

УДК 550.311

ОЦЕНКА СКОРОСТИ СУБДУКЦИИ РУССКОЙ ПЛАТФОРМЫ ПОД СИБИРСКУЮ В ПАЛЕОЗОЕ ПО РАСПРЕДЕЛЕНИЮ ЗОН ВЫНОСА МАНТИЙНЫХ УГЛЕВОДОРОДОВ В ЗАПАДНОЙ СИБИРИ

© 2015 г. С.В. Гаврилов¹, А.Л. Харитонов²

¹ *Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, г. Москва, Россия*

² *Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН, г. Москва, Россия*

Вытянутые в меридиональном направлении нефтегазоносные районы Западной Сибири расположены с пространственным периодом ~300 км в области, имеющей по широте протяженность более 1000 км. Предполагается, что на исследуемой территории абиогенные углеводороды выносятся из верхней мантии к дневной поверхности механизмом мантийной конвекции, которая возникает на фоне движения мантийного материала при субдукции Русской платформы под Сибирскую в палеозое и совпадает по масштабу с пространственным периодом расположения нефтегазоносных районов. На основании этого предположения с привлечением дополнительных геофизических данных оценивается скорость имевшей место субдукции Русской платформы под Уральский хребет.

Ключевые слова: вынос абиогенных углеводородов, конвекция в мантийном клине, угол и скорость субдукции.

Введение

Особенностью локализации нефтегазоносных провинций Западной Сибири является периодичность их расположения на территории Западно-Сибирской низменности. Общая широтная протяженность всей нефтегазоносной области в исследуемом регионе несколько превышает 1000 км и включает четыре провинции – Березовский и Восточный газонасыщенные районы, Шаимский и Среднеобский нефтеносные, [Васильев, Горбенко, Миронов, 2006]. Названные районы, вытянутые в меридиональном направлении, в плане параллельны Уральскому хребту и расположены квазипериодически с пространственным периодом ~300 км. Асимметрия распределения гравитационной аномалии Буге поперек Урала и ряд геологических аргументов, приводимых в [Коган, Кукулиева, 1988], свидетельствуют о пододвигании Русской платформы под Сибирскую после формирования Уральского горного пояса в перми (300–250 млн. лет назад). Предполагая, что нефтегазоносные провинции образуются над восходящими конвективными потоками в мантийном клине, выносящими абиогенные углеводороды из мантии к дневной поверхности, можно оценить скорость субдукции Русской платформы в палеозое.

Описание модели

В качестве модели термомеханического состояния мантийного клина между подошвой Сибирской платформы и поверхностью субдуцирующей Русской, поддвигающейся под углом β со скоростью V , можно принять модель, представленную в

[Гаврилов, 2014]. В рамках этой модели материал мантийного клина считается однородной несжимаемой жидкостью с постоянным коэффициентом вязкости $\bar{\eta}$, равным его среднему значению, а температура определяется с учетом диссипативного нагрева в мантийном клине. Стационарное распределение абсолютной температуры T рассчитывалось в [Гаврилов, 2014] численно в приближении Буссинеска при $Pr \rightarrow \infty$. Результат расчета показывает, что температура достигает максимального значения T_{\max} вблизи поверхности субдуцирующей литосферы. Применительно к субдукции Русской платформы под Сибирскую при малом угле субдукции β величина T_{\max} может быть с достаточной точностью ($\sim 10\%$) аппроксимирована следующей аналитической формулой, учитывающей адвекцию тепла в мантийном клине [Гаврилов, Абботт, 1999]:

$$T_{\max} = T_m + \frac{\bar{\eta} V^2}{\kappa} \frac{1}{F + GVx/\chi}, \quad (1)$$

