

BIODIVERSITY

UDC 530.311

Gavrilov S.V., Kharitonov A.L. On the anomalous heat flux formation in the Pannonia basin and Vardar zone in the course of subduction of the Adriatic plate under the Eurasian plate

О формировании аномального теплового потока в бассейне Паннония и зоне Вардар при субдукции Адриатической плиты под Евроазиатскую плиту

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 РАН

Abstract. For the non-Newtonian mantle rheology case the 2D thermal viscous dissipation-driven thermal convection in the mantle wedge above the Adriatic (micro) plate subducting under the Euro-Asian plate is modeled numerically. The effects of the 410 km and 660 km phase transitions are taken into account. Within the framework of the model constructed the horizontal extent of the 2D heat flux anomaly observed in the rear of the Dinarides mountain belt corresponds to subduction velocity ~ 10 mm per year which is close to that observed with the help of geodetic means. In the case of non-Newtonian rheology the upwelling convective flow transporting heat to the Earth's surface locates at the distance from the trench corresponding to the actually observed 2D heat flux anomaly, the velocity in the convective vortices being over ~ 10 m per year. Rheological constants of the mantle wedge material are specified more accurately, the concentration of water in the mantle wedge being ~ 1 weight percent. Upwelling mantle wedge convective flow is indicated to be able to provide the mantle wedge hydrocarbons transport to the Earth's surface, the model surface heat flux $\sim 10^2$ mW \times m $^{-2}$ corresponds to the observed one.

Keywords: mantle wedge 2D thermal convection, non-organic mantle hydrocarbons transport, subduction angle and velocity, mantle rheology, phase transitions in the mantle, surface heat flux.

Аннотация. В предположении неньютоновской реологии мантии выполнено численное моделирование 2D термической конвекции, возбуждаемой диссипативным тепловыделением в мантийном клине при субдукции Адриатической плиты под горный пояс Динара, бассейн Паннония и зону Вардар. В рамках построенной модели объясняется локализация, поперечная протяженность и величина вытянутой параллельно побережью Адриатического моря зоны аномального мантийного теплового потока, соответствующие скорости субдукции ~ 10 мм/год, наблюдаемому углу субдукции $\sim 25^\circ$, и содержанию воды в мантийном клине ~ 1 вес. %. При такой

скорости субдукции возбуждается одна конвективная ячейка с единственным 2D конвективным течением, восходящим к зоне максимального мантийного теплового потока, составляющего в предлагаемой модели ~ 100 мВт×м⁻², который действительно наблюдается в бассейне Паннония и зоне Вардар. Указывается, что в случае неньютоновской реологии конвективный вынос тепла происходит в нестационарном режиме. Конвекция в мантийном клине может обеспечить вынос мантийных углеводородов к дневной поверхности.

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

DOI 10.54092/25421085_2021_9_27

Рецензент: Кетова Каролина Вячеславовна - Доктор физико-математических наук, профессор. Ижевский государственный технический университет имени М.Т. Калашникова

Введение

Согласно [9], субдукция Адриатической литосферной плиты под горный массив Динара, бассейн Паннония и зону Вардар в течение последних ~ 45 млн. лет происходит под углом ~ 25°. Горный пояс Динара поперечной протяженностью ~300 км видимо складчато-надвиговой природы, возник в последние 55 – 35 млн. лет при столкновении и субдукции океанических ответвлений нео-Тетиса и Альпийского Тетиса в результате пододвигания Африканской плиты под Восточную и Западную Европу [9]. В [7] приводятся многочисленные ссылки на работы, содержащие противоречивые результаты оценок, сделанных о взаимных движениях Адриатической и Евроазиатской плит на основе сейсмических, геофизических и геодезических данных. В [7] указывается, что скорость субдукции Адриатической плиты под Евроазиатскую составляет ~ 5 – 8 мм/год, а по данным геодезических наблюдений ~ 5 мм/год. Согласно [17] бассейн Паннония и зона Вардар суть зоны растяжения, происшедшего в Среднем Миоцене ~ 14 – 11.6 млн. лет назад и приведшего к утонению литосферы, т.е. представляют собой окраинный бассейн, характеризуемый задуговым спредингом. В этот период единый горный пояс, параллельный Адриатическому побережью, расцепляется на Карпаты и Динару, и образуется мелкое Паннонское море, существовавшее до ~ 600 тыс. лет назад. В настоящее время здесь расположен Паннонский нефтегазовый бассейн. Ранее в [11, 12, 13] выяснялись условия инициации центра окраинного раздвигания в результате действия механизма конвективной неустойчивости, движимой диссипативным тепловыделением в мантийном клине при заданных скорости и угле субдукции при концентрации воды в мантийном клине $C_w = 0.3$ вес. %. В настоящей работе показывается, что диссипативный тепловой поток, выносимый конвекцией к дневной поверхности, соответствует концентрации воды $C_w =$

