О КОНВЕКТИВНЫХ ВИХРЯХ КАРИГА В ПАЛЕОЗОЙСКОМ МАНТИЙНОМ КЛИНЕ ПОД ТИМАНО-ПЕЧОРСКОЙ ПЛИТОЙ КАК МЕХАНИЗМЕ ВЫНОСА УГЛЕВОДОРОДОВ

С. В. Гаврилов¹, А. Л. Харитонов²

¹Институт физики Земли им. О. Ю. Шмидта РАН, Москва; gavrilov@ifz.ru

²Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н. В. Пушкова РАН, Москва; ahariton@izmiran.ru

Проводится прежде не предпринимавшееся исследование развитой 2D-термической мелкомасштабной конвекции в мантийном клине при крайне малом угле субдукции, по-видимому происходившей в палеозое в ходе закрытия Палеоуральского океана и субдукции Русской плиты под Тимано-Печорскую.

Расположение топографических депрессий и поднятий (и приуроченных к последним нефтегазоносных зон) на Тимано-Печорской плите, квазипериодически чередующихся и вытянутых параллельно ее юго-западной границе, возможно, свидетельствует, что пространственные вариации топографии возникли вследствие 2D-конвекции в мантийном клине.

Численное моделирование мантийной термической конвекции с учетом влияния фазовых переходов на глубинах 410 и 660 км и зависимости коэффициента вязкости от температуры и давления для влажного оливина показывает, что при скорости субдукции ~ 6 см·год⁻¹ характерный масштаб ячеек конвекции (вихрей Карига), возникающей вследствие диссипативного нагрева в мантийном клине, приблизительно совпадает с пространственным периодом расположения вариаций рельефа в Тимано-Печорском регионе, а горизонтальная протяженность области с конвекцией равна горизонтальной протяженности Тимано-Печорской нефтегазоносной провинции.

Ключевые слова: конвекция в мантийном клине, угол и скорость субдукции, реология мантии, фазовые переходы.

ON KARIG CONVECTIVE ROLLS WITHIN THE MANTLE WEDGE BENEATH THE TIMAN-PECHORA PLATE AS THE MECHANISM OF TRANSPORT OF THE HYDROCARBONS AT PALEOZOIC

S. V. Gavrilov¹, A. L. Kharitonov²

¹Schmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences, Moscow; gavrilov@ifz.ru

²Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radio Wave Propagation, Russian Academy of Sciences, Moscow; ahariton@izmiran.ru

Previously not carried out investigation is performed for finite-amplitude 2D small-scale mantle convection in the mantle wedge above the slab subducting at extremely small angle, which appears to be the case at Paleozoic in the course of closing of the former Urals ocean and subduction of the Russian plate under the Timan-Pechora one.

Topography depressions and uplifts at the Timan-Pechora lithospheric plate alternate quasi periodically and are nearly parallel to the South-Western border of the plate. This probably is indicative of the convective origin of topography spatial undulations, the convection at the mantle wedge being due to shear heating in the mantle slab-induced flow.

Numerical modeling of the thermal mantle convection accounting for the effects of phase transitions at 410 km and 660 km depths and temperature- and pressure dependence of viscosity for «wet» olivine shows the subduction velocity ~ 6 cm·y⁻¹ to correspond to convective cell (Karig rolls) dimension of the same scale as the wavelength of the relief variations, horizontal extent of convection region being equal to horizontal extent of Timan-Pechora oil- and gas bearing province.

Keywords: mantle wedge convection, subduction angle and velocity, mantle rheology, phase transitions.

