

# **ФИЗИЧЕСКИЕ МЕХАНИЗМЫ ОБРАЗОВАНИЯ НЕФТЕГАЗОНОСНЫХ БАССЕЙНОВ И ЛОВУШЕК ДЛЯ УГЛЕВОДОРОДОВ**

Е.В. Артюшков  
ИФЗ РАН

## **ВВЕДЕНИЕ**

Одними из главных проблем в геологии нефти и газа и в бассейновом анализе являются установление механизма образования и характерных особенностей крупных нефтегазоносных бассейнов, а также выявление распределения во времени и природы быстрых изменений уровней воды (sea-level changes) в эпиплатформенных осадочных бассейнах. Исследования в области первой из этих проблем важны для поиска новых нефтегазоносных бассейнов, особенно на акваториях, где стоимость бурения весьма высока. Знание механизма образования бассейнов важно также для определения времени созревания углеводородов, путей их миграции, выявления наиболее перспективных районов и стратиграфических интервалов, где можно ожидать высокой концентрации залежей нефти и газа. Изменения глубины воды в эпиплатформенных бассейнах сопровождались большими перемещениями береговых линий, вблизи которых формировались многочисленные неструктурные, стратиграфические ловушки, вмещающие крупные запасы углеводородов. Зная природу вариаций палеоглубин в морском бассейне и то, как они развивались в пространстве и во времени, можно более точно определить местоположение неструктурных ловушек по глубине и на площади.

## **ПРИРОДА БЫСТРЫХ ИЗМЕНЕНИЙ ГЛУБИНЫ МОРЯ В ЭПИПЛАТФОРМЕННЫХ ОСАДОЧНЫХ БАССЕЙНАХ**

При анализе условий образования неструктурных ловушек особый интерес для исследователей представляют флуктуации глубины моря продолжительностью 1–3 млн лет с амплитудами до 100–200 м (колебания третьего порядка). С размывом шельфа, осушавшегося в процессе таких флуктуаций, связано образование многочисленных неструктурных ловушек. В такие эпохи в реках, текущих по осушившемуся шельфу, формировался русловой аллювий с высокими коллекторскими свойствами. Песчаные коллекторы отлагались также в мелководных условиях вблизи береговой линии. На подводных склонах потоки турбидитов формировали клиноформы, с которыми также

связаны многочисленные ловушки. Примером может служить ачимовский комплекс берриас-валанжинского возраста в Западной Сибири с крупными запасами газа, газоконденсата и нефти.

подавляющее большинство исследователей объясняют изменения глубины моря третьего порядка эвстатическими флуктуациями уровня Мирового океана [Наф, Al-Qahtani, 2005 и др.]. Поэтому флуктуации данного типа часто называют эвстатическими событиями. Детально анализируя строение опорных стратиграфических разрезов крайне мелководных отложений, мы показали, что в позднем кембрии, на основной части ордовика и в силуре амплитуда эвстатических событий в действительности не превышала нескольких десятков метров [Artyushkov, Chekhovich, 2001; Артюшков и др., 2008]. Более крупные изменения глубины моря третьего порядка, происходившие в эти эпохи, были обусловлены быстрыми поднятиями и погружениями коры на платформах, которые обычно считаются спокойными в тектоническом отношении.

В девоне значительные погружения коры произошли в Тимано-Печорском, Волго-Уральском, Прикаспийском и Восточно-Баренцевском нефтегазоносных бассейнах. При поиске в них неструктурных ловушек необходимо знать, как изменялся уровень океана в девонском периоде. Для установления этого нами были использован уникальный стратиграфический материал по девону детально разбуренной Московской синеклизы [Родионова и др., 1995]. В данную эпоху здесь происходило терригенно-карбонатное и/или карбонатное осадконакопление на очень малых глубинах (10–20 м). В таких условиях мощность осадков, накопившихся за короткие интервалы времени (~ 1 млн лет), почти точно соответствовала степени погружения коры либо подъема уровня Мирового океана за то же время.

Для оценки возможной амплитуды эвстатических событий была разработана математическая модель, описывающая изменения глубины воды под влиянием эвстатических флуктуаций на карбонатных платформах, испытывающих тектоническое погружение. Учитывались изостатическая реакция коры на изменения водной нагрузки и конечное время, необходимое для образования почв и карста на осушившемся шельфе. На двух этапах, в раннем живете и в раннем фамене, в Московской синеклизе имели место регрессии продолжительностью 1.5 млн лет. В эти же эпохи регрессии проявились в ряде других регионов, в частности в Тимано-Печорском бассейне, а также на мелководных карбонатных платформах Невады и пассивной окраины Южного Урала. Эти данные с

достаточно высокой вероятностью позволяют предположить понижения в указанные эпохи понижения уровня Мирового океана с амплитудами ~ 50 м. Как показало численное моделирование, проведенное на основе описанной модели, на остальной части девона эвстатические флуктуации третьего порядка не превышали 20–30 м.