1 вес. % при скорости субдукции ~ 10 мм/год.

Согласно [1; 15; 14] в мантийном клине возможны два типа мелкомасштабной термической конвекции, вызываемой диссипативным нагревом: 3D конвекция в виде струй, восходящих к вулканической цепи, и 2D конвекция в виде вихрей Карига, ориентированных поперек субдукции. В [1] показано, что пространственное разделение этих двух типов термической конвекции возникает вследствие зависимости коэффициента эффективной вязкости мантии от температуры, причем вихри Карига, если они формируются, располагаются позади вулканической гряды. О скорости субдукции Адриатической плиты под Евроазиатскую имеются противоречивые суждения, хотя порядок величины современной скорости субдукции (~ 10 мм/год), видимо, может считаться определенным достаточно надежно. Параллельно северовосточному берегу Адриатики расположен горный массив Динара, вероятно, надвиговой и/или складчатой природы. Можно предположить, что 2D максимум аномалии теплового потока ~ 100 мВт/м², наблюдаемый в тылу массива Динара в бассейне Паннония и зоне Вардар [16], обязан своим происхождением конвективному 2D подводу тепла из мантийного клина. Численное моделирование 2D конвекции, происходящей в форме вихрей Карига и, возможно, выносящей тепло, может позволить судить о среднем содержании воды в мантийном клине и высказать предположение о конвективном выносе мантийных углеводородов к поверхности Земли. Численные модели конвекции, учитывающие зависимость вязкости от температуры, давления и напряжений, наилучшим образом согласуются с наблюдениями в случае неньютоновской реологии мантии при концентрации кристаллизационной воды в мантии ~ 1 вес. % и скорости субдукции в Среднем Миоцене ~ 10 мм/год. В [5, с.131] указывается, что столь высокое, и даже в 3 раза большее, содержание воды может наблюдаться в мантийном клине в переходной зоне мантии, а скорость субдукции, возможно, несколько превышающая наблюдаемую в настоящее время, по-видимому, могла иметь место в ходе раскрытия бассейна Паннония.

Описание модели

В качестве модели термомеханического состояния мантийного клина между подошвой Евроазиатской плиты, на которой находится бассейн Паннония, и поверхностью Адриатической микроплиты, пододвигающейся под горный массив Динара под углом со скоростью V , примем модель, получаемую при $Pr \rightarrow \infty$ в приближении Буссинеска из системы двумерных безразмерных уравнений гидродинамики для функции тока и температуры T [18]:

$$(\partial^2_{zz}-\partial^2_{xx}) \times (\partial^2_{zz}-\partial^2_{xx}) \times 4 \times \partial^2_{xz} \times \partial^2_{xz} = Ra \times T_x - Ra^{(410)} \times \Gamma_x^{(410)} - Ra^{(660)} \times \Gamma_x^{(660)}, \quad (1)$$

$$\partial_t T = - (\partial_z \times T_x) + (\partial_x \times T_z) + (Di / Ra) \times (\tau_{ik} / 2 \times \dots) + Q, \quad (2)$$

Здесь η – безразмерный коэффициент динамической вязкости, символ ∂ и индексы означают частные производные по координатам x (горизонтальной), z (вертикальной) и времени t , ∇^2 – 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:

$$V_x = \partial_z \psi, \quad V_z = - \partial_x \psi \quad (3)$$

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

$$\begin{aligned} Ra &= [(a \times g \times d^3 \times T_1) / (c_p \times \dots)] = 5.55 \times 10^8; \\ Ra^{(410)} &= [(a \times g \times d^3) / (c_p \times \dots)] = 6.60 \times 10^8; \\ Ra^{(660)} &= [(a \times g \times d^3) / (c_p \times \dots)] = 8.50 \times 10^8; \\ Di &= [(a \times g \times d) / c_p] = 0.165, \end{aligned} \quad (4)$$