где $\kappa \approx 4 \cdot 10^5$ эрг/см \cdot с \cdot К – коэффициент теплопроводности; $\chi = \kappa/\rho c_p \approx 10^{-2}$ см 2 /с – коэффициент температуропроводности; $T_m \approx 1.5 \cdot 10^3$ – температура субсолидуса; $\rho \approx 3.3$ г/см 3 – плотность; $c_p \approx 1.2 \cdot 10^7$ эрг/г \cdot К – удельная теплоемкость при постоянном давлении; x – расстояние по горизонтали от острия мантийного клина. Безразмерные функции F и G в (1) при $8^\circ < \beta < 15^\circ$ имеют вид:

$$F = 8.295 \cdot \beta + 1.207, \quad G = 6.933 \cdot 10^{-3} \cdot \beta - 0.025 \cdot 10^{-3}. \quad (2)$$

Формулы (1)–(2) с точностью $\sim 10\%$ аппроксимируют температуру в мантийном клине, определенную численно. При их выводе предполагается, что границы мантийного клина изотермичны, и температура на них равна температуре субсолидуса T_m .

В работе [Гаврилов, 2014] построенная термомеханическая модель мантийного клина исследовалась на двумерную термическую и конвективную неустойчивость. Первая возникает в связи с зависимостью коэффициента вязкости от температуры, которая (зависимость) не учитывалась при расчете невозмущенной термомеханической модели мантийного клина с диссипативным нагревом. Конвективная неустойчивость также отчасти связана с зависимостью вязкости от температуры, но при расчете неустойчивости зависимость вязкости от температуры учитывалась в [Гаврилов, 2014] усредненно, а именно, множитель, определяющий температурную зависимость вязкости, считался равным его среднему значению. Было показано, что инкремент γ_{\perp} термической и конвективной неустойчивости в виде валов переменной толщины, ориентированных поперек субдукции, является плавно меняющейся функцией горизонтальной координаты x и определяется формулой

$$\gamma_{\perp} = 4\bar{\eta}\xi \frac{(D - Ct/2)^2}{x^2 \rho c_p T} + \frac{\alpha \rho g x^3 T k_x^2}{\bar{\eta}(x^2 k_x^2 + \lambda^2)^2} + 16\bar{\eta} \frac{\xi U k_x^2 \lambda^2 (D - Ct/2)}{\rho c_p T (x^2 k_x^2 + \lambda^2)^2} - \frac{x^2 k_x^2 + \lambda^2}{x^2} \chi, \quad (3)$$

где $\xi = (E^* + pV^*)/RT$ – показатель степени в экспоненциальной зависимости вязкости от температуры; E^* и V^* – энергия и объем активации; R – универсальная газовая постоянная; константы $D = V(\beta \cos \beta - \sin \beta)/(\beta^2 - \sin^2 \beta)$ и $C = -V\beta \sin \beta/(\beta^2 - \sin^2 \beta)$ соответствуют условиям прилипания материала мантийного клина к литосферным плитам; $t = \text{tg} \beta$; $\alpha = 3 \cdot 10^{-5}$ 1/К – коэффициент теплового расширения; g – ускорение силы тяжести; $T' = (T_{\max} - T_m)/t$, $\lambda = \pi/\text{tg} \beta$, $U' = (D(\sin \beta \cos \beta + \beta) - C \sin^2 \beta)/\text{tg} \beta$; $T = (T_{\max} + T_m)/2$ – средняя температура в вертикальном сечении мантийного клина;

k_x – волновое число, соответствующее пространственному периоду $2\pi/k_x$ восходящих конвективных течений в мантийном клине.

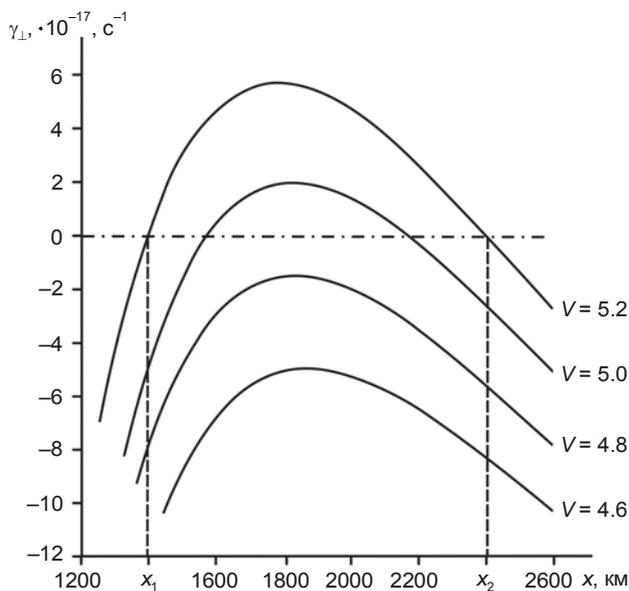
Первое слагаемое в (3) не зависит от k_x и описывает термическую неустойчивость, возникающую из-за зависимости коэффициента вязкости от температуры и существенную на малых расстояниях x от желоба, в который погружается субдуцирующая литосферная плита. Остальные слагаемые в (3) соответствуют конвективной неустойчивости, вызываемой вертикальным перепадом температуры $T_{\max} - T_m$ в мантийном клине.