Подробное рассмотрение показало также, что в Московской синеклизе скорость осадконакопления в девоне резко изменялась во времени, возрастая по всему бассейну на порядок в течение трех коротких интервалов продолжительностью 0.5–1 млн лет. Они относятся к самому началу эйфеля, ко второй половине раннего франа и к началу позднего франа. Эти ускорения осадконакопления следовали за короткими эпохами локального проявления вулканизма основного состава на Восточно-Европейской платформе. Синхронность эпох вулканизма и ускоренного осадконакопления указывает на их общую глубинную природу. Оба эти явления можно связать с поступлением в литосферу небольших объемов мантийного флюида. Вулканизм был обусловлен понижением температуры плавления в мантийной литосфере в присутствии флюида. Ускорение осадконакопления происходило при инфильтрации в нижнюю кору флюида, что катализировало переход габбро в более плотные гранатовые гранулиты. Погружение коры в платформенном осадочном бассейне, сильно неравномерное как по площади, так и во времени, представляет собой новое явление. Оно могло быть обусловлено быстрыми изменениями распределения течений в астеносфере, приносящих флюид в литосферный слой.

Анализируя с помощью описанной модели данные по опорному разрезу крайне мелководных отложений на Северном Тимане, нам удалось также установить, что среднего карбона по раннюю пермь эвстатические флуктуации уровня океана не превышали нескольких десятков метров [Артюшков, Чехович, 2011]. В связи с образованием и таянием ледяных щитов на Гондванском континенте в эту эпоху происходили значительные понижения уровня океана продолжительностью  $\leq 100\ 000$  лет. Такие короткопериодные эвстатические флуктуации не сопровождались существенным размывом осушившегося шельфа, и поэтому они не приводили к образованию стратиграфических ловушек.

Рассмотренные нами интервалы времени (поздний кембрий – девон и средний карбон – ранняя пермь) вместе составляют почти 80% продолжительности палеозоя (291 млн лет). На преобладающей части этого временного интервала крупные

эвстатические события не проявлялись. Лишь в самом конце ордовика имели место несколько кратковременных понижений уровня океана с амплитудами ~ 100 м, связанные, вероятно, с образованием ледяных щитов в Гондване. С другой стороны, в период с позднего кембрия по раннюю пермь в эпиплатформенных морских бассейнах наблюдались изменения палеоглубин за 1–3 млн лет, свидетельствующие об относительных изменениях уровня моря амплитудой до 100–200 м. Характерным примером может служить поднятие коры на ~ 200 м, происходившее в течение 3–4 млн лет в башкирском веке среднего карбона в западной части Восточно-Европейской платформы [Артюшков, Чехович, 2011]. На востоке платформы в эту эпоху сохранялись крайне мелководные условия, что указывает на тектоническую природу поднятия в ее западной части. Это поднятие было, по-видимому, обусловлено кратковременным воздействием на литосферу восходящего конвективного потока в мантии.

Полученные результаты свидетельствуют о необходимости коренного изменения методики поиска неструктурных ловушек для нефти и газа, образовавшихся в указанные эпохи. Многочисленные стратиграфические ловушки формировались вблизи береговых линий эпиконтинентальных морских бассейнов во время регрессий. Для надежного поиска в них залежей углеводородов необходимо знать, где в каждом бассейне береговые линии располагались в ту или иную эпоху. Обычно предполагается, что перемещения береговых линий ~ 100–200 км были обусловлены изменениями уровня океана. В таком случае прогноз расположения древних береговых линий в каждом бассейне осуществляется просто – если известны угол его палеосклона и отклонение для данной эпохи уровня океана по отношению к его среднему положению (см., например, [Артюшков, Чехович, 2008]). В действительности, на значительной части фанерозоя изменения глубины моря третьего порядка в осадочных бассейнах были обусловлены тектоническими движениями земной коры. Поэтому для надежного поиска залежей углеводородов в стратиграфических ловушках необходимо в первую очередь определять, в какие эпохи и в каких областях такие движения проявлялись в каждом конкретном бассейне.