где $\alpha = 3 \cdot 10^{-5} \text{ K}^{-1}$ – 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, $Q = 6.25 \cdot 10^{-4} \text{ МВт м}^{-3}$ – объемная мощность тепловыделения в коре, τ_{ik} – тензор вязких напряжений, $d = 660 \text{ км}$ – вертикальный размер модельной области, $\nu = 10^{18} \text{ Па} \cdot \text{с}$ – масштабный множитель вязкости, $\kappa = 1 \text{ мм}^2 \cdot \text{с}^{-1}$ – коэффициент температуропроводности, $\Gamma^{(410)} = 0.07$ и $\Gamma^{(660)} = 0.09$ – 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 $d^2 \cdot \chi^{-1}$, $\bar{\eta} \chi \cdot d^{-2}$ и \dots . Ранее в [10] строилась модель термомеханического состояния мантийного клина под Тимано-Печерской плитой в предположении линейной реологии для диффузионного механизма ползучести, доминирующего в мантии на глубинах более $\sim 200 \text{ км}$ [8], зависимость коэффициента вязкости от температуры T и

литостатического давления p принималась в виде [5]:

$$\left(\frac{1}{2} \times A \right) \times (h / b^*)^m \times \{ \exp [(E^* + p \times V^*) / (R \times T)] \}, \quad (5)$$

где для «влажного» оливина $A=5.3 \cdot 10^{15} \text{ с}^{-1}$, $m=2.5$, размер зерна $h=10^{-1} - 10^1 \text{ мм}$, вектор Бюргерса $b^*=5 \cdot 10^{-7} \text{ мм}$ [4], энергия активации $E^*=240 \text{ кДж моль}^{-1}$, объем активации $V^*=5 \cdot 10^3 \text{ мм}^3 \cdot \text{моль}^{-1}$, $\sigma = 300 \text{ ГПа}$ – нормирующее значение модуля сдвига, R – универсальная газовая постоянная. При этих значениях констант, выбранном масштабном множителе $C_w = 10^{18} \text{ Па} \cdot \text{с}$ и размере зерна $h = 1.6 \text{ мм}$ безразмерный коэффициент вязкости, который также обозначается через η , равен

$$\eta = 5 \cdot 10^{-7} \exp \{ [14.8 + 6.72 (1 - z)] / T \}, \quad (6)$$

где T – безразмерная температура, а безразмерная координата z , нормированная на d , отсчитывается вверх от основания ПЗМ (ось x направлена по нижней границе ПЗМ против субдукции). Чтобы проверить, насколько для получаемых оценок скорости субдукции Адриатической микро плиты существенно предположение о линейной реологии мантии, в настоящей работе проведен расчет для неньютоновской реологии, для которой формулы вязкости (5)–(6) переписываются в виде:

$$\left(\frac{1}{2} \times A \times C_w^r \times \eta^{n-1} \right) \times (h / b^*)^m \times \{ \exp [(E^* + p \times V^*) / (R \times T)] \}, \quad (7)$$

где, согласно [6], для «влажного» оливина $n=3$, $r=1.2$, $m=0$, $\eta = 10^{-3}$, $E^*=480 \text{ кДж моль}^{-1}$, $V^*=11 \cdot 10^3 \text{ мм}^3 \cdot \text{моль}^{-1}$, $A=10^2 \text{ с}^{-1} \times (\text{МПа})^{-n}$, $C_w > 10^{-3}$ для влажного оливина – весовая доля воды (в %). Следует отметить, что значения констант в (7) у разных авторов, на которых приводятся ссылки в [6], весьма разнятся, и выше приведены усредненные значения. При $C_w = 10^{-3}$ с учетом

$$\eta_k^2 = (4 \times \eta^2) \times [(z - z_x)^2 / 2 + 2 \times z_x^2], \quad (8)$$

безразмерная вязкость есть

$$\eta = \{ 1.0 / [(z - z_x)^2 / 2 + 2 \times z_x^2]^{1/3} \} \times \exp \{ [10.0 + 5.0 \times (1 - z)] / T \}, \quad (9)$$

Отношение сторон модельной области примем равным 1:2.25, так что при субдукции по

диагонали модельной области угол субдукции составит $\alpha = 24^\circ$, а расчетная скорость $V = 10 \text{ мм год}^{-1}$ в единицах $(\text{см} \cdot \text{д}^{-1})$ равна $V = 0.208 \cdot 10^3$, т.е. в субдуцирующей Адриатической плите ее компоненты $V_x = -0.190 \cdot 10^3$ и $V_z = -0.085 \cdot 10^3$.

