской субдукции. Например, в случае неньютоновской реологии характерный размер конвективной ячейки вихря Карига, полученной в модели мантийного клина, сформировавшегося при субдукции Восточно-Черноморской микроплиты под Кавказский регион, составляет ~ 250 км, что при скорости субдукции 40.5 мм в год приблизительно совпадает с характерным пространственным размером 2D аномалии теплового потока. Средняя концентрация воды в мантийном клине $C_w = 3 \times 10^{-1}$ весовых % [16]. Скорость движения 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 плиты, отмеченное в работах ряда исследователей [1, 2], подтверждается наличием первой цепочки залежей нефти и газа на территории вала Шатского (Туапсинско-Западно-Кавказский нефтегазовый бассейн – 15), а затем второй цепочки месторождений нефти и газа, протягивающейся на территории северного склона Большого Кавказа (Таманская (4) и Индоло-Кубанская впадины), что хорошо видно на (рис. 8).

В Черноморско-Кавказском регионе (рис. 8) видны две, уже частично разведанные геолого-геофизическими методами [2, 4], линейные, почти параллельные друг другу валообразные тектонические зоны месторождений нефти и газа, расположенные на расстоянии около 250 км на территории северных бортов валов Шатского (Туапсинско-Западно-Кавказский нефтегазовый бассейн – 15) и северных предгорий Большого Кавказа (Таманская (4) и Индоло-Кубанская впадины) (рис. 6, 8), что соответствует проведенным в статье расчетам (рис. 4). Образованию месторождений нефти и газа на территории Большого Кавказа и вала Шатского способствовали многофазная магматическая деятельность, вулканизм и подъем щелочных магм с растворенными в них углеводородами, возникавших в течение длительного (165

млн лет) эволюционного геолого-тектонического преобразования Восточно-Черноморского региона над мантийными конвективными вихрями Карига в субдукционной зоне. В течение многих миллионов лет расплавленная магма периодически внедрялась по многочисленным трещинам и разломам в породы Кавказских и Предкавказских регионов. Периодические магматические интрузии (с растворенными в них углеводородными геофлюидами), возникшие над мантийными конвективными вихрями, внедрились в сланцевые породы, которые постепенно образовали залежи углеводородов в вышележащих осадочных породах с хорошими коллекторскими свойствами. Субширотное линейное распределение различных месторождений нефти и газа, параллельных друг другу на акватории Черного моря (северные борта вала Архангельского и вала Шатского) и территория северного борта Большого Кавказа (Таманская (4) и Индоло-Кубанская впадины) с расстоянием между ними около 250 км, подтверждает результаты проведенных исследований, связанных с субширотным расположением ролловых (квазицилиндрических) 2D конвективных вихрей Карига, возникавших в процессе геологической эволюции в зоне субдукции Восточно-Черноморской литосферной микроплиты.

В качестве новых регионов, перспективных на залежи нефти и газа, по результатам проведенных авторами глубинных геодинамических исследований, могут быть рекомендованы пока слабо изученные глубоководные районы Черного моря, расположенные позади основных вулканических сооружений вала Архангельского (Восточно-Черноморский нефтегазовый бассейн (17) – см. рис. 6, 7), где также наблюдается повышенный тепловой поток [4].

БЛАГОДАРНОСТЬ

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.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гаевилов С.В. Исследование механизма формирования островных дуг и тылового раздвигания литосферы // Геофизические Исследования. 2014. Т. 15, № 4. С. 35–43.
2. Глухов И.Ф., Гулев В.Л., Сенин Б.В., Карнаухов С.М. Региональная геология и перспективы нефтегазоносности Черноморской глубоководной впадины и прилегающих шельфовых зон. – Москва: Недра, 2014. 181 с.

3. Жарков В.Н. Физика земных недр. – Москва: Наука и образование, 2012. 384 с.
4. 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.
5. Смирнов Я.Б. Карта теплового потока территории СССР и сопредельных территорий. Масштаб 1: 10000000.

– М.: ГУГК, 1980. 4 л.

6. Сорохтин О.Г., Ушаков С.А. Развитие Земли. – М.: Изд-во Московского университета, 2002. 506 с.

7. 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.

8. Condie K.C. Plate tectonics and crustal evolution. – New York: Pergamon Press, Inc., 1975. 288 p.

9. Gerya T.V., Connolly J.A.D., Yuen D.A., Gorczyk W., Cape A.M. Seismic implications of mantle wedge plumes // Phys. Earth Planet. Inter. 2006. Vol. 156. P. 59–74.

10. Gerya T.V. Future directions in subduction modeling // J. of Geodynamics. – 2011. – Vol. 52. – P. 344–378.

11. Finetti G. Monograph on the Black Sea // Bolletino di Geofisica: teorica ed applicata. – 1988. – Vol. XXX. – P. 117–118.

12. Hirth G., Kohlstedt R. Rheology of the upper mantle and the mantle wedge: A view from the experimentalists // In: Inside the subduction Factory, Geophysical Monograph, 2003. Vol. 138. P.