#### МЕХАНИЗМ ОБРАЗОВАНИЯ НЕФТЕГАЗОНОСНЫХ БАССЕЙНОВ. СЕВЕРО-БАРЕНЦЕВСКАЯ И СЕВЕРО-ЧУКОТСКАЯ ВПАДИНЫ

Внутри континентов и на их окраинах расположен ряд осадочных бассейнов, где мощность осадков достигает 15–20 км. Примерами могут служить Восточно-

Баренцевская, Прикаспийская, Южно-Каспийская и Северо-Чукотская впадины. Вопрос о механизме образования таких структур является дискуссионным. Одни исследователи полагают, что они представляют собой результат заполнения осадками глубоководных впадин на океанической коре [Верба и др., 2001 и др.]. Другие связывают образование глубоких осадочных бассейнов с сильным растяжением континентальной коры [Тектоническая карта..., 1996 и др.]. В качестве причины образования глубоких осадочных бассейнов предлагался также переход габбро в нижней части континентальной коры в эклогиты, более плотные, чем мантийные перидотиты [Артюшков, 2010а и др.]. Скорости продольных волн в эклогитах примерно такие же, как в мантии. Поэтому по сейсмическим данным их помещают под разделом Мохо, но по своему составу они относятся к земной коре. В таких областях консолидированная кора на сейсмических профилях выглядит сильно утоненной. Вместе со слоем эклогитов, расположенным под разделом Мохо, она, однако, имеет мощность, характерную для континентальных платформ.

Знание природы коры и механизма ее погружения в глубоких осадочных бассейнах весьма важно для оценки их перспектив на нефтегазоносность. Крупные ресурсы углеводородов сосредоточены в первую очередь в тех бассейнах на континентальной коре, где имели место ее быстрые высокоамплитудные погружения, формировавшие на мелководном шельфе глубоководные впадины за один или несколько миллионов лет [Артюшков, 1993 и др.].

В последнее время большой интерес исследователей вызывает сверхглубокая Северо-Баренцевская впадина, в которой можно предполагать существование месторождений-гигантов. На рис. 1 представлен разрез осадочного чехла во впадине, построенный по данным высокоточного сейсмического профилирования. В глубокой, левой, части прогиба фундамент находится за пределами записи, достигающей глубины 16 км. Наиболее яркой отражающей границей на профиле является рефлектор  $\Pi_2$ . Он представляет собой резкое угловое несогласие типа эрозионного среза, сформировавшегося к раннему франу в начале позднего девона. Несогласие хорошо прослеживается по всей впадине и датируется по скважинам, пробуренным на Адмиралтейском поднятии вблизи Новой Земли. Его существование свидетельствует о том, что в среднем девоне и в начале позднего девона кора во впадине располагалась выше уровня моря.

Погружение океанической коры, образовавшейся на оси спрединга, обусловлено охлаждением коры и мантии в океанической литосферной плите. Оно продолжается около 80 млн лет со скоростью, быстро убывающей во времени. Допустим, что в глубокой части Северо-Баренцевской впадины залегает океаническая кора. В таком случае осушение впадины в среднем девоне означает, что охлаждение под ней литосферой плиты к этому времени уже практически закончилось и начальная впадина оказалась целиком заполненной осадками. На проведенном через впадину профиле 4-AP мощность консолидированной коры составляет 14–16 км [Супруненко и др., 2009]. Как следует из условия изостатического равновесия, для полной компенсации впадины на древней океанической литосфере при мощности коры 16–18 км требуется ~ 11 км осадков. В действительности под раннефранским несогласием III<sub>2</sub> в глубокой части впадины залегают лишь несколько километров осадков [там же].

Более того, после охлаждения за ~ 80 млн лет коры и мантии в океанической плите ее погружение практически заканчивается и кора остается примерно на одном и том же уровне. Если бы Северо-Баренцевская впадина образовалась на океанической коре, то после ее заполнения осадками, со среднего девона, погружение коры во впадине прекратилось бы. В действительности, как следует из рис. 2, за последующий период времени продолжительностью 370 млн лет в ней накопилось еще 14 км осадков. Из них около 10 км осадков отложились с начала триаса, т.е. через  $\geq 120$  млн лет после начала погружения в раннем фране. На охладившейся океанической литосферной плите такое развитие погружения было бы абсолютно невозможным. Таким образом, относительно малая мощность осадков под среднедевонским-раннефранским несогласием вместе с длительным последующим погружением коры, сопровождавшимся образованием очень мощного слоя осадков, исключают существование океанической коры в Северо-Баренцевской впадине. Отсюда следует, что консолидированная кора здесь относится к континентальному типу.