Субдукция Русской платформы под Сибирскую характеризуется двумя неизвестными величинами – скоростью пододвигания V и углом субдукции β , – которые не могут быть определены по данным сейсмических и геодезических наблюдений, поскольку в настоящее время субдукция не происходит. По результатам исследований на пересекающем Уральский хребет профиле “Кварц” [Павленкова, Павленкова, 2014] установлено, что в верхней мантии под Западной Сибирью имеется наклонная аномалия плотности, падающая в глубину под углом $\sim 8^\circ$ в направлении, перпендикулярном хребту. Если эту плотностную аномалию интерпретировать как остаточный фрагмент Русской платформы, субдуцировавшей в палеозое под Западную Сибирь, то угол субдукции β можно оценить в $\sim 8^\circ$.

В работе [Жарков, 2012] отмечается, что вязкость материала мантийного клина из-за присутствия поднимающейся из субдуцирующей плиты воды может быть очень мала ($\bar{\eta} \leq 3 \cdot 10^{18}$ Па·с), а для энергии и объема активации принимаются значения $E^* = 240$ кДж/моль и $V^* = 8$ см³/моль. В таком случае среднее значение ξ может быть принято равным ≈ 20 .

Результаты и обсуждение

Значения инкремента γ_\perp конвективной неустойчивости в мантийном клине, определенные по (3) для перечисленных выше числовых значений физических параметров и $2\pi/k_x = 300$ км, изображены на рисунке при различных значениях скорости субдукции V .



Инкременты γ_\perp конвективной неустойчивости в мантийном клине как функции горизонтального расстояния x от острия мантийного клина при различных скоростях субдукции V , см/год.

В интервале $x_1 < x < x_2$ положительных γ_\perp можно ожидать выноса углеводородов из мантийного клина к дневной поверхности в Западной Сибири при $V \sim 5.2$ см/год

Результаты расчета по формулам (1)–(3) показывают, что при малом коэффициенте вязкости ($\bar{\eta} \leq 3 \cdot 10^{18}$ Па·с) роль термической неустойчивости незначительна, а конвективная неустойчивость практически не зависит от принятого $\bar{\eta}$. Последнее связано с тем, что вызывающий конвекцию перепад температуры $T_{\max} - T_m$ формируется благодаря диссипативному тепловыделению и пропорционален $\bar{\eta}$. Но, с другой стороны, чем больше $\bar{\eta}$, тем труднее возбудить конвекцию. Слабая зависимость конвективной неустойчивости от средней вязкости $\bar{\eta}$ следует из (3), где $\bar{\eta}$ в правой части входит во втором и третьем слагаемых как в числитель, так и в знаменатель.

Следует отметить, что при $\bar{\eta} \leq 3 \cdot 10^{18}$ Па·с роль зависимости коэффициента вязкости от температуры невелика и для конвективной неустойчивости, и кривые $\gamma_{\perp}(x)$ при $\xi \approx 20$ и $\xi \approx 0$ совпадают с точностью $\sim 5\%$.