Введение

Тимано-Печорская плита на западе и юго-западе ограничена складчатыми сооружениями Тиманского кряжа, а на востоке и северо-востоке — Уралом и Пай-Хоем. Геофизическими методами устанавливается северная граница провинции, проходящая по субширотному глубинному разлому приблизительно в 50 км к северу от о. Колгуев в Баренцевом море. В рельефе плиты выделяется ряд параллельных Тиманскому кряжу крупных впадин (Ижма-Печорская, Денисовская, Хорейверская, Коротайхинская, Косью-Роговская), разделенных региональными поднятиями (Восточно-Тиманский и Печоро-Колвинский мегавалы, Шапкино-Юрьехинский, Лайский, Колвинский, Варандейский валы, вал Сорокина). Отмечается, что с валами связаны основные нефтегазоносные зоны [6]. Вытянутые параллельно юго-западной границе Тимано-Печорской плиты чередующиеся зоны топографических поднятий и депрессий и подобным образом вы-

тянутые периодически чередующиеся аномалии плотности [1] свидетельствуют, что своим происхождением эти структуры могут быть обязаны 2D-конвекции в мантийном клине, образовавшемся при закрытии в палеозое Палеоуральского океана, и связанной с этим процессом субдукцией Русской плиты под Тимано-Печорскую. После закрытия океана в конце палеозоя субдукция прекратилась [9]. Однако и в наше время наблюдаемая на профиле «Кварц» наклонная зона повышенных сейсмических скоростей в мантии на глубинах ~ 50 – 100 км, падающая в восточном направлении под углом ~ 8 – 9° [8], вероятно, свидетельствует, что субдукция Русской плиты под Тимано-Печорскую действительно имела место и наклонная зона повышенной плотности является остаточным фрагментом Русской плиты, субдуцировавшей под Тимано-Печорскую в палеозое. Впоследствии вариации рельефа, возникшие вследствие горизонтальных изменений температуры в мантийном клине, охваченном 2D-конвек-

цией, сохранились до настоящего времени, поскольку, согласно исследованиям [14], именно благодаря конвекции в мантийном клине и связанному с ней переносу базальтовой магмы происходит процесс роста коры на литосферной плите над субдуцирующим блоком. Следует отметить, что мелкомасштабная конвекция, исследуемая в настоящей работе, возникает при весьма специфических условиях (крайне малый угол и достаточно большая скорость субдукции) и не исследовалась ни в статье Т. В. Геруа [14], ни в цитируемых там работах, где рассматривались химико-плотностная конвекция, а также конвекция в виде плюмов и валов, ориентированных в направлении субдукции. Нефтегазоносные зоны на Тимано-Печорской плите также вытянуты параллельно Тиманскому кряжу, приурочены к топографическим поднятиям и, возможно, тоже связаны с конвективными потоками, восходящими в мантийном клине и выносившими нефть мантийного (как отмечается в работе [7]) происхождения. Предполагая, что размер 2D-конвективной ячейки Карига термической мантийной конвекции равен длине волны вариаций рельефа, можно, как уже было предложено ранее [2], оценить среднюю скорость субдукции Русской платформы при закрытии Палеоуральского океана ($\sim 5\text{--}6$ см/год). Эта скорость получается из предположения о постоянстве вязкости в мантийном клине, и в настоящей работе представляется важным рассчитать характерные масштаб и локализацию конвективной неустойчивости для более реалистического реологического закона, учитывающего эффекты фазовых переходов и зависимость коэффициента вязкости от температуры и давления, и, как следствие, уточнить оценку скорости субдукции. Коэффициент вязкости в мантийном клине, вероятно, очень мал, порядка 10^{18} Па·с и менее, что связано с наличием воды, поднимающейся в мантийный клин из субдуцирующего блока [5]. Как отмечается [11], добавление $10^2\text{--}10^3$ г воды на тонну оливина уменьшает вязкость на два порядка по сравнению с условиями отсутствия воды в горной породе. В предлагаемой модели понижение вязкости из-за присутствия воды учитывается усредненно путем использования реологических параметров «влажного» оливина.

