

ГЕОТЕКТОНИКА И ГЕОДИНАМИКА

УДК 530.311

Геодинамическая модель глубинного строения палеосубдукционной зоны на восточной окраине Русской палеоплиты и распределение месторождений нефти и газа**С.В. Гаврилов^а, А.Л. Харитонов^б**^аИнститут физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН

123242, Москва, ул. Большая Грузинская, д.10. E-mail: gavrilov@ifz.ru

^бИнститут земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН

108840, Москва, Троицк, Калужское шоссе, 4. E-mail: ahariton@izmiran.ru

(Статья поступила в редакцию 27 августа 2019 г.)

Использована известная гипотеза М. Barazangi о том, что квазилинейные геолого-тектонические зоны представляют собой полосчатые структуры, которые параллельны палеовулканическому Уральскому горному поясу и могут находиться в пределах некоторого интервала расстояний от пояса. По величине этого интервала ($\sim 10^3$ км) и периодическому расположению квазилинейных геолого-тектонических зон (с поперечным размером ~ 300 км) оценивается скорость палеосубдукции ($\sim 5 - 6$ см в год) на примере некоторых районов Сибири. Альтернативой столь высокой скорости палеосубдукции может быть угол палеосубдукции значительно меньше 10° . Результаты расчета могут быть применимы при изучении древних и современных литосферных блоков.

Ключевые слова: *геодинамическая модель, палеосубдукционная зона, месторождения нефти и газа.*

DOI: 10.17072/psu.geol.19.1.1

Введение

Известно, что построение надежной физико-математической модели глубинного строения любого региона имеет существенное значение как в теоретическом плане – для исследования тектонического строения этого региона, так и в прикладном – для прогнозирования поисков полезных ископаемых на исследуемой территории. Постановка задачи данной статьи связана с разработкой методики оценки некоторых глубинных гидродинамических параметров мантии Земли на основе определения расстояния от вулканической островной гряды, использующей известную гипотезу о том, что квазилинейные геолого-тектонические зоны представляют собой полосчатые структуры, которые параллельны горному вулканическому поясу, расположенному у ребра мантийного субдукционного клина, и могут находиться в

пределах некоторого интервала расстояний от горного вулканического пояса. Первые исследования в этом направлении были сделаны зарубежными коллегами на примере субдукционной зоны в районе литосферной плиты Наска (Barazangi et al., 1976), а также по несколько другой, но подобной методике оценки (Karig, 1971). На территории России имеется несколько регионов, где по параметрам расположения островных вулканических дуг экспериментально могут быть проверены основанные на рассматриваемой гипотезе теоретические расчеты углового направления субдукционного погружения литосферных или палеолитосферных плит. Одним из самых важных регионов России, где можно показать преимущество расчетов геодинамических параметров мантии в зоне палеосубдукционного клина для прогноза зон расположения месторождений нефти и газа, является территория Западной Сибири (рис. 1).

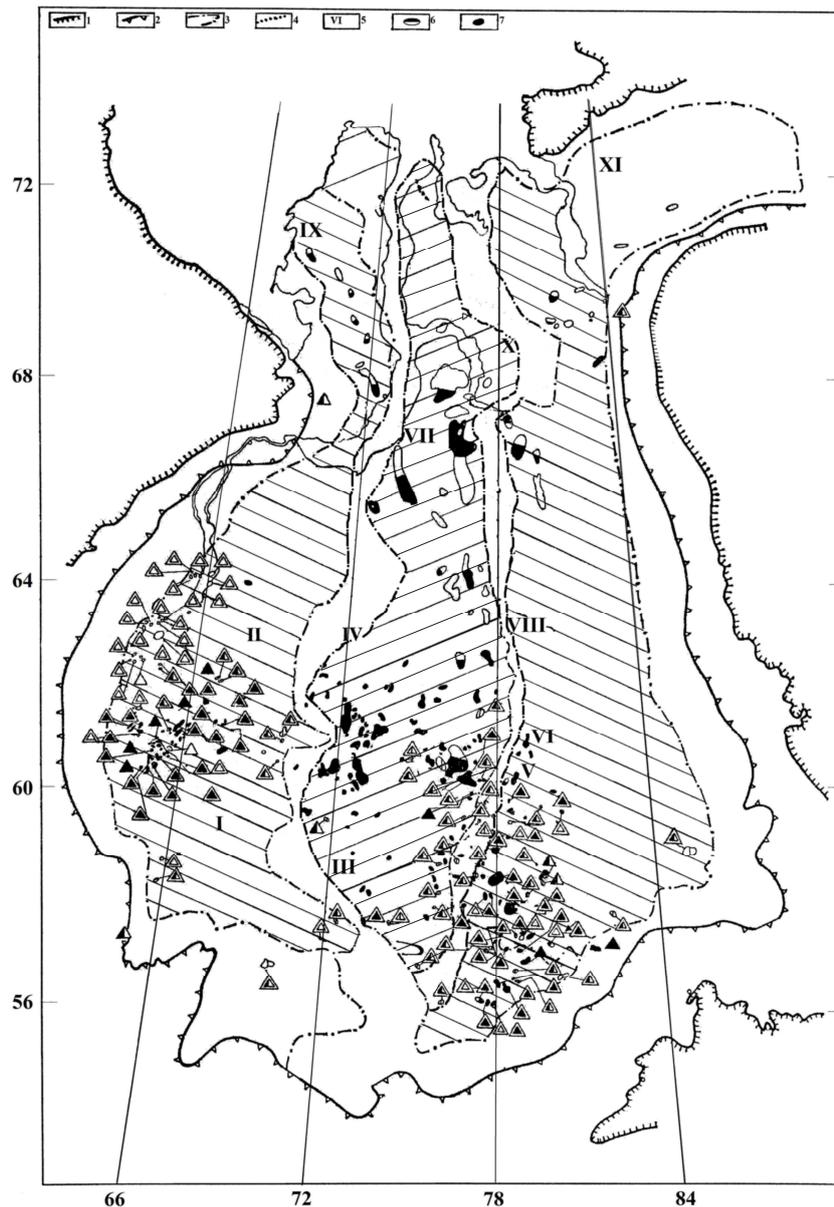


Рис.1. Схема полосчатой структуры расположения субмеридиональных геолого-тектонических поясов Западно-Сибирского региона (заштрихованы). Геолого-тектонические (в том числе нефтегазонасные) пояса связаны с теплопереносом вещества по серии глубинных литосферных разломов от центров пар конвективных противоположно вращающихся вихрей Карига, возникших в астеносфере, прилегающей к палеосубдукционному мантийному клину, расположенных под «подошвой» литосферного слоя Уральского палеоокеана (Западно-Сибирской палеоплиты): 1 – тектонические границы Западно-Сибирского региона; 2 – границы Западно-Сибирской углеводородной провинции; 3 – номера геолого-тектонических зон, составляющих пояса определенного вида углеводородных месторождений (нефть или газ или конденсат): I–II–IX – Приуральско-Фроловско-Южно-Ямальский газовый пояс, III–IV–VII–X – Каймысовско-Среднеобско-Надым-Пурский нефтяной пояс, V–VI–VIII – Васюган-Пайдугинско-Пур-Тазовский конденсатный пояс, 4 – границы геолого-тектонических зон; 5 – номера геолого-тектонических зон; 6 – контуры месторождений углеводородов; 7 – обозначение разных типов месторождений углеводородов (Порфирьев, 1982)

Существенной особенностью локальных и региональных геолого-тектонических зон Зауралья и Западной Сибири является периодичность их пространственного расположения вдоль широтного направления (Ступак,

Берзин, 2001). Так, например, вытянутые в меридиональном направлении эти периодические региональные геолого-тектонические зоны представляют собой своеобразные полосы шириной ~ 300 км, параллельные

Уральскому хребту и расположенные с периодичностью примерно 300 км (Порфирьев, 1982).

