

О. Г. СОРОХТИН, С. А. УШАКОВ,
член-корреспондент АН СССР В. В. ФЕДЫНСКИЙ

ДИНАМИКА ЛИТОСФЕРНЫХ ПЛИТ И ПРОИСХОЖДЕНИЕ МЕСТОРОЖДЕНИЙ НЕФТИ

Теория глобальной тектоники, или тектоники подвижных литосферных плит, позволяет по-новому подойти к проблеме образования нефтяных месторождений. Известно (¹⁻⁴), что литосфера разбита на отдельные плиты, перемещающиеся друг относительно друга по поверхности Земли. В тех районах, где литосферные плиты раздвигаются и происходит их наращивание за счет охлаждения и кристаллизации вещества астеносферы, возникают рифтовые зоны и срединно-океанические хребты. Там, где литосферные плиты надвигаются друг на друга, образуются геосинклинальные пояса. Причиной перемещения литосферных плит являются астеносферные течения, возникающие за счет плотностной конвекции в мантии, которая, в свою очередь, генерируется химико-гравитационной дифференциацией мантийного вещества на границе с ядром — мощным процессом, приводящим к расслоению Земли и росту ядра за счет мантии.

С позиций теории глобальной тектоники образование нефти происходит в результате возгонки и термоллиза биогенных веществ, затаянутых вместе с океаническими осадками в зону поддвига литосферных плит. Впервые эта идея качественно и без каких-либо оценок была высказана Х. Хедбергом в 1970 г. (⁵). Ниже рассмотрен более подробно и на уровне количественных оценок возможный механизм образования нефти с точки зрения теории глобальной тектоники.

В зоне поддвига (в зоне Бениоффа) на погружающуюся в мантию плиту оказывает сильное давление надвигаемая на нее плита (см. рис. 1). В результате в пограничных слоях между литосферными плитами возникают значительные напряжения трения и сдвиговые деформации. Поскольку эффективная вязкость океанической коры (в основном состоящей из серпентинитов и осадочно-вулканогенной толщи) значительно ниже вязкости литосферы, то породы коры, попав на контакт между сдвигающимися жесткими литосферными плитами, играют роль смазки. В этом случае основная доля тепла, генерируемого за счет диссипации энергии вязкого трения, будет выделяться в слое океанической коры, затаятой в зону Бениоффа. Удельная тепловая энергия q , выделяемая единицей массы океанической коры при опускании поддвигаемой литосферной плиты на глубину H , определяется выражением

$$q = \frac{H^2 g \operatorname{tg} \varphi}{2h \sin \beta}, \quad (1)$$

где g — ускорение силы тяжести; φ — угол внутреннего трения пород коры; h — мощность океанической коры; $\beta = 45^\circ + \varphi/2$ — угол падения зоны Бениоффа (см. рис. 1).

Например, под Курильскими островами $\beta = 52^\circ$, следовательно, $\varphi = 14^\circ$ и $\operatorname{tg} \varphi = 0,25$. Принимая $h = 6$ км, получим, что при опускании океанической коры в зону поддвига литосферных плит на глубину $H = 100$ км выделяется около 600 кал/г тепла. Этого тепла вполне достаточно не только для разогрева самой океанической коры до температуры плавления пород, но

и для прогрева всей толщи литосферной плиты над зоной Бениоффа. Вынос тепла термальными водами, образующимися при дегидратации пород коры, безусловно значительно снижает температуру в зоне Бениоффа и, по-видимому, стабилизирует ее на уровне анатексиса.