Методы и подходы

В качестве модели термомеханического состояния мантийного клина между подошвой Тимано-Печорской плиты и поверхностью Русской плиты, поддвигающей Тимано-Печорскую под углом β со скоростью V , примем модель, получаемую при $\text{P} \rightarrow \infty$ в приближении Буссинеска из системы двумерных безразмерных уравнений гидродинамики для функции тока ψ и температуры T [14]:

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

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

Здесь η — безразмерный коэффициент динамической вязкости, символ ∂ и индексы означают частные производные по координатам x (горизонтальной), z (вертикальной) и времени t , Δ — оператор Лапласа, $\Gamma^{(410)}$ и $\Gamma^{(660)}$ — объемные доли тяжелой фазы на фазовых переходах на глуби-

нах 410 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

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

где $\alpha = 3 \times 10^{-5} \text{ K}^{-1}$ — коэффициент теплового расширения, $\rho = 3.3 \text{ г·см}^{-3}$ — плотность мантии, g — ускорение силы тяжести, $c_p = 1.2 \times 10^3 \text{ Дж·кг}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ — 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, τ_{ik} — тензор вязких напряжений, $d = 660 \text{ км}$ — вертикальный размер модельной области, $\bar{\eta} = 10^{18} \text{ Па·с}$ — масштабный множитель вязкости, $\chi = 10^{-2} \text{ см}^2 \cdot \text{с}^{-1}$ — коэффициент температуропроводности, $\delta \rho^{(410)} = 0.07\rho$ и $\delta \rho^{(660)} = 0.09\rho$ — скачки плотности на фазовых переходах на глубинах 410 и 660 км. В (1), (2) масштабными множителями для времени t , напряжений τ_{ik} и функции тока ψ служат соответственно величины $d^2 \cdot \chi^{-1}$, $\bar{\eta} \chi^2 \cdot d^{-2}$ и χ . Предполагая реологию линейной для диффузионного механизма ползучести, доминирующего в мантии на глубинах более $\sim 200 \text{ км}$ [11], примем зависимость коэффициента вязкости η от температуры T и литостатического давления p в виде [5]:

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

где для «влажного» оливина $A = 5.3 \times 10^{15} \text{ с}^{-1}$, $m = 2.5$, размер зерна $h = 10^{-2} \text{ — } 1 \text{ см}$, вектор Бюргерса $b^* = 5 \times 10^{-7} \text{ мм}$ [4], энергия активации $E^* = 240 \text{ кДж·моль}^{-1}$, объем активации $V^* = 5 \text{ см}^3 \cdot \text{моль}^{-1}$, $\mu = 300 \text{ ГПа}$ — нормирующее значение модуля сдвига, R — универсальная газовая постоянная. При этих значениях констант, выбранном масштабном множителе $\bar{\eta} = 10^{18} \text{ Па·с}$ и размере зерна $h = 10^{-2} \text{ см}$ безразмерный коэффициент вязкости, который также обозначим через η , равен:

$$\eta = 5.0 \times 10^{-7} \exp \frac{14.8 + 1.34(1 - z)}{T}, \quad (6)$$

где T — безразмерная температура, а безразмерная координата z , нормированная на d , отсчитывается вверх от основания ПЗМ (ось x направлена по нижней границе ПЗМ против субдукции). Отношение сторон модельной области примем равным 1:6, так что при субдукции по диагонали модельной области угол субдукции составит $\beta \approx 9^\circ$, а принятая в расчетах скорость $V = 6 \text{ см·год}^{-1}$ в единицах $\chi^2 \cdot d^{-1}$ равна $V = 1.25 \times 10^3$, т. е. в субдуцирующей плите ее компоненты $V_x = -1.233 \times 10^3$ и $V_z = -0.164 \times 10^3$.