83–105.

13. Isacks B., Oliver J., Sykes L.R. Seismology and new global tectonics // Journal Geophysical Researches. 1968. Vol. 73. P. 5855–5900.

14. Karig D.E. Origin and development of marginal basins in the Western Pacific // Journal Geophysical Researches. – 1971. Vol. 76. N. 11. P. 2542–2561.

15. Schubert G., Turcotte D.L., Olson P. Mantle convection in the Earth and Planets. New York: Cambridge University Press, 2001. 940 p.

16. 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.

17. Hirschmann M.M. Water, melting and the deep Earth H₂O cycle // Ann. Rev. Earth Planet. Sci. 2006. Vol. 34. P. 629–653.

18. Mumladze T., Forte A.M., Cowgill F.S., Trexler C.C., Niemi N.R., Yikilmaz M.B., Kellogg L.J. Subducted, detached and torn slabs beneath the Greater Caucasus // GeoResJ. 2015. Vol. 5. P. 36–46.

REFERENCES

1. Gavrilov S.V. Investigation of the mechanism of island arc formation and the back-arc spreading of the lithosphere // Geophysical Researches. 2014. Vol. 15. 4, pp. 35–43. (In Russian).

4. Glumov I.F., Gulev V.L., Senin B.V., Karnaukhov S.M. Regionalnaya geologia i perspektivi neftegazonosnosti Chernomorskoj glubokovodnoy vpadini i prilgayushih shelfovih zon [Regional geology and of the Black Sea deep depression and the shelf zones]. Moscow: Nedra. 2014. 181 p. (In Russian).

5. Zharkov V.N. Fizika zemnykh neдр [Physics of the Earth's interiors]. Moscow: Nauka i Obrazovanie [Science and Education]. 2012. 384 p. (In Russian).

4. Kutas R.I., Tsviaschenko V.A. Geotermicheskiy rejim i seysmichnost' Krimskogo poluostrova [Geothermal regime and seismicity of the Crimea peninsula] V kn.: Geotermiya seysmichnikh i aseysmichnikh zon [In the book: Geothermy of seismic and no-seismic zones] Moskwa: Nauka. [Moscow: Science]. 1993. pp. 5–26. (In Russian).

5. Smirnov Ya.B. Karta teplovogo potoka territorii SSSR i sopredelnih regionov. Masshtab 1: 10 000 000 [Heat flow map of the USSR and adjacent areas. Scale 1: 10 000 000], Moskwa: GUGK [Moscow: GUGK], 1980. 4 p. (In Russian).

6. Sorokhtin O.G., Ushakov S. A. Development of the Earth. Moscow: Publishing house of the Moscow University, 2002. 506 p. [In Russian].

7. Trubutsyn V.P., Trubitsyn A.P. Numerical model of formation of the set of lithospheric plates and their penetration through the 660 km boundary // Physics of the Earth. 2014. 6. pp. 138–147. (In Russian).

8. Condie K.C. Plate tectonics and crustal evolution. – New York: Pergamon Press, Inc. 1976. 288 p.

9. Gerya T.V., Connolly J.A.D., Yuen D.A., Gorczyk W., Cape A.M. Seismic implications of mantle wedge plumes // Phys. Earth Planet. Inter. 2006. 156. pp. 59–74.

10. Gerya T.V. Future directions in subduction modeling // J. of Geodynamics. 2011. 52. pp. 344–378.

11. Finetti G. Monograph on the Black Sea // Bolletino di Geofisica: teorica ed applicata. 1988. XXX. pp. 117–118.

12. Hirth G., Kohlstedt R. Rheology of the upper mantle and the mantle wedge: A view from the experimentalists // In: Inside the subduction Factory, Geophysical Monograph, 2003. 138. pp. 83–105.

13. Isacks B., Oliver J., Sykes L.R. Seismology and new global tectonics // Journal Geophysical Researches. 1968. 73. pp. 5855–5900.

14. Karig D.E. Origin and development of marginal basins in the Western Pacific // Journal Geophysical Researches. 1971. 76. N. 11. pp. 2542–2561.

15. Schubert G., Turcotte D.L., Olson P. Mantle Convection in the Earth and Planets. New York: Cambridge University Press. 2001. 940 p.

16. Billen M., Hirth G. Newtonian versus non-Newtonian Upper Mantle Viscosity: Implications for Subduction Initiation // Geophys. Res. Lett. 2005. 32. (L19304). doi: 10.1029/2005GL023458.

17. Hirschmann M.M. Water, melting and the deep Earth H₂O cycle // Ann. Rev. Earth Planet. Sci. 2006. 34. pp. 629–653.

18. Mumladze T., Forte A.M., Cowgill F.S., Trexler C.C., Niemi N.R., Yikilmaz M.B., Kellogg L.J. Subducted, detached and torn slabs beneath the Greater Caucasus // GeoResJ. – 2015. – Vol. 5. pp. 36–46.