Распределение гравитационных аномалий в редукции Буге (Петров, 2001) поперек поля напряжений Уральской геотектонической системы и ряд геологических аргументов в работе М.Г. Когана и Р.Ю. Кукулиевой (1988) свидетельствуют, что после формирования Уральского палеовулканического пояса в пермский период эволюционного развития Земли (295–240 млн лет назад) происходило взаимное поддвижение литосферы Русской палеоплиты (РП) под литосферу Восточно-Сибирской палеоплиты (ВСП) в районе окраинного палеоокеанического бассейна – Уральского палеоокеана, примерно соответствующего современному расположению Западно-Сибирской низменности (рис. 2).

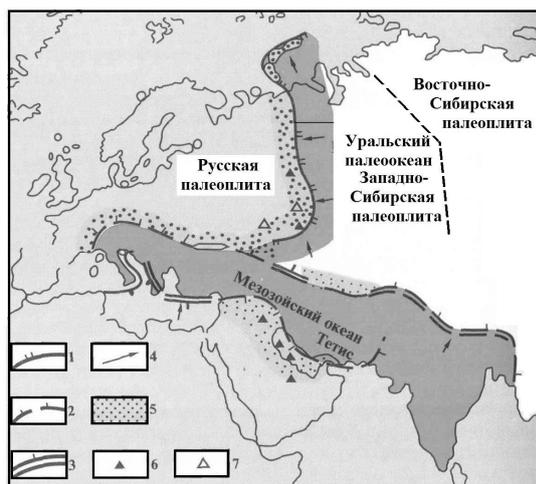


Рис. 2. Палеотектоническая реконструкция формирования Уральского палеовулканического пояса в процессе формирования палеосубдукционной зоны при палеотектонической коллизии Русской и Восточно-Сибирской палеоплит (ВСП). Зоны палеосубдукции: 1 – палеозойские; 2 – мезозойско-кайнозойские; 3 – ныне действующие; 4 – зона сжимающих напряжений при взаимном поддвиге Русской и Восточно-Сибирской литосферных палеоплит в палеозойский период эволюции Земли; 5 – зона расположения Уральского палеовулканического пояса; 6, 7 – расположение некоторых крупных месторождений полезных ископаемых (Арешев, Гаврилов и др., 1997)

Хорошо известна аналогичная современная субдукционная зона, которая в данный

период только развивается в пределах Охотского моря – окраинной зоны Тихоокеанской литосферной плиты, поддвигающейся под литосферу Азиатского континента (рис. 3) (Гайнанов, 1991).

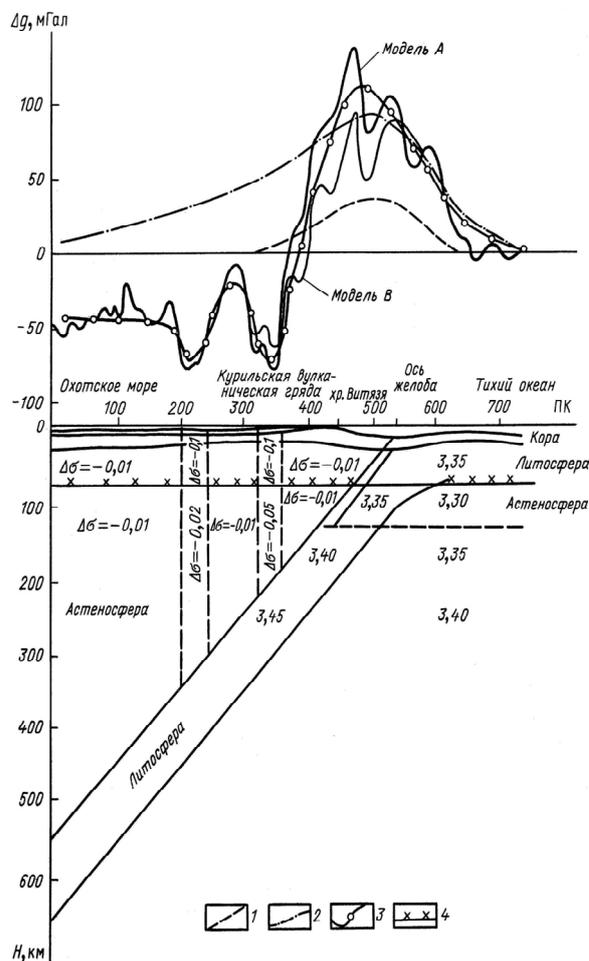


Рис. 3. Плотностная модель астеносферы и зоны субдукции Тихоокеанской литосферы в переходной зоне Охотское море – Курильская гряда – Тихий океан (Гайнанов, 1991). Кривые «модель А» и «модель В» – остаточные мантийные аномалии силы тяжести – Δg после исключения из наблюдаемой аномалии силы тяжести влияния изменения мощности слоев земной коры, полученной по сейсмическим данным; 1 – гравитационный эффект эклогитового слоя литосферы ($\Delta\sigma = +0.02 \text{ г/см}^3$), 2 – гравитационный эффект погружающейся плиты литосферы ($\Delta\sigma = +0.05 \text{ г/см}^3$), 3 – суммарный гравитационный эффект плотностных неоднородностей литосферы и астеносферы, 4 – «подошва» литосферы

На рис. 3 хорошо видны после основного максимума, расположенного над осью желоба, два экспериментально зафиксированных минимума значений поля силы тяжести, свя-

занные с вертикальными зонами изменения плотности пород в астеносфере, под Охотским окраинным бассейном. По мнению некоторых исследователей, эти вертикальные зоны разуплотнения в астеносфере также связаны с конвективными ячейками Карига, которые образуют вертикальные зоны теплопереноса вещества из мантии к поверхности Земли.

Предполагая, что геолого-тектонические зоны на территории Западно-Сибирской низменности (Уральский палеоокеан) образовались над восходящими потоками нагретого вещества (процессы теплопереноса), возникшими над конвективными вихрями Карига в палеосубдукционном мантийном клине, можно оценить некоторые геодинамические параметры мантии в зоне палеосубдукции (скорость палеосубдукции, угол наклона палеомантийного клина, скорость

смещения конвективных вихрей Карига во времени) в районе палеотектонической коллизии Русской и Восточно-Сибирской литосферных плит в палеозойский период развития Земли, которые позволили создать большое количество месторождений нефти, газа, газоконденсата на этой территории.

В соответствии с имеющимися научными представлениями о развитии этого региона (Порфирьев, 1982; Арешев, Гаврилов и др., 1997; Павленкова и др., 2014) мы хотели показать, что конвективная зона шириной 1000 км в палеомантийном клине (рис. 4) в палеозойский период эволюции Земли была расположена на восток от Уральского палеовулканического хребта, что соответствует образовавшимся там (на территории Западной Сибири) линейным геолого-тектоническим зонам, показанным выше на рис. 1.