Крупное погружение континентальной коры может быть обусловлено ее растяжением [McKenzie, 1978] или метаморфизмом в породах основного состава в нижней части коры [Артюшков, 2010а и др.]. В правой части профиля рис. 2 виден разбитый сбросами фундамент – рефлектор VI предположительно архейско-протерозойского возраста. Расчеты показывают, что с образованием этих сбросов в раннем палеозое было связано растяжение коры примерно на 10%.

Согласно стандартным формулам [Артюшков, 1993] такое растяжение может обеспечить компенсированное осадконакоплением погружение континентальной коры на 2.0–2.5 км. Эта величина сопоставима со средней мощностью осадков нижнего и среднего палеозоя, расположенных ниже позднедевонского рефлектора III<sub>2</sub> в правой части профиля рис. 1. Поэтому весьма вероятно, что погружение коры, осуществившееся до позднего девона, здесь было связано с растяжением.

Погружение коры, обусловленное растяжением литосферы, включает две основные фазы [McKenzie, 1978]. Синрифтовое погружение, сопровождающее растяжение, обычно осуществляется за короткое время и представляет собой изостатическую реакцию коры на уменьшение ее толщины. Растяжение сопровождается подъемом изотерм в коре и мантийной части литосферы. После растяжения эти слои охлаждаются, испытывая термоупругое сжатие, что приводит к пострифтовому погружению. Синрифтовое погружение обычно составляет примерно две трети общего погружения коры, а на долю пострифтового погружения приходится его одна треть. Основная часть пострифтового погружения осуществляется за 70–100 млн лет. Последующее погружение составляет не более 10% от общего погружения.

В Северо-Баренцевской впадине погружение, обусловленное растяжением в раннем палеозое или в более раннюю эпоху, к раннему франу должно было уже закончиться. С позднего девона погружение, обусловленное растяжением литосферы, здесь не могло превышать ~ 100 м. В действительности за это время в ней накопилось еще 13–14 км осадков. Чтобы обеспечить такое погружение за счет растяжения литосферного слоя, его нужно было бы растянуть, по крайней мере, два раза. На рис. 1 в глубокой части Северо-Баренцевской впадины слои осадков нижнего палеозоя – триаса в нескольких местах прорваны магматическими каналами, сформировавшимися в триасовое время. За пределами этих каналов нижнефранский рефлекс, однако, непрерывен. Отсюда следует, что с позднего девона растяжение во впадине не проявлялось. В таких условиях крупное погружение коры могло произойти только вследствие перехода габбро в нижней части коры в более плотные эклогиты. Чтобы обеспечить погружение на 13–14 км, должен был образоваться слой эклогитов толщиной 19 км с плотностью 3500 кг/м<sup>3</sup>. Эти породы со скоростями продольных волн, близкими к скоростям в мантийных перидотитах, в настоящее время залегают под разделом Мохо. По своему составу они относятся к коре.

Поэтому общая толщина консолидированной коры во впадине составляет 35–37 км, что характерно для континентальных платформ.

В начале раннего франа на месте размывавшейся суши в Северо-Баренцевской впадине быстро образовался глубоководный бассейн. В его краевой, юго-восточной, части в позднем девоне сформировалась система клиноформ современной высотой 2.5 км. С учетом последующего уплотнения осадков начальная мощность верхнедевонских клиноформ была ~ 3 км. Под нагрузкой клиноформ могло происходить изостатическое погружение коры. В любом случае, однако, глубина воды была не менее 1.5 км. В глубокой части впадины глубина воды, скорее всего, была больше. В позднем девоне и в раннем и среднем карбоне в глубоководных условиях здесь накопилось 500–700 м осадков. Поскольку в эту эпоху Восточно-Баренцевская впадина была изолирована от океана, то вблизи дна существовали застойные условия, что способствовало сохранению в осадках больших объемов неокисленной органики.

Характерной особенностью крупных нефтегазоносных бассейнов являются быстрые погружения коры большой амплитуды, обычно приводившие к образованию глубоководных или относительно глубоководных впадин на месте мелководного шельфа [Артюшков, 1993, 2010 и др.]. Такие погружения происходили, например, в Западно-Сибирском бассейне в поздней юре и в Прикаспийской впадине в позднем девоне, на рубеже раннего и среднего карбона и во второй половине позднего карбона. Быстрые погружения коры, не сопровождавшиеся значительным растяжением, можно объяснить резким ускорением метаморфизма с уплотнением пород основного состава в нижней коре при поступлении в нее мантийного флюида, катализирующего реакцию [там же]. В Северо-Баренцевской впадине первое погружение такого типа произошло в позднем девоне.