Следуя [6], примем фазовые функции $\Gamma^{(l)}$ в виде (напомним, что ось z здесь направлена вверх, поэтому знаки изменены):

$$\Gamma^{(l)} = (1/2) \times \{1 - \text{th} [z - z_o^{(l)}(T)] / w^{(l)}\}; z^{(l)}(T) = z_o^{(l)} - \{[\beta^{(l)} \times (T - T_o^{(l)})] / (\alpha \times g)\}, \quad (10)$$

где $z^{(l)}(T)$ – глубина l -го фазового перехода, $z_o^{(l)}$ и $T_o^{(l)}$ – усредненные глубина и температура фазового перехода, $\beta^{(410)} = 3 \text{ МПа} \times \text{К}^{-1}$ и $\beta^{(660)} = -3 \text{ МПа} \times \text{К}^{-1}$ – наклоны кривых фазового равновесия, $w^{(l)}$ – характерная ширина l -го фазового перехода $T_o^{(410)} = 1800 \text{ К}$, $T_o^{(660)} = 1950 \text{ К}$ – средние температуры фазовых переходов. Теплоты фазовых переходов, как и в [6], в (2) не учитываются ввиду несущественности в случае развитой конвекции. Из (10) получаем:

$$\Gamma_x^{(l)} = -(\beta^{(l)} / 2 \times \alpha \times g \times w^{(l)}) \times T_x \times \text{ch}^{-2} \{[(z - z_o^{(l)} + \beta^{(l)} \times (T - T_o^{(l)})) / (\alpha \times g)] / w^{(l)}\}, \quad (11)$$

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

$$\Gamma_x^{(l)} = -(\beta^{(l)} / 2 \times \alpha \times g \times w^{(l)}) \times T_x \times \text{ch}^{-2} \{[(z - z_o^{(l)} + \beta^{(l)} \times (T - T_o^{(l)})) / (\alpha \times g)] / w^{(l)}\}, \quad (12)$$

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 (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 плиты и 100 млн. лет для Адриатической (микро) плиты.

Результаты и обсуждение

Предполагая, что максимум теплового потока Q возникает над конвективным

течением, восходящим к бассейну Паннония и зоне Вардар и размер конвективной ячейки равен расстоянию между минимумами Q , расположенными по обе стороны максимума Q (т.е. минимумы Q расположены над нисходящими конвективными течениями), можно оценить размер конвективной ячейки ~ 300 км.

Для построения согласованной модели мелкомасштабной термической конвекции в мантийном клине между настиляющей Евроазиатской плитой и субдуцирующей Адриатической (микро) плитой, ради повышения точности вычислений вначале необходимо положить в (1)–(2) $Ra \rightarrow 0$, $Di = 0$, т.е. рассчитать модель погружающейся влиты, мантийного клина и настиляющей плиты без учета вязкой диссипации и конвекции. Это связано с тем, что при Ra и Di (4) конвекция в модели проходит стадии с большими скоростями, и для обеспечения устойчивости расчета квазистационарного состояния требуются крайне малые шаги по времени. При этом трудно рассчитать термическое состояние погружающейся плиты, настиляющей плиты и индуцированного возвратного потока. Полагая вначале, что 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 при $V = 10$ мм/год, получим квазистационарные безразмерные $T = T_R$, изображенные соответственно на рис. 1 и 2, где линии тока на рис. 1 показаны с интервалом 5, а изотермы на рис. 2 – с интервалом 0.05.