Следуя авторам [10], примем фазовые функции $\Gamma^{(l)}$ в виде (напомним, что ось z здесь направлена вверх, поэтому знаки изменены):

$$\Gamma^{(l)} = \frac{1}{2} \left(1 - th \frac{z - z^{(l)}(T)}{w^{(l)}} \right),$$

$$z^{(l)}(T) = z_0^{(l)} - \frac{\gamma^{(l)}}{\rho g} (T - T_0^{(l)}), \quad (7)$$

где $z^{(l)}(T)$ — глубина l -го фазового перехода, $z_0^{(l)}$ и $T_0^{(l)}$ — усредненные глубина и температура фазового перехода, $\gamma^{(410)} = 3 \text{ МПа} \cdot \text{К}^{-1}$ и $\gamma^{(660)} = -3 \text{ МПа} \cdot \text{К}^{-1}$ — наклоны кривых фазового равновесия, $w^{(l)}$ — характерная ширина l -го фазового перехода $T_0^{(410)} = 1800 \text{ К}$, $T_0^{(660)} = 1950 \text{ К}$ — средние температуры фазовых переходов. Теплоты фазовых переходов [9], в (2) не учитываются ввиду несущественности в случае развитой конвекции. Из (7) получаем:

$$\Gamma_x^{(l)} = -\frac{\gamma^{(l)}}{2\rho g w^{(l)}} ch^{-2} \frac{z - z_0^{(l)} + \gamma^{(l)}(T - T_0^{(l)})/\rho g}{w^{(l)}} \times T_x, \quad (8)$$

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 (1):

$$\Gamma_x^{(l)} = -\frac{\delta\rho^{(l)}}{\rho Ra^{(l)}} \frac{\gamma^{(l)}}{2w^{(l)}} \times$$

$$\times ch^{-2} \frac{z - z_0^{(l)} + \gamma^{(l)} \frac{\delta\rho^{(l)}}{\rho Ra^{(l)}} (T - T_0^{(l)})}{w^{(l)}} \times T_x. \quad (9)$$

В качестве граничных условий приняты изотермичность горизонтальных и адиабатичность вертикальных границ, условия прилипания и непроницаемости границ (кроме «окон» внедрения и выхода субдуцирующей плиты, в которых задана скорость субдукции и проницаемости удаленной от зоны субдукции границы под прямым

углом, близким к углу выхода вынужденного мантийного потока при пологой субдукции). Величина Q в (2) отлична от нуля в континентальной и океанической коре мощностью 40 и 7 км соответственно. Начальная температура вертикальных границ принята по модели охлаждения полупространства в течение 1 млрд лет для Тимано-Печорской плиты и 100 млн лет для Русской плиты. Безразмерное τ_{ik}^2 в (2) удобно выразить через ψ как

$$\tau_{ik}^2 = 4\eta^2 [(\psi_{zz} - \psi_{xx})^2 / 2 + 2\psi_{xz}^2]. \quad (10)$$

Результаты и обсуждение

Для построения согласованной модели мелкомасштабной термической конвекции в мантийном клине между настиляющей Тимано-Печорской плитой и субдуцирующей Русской плитой, ради повышения точности вычислений вначале необходимо положить в (1) — (2) $Ra \rightarrow 0$, $Di = 0$, т. е. рассчитать модель погружающейся плиты, мантийного клина и настиляющей плиты без учета вязкой диссипации и конвекции. Это связано в том, что при Ra и Di (4) конвекция проходит стадии с большими скоростями, и для обеспечения устойчивости расчета требуются крайне малые шаги по времени. Полагая вначале в (1) — (2) $Ra \rightarrow 0$, $Di = 0$, т. е. учитывая только теплопроводность и адвекцию тепла и интегрируя (1) — (2) по пространственным координатам методом конечных элементов на сетке 104×104 и по временной координате методом Рунге — Кутты 3-го порядка, получим квазистационарные безразмерные ψ и $T = T_R$, изображенные на рис. 1 и 2, где линии тока на рис. 1 показаны с интервалом 0.25, а изотермы на рис. 2 — с интервалом 0.05 (вертикальная шкала на рисунках растянута в два раза). Плита, субдуцирующая с заданной скоростью V , считалась жесткой, а коэффициент вязкости в зоне трения литосферных плит при температурах ниже 1200 К понижался по сравнению с (5) на два порядка величины. Последним учтен эффект смазки за счет субдуцирующих осадков, которые частично затягиваются погружающейся плитой и препятствуют прилипанию к ней настиляющей литосферы [13]. Полагая затем безразмерные параметры в (1) — (2) согласно (4), то есть включая эффекты диссипации и конвекции, и интегрируя (1) — (2), находим, что показанный отрицательными линиями тока на рис. 1