Второе быстрое погружение имело место в триасе и привело к резкому ускорению осадконакопления. Как следует из рис. 1, за это время здесь накопилось до 7 км терригенных отложений. Третье быстрое погружение с образованием впадины с глубиной воды несколько сотен метров произошло в конце юры одновременно с быстрым погружением в Западной Сибири. Судя по проявлению на нескольких уровнях быстрых погружений коры, Северо-Баренцевская впадина с большой вероятностью представляет собой крупный нефтегазоносный бассейн. Во впадине выявлено несколько десятков антиклинальных структур, которые могут служить ловушками для углеводородов

[Хлебников и др., 2009]. Заполнение относительно глубоководной впадины, образовавшейся после быстрого погружения в поздней юре, сопровождалось образованием системы клиноформ, представляющих собой неструктурные ловушки. В таких условиях потенциал Северо-Баренцевской впадины должен быть очень высоким, исчисляясь миллиардами тонн условного топлива.

В восточной части Арктического шельфа РФ расположен еще один сверхглубокий осадочный бассейн – Северо-Чукотский прогиб, заполненный 20 км фанерозойских осадков. Как следует из условия изостатического равновесия, для полной компенсации впадины на океанической коре с такой мощностью было бы достаточно 13 км осадков, что на 7 км меньше максимальной мощности осадков в прогибе. Более того, осадконакопление началось в нем в позднем девоне около 380 млн лет назад [Государственная..., 2005], и погружение охлаждающейся океанической литосферы прекратилось бы около 300 млн лет назад. Тем не менее, с баррема, за последние 115 млн лет, когда погружение океанической коры уже давно завершилось бы, в прогибе накопилось до 14–16 км осадков. Эти данные указывают на то, что под осадками в нем залегает кора континентального типа.

В областях, прилегающих к Северо-Чукотскому прогибу с севера и с юга, толщина консолидированной коры составляет примерно 30 км. Чтобы обеспечить утонение этого слоя до 12 км за счет растяжения, было бы необходимо растянуть кору в 2.5 раза. На сейсмических профилях, проведенных через осадочный бассейн [там же], выделяются отдельные сбросы. Связанное с ними растяжение коры не превышает 5–10%. Оно могло обеспечить образование слоя осадков мощностью лишь 1–2 км. В таких условиях, чтобы удерживать консолидированную кору под осадками на глубине 20 км, под разделом Мохо должен залегать слой эклогитов мощностью 20–25 км, плотность которых значительно превышает плотность мантийных перидотитов.

На нескольких этапах в прогибе формировались крутые флексуры фундамента. Их образование свидетельствует о сильном размягчении литосферного слоя при инфильтрации в него активного флюида из небольших мантийных плюмов. В эти эпохи в нижней коре резко ускорялась эклогитизация, что приводило к быстрым погружениям. Такое погружение произошло в прогибе в барреме-альбе, когда в нем накопилось до 11.5 км осадков. Быстрые погружения, по-видимому, проявлялись и в более ранние эпохи, а также в позднем мелу. Вместе с формированием крутых флексур они являются

характерной особенностью крупных нефтегазоносных бассейнов. По своему строению и истории развития Северо-Чукотский прогиб очень близок к Прикаспийскому, Южно-Каспийскому и Восточно-Баренцевскому нефтегазоносным бассейнам. Поэтому с большой вероятностью он также представляет собой нефтегазоносный бассейн с запасами углеводородов порядка 10 млрд тонн условного топлива.

#### ГЛУБОКОВОДНЫЕ ВПАДИНЫ НА СЕВЕРО-ВОСТОКЕ РОССИЙСКОГО СЕКТОРА АРКТИКИ. ПРИРОДА ЗЕМНОЙ КОРЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ НЕФТЕГАЗОНОСНОСТИ

В этой области расположены хребет Ломоносова и поднятие Менделеева, покрытые слоем воды толщиной от 1300 до 2500 м. Между ними находятся котловины Подводников и Макарова, где глубина воды составляет 2800–3800 м. Мощность коры на хребте Ломоносова и в котловине Подводников составляет 20 км, а на поднятии Менделеева она достигает 30 км. На поднятии Менделеева мощность гранитного слоя составляет 5 км, а в котловине Подводников она уменьшается до 1–3 км.