Как следует из формулы (1), выделение тепла увеличивается с глубиной, поэтому разогрев пород и осадков в начале зоны поддвига еще невелик, и, следовательно, всегда должен существовать участок зоны, на котором устанавливается оптимальный температурный режим для возгонки

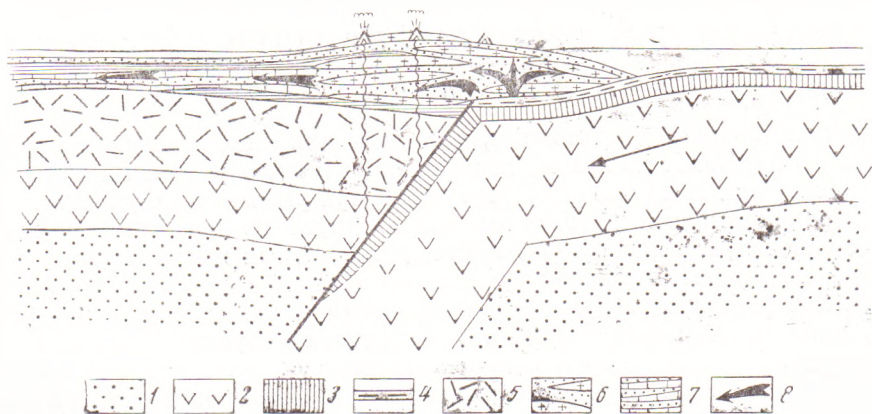


Рис. 1. Схема поддвига литосферных плит и путей миграции нефти. 1 — астеносфера, 2 — литосферная плита, 3 — океаническая кора, 4 — пелагические осадки, 5 — континентальная кора, 6 — осадочно-вулканогенная толща эвгеосинклинальной зоны, 7 — осадочный чехол краевой зоны континентальной платформы, 8 — пути миграции нефти и газа

и термализа биогенных веществ, рассеянных в слое пелагических осадков поддвигаемой плиты ($100 \div 400^\circ$). При этом, благодаря недостатку свободного кислорода в пелагических осадках, окисление биогенных веществ в процессе термализа происходить не будет, а возникнут углеводороды состава C_nH_{2n+k} .

Попадающие в зону поддвига пелагические (преимущественно глинистые) осадки всегда насыщены поровыми и кристаллизационными водами (до 50%). При разогреве пород эти воды резко активизируются, превращаясь в условиях закритических давлений ($P > 219$ атм.) в термальные флюиды. При высоких температурах (в интервале от 100 до 400°) должны переходить в парообразное или флюидообразное состояние и углеводороды — продукты термализа биогенных веществ. Под влиянием возникающего за счет перегрева избыточного давления водные флюиды вместе с образовавшимися углеводородами будут выжиматься из зоны поддвига в область развития осадочно-вулканогенной толщи, перекрывающей фронтальную (эвгеосинклинальную) часть напозлающей плиты (см. рис. 1).

Прорвавшиеся в осадочно-вулканогенную толщу перегретые пары воды и углеводородов также будут находиться под избыточным давлением. Если теперь в этой части разреза существуют водоупорные (экранирующие) слои, а такая ситуация обычно и наблюдается в геосинклинальных толщах, то благодаря этому давлению нефтегазовые фракции начнут мигрировать вдоль водопроницаемых слоев в сторону от места их подъема над зоной Бениоффа. Часть углеводородов при этом, безусловно, будет теряться, но какая-то часть окажется выжатой в область развития миогеосинклинальных отложений и в область будущих предгорных прогибов.

Несмотря на появление нефти из зоны поддвига литосферных плит, расположенной непосредственно под эвгеосинклиналию, накопления больших количеств нефти в этих районах происходить не может по двум причинам. Во-первых, в зоне Бениоффа в процессе формирования геосинклинали всегда существует избыточное давление перегретых водяных

флюидов, активно вытесняющих из эвгеосинклинали все способные к миграции жидкости, в том числе и нефть, которая проходит эти участки лишь «транзитом» (в схеме образования нефти эту зону можно назвать транзитной). Во-вторых, на орогенной стадии развития геосинклинали именно эвгеосинклинальные зоны подвергаются не только пликативным, но и наибольшим дизъюнктивным деформациям, дренирующим практически всю осадочную толщу в этих районах (механизм орогенных движений с точки зрения теории глобальной тектоники изложен в ⁽⁸⁾).