Рис. 1. Квазистационарное распределение безразмерной функции тока в области субдукции Русской плиты под Тимано-Печорскую без учета эффектов диссипативного нагрева и конвекции. Параллельные эквидистантные линии тока соответствуют субдуцирующей Русской плитой, линии тока с отрицательными значениями ψ — вынужденному движению, вызванному субдукцией

Ris. 1. Quasi steady-state non-dimensional streamfunction in the zone of subduction of the Russian plate under the Timan-Pechora plate at Peleozoic with no effects of dissipative heating and small scale convection. Parallel equidistant streamlines represent subducting Russian plate, streamlines with negative ψ correspond to mantle flow induced by subduction

Рис. 2. Квазистационарное распределение безразмерной температуры в мантийном клине без учета эффектов диссипативного нагрева и конвективной неустойчивости

Ris. 2. Quasi steady-state non-dimensional temperature in the mantle wedge with no effects of dissipative heating and small scale convective instability

вынужденный мантийный поток в мантийном клине за время $\sim 1.5 \times 10^{-4}$ (в размерном виде ~ 1.3 млн лет) частично разрушается конвекцией, которая по достижении квазистационарного режима принимает вид, изображенный на рис. 3 вихревыми линиями тока с интервалом 0.25. На рис. 3 видно, что масштаб конвективных ячеек Карига — порядка 300 км, а густота линий тока соответствует скорости конвективных движений менее или порядка $10 \text{ см} \cdot \text{год}^{-1}$. В верхней части рис. 3 показаны связанные с конвекцией изостатические вариации рельефа, вычисленные по формуле:

$$h = \alpha d T_1 \frac{\rho_m}{\rho_c} \int_0^1 (T - T_R) dz, \quad (11)$$

где переменные под знаком интеграла безразмерны (T_R — температура, показанная на рис. 2), а ρ_m и ρ_c — плотности мантии и коры. Видно, что вариации рельефа составляют несколько сотен метров, и топографические поднятия располагаются над восходящими конвективными потоками, показанными стрелками *a*, *b*, *c* и *d*. Характерный размер конвективных ячеек (вихрей Карига) порядка пространствен-

ного периода расположения топографических поднятий в рассматриваемом регионе ($\sim 300 \text{ км}$), а горизонтальная протяженность АВ конвективной зоны та же, что у всей Тимано-Печорской нефтегазоносной провинции ($\sim 1300 \text{ км}$). Это дает основание утверждать, что в рамках модели с реалистической реологией мантии, учитывающей влияние фазовых переходов и зависимость вязкости от температуры и давления для «влажного» оливина, скорость субдукции Русской плиты под Тимано-Печорскую может быть оценена в $\sim 6 \text{ см} \cdot \text{год}^{-1}$. Отметим, что образование в мантийном клине конвективных валов, ориентированных поперек субдукции, как на рис. 3, характерно для малых углов субдукции и уже при $\beta = 30^\circ$ поперечные валы не возникают [3, 14]. При рассмотренном угле субдукции $\beta = 9^\circ$ конвекция не возникает при скорости $V < 5 \text{ см} \cdot \text{год}^{-1}$. Очевидно, наличие двумерной конвекции в узком мантийном клине связано с большими, чем в широком клине, вязкими напряжениями и, следовательно, с большим диссипативным нагревом. Следует отметить, что в многочисленных исследованиях термомеханического состояния мантии в зонах субдукции (см., например, [13, 14] и обширную библиографию в этих статьях) не