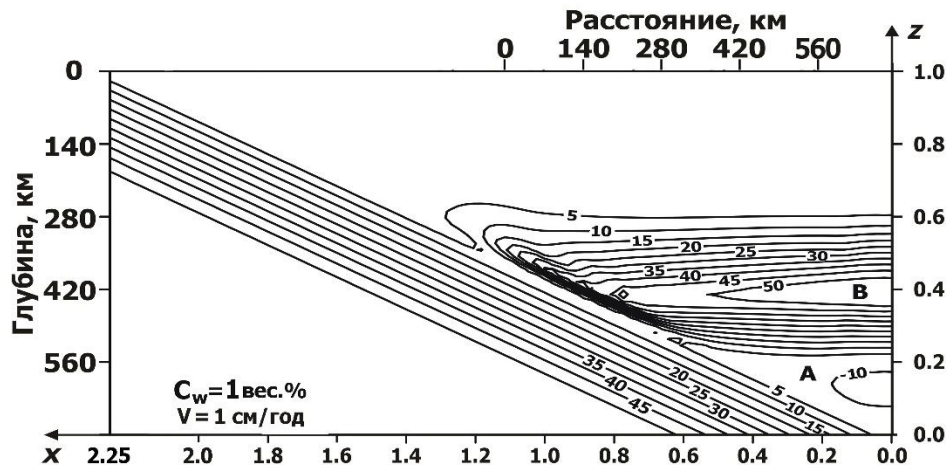


Рисунок 1. Квазистационарное распределение безразмерной невозмущенной функции тока в мантии над субдуцирующей Адриатической плитой без учета эффектов вязкой диссипации и конвекции. Линии тока показаны с интервалом 5. Диагональные эквидистантные линии тока соответствуют жесткой субдуцирующей плите, а вынужденные течения А и В индуцируются субдуцирующей плитой. Расстояние

отсчитывается от «острия» мантийного клина.

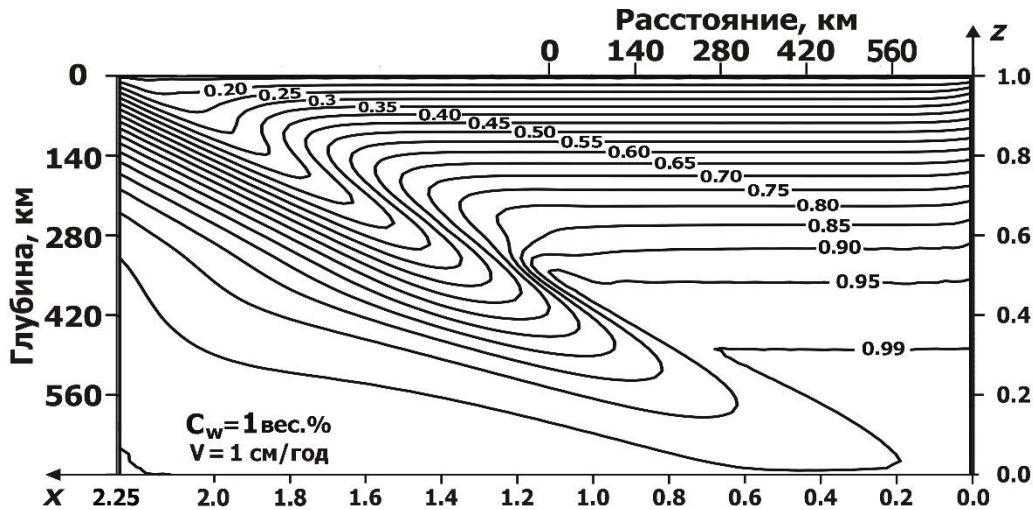


Рисунок 2. Квазистационарное распределение безразмерной температуры без учета эффектов вязкой диссипации и конвекции. Изотермы показаны с интервалом 0.05.