Судя по данным глубоководного бурения, хребет Ломоносова подстилается корой континентального типа [Moran et al., 2006]. На основании имеющихся данных глубинного сейсмического зондирования большинство российских ученых относят к тому же типу структур поднятие Менделеева, котловины Макарова и Подводников. Используя те же данные ГСЗ, зарубежные ученые считают, однако, что три последние структуры образовались на океанической коре. Повышенную мощность коры они объясняют присоединением к ней большого объема магм, выплавившихся из горячего пятна в поздней юре и раннем мелу (в период между 160 и 100 млн лет назад). Считается, что на ранней стадии своего развития данные структуры были аналогичны современному горячему пятну Исландии и хребта Рейкьяннесс [Asudeh et al., 1988].

Предположение о существовании океанической коры в указанных областях основано на наличии в них глубоководных условий. При этом упускается из виду, что глубина воды там значительно меньше, чем в океанических котловинах на древней коре за пределами разрастающихся хребтов (5000–5500 м). С другой стороны, на континентах и их пассивных окраинах имеется целый ряд глубоких осадочных бассейнов, где мощность осадочного чехла составляет 10–20 км. Как следует из условия изостатического равновесия, в отсутствие осадков эти впадины были бы заполнены слоем воды толщиной примерно в три раза меньшей мощности осадков, т.е. глубина воды составляла бы в них

3–7 км. Так, например, в Вилуйской синеклизе мощность осадков достигает 13 км [Egorkin et al., 1987]. В отсутствие осадков глубина воды составила бы в этой впадине примерно 4 км. Она соответствует максимальной глубине воды в рассматриваемых областях на северо-востоке российского сектора Арктики, характерной для котловины Макарова. Толщина консолидированной коры в Вилуйской синеклизе составляет 20 км [там же]. Эта кора включает гранитный и базальтовый слои мощностью ~ 10 км. Она представляет собой типичную консолидированную кору континентального типа. Примерно такое же строение имеет земная кора на хребте Ломоносова. Таким образом, существование в относительно глубоководной впадине утоненной консолидированной коры, включающей гранитный слой, не может указывать на ее океаническую природу.

На поднятии Менделеева мощность коры (30 км) значительно выше, чем на хребте Ломоносова (20 км), где, судя по данным глубоководного бурения, кора относится к континентальному типу. Тем не менее зарубежные авторы утверждают, что поднятие Менделеева подстилается океанической корой. Такая же мощность коры характерна и для многих областей внутри континентов. В таких условиях в качестве единственного аргумента в пользу существования океанической коры на поднятии Менделеева может быть использована относительно небольшая мощность гранитного слоя в данной области. (~ 5 км). Пониженная мощность гранитного слоя характерна и для ряда глубоких осадочных бассейнов на континентах и их пассивных окраинах. Так, в Северо-Баренцевской впадине с мощностью осадков до 16–17 км гранитный слой утонен до 1–5 км [Супруненко и др., 2009]. Судя по тому, что в среднем девоне кора во впадине располагалась выше уровня моря [Хлебников и др., 2009], она относится к континентальному типу. Такое же строение коры характерно и для Северо-Чукотского прогиба. Судя по данным ГСЗ, профиль 5-АР, гранитный слой утонен под ним до 2–3 км.

Сильное утонение гранитного геофизического слоя во впадинах можно связать с формированием граната в сиалических породах верхней коры [Артюшков и др., 2012]. В нижней части гранитного слоя оно приводит к повышению скоростей упругих волн до значений, характерных для базальтового слоя континентальной коры на платформах. Как показывают эти данные, сокращенная мощность гранитного геофизического слоя характерна для многих глубоких осадочных бассейнов на континентальной коре, и поэтому данное обстоятельство не может рассматриваться как признак океанической природы коры. Как следует из данных глубоководного бурения на хребте Ломоносова, в

олигоцене он располагался выше уровня моря или вблизи него. В течение предшествующих 60 млн лет, с кампана в позднем мелу, вулканизм на хребте не проявлялся. Отсюда следует, что если ранее на хребте и существовало горячее пятно, то, по крайней мере, с кампана его активность прекратилась. За такое время океаническая кора на горячем пятне, утратившем свою активность, погрузилась бы до глубины 1500 м. В действительности с кампана и до начала миоцена на хребте Ломоносова существовал мелководный шельф. Это исключает существование под ним океанической коры и указывает на то, что хребет подстилается корой континентального типа [Артюшков, Поселов, 2010; Артюшков, 2010б; Artyushkov et al., 2011].