По мере удаления от зоны Бениоффа температура и давление паров падают, вода и нефть конденсируются, а скорость их миграции постепенно замедляются. Естественно ожидать, что именно на этих расстояниях в аккумулятивной зоне миогеосинклиналей и краевых частей платформ начнут постепенно накапливаться залежи нефти и газа, формируя будущие нефтегазоносные месторождения. Оценить расстояние аккумулятивной зоны от места образования первичной нефти (от эвгеосинклинали) можно, например, по закону Дарси для расхода жидкости, фильтрующейся через пористую среду:

$$L^2 = \frac{K \Delta P}{\eta m} t, \quad (2)$$

где L — расстояние, на которое фильтруется вязкая жидкость за время t ; K — проницаемость пористой среды; ΔP — перепад давлений,двигающий фильтрующуюся жидкость; m — коэффициент пористости. Избыточное давление перегретого пара в термальной зоне поддвига примерно равно гидростатическому давлению пород, перекрывающих эту зону, т. е. $\Delta P_0 \approx 3 \div 6$ кбар. Благодаря конечной проницаемости пород, давление этого пара в осадочно-вулканогенной толще, расположенной над термальной зоной, будет значительно ниже. По порядку величины можно принять $\Delta P \approx 0,1$ кбар $= 10^8$ дин/см² (этому перепаду давлений соответствует превышение уровня эвгеосинклинали над аккумулятивной зоной всего на 400 м). Примем также $K = 0,05$ дарси $= 5 \cdot 10^{-10}$ см², $m = 0,1$, $\eta = 0,1 \div 10$ пуаз; тогда по формуле (2) найдем, что за время, соизмеримое с периодом тектонического цикла $t = 10^8$ лет $= 3 \cdot 10^{15}$ сек. нефть может мигрировать на расстояния порядка от 120 км (тяжелые фракции) до 1200 км (легкие фракции).

Выполненные оценки, безусловно, очень приближенны и, скорее, показывают возможности описываемого механизма миграции нефти, чем определяют количественную сторону процесса. Однако из этого расчета вытекает, что должна наблюдаться приуроченность основных нефтегазоносных месторождений к предгорным прогибам и краевым участкам платформ, а также зональность распределения фракций: чем дальше от геосинклинальной зоны сформировалось месторождение, тем большую роль в нем должны играть легкие и газовые фракции, характеризующиеся низкими значениями вязкости η (если, конечно, картина не окажется искаженной последующей утечкой этих фракций).

Рассмотренная модель не противоречит предположению, что нефть имеет биогенное происхождение, хотя она и появляется снизу, просачиваясь под большим давлением через породы фундамента эвгеосинклинальной осадочно-вулканогенной толщи. Поэтому остатки молодой нефти можно встретить и в сколь угодно древних породах (в том числе и кристаллических). Происходящая под избыточным давлением латеральная миграция нефти также может привести к насыщению ею даже терригенных (неморских) отложений и более древних осадочных толщ в предгорных прогибах и краевых зонах платформ. В частности, так называемая девонская нефть Волго-Уральской области с этой точки зрения может оказаться более молодого — пермского возраста. Понятным становится появление признаков нефти в фумаролах молодых вулканических поясов геосинклинального типа, например, на Камчатке, а также обнаружение нефти

в структурах некоторых островных дуг, например на о-вах Тонга. Рассмотренная схема позволяет понять и механизм мобилизации рассеянного биогенного вещества и микронепти в осадках, в которых образуются и через которые фильтруются термальные воды. Это, прежде всего, процесс активной «промывки» слоев перегретым паром и горячей водой, уменьшающими благодаря сильному прогреву пород капиллярное взаимодействие нефти со стенками пор и срывающими под большим напором молекулярные пленки биогенных веществ с поверхности гранул и зерен осадочной породы. Избыточное давление, вызывающее направленную миграцию нефти, постоянно поддерживается в течение всего времени развития геосинклинали за счет мобилизации и перегрева поровых вод пелагических осадков и вод, освобождающихся при дегидратации пород океанической коры⁽⁷⁾, затягиваемых в зону поддвига литосферных плит (в зону Бениоффа).