Результаты расчета показаны для неньютоновской реологии (формулы (7) – (9) для вязкости). Скорость $V = 10$ мм/год выбрана как соответствующая современным геодезическим данным. Плита, субдуцирующая с заданной скоростью V , показана на рис. 1 диагональными линиями тока и считалась жесткой, а коэффициент вязкости в зоне трения литосферных плит при температурах ниже 1200 К понижается по сравнению с (7) на два порядка величины. Последним учтен эффект смазки за счет субдуцирующих осадков, которые частично затягиваются погружающейся плитой и препятствуют прилипанию к ней настиляющей литосферы [15]. Из рис. 1 видно, что возвратный поток, индуцируется в виде двух расположенных один над другим вихрей «А» и «В», верхний из которых (вихрь «В» с >0) вращается по часовой стрелке, а нижний («А» с <0) – против часовой стрелки. Из рис.1 видно, что в зоне «трения» индуцированного течения «В» и судуцирующей плиты, движущихся навстречу друг другу, велик градиент скорости (т.е. скорость деформации), благодаря чему коэффициент вязкости (7) уменьшается на несколько порядков величины, и возможна инициация восходящего потока вихря Карига. Встречное течение «В» «срывает» верхний слой с субдуцирующей плиты, и, очевидно, вызывается течением «А», индуцируемым судуцирующей плитой.

Полагая затем безразмерные параметры в (1)–(2) согласно (4) , т.е. включая эффекты диссипации и конвекции, и интегрируя (1)–(2), находим, что в случае неньютоновской реологии при $C_w=1$ вес. % вынужденный мантийный поток над

субдуцирующей плитой за безразмерное время $\sim 0.4 \times 10^{-6}$ (в размерном виде $\sim 10^5$ лет) разрушается конвекцией, которая, по достижении стадии развитой конвекции, принимает вид, изображенный на рис.3. Видно, что вихревые линии тока, показанные с интервалом $\sim 10^5$, действительно соответствуют одной конвективной ячейке, возбуждающейся при скорости субдукции $V = 10$ мм/год. Размер конвективной ячейки порядка 300 км, т.е. близок к наблюдаемому пространственному масштабу аномалии теплового потока в бассейне Паннония и зоне Вардар. Густота линий тока соответствует скорости конвективных движений более 10 м/год¹.

Таким образом, расчет для неньютоновской реологии с вязкостью (7)-(9) показывает, что при снижении вязкости в 4.19×10^3 раз по сравнению с (7) – (9), т.е. при $C_w = 1$ вес. %, в мантийном клине развивается конвекция в виде двух микро вихрей, могущая обеспечить аномальный 2D тепловой поток. Ранее, в [11-13] не вычислялась абсолютная величина диссипативного теплового потока, выносимого конвекцией вдоль вектора q на рис. 3 так как это требовало длительного расчета.

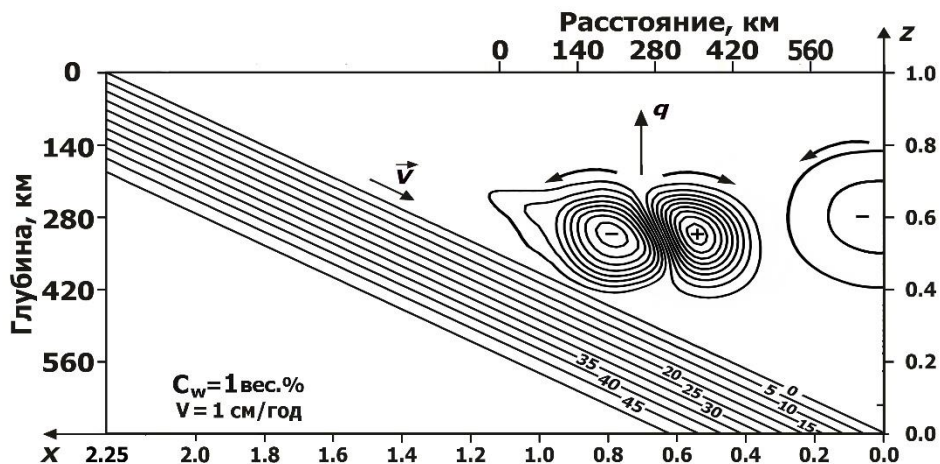


Рисунок 3. Квазистационарное распределение безразмерной функции тока в мантии над субдуцирующей Адриатической плитой с учетом эффектов вязкой диссипации и конвекции в случаях неньютоновской реологии среды. Линии тока в литосферной плите показаны с интервалом 5, а в конвективных вихрях с интервалом 2×10^6 . Вектор q указывает направление восходящего теплового потока, выносимого конвекцией.

В настоящей работе такой модельный расчет выполнен, и на рис. 4 показан термический диапир D , поднимающийся к дневной поверхности.