В олигоцене, в эпоху высокого стояния хребта Ломоносова, в этой области сформировалось выраженное эрозионное несогласие. Оно четко прослеживается на многочисленных сейсмических профилях в пределы котловин Макарова и Подводников и далее на поднятие Менделеева (рис. 3). Отсюда следует, что в олигоцене все эти структуры располагались вблизи уровня моря или выше его. В настоящее время глубина воды над ними составляет 1300–3800 м. Такое крупное погружение не могло осуществиться за счет охлаждения океанической литосферы на горячем пятне, утратившем активность. Более того, на сейсмических профилях через осадочный чехол под региональным эрозионным несогласием олигоценового возраста крупные магматические тела в рассматриваемой области не выделяются. Эти данные показывают, что, как и хребет Ломоносова, поднятие Менделеева и котловины Подводников и Макарова также подстилаются корой континентального типа.

Крупные погружения континентальной литосферы обычно объясняют ее растяжением. Для образования на месте суши впадины с глубиной воды 1300–3800 м литосфера должна быть растянута в 1.5–4 раза. На многочисленных сейсмических профилях через рассматриваемую область в осадках, расположенных под олигоценовым несогласием, значительные деформации растяжения не наблюдаются. В таком случае быстрое погружение коры, начавшееся в миоцене, следует связывать с переходом габбро в нижней коре в более плотные гранатовые гранулиты и эклогиты при инфильтрации поверхностно-активных мантийных флюидов, катализирующих реакцию. Скорости продольных волн в этих породах примерно такие же, как и в мантийных перидотитах. Поэтому по сейсмическим данным их обычно помещают под разделом Мохо. В действительности эклогиты и гранатовые гранулиты, как породы основного состава,

относятся к коре. В рассматриваемых областях они расположены под разделом Мохо. Вместе с этими плотными породами кора там имеет высокую мощность, такую же, как на обычных континентальных платформах.

В рассматриваемых областях мощность осадочного чехла достигает 5–6 км. По крайней мере, в начале миоцена здесь повсюду имели место быстрые погружения коры, сформировавшие глубоководные впадины на месте суши или мелководного шельфа. Такие погружения являются характерным признаком крупных нефтегазоносных бассейнов. Поэтому в рассматриваемых впадинах, включающих на некоторых стратиграфических уровнях значительные объемы неокисленной органики, можно с высокой вероятностью предполагать наличие крупных запасов углеводородов. Учитывая большую площадь области (1 200 000 км<sup>2</sup>), их величина должна быть не менее 10 млрд тонн условного топлива.

#### НОВЕЙШИЕ ПОДНЯТИЯ ЗЕМНОЙ КОРЫ НА КОНТИНЕНТАХ КАК СЛЕДСТВИЕ ПОСТУПЛЕНИЯ В ЛИТОСФЕРУ КРУПНЫХ ОБЪЕМОВ МАНТИЙНОГО ФЛЮИДА

Как показывает большой объем фактических данных, основная часть крупных современных положительных форм рельефа сформировалась в результате резкого ускорения поднятий коры в плиоцен-четвертичное время после периода относительной стабильности, в большинстве областей продолжавшегося около 100 млн лет [Неотектоническая..., 1981; Карта..., 1997 и др.]. Особенно крупные новейшие поднятия имели место на Тибетском плато и в Гималаях. К северу от них новейшие поднятия с амплитудами от нескольких сотен метров до нескольких километров охватили огромную область от Центрального и Северо-Восточного Китая на юге до Таймыра и Северо-Восточной Азии на севере. Их часто связывают со столкновением Индийской и Азиатской плит, начавшимся приблизительно 50 млн лет назад. Основная часть поднятий в указанных областях осуществилась, однако, лишь за последние несколько миллионов лет, не сопровождаясь значительным сжатием коры. В таких условиях крупные новейшие поднятия коры можно объяснить понижением плотности вещества в литосферном слое [Артюшков, в печати]. Одной из причин этого было быстрое конвективное замещение астеносферой или веществом мантийного плюма нижней части более плотной мантийной литосферы. Это оказалось возможным благодаря резкому размягчению мантийной литосферы при поступлении в нее мантийных флюидов. В ряде мест значительный

подъем кровли астеносферы фиксируется по данным сейсмической томографии. Под областями новейших поднятий коры на ~ 1.0 км в Центральной Азии была разрушена нижняя часть мантийной литосферы толщиной 50–100 км. В ряде областей с мощной литосферой имели место относительно небольшие новейшие поднятия, сильно неоднородные по площади. Они свидетельствуют о метаморфизме в нижней коре с разуплотнением пород основного состава при инфильтрации в них флюида из астеносферы. Проявление в плиоцене и плейстоцене крупных поднятий коры на разных континентах указывает на квазисинхронное поступление в их литосферу больших объемов мантийного флюида.