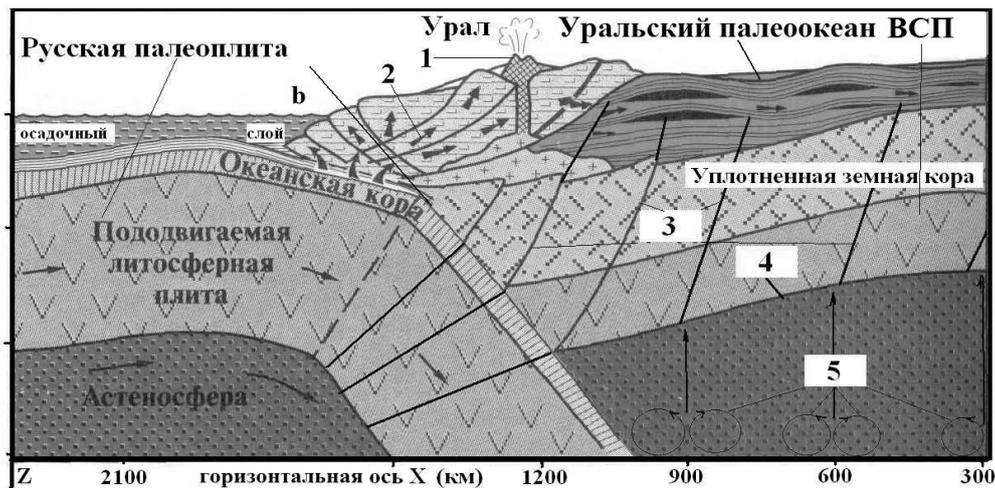


Рис. 4. Схематический глубинный разрез астеносферы и зоны палеосубдукции, образовавшейся в процессе палеозойского погружения литосферы Русской палеоплиты (РП) в переходной зоне Уральского палеоокеана (территория Западно-Сибирской плиты (ЗСП)): 1 – Уральская палеовулканическая гряда; 2 – направление движения конвективного потока нагретого вещества (в том числе и углеводородов) из мантии к поверхности Земли по зонам напластования и по глубинным литосферным разломам; 3 – глубинные литосферные разломы, уходящие корнями в астеносферу, связанные с зоной субдукции; 4 – «подшивка» литосферы Уральского палеоокеана (Западно-Сибирской палеоплиты) в палеозойский (Pz) период эволюции Земли; 5 – схематическое изображение расположения трех пар конвективных (противоположно вращающихся в паре) вихрей Карига, создающих в центре пары конвективных вихрей восходящие к поверхности Земли потоки разогретого мантийного вещества (теплоперенос) (в астеносфере, прилегающей к зоне субдукционного клина, образованного между «кровлей» литосферы субдуцирующей Русской палеоплиты и «подшивкой» литосферы Восточно-Сибирской палеоплиты (ВСП)). Горизонтальная ось (x) на данном схематическом глубинном разрезе отображает важный параметр – горизонтальное расстояние (300 км) между центрами трех пар конвективных вихрей Карига в палеосубдукционном мантийном клине. На вертикальной оси (z) на данном схематическом глубинном разрезе показаны глубинные отметки расположения различных палеослоев земной коры и верхней мантии в палеозойский период эволюции Земли без мощного слоя современных осадочных пород на Русской плите, соответствующие 0, 30, 60, 90 км

По нашему мнению, конвективные вихри возникали над погруженной Русской палеоплитой в астеносфере над мантийным клином. Конвективные вихри Карига (или просто вихри Карига), поскольку их может быть несколько, при достаточно пологой зоне субдукции должны располагаться в мантии между субдуцирующим литосферным блоком восточного обрамления Русской палеоплиты и Восточно-Сибирской палеоплиты в астеносфере под литосферой Уральского палеоокеана. Иными словами, вихри Карига обычно должны быть расположены в мантийном клине (рис. 4) между «кровлей» субдуцирующей плиты и «подшовой» плиты, под которую происходит субдукция. Конвективные вихри Карига в палеосубдукционном мантийном клине обычно бывают расположены парами и закручены навстречу друг другу. Один конвективный вихрь из пары закручен по часовой стрелке, а другой – против. Между этими двумя вихрями расплавленной мантии образуется восходящий мантийный поток тепла и вещества (тепломассоперенос). Он и выносит по глубинным литосферным разломам простейшие углеводороды (H_2 , CO_2 , CH_4) в приповерхностные зоны их накопления и последующего преобразования (различного типа геолого-тектонические «ловушки») в «осадочном» слое Земли (Сефуль-Мулюков, 2012). В нашем случае, при погружении Русской палеоплиты под Восточно-Сибирскую палеоплиту в палеозойский период эволюции Земли, существовали три пары конвективных вихрей Карига. Причем каждая конвективная ячейка, состоявшая из пары противоположно вращающихся конвективных вихрей Карига, имела средний горизонтальный размер около 300 км. Все три пары конвективных вихрей Карига должны были быть расположены в палеомантийном клине общей протяженностью в горизонтальной проекции на поверхность Земли около 1000 км к востоку от Уральского палеовулканического пояса и образовывать соответствующую им трехсоткилометровую геолого-тектоническую зональность на территории Западно-Сибирской палеоплиты, сохранившуюся до наших дней (рис. 1).

Рассмотрим модель палеомантийного клина между «подшовой» Западно-

Сибирской палеоплиты и верхней поверхностью («кровлей») субдуцирующей Русской палеоплиты (рис. 4), в результате относительного движения Русской палеоплиты на восток поддвигающейся под углом β со скоростью V . Верхнюю поверхность («кровлю») субдуцирующей Русской палеоплиты в первом приближении будем считать наклонной полуплоскостью ($z = x \times \operatorname{tg} \beta$), а «подшову» Западно-Сибирской палеоплиты – горизонтальной полуплоскостью ($z = 0$) соответственно, где x – горизонтальная ось, соответствующая почти горизонтальному направлению «подшовой» Западно-Сибирской палеоплиты, а ось z направлена вертикально вниз. Материал мантийного клина считаем однородной несжимаемой жидкостью с постоянным коэффициентом вязкости η_c , равным его среднему значению. Движение вещества в мантийном клине определяется формулами (Schubert, Turcotte, Olson, 2001; Turcotte, 2002), а уравнение стационарного распределения абсолютной температуры T в мантийном клине при бесконечном числе Прандтля в приближении Буссинеска имеет вид (V_x, V_z – компоненты скорости вдоль осей x и z)

$$(V_x \times \partial_x \times T) + (V_z \times \partial_z \times T) = (\chi \times T_x) + [\tau_{ik}^2 / (2 \times \eta_c)], \quad (1)$$

где τ_{ik} – тензор вязких напряжений, символ ∂ обозначает частную производную по координатам, χ – коэффициент температуропроводности, Δ – оператор Лапласа. Согласно (Turcotte, 2002), имеем

$$U = V_x = \partial \psi / \partial z = - [D \times \operatorname{arctg} (x / z)] + \{ x \times [(C_x + D_z) / (x^2 + z^2)] \} - B,$$

$$W = V_z = \partial \psi / \partial x = - [C \times \operatorname{arctg} (x / z)] + \{ z \times [(C_x + D_z) / (x^2 + z^2)] \} - A, \quad (2)$$

$$\tau_{ik}^2 / (2 \times \eta) = [(4 \times \eta_c) \times (C_z - D_x)^2] / (x^2 + z^2)^2, \quad (3)$$

где при условии непроскальзывания при $z = 0$ и $z = x \times \operatorname{tg} \beta$ на границах мантийного клина

$$A = V \times \{ [(\beta \times (\pi / 2) \times \sin \beta) / [\beta^2 - \sin^2 \beta]] \};$$

$$B = V \times \{ [(\pi / 2) - \beta] \times \sin \beta - [\beta \times (\pi / 2) \times \cos \beta] \} / [\beta^2 - \sin^2 \beta];$$

$$C = -V \times \{ [\beta \times \sin \beta] / [\beta^2 - \sin^2 \beta] \};$$

$$D = V \times \{ [(\beta \times \cos \beta) - \sin \beta] / [\beta^2 - \sin^2 \beta] \}. \quad (4)$$

Отметим, что при $\beta < (\pi / 4)$ мощность (3) диссипативного тепловыделения максималь-

на у поверхности субдуктирующей литосферы, т.е. у нижней границы мантийного клина.