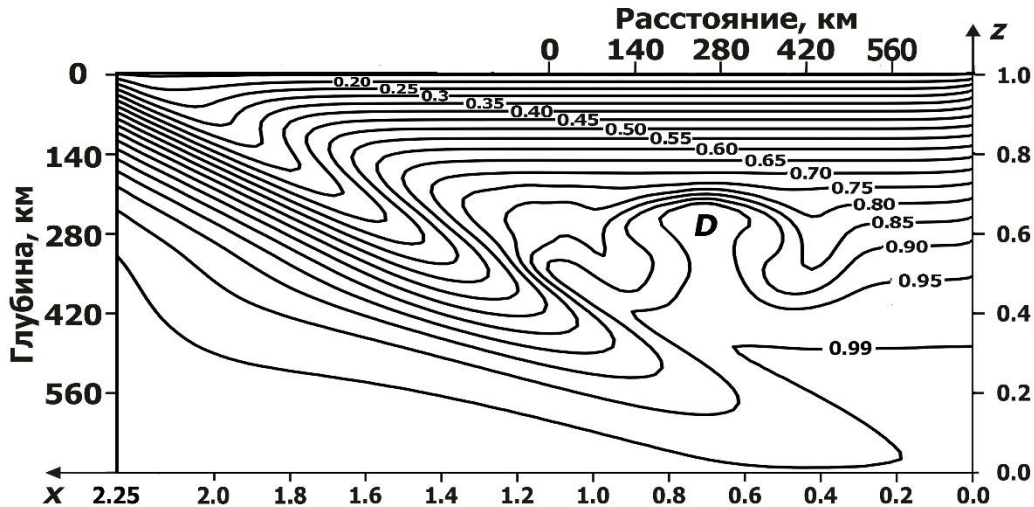


Рисунок 4. Безразмерная температура в начальный момент формирования теплового диапира *D*, возникающего в виде характерного «гриба» у поверхности субдуцирующей Адриатической микроплиты за счет эффектов вязкой диссипации и конвекции и поднимающегося к подошве настилающей Евразийской плиты.

На рис. 5 этот диапир практически достигает дневной поверхности в виде изотермического ядра (с безразмерной температурой 0.525, или $\sim 10^3$ K), внутри которого имеются конвективные вихри. Густота изотерм над диапиром соответствует тепловому потоку $\sim 10^2$ мВт \times м², согласующемуся с наблюдениями.



Рисунок 5. Распределение безразмерной температуры (изотермы в интервалом 0.05) и функции тока (вихревые линии тока, показанные с интервалом 4) в момент максимального внедрения теплового диапира с температурой $\sim 10^3$ K в Евразийскую плиту. Конвективный тепловой поток $\sim 10^3$ мВт \times м² из центра конвективной ячейки в «голове» диапира распределяется по ширине конвективной ячейки и обеспечивает тепловой поток $\sim 10^2$ мВт \times м² на расстоянии ~ 280 км к северо-востоку от зоны субдукции.

Отметим, что в случае ньютоновской реологии образование в мантийном клине конвективных валов, ориентированных поперек субдукции, как на рис. 3, характерно для достаточно малых углов субдукции. Так, при $\beta=30^\circ$ поперечные валы не возникают [3; 15]. В случае неньютоновской реологии поперечные валы (2D вихри Карига) могут возникать и при бóльших углах субдукции и достаточно малых скоростях субдукции. Очевидно, наличие двумерной конвекции в узком мантийном клине связано с бóльшими, чем в широком клине, вязкими напряжениями и, следовательно, с бóльшим диссипативным нагревом. Для неньютоновской реологии мантии конвекция при $V = 10 \text{ мм/год}^1$ возникает при концентрации воды $C_w \sim 1 \text{ вес. \%}$ благодаря формированию двух невозмущенных вынужденных течений, расположенных одно над другим, и значительному вязкому трению верхнего вынужденного течения, движущегося навстречу субдуцирующей плите. Следует отметить, что в многочисленных исследованиях термомеханического состояния мантии в зонах субдукции (см., например, [14; 15] и обширную библиографию в этих статьях) не получалось конвекции в виде валов, поперечных к направлению субдукции, так как модели с крайне малыми углами (и достаточно большой скоростью) субдукции не рассматривались. Подчеркнем, что течение, индуцируемое в мантийном клине субдуцирующей плитой и не возмущенное конвекцией, состоит из двух расположенных одно над другим течений А и В (рис. 1) только в случае неньютоновской реологии мантии, и именно в этом случае формируется локализованная зона трения в области контакта встречного течения В и субдуцирующей плиты. В этой зоне велико диссипативное тепловыделение, порождающее восходящий конвективный поток (показанный стрелкой q на рис. 3). В случае ньютоновской реологии невозмущенное конвекцией вынужденное течение в мантийном клине возникает в виде единого вихря. Преобладание неньютоновской реологии в мантийном клине, вероятно, имеет место из-за высокого содержания воды, поступающей из субдуцирующего блока. Действительно, понижение эффективной вязкости мантии из-за наличия воды происходит только в случае неньютоновской реологии.