Рассмотрим теперь мощность описанного процесса нефтеобразования. Будем считать, что в геохимии осадков биогенное вещество начало играть заметную роль только около $1 \cdot 10^9$ лет тому назад, причем с тех пор содержание этих веществ в пелагических осадках линейно возрастало вплоть до современного уровня. Объем осадков, затянутых за этот промежуток времени, легко определить, используя принцип актуализма и исходя из значения средней мощности осадочного слоя в океанах $h_s = 0,5$ км, величины средней скорости поддвига литосферных плит $v_l \approx 7$ см/год и длины всех развивающихся в настоящее время геосинклинальных зон $L_g \approx 40$ тыс. км. Такая оценка показывает, что за отмеченное время $1 \cdot 10^9$ лет под геосинклинальные зоны погрузилось $1,4 \cdot 10^{24}$ см³, или около $2,8 \cdot 10^{24}$ г пелагических осадков. Содержание биогенных веществ в современных океанических осадках колеблется от 0,25 до 0,9%⁽⁸⁾ и в среднем, по-видимому, близко к 0,5%. Отсюда следует, что за принятый период активной биопродуктивности Земли в зоны поддвига литосферных плит было затянута $\sim 7 \cdot 10^{21}$ г биогенных веществ, что более чем в 10^3 раз (!) больше всех геологических запасов нефти ($1,5 \cdot 10^{12}$ т = $1,5 \cdot 10^{18}$ г) и соизмеримо с массой органического углерода в земной коре ($3,5 \cdot 10^{15}$ т = $3,5 \cdot 10^{21}$ г)⁽⁹⁾. Поэтому, даже приняв коэффициент полезного действия описанного механизма образования нефти и газа равным 0,1%, что явно занижено, все же можно с его помощью объяснить происхождение всех геологических запасов нефти.

Рассмотренный процесс может быть не единственным механизмом образования нефтяных месторождений, не исключена возможность образования таких месторождений благодаря действию других процессов, ранее описанных в литературе. По-видимому, роль каждого из этих процессов определяется конкретной геологической обстановкой.

Авторы признательны А. А. Геодекяну, А. А. Трофимуку и Э. Э. Фотиади за обсуждение проблемы и полезные советы.

Институт океанологии им. П. П. Ширшова
Академии наук СССР
Москва

Поступило
19 IX 1973

Московский государственный университет
им. М. В. Ломоносова

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- ¹ B. Isacks, J. Oliver, L. R. Sykes, J. Geophys. Res., **73**, 18 (1968). ² X. Le Pichon, J. Geophys. Res., **73**, 12 (1968). ³ В. П. Мясников, С. А. Ушаков, В. В. Федынский, Вестн. Московск. ун-в., в. геол., № 3 (1971). ⁴ О. Г. Сорохтин, Физика Земли, № 7 (1972). ⁵ H. D. Hedberg, Am. Assoc. Petroleum Geologists Bull., **54**, 1 (1970). ⁶ О. Г. Сорохтин, Физика Земли, № 7 (1973). ⁷ О. Г. Сорохтин, Л. В. Дмитриев, Г. Б. Удинцев, ДАН, **199**, № 2 (1971). ⁸ Ю. А. Богданов, А. П. Лисицын, Е. А. Романкевич, В сборн. Органическое вещество в современных и ископаемых осадках, «Наука», 1971. ⁹ Н. Б. Вассоевич, Природа, № 3 (1971).