Граничные условия в уравнении (1) для температуры есть $T = T_m$ при $z = 0$ и $z = x \times \operatorname{tg} \beta$, где $T_m = 1500^\circ K$ – температура субсолидуса. Граничные условия $T = T_m$ вдали от ребра мантийного клина (при $x \rightarrow \infty$) также справедливы, поскольку тепловая энергия, соответствующая температуре, отличной от T_m , на достаточном удалении от хребта передается к литосферным плитам, т.к. диссипативное тепловыделение при $x \rightarrow \infty$ спадает до нуля.

Формула (1) показывает, что максимальная температура T_{max} в мантийном клине достигается у поверхности погружающейся плиты и с точностью $\sim 10\%$ может быть представлена аналитической формулой $T_{max} = T_m + \{(\eta_c \times V^2/k) \times (1/[F+(G \times V \times x/\chi)])\}$, (5) где F и G – функции угла субдукции β , которые при $(\pi/9) < \beta < (\pi/4)$ могут быть представлены приближенными интерполяционными формулами

$$F = -2.70 + 15.75 \times \beta; \quad G = -2.35 \times 10^{-3} + 1.27 \times 10^{-2} \times \beta, \quad (6)$$

где $k = 4 \times 10^5 \text{ эрг/см} \cdot \text{с} \cdot K$ – коэффициент теплопроводности пород астеносферы, $\chi = [k / (\rho \cdot c_p)] = 10^{-2} \text{ см}^2/\text{с}$, $\rho = 3.30 \text{ г/см}^3$ – плотность пород астеносферы, $c_p = 1.2 \times 10^7 \text{ эрг} / (\text{г} \cdot K)$ – удельная теплоемкость пород. Согласно (1), $(T_{max} - T_m)$ пропорционально среднему коэффициенту вязкости η_c . Например, при $\eta_c = 10^{21} \text{ Па} \cdot \text{с} = 10^{22} \text{ П}$, $\beta = 30^\circ$, $V = 10 \text{ см/год}$, $x = 100 \text{ км}$, согласно (5)–(6), величина $(T_{max} - T_m) \sim 400^\circ K$.

В мантийном клине возможны конвективная и термическая неустойчивости, вызываемые перепадом $(T_{max} - T_m)$ температуры и возможной (не учитываемой выше) зависимостью вязкости от температуры. Исследуя эти неустойчивости, будем считать угол β субдукции литосферы Русской палеоплиты малым, а вынужденное течение в мантийном клине близким к плоскопараллельному. Если возмущения v_x , v_y , v_z компонент скорости, p – давления и θ – температуры зависят от пространственных координат x , z и времени t как

$$(v_x, v_y, v_z, p, \theta) = [u(\zeta), v(\zeta), w(\zeta), p(\zeta), \theta(\zeta)] \times \exp[\gamma \times t + i(x \times k_x + y \times k_y - t \times \omega)], \quad (7)$$

где $\zeta = (z/x)$ и в нулевом приближении γ и ω не зависят от x , при этом ось y направлена вдоль простирания Уральского палеовулканического хребта и коэффициент вязкости (η) зависит от температуры (T) как

$$\eta = \eta_0 \times \exp \zeta; \quad \zeta = (E^* + p \times V^*) / (R \times T) \quad (8)$$

(где E^* и V^* – энергия и объем активации, R – универсальная газовая постоянная), то с учетом

$$\partial_x = \partial_x - (\zeta/x) \times \partial_\zeta;$$

$$\partial_z = (1/x) \times \partial_\zeta;$$

$$\partial_{xx}^2 = \partial_{xx}^2 - 2 \times (\xi/x) \times \partial_{x\xi}^2 + 2 \times (\zeta/x^2) \times \partial_\zeta + (\zeta^2/x^2) \times \partial_{\zeta\zeta}^2;$$

$$\partial_{zz}^2 = (1/x^2) \times \partial_{\zeta\zeta}^2;$$

пренебрегая при $\zeta \ll 1$ величиной ζ , для возмущений (11) имеем

$$i k_x u + i k_y v + w'/x = 0, \quad (9)$$

$$0 = -i k_x \times p - 2 \times \eta \times k_x^2 \times u - \eta \times k_y^2 \times u - k_x \times k_y \times v + \{\eta \times [-\zeta \times (\theta/x \times T) \times U' + (u'/x) + i k_x \times w]\}'/x, \quad (10)$$

$$0 = -i k_y \times p - 2 \times \eta \times k_y^2 \times v - \eta \times k_x \times k_y \times u + \{\eta \times [(v'/x) + i k_y \times w]\}'/x, \quad (11)$$

$$0 = -(p'/x) - (\alpha \times g \times \rho \times \theta) + \eta \times \{(i k_x \times u'/x) - (k_x^2 \times w) - [i k_x \times U' \times (\xi \times \theta/x \times T)] +$$

$$\{\eta \times [(i k_y \times v'/x) - k_y^2 \times w]\}' + 2 \times (\eta \times w)'/x^2, \quad (12)$$

$$\rho \times c_p \times \{(\gamma \times \theta) - (i \times \omega \times \theta) + (w \times T)'/x + (i k_x \times U \times \theta) + [(W \times \theta)'/x]\} = k(\theta)''/x^2 - k^2(\theta) +$$

$$[(4 \times \eta \times D^2 \times \xi \times \theta) / (x^2 \times T)] + 4 \times \eta \times D \times \{[(U' \times \xi \times \theta) / (x \times T)] - (u'/x) - (i k_x \times w)\}'/x, \quad (13)$$

где (9)–(13) есть соответственно уравнение неразрывности, три компоненты уравнения движения и уравнение переноса тепла, а штрих обозначает производную по ζ . Для решения системы (9)–(13) вводим новые неизвестные функции ξ :

$$y_{1,2} = u^{\text{Re,Im}}, \quad y_{3,4} = v^{\text{Re,Im}}, \quad y_{5,6} = w^{\text{Re,Im}}, \quad y_7 = \eta \times \{u^{\text{Re}} / [x - k_x \times w^{\text{Im}} - U' \times \xi \times (\theta^{\text{Re}} / x \times T)]\}, \quad y_8 = \eta \times \{u^{\text{Im}} / [x + k_x \times w^{\text{Re}} - U' \times \xi \times (\theta^{\text{Im}} / x \times T)]\}, \quad y_9 = \eta \times [v^{\text{Re}} / (x - k_y \times w^{\text{Im}})], \quad y_{10} = \eta \times [v^{\text{Im}} / (x + k_y \times w^{\text{Re}})], \quad y_{11} = p^{\text{Re}} - (2 \times \eta \times w^{\text{Re}} / x), \quad y_{12} = p^{\text{Im}} - (2 \times \eta \times w^{\text{Im}} / x), \quad y_{13,14} = \theta^{\text{Re,Im}}, \quad y_{15,16} = \chi \times \theta^{\text{Re,Im}}. \quad (14)$$