Из рисунка следует, что неустойчивость начинает проявляться (т.е. $\gamma_{\perp} > 0$) при V , превышающем некоторое критическое значение $V_{\text{кр}}$, лежащее в интервале от 4.8 см/г до 5.0 см/г; при $V \sim 5.2$ см/год горизонтальная протяженность области неустойчивости $x_2 - x_1$ достигает $\sim 10^3$ км. При этом считается, что пространственный период $2\pi/k_x = 300$ км конвекции должен совпадать с пространственным периодом расположения нефтегазоносных районов. Это условие основывается на предположении, что нефтяные и газовые месторождения образуются над восходящими конвективными потоками, выносящими к дневной поверхности абиогенные углеводороды верхней мантии.

Выводы

Полученная оценка скорости субдукции Русской платформы под Сибирскую в палеозое, составляющая ~ 5.2 см/год, по порядку величины согласуется с наблюдаемой скоростью субдукции Индо-Австралийской континентальной плиты под Евразийскую ($V \sim 6.1$ см/год) [Schubert, Turcotte, Olson, 2001, табл. 2.4]. Согласно рис. 2.32,d названной монографии, наблюдается выраженная корреляция между скоростью субдукции литосферной плиты и отношением длины желобов на этой плите к её периметру независимо от угла субдукции и доли континентальной коры на плите. С учетом значительной протяженности Уральского хребта Русская платформа, по-видимому, вполне вписывается в отмеченную корреляционную зависимость, поскольку отношение длины желоба (т.е. меридиональной протяженности Уральского хребта) к периметру Русской платформы не уступает отношению длины области субдукции Индо-Австралийской плиты в Гималаях к её периметру.

Литература

- Васильев В.Г., Горбенко Г.Л., Миронов Ю.П. Месторождение природного газа в Сибири // Газовая промышленность. 2006. № 5. С.33–40.
- Гаврилов С.В. Исследование механизма образования островных дуг и задугового раздвигания литосферы // Геофизические исследования. 2014. Т. 15, № 4. С.35–43.
- Гаврилов С.В., Абботт Д.Х. Термомеханическая модель тепло- и массопереноса в окрестности зоны субдукции // Физика Земли. 1999. № 12. С.3–12.
- Жарков В.Н. Физика земных недр. М.: Наука и образование, 2012. 384 с.
- Коган М.Г., Кукулиева Р.Ю. Изгибная жесткость литосферы Евразии // Докл. РАН. 1988. Т. 301, № 1. С.69–75.

Павленкова Н.И., Павленкова Г.А. Строение коры и верхней мантии Северной Евразии по данным сейсмического профилирования с ядерными взрывами. М.: ГЕОКАРТ-ПРЕСС, 2014. 192 с.

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

Сведения об авторах

ГАВРИЛОВ Сергей Владиленович – доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник, Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН. 123242, Москва, ул. Большая Грузинская, д. 10, стр. 1. Тел.: 8(495) 254-53-30. E-mail: gavrilov@ifz.ru

ХАРИТОНОВ Андрей Леонидович – кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник, Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН. 142190, Москва, Троицкий АО, Калужское шоссе, д. 4. Тел.: 8(495) 851-02-95. E-mail: ahariton@izmiran.ru.

VELOCITY OF THE SUBDUCTION OF THE RUSSIAN PLATFORM UNDER THE SIBERIAN ONE IN THE PALEOZOIC BY THE DISTRIBUTION OF MANTLE HYDRO-CARBON UPWELLING ZONES IN WESTERN SIBERIA

S.V. Gavrilov¹, A.L. Kharitonov²

¹ *Schmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

² *Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radio Wave Propagation,
Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

Abstract. Gas- and oil-bearing provinces in the Western Siberia are aligned nearly longitudinally with a spatial period of ~300 km. Their total latitudinal range exceeds 10^3 km. It is assumed that non-organic hydrocarbons are transported to the Earth's surface from the upper mantle by mantle convection formed on the background of total mantle material motion in result of subduction of the Russian platform under the Western Siberia in the Paleozoic. That convection coincides in scale with the spatial period of the gas- and oil-bearing provinces. Based on this assumption and with the use of other geophysical data, the subduction velocity of the Russian platform under the Urals can be constrained.

Keywords: non-organic hydrocarbons transport, mantle wedge convection, subduction angle and velocity.