Рис. 3. Квазистационарное распределение безразмерной функции тока над нижней границей переходной зоны мантии с учетом диссипативного нагрева, конвективной неустойчивости и фазовых переходов. Вихревые линии тока соответствуют конвективным движениям (вихрям Карига), которые могут обеспечить вынос мантийных углеводородов к дневной поверхности вдоль линий *a*, *b*, *c*, *d*. АВ — общая горизонтальная протяженность зоны с развитой конвекцией в мантийном клине. В верхней части рисунка изображены изостатические вариации рельефа, вызванные конвекцией

Ris. 3. Quasi steady-state non-dimensional streamfunction above the lower boundary of mantle transition zone with dissipative heating, convective instability and phase transitions. Vortices correspond to convective flows (Karig rolls) possibly providing vertical transport of mantle hydrocarbons to the Earth's surface along the directions *a*, *b*, *c*, *d*

получалось конвекции в виде валов, поперечных к направлению субдукции, так как модели с крайне малыми углами субдукции не рассматривались.

Выводы

Характерный масштаб конвективных ячеек, полученных для реалистической реологии мантийного клина, сформировавшегося в палеозое в ходе закрытия Палеоуральского океана и субдукции Русской плиты под Тимано-Печорскую, составляет ~ 300 км, что приблизительно совпадает с характерным пространственным периодом расположения топографических поднятий в Тимано-Печорском регионе. Горизонтальная протяженность всей Тимано-Печорской нефтегазоносной провинции, в которой зоны нефтегазонакопления приурочены к поднятиям рельефа, совпадает с горизонтальной протяженностью зоны, в которой развивается конвекция. Скорость движения в конвективных вихрях может достигать десятка сантиметров в год, что, по-видимому, может обеспечить достаточно эффективный вынос базальтовой выплавки к дневной поверхности и формированию рельефа коры. Совпадение порядков величины конвективных ячеек и пространственного масштаба периодичности нефтегазоносных зон, приуроченных к топографическим поднятиям, служит подтверждением оценки скорости субдукции Русской плиты под Тимано-Печорскую в палеозое (~ 6 см·год⁻¹).

Литература

1. Блинова Т. С., Удоратин В. В., Дягилев Р. А., Баранов Ю. В., Носкова Н. Н., Конанова Н. В. Сейсмичность и сейсмическое районирование слабоактивных территорий. Пермь: ГИ УрО РАН, 2015. 287 с.
2. Гаврилов С. В., Харитонов А. Л. Оценка скорости субдукции Русской платформы под Сибирскую в палеозое по распределению зон выноса мантийных углеводородов в Западной Сибири // Геофизические исследования. 2015. Т. 16. № 4. С. 36—40.
3. Гаврилов С. В., Абботт Д. Х. Термомеханическая модель тепло- и массопереноса в окрестности зоны субдукции // Физика Земли. 1999. № 12. С. 3—12.
4. Жарков В. Н. Геофизические исследования планет и спутников. М.: ОИФЗ РАН, 2003. 102 с.
5. Жарков В. Н. Физика земных недр. М.: Наука и образование, 2012. 384 с.
6. Кочетков О. С. Кумжинское газоконденсатное месторождение // Вокруг газа: Эл. журнал. 2010. № 8. С. 1—2.
7. Павленкова Н. И. Ротационно-флюидная модель глобального тектогенеза // Дегазация Земли и генезис нефтегазовых месторождений. М.: ГЕОС, 2011. С. 69—98.
8. Павленкова Н. И., Павленкова Г. А. Строение коры и верхней мантии Северной Евразии по данным сейсмического профилирования с ядерными взрывами / Роснедра, ИФЗ РАН, Геокарт. М.: Геокарт-пресс, 2014. 192 с.
9. Свяжина И. А., Пучков В. Н., Иванов К. С. Реконструкция ордовикского Уральского океана на палеомагнитной основе // Геология и геофизика. 1992. № 4. С. 17—22.
10. 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.
11. Ферштаттер Г. Б. Палеозойский интрузивный магматизм Урала — ключ к пониманию природы орогена // Литосфера. 2012. № 1. С. 3—13.
12. 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.
13. Gerya T. V., Connolly J. A. D., Yuen D. A., Górczyk W., Cape A. M. I. Seismic implications of mantle wedge plumes // Phys. Earth Planet. Inter. 2006. V. 156. Pp. 59—74.
14. Gerya T. V. Future directions in subduction modeling // J. of Geodynamics. 2011. V. 52. Pp. 344—378.
15. Schubert G., Turcotte D. L., Olson P. Mantle Convection in the Earth and Planets. New York: Cambridge University Press, 2001. 940 p.