Уравнения (9)–(13) относительно функций (14) превращаются в систему 1-го порядка:

$$y_1' = (x \times k_x \times y_6) + [(x \times y_7) / \eta] + (\xi \times U' / T) \times y_{13}; \quad y_2' =$$

$$-(x \times k_x \times y_5) + [(x \times y_8) / \eta] + (\xi \times U' / T) \times y_{14};$$

$$y_3' = (x \times k_y \times y_6) + [(x \times y_9) / \eta]; \quad y_4' = (x \times k_y \times y_5) +$$

$$[(x \times y_{10}) / \eta]; \quad y_5' = (x \times k_x \times y_2) + (x \times k_y \times y_4);$$

$$y_6' = -(x \times k_x \times y_1) - (x \times k_y \times y_3); \quad y_7' =$$

$$x \times \eta \times [(4 \times k_x^2 + k_y^2) \times y_1] + (3 \times x \times \eta \times k_x \times k_y \times y_3) - (x \times k_x \times y_{12}); \quad y_8' = x \times \eta \times [(4 \times k_x^2 + k_y^2) \times y_2] +$$

$$(3 \times x \times \eta \times k_x \times k_y \times y_4) + (x \times k_x \times y_{11});$$

$$\begin{aligned}
 y'_9 &= x \times \eta \times [(4 \times k_y^2 + k_x^2) \times y_3] + (3 \times x \times \eta \times k_x \times k_y \times y_1) - \\
 & (x \times k_y \times y_{12}); \\
 y'_{10} &= x \times \eta \times [(4 \times k_y^2 + k_x^2) \times y_4] + (3 \times x \times \eta \times k_x \times k_y \times y_2) \\
 & + (x \times k_y \times y_{11}); \\
 y'_{11} &= - (x \times k_x \times y_8) - (x \times k_y \times y_{10}) - (a \times \rho \times g \times x \times y_{13}); \\
 y'_{12} &= (x \times k_x \times y_7) + (x \times k_y \times y_9) - (a \times \rho \times g \times x \times y_{14}); \\
 y'_{13,14} &= y'_{15,16} / \chi, \\
 y'_{15} &= [x^2 \times (\gamma + k_x^2 \times \chi) \times y_{13}] + [x^2 \times (\omega - (k_x \times U) y_{14}) \\
 & + [(x \times T') \times y_5] - [(4 \times y_{13} \times \eta \times D^2 \times \xi) / (\rho \times c_p \times T)] + \\
 & [(4 \times y_7 \times x \times D) / (\rho \times c_p)] + [(y_{15} \times x \times V \times \xi^2) / (\chi \times \beta)]; \\
 y'_{16} &= [x^2 \times (\gamma + k_x^2 \times \chi) \times y_{14}] - [x^2 \times (\omega - (k_x \times U) y_{13}) \\
 & + [(x \times T') \times y_6] - [(4 \times y_{14} \times \eta \times D^2 \times \xi) / (\rho \times c_p \times T)] + \\
 & [(4 \times y_8 \times x \times D) / (\rho \times c_p)] + [(y_{16} \times x \times V \times \xi^2) / (\chi \times \beta)], \quad (15)
 \end{aligned}$$

где подставляем $W = (\zeta^2 \times V / \beta) = 0$ при $\zeta \ll 1$ (V – скорость субдукции). Свободные граничные условия для уравнений (15) в терминах неизвестных (14) запишутся в виде $y'_{5,6,7,8,9,10,13,14} = 0$ при $\zeta = 0, t = \text{tg } \beta$. (16)

Для оценки величин γ и ω примем коэффициенты в формуле (15) постоянными, равными их средним значениям, в частности $\eta = \eta_c$. Тогда задача, представленная в формулах (15) – (16), имеет решение: $y_i = A_i \times \{[\cos^{\sin}] \lambda \times \zeta\}$ с $\lambda = [\pi / (\text{tg } \beta)]$, $i = 1, 2 \dots 16$.

Найдем условия существования нетривиального решения при $k_y = 0$. В этом случае конвекция возникает в форме вихрей Карига, а уравнения для $y_{3,4,9,10}$ образуют отдельную подсистему, из которой следует, что $y_{3,4,9,10} = 0$, т.е. возмущения скорости и сдвиговые напряжения поперек направления субдукции Русской палеоплиты отсутствуют. Оставшиеся уравнения, в пренебрежении малым $W = (\zeta^2 \times V / \beta)$, приводят к следующему условию для γ и ω :

$$\begin{aligned}
 \{(\lambda^2 \times \chi) + [x^2 \times (\gamma + k_x^2 \times \chi)] - D_2 - \{(x^2 \times k_x^2) / \\
 [(x^2 \times k_x^2) + \lambda^2]^2\} \times [(a \times \rho \times g \times x^3 \times T') / \eta] + \\
 [(4 \times y_7 \times B \times D_1 \times \lambda^2 / x)]^2 + \{x^2 \times (\omega - (k_x \times \\
 U)) + [(x^2 \times k_x) \times [(x^2 \times k_x^2) - \lambda^2] \times (B \times T' + a \times \rho \times g \times D_1)] / \\
 [(x^2 \times k_x^2) + \lambda^2]^2\} = 0, \quad (17)
 \end{aligned}$$

где $B = \xi \times U' / T$, $D_1 = 4 \times x \times [D - (1/2) \times C \times \text{tg } \beta] / (\rho \times c_p)$, $D_2 = 4 \times \eta_c \times \xi \times [D - (1/2) \times C \times \text{tg } \beta]^2 / (\rho \times c_p \times T)$, и, согласно формуле (5),

$$T' = [(T_{max} - T_m) / \text{tg } \beta] = [(\eta_c \times V^2) / (k \times \text{tg } \beta)] \times (1 / \{F + [(x \times V \times G) / \chi]\}). \quad (18)$$

Из условия (17), эквивалентного двум независимым уравнениям, получаем $t = \text{tg } \beta$:

$$\begin{aligned}
 \gamma_L = \gamma(k_y = 0) &= 4 \times \eta_c \times \xi \times [(D - C \times t / 2)^2 / \\
 (x^2 \times \rho \times c_p \times T)] + \{(\rho \times \alpha \times g \times x^3 \times T' \times k_x^2) / \eta_c \times [(x^2 \times \\
 k_x^2) + \lambda^2]^2\} + 16 \times \eta_c \times \{U' \times k_x^2 \times \lambda^2 \times \xi \times [(D - C \times t / 2) /
 \end{aligned}$$

$$[(x^2 \times k_x^2) + \lambda^2]^2 \times \rho \times c_p \times T)\} - \{\chi \times [(x^2 \times k_x^2) + \lambda^2] / x^2\}, \quad (19)$$

$$\begin{aligned}
 \omega' = \omega(k_y = 0) &= k_x \times U - \{[k_x \times (x^2 \times k_x^2 - \lambda^2)] / [x^2 \times k_x^2 \\
 + \lambda^2]^2\} \times \{[(T' \times U' \times \xi) / T] + 4 \times [\rho \times \alpha \times g \times x \times \\
 (D - C \times t / 2) / \rho \times c_p]\}, \quad (20)
 \end{aligned}$$

где $a = 3 \times 10^{-5} 1/K$ – коэффициент теплового расширения, g – ускорение силы тяжести, $T' = (T_{max} - T_m) / t$, $t = \text{tg } \beta$, $\xi = (E^* + p \times V^*) / (R \times T)$, E^* и V^* – энергия и объем активации, R – универсальная газовая постоянная, $U' = \{[D \times (\sin \beta \times \cos \beta + \beta)] - [C \times (\sin^2 \beta)]\} / \text{tg } \beta$, $\Lambda^2 = \lambda^2 + 4 \times \pi^2$, $\lambda = [\pi / (\text{tg } \beta)]$, $C = -V \times \{[\beta \times \sin \beta] / [\beta^2 - \sin^2 \beta]\}$, $D = V \times \{[(\beta \times \cos \beta) - \sin \beta] / [\beta^2 - \sin^2 \beta]\}$, $T = (T_{max} + T_m) / 2$.