Выводы

В случае неньютоновской реологии характерный размер конвективной ячейки, полученной в модели мантийного клина, сформировавшегося при субдукции Адриатической плиты под Евроазиатскую плиту, составляет $\sim 300 \text{ км}$, что при скорости субдукции 10 мм/год приблизительно совпадает с характерным пространственным размером 2D аномалии теплового потока в бассейне Паннония и зоне Вардар в тылу

горного массива Динара. При средней концентрации воды в мантийном клине $C_w = 1$ вес. % модельный тепловой поток с дневной поверхности $\sim 1 \text{ мВт} \times \text{м}^{-2}$ хорошо согласуется с наблюдаемым тепловым потоком. Подъем термических диапиров в мантийном клине происходит в нестационарном режиме и, возможно, повторяется периодически.

References

1. Гаврилов С.В. Исследование механизма формирования островных дуг и тылового раздвигания литосферы // Геофизические Исследования. - 2014. - Т.15. - №4. - С. 35-43.
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. 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.
7. Babbicci D., Tamburelli C., Viti M., Mantovani E., Albarello D., D'Onza F., Cenni N., Mugnaioli E. Relative motion of the Adriatic with respect to the confining plates: seismological and geodetic constraints // Geophys. J. Int.. - 2004. - V.159. - P. 765-775.
8. 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.
9. Carminati E., Lustrino M., Doglioni C. Geodynamic evolution of the central and western Mediterranean: Tectonics vs. igneous petrology constraints // Tectonophysics. - 2012. - V.579. - P. 173-192.
10. Gavrilov S.V., Kharitonov A.L. Subduction velocity of the Russian plate under the Siberian one at Paleozoic: a constraint based on the mantle wedge convection model and the oil- and gas-bearing zones distribution in Western Siberia // Modern Science. - 2016. - No.16. - P.155-160.
11. Gavrilov S.V., Kharitonov A.L. The subduction of the Adriatic plate and the convective

mechanism of the dissipative heat and hydrocarbons transport from the mantle wedge in the Pannonian region // Modern Science. - 2019 a. - No.5-1. - P. 33-40.

12. Gavrilov S.V., Kharitonov A.L. The computer modeling of physical mechanism of the 2D convective transport of hydrocarbons from the mantle wedge to the Earth's surface: a comparison of the Newtonian and non-Newtonian rheology cases // International Journal of Engineering Research and Science. – 2019 б. - V. 5. - Issue (No.10). - P. 17-22.

13. Gavrilov S.V., Kharitonov A.L. On the subduction of the Apulian lithospheric microplate under the Euro-Asian one and the mantle wedge thermal convection as a possible mechanism of hydrocarbons upward transport in the Pannonia and the Vardar basins // International Journal of Professional Science. - 2019 в. - No.10. - P. 68-77.

14. 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. - P. 59-74.

15. Gerya T.V. Future directions in subduction modeling // J. of Geodynamics. - 2011. - V.52. - P. 344-378.

16. Lenkey L., Dovenyi P., Horvath F., Cloetingh S.A.P.L. Geothermics of the Pannonian basin and its bearing on the neotectonics // EGU Stephan Mueller Special Publication Series. - 2002. - V.3. - P. 29-40.

17. Royden L.H., Horvath F., Nagymarosy A., Stegena L. Evolution of the Pannonian basin system: 2. Subsidence and thermal history // Tectonics. - 1983. - V.2. - P. 91-137.

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