References

1. Blinova T. S., Udoratin V. V., Dyagilev R. A., Baranov Yu. V., Noskova N. N., Konanova N. V. *Seismichnost' i seismicheskoye rayonirovaniye slaboaktivnykh territoriy*. (Seismicity and seismic zoning of the territories of weak seismic activity). Perm'. Nauki Publishing Company Urals Department of RAS, 2015, 287 p.
2. Gavrilov S. V., Kharitonov A. L. *Otsenka skorosti subduksii Russkoy platformy pod Sibirskuyu v Paleozoe po raspredeleniyu zon vynosa mantiynykh uglevodorodov v Zapadnoy Sibiri* (Velocity of the subduction of the Russian platform under the Siberian one in the Paleozoic by the distribution of mantle hydrocarbon upwelling zones in Western Siberia). *Geofizicheskie Issledovaniya*. 2015, V.16, No.4, pp. 36—40.
3. Gavrilov S. V., Abbott D. H. Thermo-mechanical model of heat- and mass-transfer in the vicinity of subduction zone. *Physics of the Earth*. 1999, V.35, No. 12, pp. 967—976.
4. Zharkov V. N. *Geofizicheskie issledovaniya planet i sputnikov* (Geophysical Researches of the Planets and Satellites). Moscow: Joint Institute of Physics of the Earth RAS, 2003, 102 p.
5. Zharkov V. N. *Fizika zemnykh neдр* (Physics of Earth subsoil). Moscow: Nauka i Obrazovanie, 2012, 384 p.
6. Kochetkov O. S. *Kumzhinskoye gazokondenstanoe mestorozhdeniye* (Kumzhinskoye gas condensate deposit). *Vokrug gaza*: digital edition. 2010, No.8, pp. 1-2.
7. Pavlenkova N. I., *Rotatsionno-fluidnaya model' global'nogo tektonogeneza* (Rotational Fluidal Model of the Global Tectonic Genesis). Gas Removal from the Earth and the Genesis of Oil- and Gas Bearing Zones. Moscow: GEOS, 2011, pp. 69—98.
8. Pavlenkova N. I., Pavlenkova G. A. *Stroeniye kory i verkhney mantii Severnoy Evrazii po dannym seismicheskogo profilirovaniya s yadernymi vzryvami* (The Crust and the Upper Mantle Structure of the Northern Eurasia as Constrained by the Data on Seismic Profiling with Nuclear Explosions). Moscow: GEOKART-PRESS, 2014.
9. Svyazhina I. A., Puchkov V. N., Ivanov K. S. *Rekonstruktsiya ordovikskogo Ural'skogo okeana na paleomagnetnoy osnove* (Reconstruction of the Ordovician Urals ocean on the paleomagnetic basis). *Geologiya i Geofizika*. 1992, No. 4, pp. 17—22.
10. Trubetsyn V. P., Trubetsyn A. P. *Chislennaya model' obrazovaniya sovokupnosti litosfernykh plit i ikh prokhozheniya cherez granitsu 660 km* (Numerical model of formation of the set of lithospheric plates and their penetration through the 660 km boundary). *Fizika Zemli*. 2014, No. 6, pp. 138—147.
11. Fershtatter G. B. *Paleozoyskiy intruzivnyy magmatizm Urala — klyuch k ponimaniyu prirody orogena* (Paleozoic intrusive magmatism at Urals — a key to understanding the orogenesis nature). *Litosfera*. 2012, No.1, pp. 3—13.