В формуле (19) зависимость от средней вязкости η_c возникает из-за существенной вблизи желоба термической неустойчивости, описываемой первым слагаемым в (19) и связанной с экспоненциальной зависимостью вязкости от ζ , т.е. от температуры.

Из формул (19)–(20) видно, что в полученном первом приближении, которым мы ограничимся, инкремент γ и частота ω являются функциями горизонтальной координаты x и, таким образом, должны быть плавно меняющимися функциями, что естественно при малых углах (β) наклона зоны субдукции. Благодаря присутствию воды в мантийном клине вязкость его материала может быть очень мала (Жарков, 2012), $\eta_c = 3 \times 10^{18}$ Па·с и менее. Примем величину k_x – волнового числа – такой, что пространственный период $[(2 \times \pi) / k_x]$, разделяющий соседние восходящие конвективные потоки в мантийном клине, равен среднему наблюдаемому расстоянию между соседними геолого-тектоническими зонами, параллельными Уральскому палеовулканическому хребту, изображенными на рис. 1 косой штриховкой (Порфирьев, 1982), т.е. $[(2 \times \pi) / k_x] = 300$ км. Считая $\xi = 20$, что соответствует энергии активации $E^* = 240$ кДж/моль и активационному объему $V^* = 8$ см³/моль (Жарков, 2012), угол поддвига $\beta \sim 10^\circ$ субдуктирующей литосферы Русской палеоплиты под литосферу Уральского палеоокеана (Западно-Сибирскую плиту) (литосферные плиты в восточном направлении субдуктируют полого, например, плита Наска под углом 20 – 30° (Barazangi et al., 1976)) и подставляя приведенные выше значения других параметров,

входящих в (19), находим распределения γ как функции x при различных скоростях субдукции, показанные на рис. 5. Видно, что инкремент γ положителен (т.е. конвекция может проявляться) при $V > 5 \text{ см/год}$, а при $V \sim 6 \text{ см/год}$ конвектирующая зона занимает диапазон расстояний $(x_2 - x_1) \sim 10^3 \text{ км}$ от горного пояса. Эта величина хорошо согласуется со средней широтной протяженностью геолого-тектонических зон Западной Сибири (рис. 1) и, следовательно, дает оценку скорости палеосубдукции в области восточнее Уральского палеовулканического пояса (современный Уральский хребет). Эта оценка практически не зависит от принятой средней вязкости η_c , поскольку движущий конвекцию перепад температуры $(T_{max} - T_m)$, согласно формуле (5), пропорционален η_c , но, с другой стороны, чем больше η_c , тем труднее возбудить конвекцию. Это видно из формулы (19), где три последних слагаемых, описывающих конвекцию, очень слабо или вообще не зависят от η_c , а первое слагаемое, описывающее термическую неустойчивость, мало при $\eta_c < 3 \times 10^{18} \text{ Па с}$.

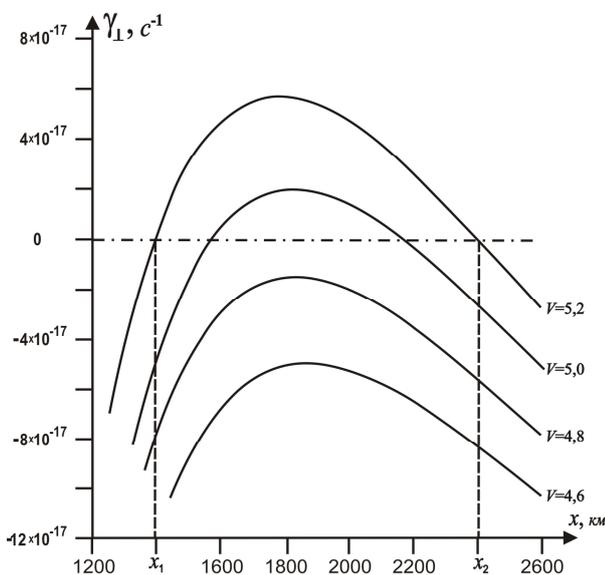


Рис. 5. Инкременты γ конвективной неустойчивости в субдукционном мантийном клине как функции горизонтального расстояния x (в км) от Уральского палеовулканического пояса при различных скоростях V (в см/год) палеосубдукции. В интервале $x_1 < x < x_2$ положительных γ можно ожидать скорость конвективного потока нагретого вещества в мантийном клине Русской палеоплиты $V \sim 6 \text{ см/год}$

Обсуждение результатов исследований

Изложенная методика может представлять некоторый интерес для геофизиков, занимающихся изучением глубинного строения мантии в зонах субдукции, т.к. развивает определенный подход к геодинамике в зонах субдукции. В этой статье обсуждаются две основные темы: поток в мантийном клине и конвективная неустойчивость в нем. Выдвинутая нами идея о том, что потоком за счет вязкости генерируется достаточно тепла, может быть обоснована следующим образом. В частности, нужно отметить, что вопрос о прогреве холодного субдуцирующего блока в нашей работе не затрагивается. Он в принципе уже решен в статье McKenzie (1969). Именно субдуцирующий блок прогревается кондуктивной теплопроводностью из вмещающей мантии и к глубине 700 км практически полностью размягчается. Мы также учитывали дополнительный диссипативный нагрев в мантийном клине, где максимум температуры достигается вблизи верхней грани субдуцирующей плиты, над верхней гранью. Без учета конвекции в мантийном клине этот дополнительный нагрев, по сравнению с работой (McKenzie, 1969), несколько сильнее бы прогрел субдуцирующий блок, но благодаря конвекции диссипативное тепло уносится вверх (там, где инкремент конвективной неустойчивости положителен, т.е. где конвекция действительно развивается). При угле поддвигания β субдуцирующего блока Русской палеоплиты порядка 10° горизонтальная протяженность области, где еще возможна конвекция, составляет немного более 1000 км при скорости около 5 см/год.

Кроме того, выделенная нами система субпараллельных структур на территории Западно-Сибирской плиты объясняется как действие конвективных вихревых структур мантии вокруг зоны субдукции. Безусловно, могут быть и некоторые другие предположения на этот счет. Приведем краткую сводку публикаций на эту тему: McKenzie, 1969; Schubert, Turcotte, Olson, 2001; Turcotte, 2002; Karig, 1971. Однако подтверждением изложенного нами механизма взаимодействия конвективных мантийных вихрей, про-

явившихся в приповерхностных геологических структурах, является то, что подобные структуры были обнаружены и в других районах субдукции Мирового океана (Karig, 1971).

Заключение

Таким образом, можно считать, что скорость палеосубдукции Русской палеоплиты с учетом расстояния до Уральского палеовулканического пояса может быть заметно ниже полученного значения $V \sim 5 - 6$ см/год только при угле субдукции $\beta \ll 10^\circ$. Мы попытались сравнить полученные результаты расчетов с независимыми данными глубинных геофизических разрезов (Петров и др., 2001; Павленкова и др., 2014), пересекающих Уральский хребет и Западную Сибирь, чтобы выяснить полученный ими угол наклона погружения (палеосубдукции) Русской плиты. Результаты таких исследований приведены на рис. 6 (Павленкова, 2014).

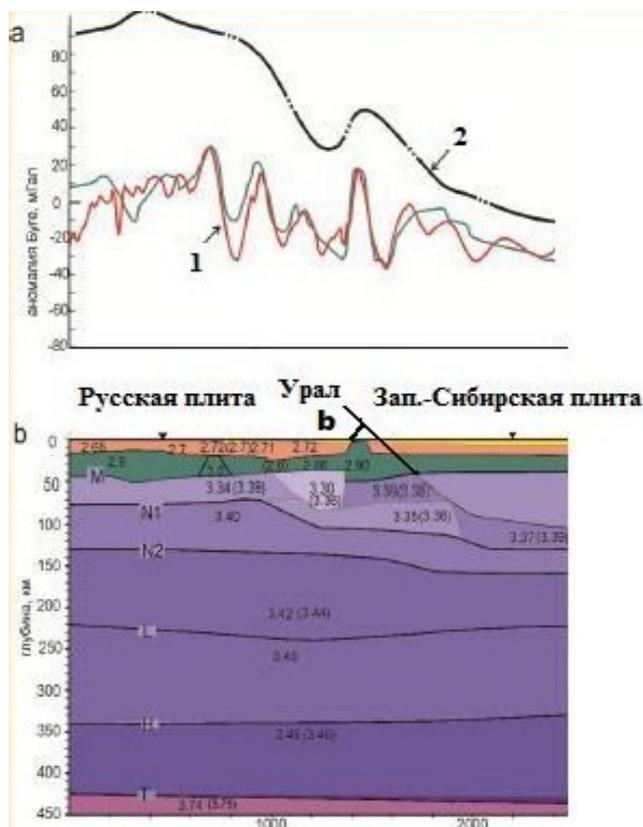


Рис. 6. Фрагмент глубинного геофизического разреза (по сейсмическим и гравитационным данным) по профилю «Кварц» в зоне сочленения Русской и Западно-Сибирской плит (Павленкова и др., 2014), показывающий: а – кривые измерен-

ного и расчетного гравитационного поля, представленного в редукции Буге: 1 – (кривая коричневого цвета) – наземные измерения гравитационного поля вдоль профиля «Кварц»; 1 – (кривая серого цвета) – результаты решения прямой задачи гравиразведки по профилю «Кварц»; 2 – (кривая черного цвета) – результаты расчета сглаженного гравитационного поля по профилю «Кварц», по данным альтиметрических аномалий, измеренных на космических аппаратах. б – глубинный разрез по профилю «Кварц», на котором видно наклонное погружение литосферного слоя Русской плиты (между нижней границей земной коры (M) – Мохоровичича и границей (N1) литосферы) под Западно-Сибирскую плиту, трактуемое как остаточные фрагменты палеомантийного клина, возникшего при палеосубдукционном погружении Русской палеоплиты под Восточно-Сибирскую в районе зоны расположения Уральского палеоокеана в палеозойский период эволюции Земли. На глубинном разрезе цифрами обозначена плотность горных пород ($г/см^3$) различных слоев земной коры и верхней мантии: M – граница Мохоровичича, являющаяся нижней границей («подошвой») земной коры; граница N1 литосферного слоя мантии; граница N2 астеносферного слоя мантии; L, H, T – другие более глубокие границы слоев разного плотностного состава верхней мантии. На данном геофизическом разрезе вертикальный и горизонтальный масштабы разные и поэтому при рассмотрении статьи необходимо ввести некоторый коэффициент пропорциональности, позволяющий из угла (b), изображенного на рисунке, вычислить истинный угол наклона (β) Русской плиты в настоящий геологический период эволюции Земли. Истинный угол наклона (β) Русской плиты под Западно-Сибирскую в настоящее время составляет около 8° по данным наших расчетов с учетом косинусоидальной поправки за неортогональность направления профиля «Кварц» к линии простирания гребня Уральского хребта

Из рис. 6 хорошо видно, что экспериментально определенный по геофизическим (сейсмическим, гравитационным) данным угол наклона современной литосферы Русской плиты (слой между границей Мохоровичича – M и границей – N1) составляет в среднем не более 10° , что может свидетельствовать в пользу правильности проведенных в статье расчетов угла наклона палеосубдукционной зоны Русской палеоплиты. Этот разрез палеосубдукционной зоны (рис.

б) по структуре гравитационного поля очень похож на разрез современной Тихоокеанской субдукционной зоны в районе Охотского моря, приведенный на рис. 3 (кривая 2). Конечно, за многие миллионы лет, прошедшие с палеозойского периода активизации палеосубдукционной зоны в зоне коллизии Русской и Восточно-Сибирской палеоплит, произошли определенные геолого-тектонические изменения в переходной зоне сочленения этих палеоплит, на территории Западно-Сибирской плиты (древняя территория, называвшаяся Уральским палеоокеаном), но тем не менее многие специалисты в области геологии считают, что на этом геофизическом разрезе (Павленкова и др., 2014) можно видеть остаточные фрагменты палеозойского палеосубдукционного погружения Русской палеоплиты. Кроме того, частота ω , согласно формуле (20), привязана к средней горизонтальной скорости $U_c = (D \times \beta) - \{C \times [(1 - \beta) / \text{tg } \beta]\} = 0$ в мантийном клине, и при малых углах наклона β зоны субдукции выполняется условие ($\gamma \gg \omega$). Это означает, что конвективные вихри Карига в целом мало смещаются в горизонтальном направлении: $(\omega/k_x) < 2 \times 10^{-2}$ см/год. Изложенная методика может помочь при проведении региональных поисковых и разведочных работ на углеводороды в аналогичных районах в окрестности расположения субдукционных и палеосубдукционных зон Земли.

Выводы

1. Конвективная зона, состоящая из трех пар конвективных вихрей Карига, в палеосубдукционном мантийном клине занимает диапазон расстояний около тысячи километров от Уральского палеовулканического пояса. Эта величина хорошо согласуется со средней широтной протяженностью трех геолого-тектонических зон Западной Сибири (около 300 км каждая), следовательно, дает возможность сделать оценку скорости палеосубдукции в области к востоку от Уральской палеовулканической дуги (современный Уральский хребет).

2. Конвективные вихри Карига, поскольку их может быть несколько при достаточно пологой зоне субдукции, располагают-

ся в мантии над субдуцирующим блоком и под надстиляющей литосферой. Иными словами, вихри Карига обычно расположены в мантийном клине, в нашем случае, при погружении (палеосубдукции) Русской палеоплиты, они были расположены к востоку от Уральского палеовулканического пояса на расстоянии 300 км друг от друга.

3. Скорость палеосубдукции Русской палеоплиты в палеозойский период эволюции Земли с учетом расстояния до Уральского палеовулканического пояса может быть заметно ниже полученного значения $V \sim 5 - 6$ см/год только при угле субдукции $\beta \ll 10^\circ$.

Библиографический список

- Арешев Е.Г., Гаврилов В.П., Донг Ч.Л., Зао Н., Попов О.К., Поспелов В.В., Шан Н.Т., Шнип О.А. Геология и нефтегазоносность фундамента Зондского шельфа. М.: Нефть и газ, 1997. 288 с.
- Гаврилов С.В. Исследование механизма формирования островных дуг и задугового раздвигания литосферы // Геофизические исследования. 2014. Т.15, №4. С. 35–43.
- Гайнанов А.Г., Пантелеев В.Л. Морская гравиразведка. М.: Недра, 1991. 214 с.
- Жарков В.Н. Физика земных недр. М.: Наука и образование, 2012. 384 с.
- Коган М.Г., Кукулиева Р.Ю. Изгибная жесткость литосферы Евразии // Доклады АН СССР. 1988. Т. 301, № 1. С.69–75.
- Павленкова Н.И., Павленкова Г.А. Строение земной коры и верхней мантии Северной Евразии по данным сейсмического профилирования с ядерными взрывами. М.: Геокарт-Пресс, 2014. 193 с.
- Петров А.В. Обработка данных гравиметрии по геотраверсу Уралсейс с использованием компьютерной технологии «КОСКАД 3D» // Глубинное строение и геодинамика Южного Урала. Тверь: Изд-во «ГЕРС», 2001. С. 79–84.
- Порфирьев В.В. Особенности глубинного строения земной коры и теоретические обоснования неорганического генезиса нефти. Киев: Наукова думка, 1982. 328 с.
- Сейфуль-Мулюков Р. Нефть и газ: глубинная природа и ее прикладное значение. М.: Торус Пресс, 2012. 216 с.
- Ступак В.М., Берзин Р.Г. Структурные, кинематические и динамические характеристики Южного Урала по данным дифференциальной сейсморазведки // Глубинное строение и геодинамика Южного Урала. Тверь: Изд-во «ГЕРС», 2001. С. 43–51.

Barazangi M., Isacks B.L. Spatial Distribution of the Earthquakes and Subduction of the Nazca Plate beneath South America // *Geology*. 1976. Vol.4. P. 686–692.

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

McKenzie D.P. Speculation on the consequences and causes of plate motions // *Geophys. J. Roy. Astron. Soc.* 1969. Vol. 18. P. 1–32.

Turcotte D.L., Schubert G. *Geodynamics*. Cambridge: Cambridge University Press, 2002. 448 p.

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

Geodynamic Model of the Deep Structure of a Paleo Subduction Zone on the East Edge of the Russian Paleo Plate and Distribution of the Oil and Gas Deposits

S.V. Gavrilov^a, A.L. Kharitonov^b

^aSchmidt Institute of Physics of Earth of the Russian Academy of Sciences
10 Bolshaya Gruzinskaya Str., Moscow 123242, Russia. E-mail: gavrilov@ifz.ru

^bPushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radio Wave Propagation of the Russian Academy of Sciences. 4 Kaluzhskoe Highway, Troitsk, Moscow 108840, Russia. IZMIRAN. E-mail: ahariton@izmiran.ru

Known hypothesis of M. Barazangi that quasilinear geological and tectonic zones represent the banded structures, which are parallel to the Urals paleo volcanic mountain belt was used. These zones can be in some interval of distances from a mountain paleo volcanic belt. On the size of this interval ($\sim 10^3$ km) and the periodical arrangement of quasilinear geological and tectonic zones (of about ~ 300 km width), the paleo subduction speed ($\sim 5 - 6$ cm a year) was estimated on the example of some Siberian regions.

Keywords: *geodynamic model; paleo subduction zone; oil and gas deposits.*

References

Areshv E.G., Gavrilov V.P., Dong Ch.L., Zao N., Popov O.K., Pospelov V.V., Shan N.T., Shnip O.A. 1997. *Geologiya i neftegazonosnost fundamenta Zondskogo shelfa* [Geology and oil and gas potential of the Zond shelf basement]. *Neft i Gas*, Moskva, p. 288. (in Russian).

Gavrilov S.V. 2014. *Issledovanie mekhanizma obrazovaniya ostrovnykh dug i zadugovogo razdviganiya litosfery* [Investigation of the mechanism of island arc formation and the back-arc spreading of the lithosphere]. *Geofizicheskie Issledovaniya*, 15(4): 35–43. (in Russian)

Gaynanov A.G., Panteleev V.L. 1991. *Morskaya gravirazvedka* [Sea gravity survey]. Nedra, Moskva, p. 214. (in Russian)

Zharkov V.N. 2012. *Fizika zemnykh neдр* [Physics of the Earth's Interiors]. Nauka i Obrazovanie, Moskva, p. 384. (in Russian)

Kogan M.G., Kukuliya R.Yu. 1988. *Izgibnaya zhestkost litosferi Evrazii* [Flexural rigidity of lithosphere of Eurasia]. *Doklady AN SSSR*, 301(1): 69–75. (in Russian)

Pavlenkova N.I., Pavlenkova G.A. 2014. *Stroenie kory i verkhney mantii Severnoy Evrazii po dannym seysmicheskogo 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], RosNedra, IFZ RAN, Geokart-Press, Moskva, p. 193. (in Russian)

Petrov A.B. 2001. *Obrabotka dannykh gravimetrii po geotraversu Uralseys s ispolzovaniem kompiyutornoy tekhnologii Koskod-3D* [Processing of gravity measurements data on a geotraverse Uralseys with use of computer technology Koskod-3D]. *In: Glubinnoe stroenie i geodinamika yuzhnogo Urala*. Izd. Gers, Tver, pp. 79–84. (in Russian)

Porfiriev V.V. 1982. *Osobennosti glubinnogo stroenia zemnoy kori i teoreticheskie obosnovaniya neorganicheskogo genezisa nefti* [Features of the deep structure of Earth's crust and theoretical justifications of inorganic genesis of the petroleum]. Kiev, Naukova Dumka, p. 328. (in Russian)

Seiful-Mulyukov R. 2012. *Neft i gas: glubinnaya priroda i ee prikladnoe znachenie* [Petroleum and gas: Inorganic abiotic nature and its applicability]. Torus Press, Moskva, p. 216. (in Russian)

Stupak V.M., Berzin R.G. 2001. Strukturnye, kinematicheskie i dinamicheskie kharakteristiki Yuzhnogo Urala po dannym differentsialnoy seysmorazvedki [Structural, kinematical and dynamical characteristics of Southern Urals on the data of differential seismic]. *In: Glubinnoe stroenie i geodinamika yujnogo Urala.* Izd. Gers, Tver, pp. 43-51. (in Russian)

Barazangi M., Isacks B.L. 1976. Spatial Distribution of the Earthquakes and Subduction of the Nazca Plate beneath South America. *Geology.* 4: 686–692.

Karig D.E. 1971. Origin and development of marginal basins in the Western Pacific. *Journal Geophysical Researches.* 76(11): 2542-2561.

McKenzie D.P. 1969. Speculation on the consequences and causes of plate motions. *Geophys. J. Roy. Astron. Soc.,* 18: 1-32.

Turcotte D.L., Schubert G. 2002. *Geodynamics.* Cambridge, Cambridge University Press, p. 448.

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