Крупные тектономагматические события имели место на континентах и в более древние эпохи, например 2700, 1800, 1100 и 450 млн лет назад, в девонское время, а также на рубеже палеозоя и мезозоя. С большой вероятностью они также были связаны с поступлением в литосферу мантийного флюида. Эти явления должны были оказывать сильное влияние на эндогенное рудообразование.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Как показало проведенное исследование, на континентах часто проявлялись быстрые восходящие и нисходящие движения земной коры, сильно неоднородные на площади. В подавляющем числе областей эти движения значительным растяжением или сжатием коры не сопровождалось, и они не приводили к существенным нарушениям изостатического равновесия. В таких условиях вертикальные движения коры были обусловлены плотностными изменениями в литосферном слое. Погружения коры требовали уплотнения пород в коре или мантийной литосфере, а поднятия были следствием их разуплотнения. Уплотнение пород может происходить за счет их термоупругого сжатия или метаморфических реакций. Значительные изменения температуры в мощной литосфере развиваются на протяжении десятков миллионов лет. В таких условиях быстрое уплотнение пород основного состава требует поступления в них флюида [Austrheim, 1990]. С этим явлением были, по-видимому, связаны быстрые погружения коры в крупных нефтегазоносных бассейнах, позволяющие отличать такие бассейны от непродуктивных бассейнов. В частности, для Северо-Баренцевской впадины на данной основе можно предполагать наличие запасов порядка 10 млрд тонн условного топлива.

В тех случаях, когда глубоководные впадины еще не успели заполниться осадками, предшествующее проявление в них быстрых погружений после длительных эпох относительной стабильности служит указанием на континентальную природу коры, залегающей под впадинами. Данный аргумент может быть использован для расширения экономической зоны РФ на 1 200 000 км<sup>2</sup> в глубоководной северо-восточной части Российской Арктики, где с большой вероятностью можно предполагать существование крупных запасов нефти и газа.

С быстрыми изменениями глубины моря в нефтегазоносных бассейнах (до 100–200 м за 1–3 млн лет, циклы третьего порядка) было связано образование многочисленных стратиграфических ловушек, содержащих крупные запасы углеводородов. Эти изменения глубины моря обычно объясняют эвстатическими флуктуациями уровня Мирового океана [Наг, Al-Qahtani, 2005 и др.]. Исследования, проведенные нами в последнее десятилетие, показали, что на основной части палеозоя крупные эвстатические флуктуации третьего порядка (1–3 млн лет) проявлялись крайне редко. Быстрые изменения глубины моря в эту эпоху были обусловлены главным образом поднятиями и погружениями земной коры. Это требует коренного изменения методики поиска залежей углеводородов в стратиграфических ловушках. Необходимо изучать не глобальные изменения уровня океана, а в первую очередь быстрые региональные поднятия коры в нефтегазоносных бассейнах и в прилегающих к ним областях.

За последние несколько миллионов лет быстрые поднятия земной коры сформировали большинство положительных структур рельефа на континентах. В отсутствие значительного растяжения они могли осуществиться за счет двух главных механизмов. Во-первых, в результате конвективного замещения менее плотной астеносферой более плотной нижней части мантийной литосферы, испытавшей разуплотнение при поступлении в нее мантийного флюида. Во вторых, вследствие низкотемпературного повторного метаморфизма, диафтореза, с разуплотнением пород в земной коре, который протекает при поступлении в породы флюида. Оба механизма требуют поступления в литосферу крупных объемов мантийного флюида. Этот процесс должен иметь серьезные последствия для эндогенной металлогении. Его изучение может быть предметом следующего проекта.

## ЛИТЕРАТУРА

*Артюшков Е.В.* Физическая тектоника. М.: Наука, 1993. 456 с.

*Артюшков Е.В.* Образование сверхглубокого Северо-Чукотского прогиба вследствие эклогитизации нижней части континентальной коры. Перспективы нефтегазоносности // Геология и геофизика. 2010а. Т. 51, № 1. С. 61–74.

*Артюшков Е.В.* Континентальная кора на хребте Ломоносова, поднятии Менделеева и в котловине Макарова. Образование глубоководных впадин в неогене вследствие глубокого метаморфизма в нижней коре // Геология и геофизика. 2010б. № 11. С. 1515–1530.

*Артюшков Е.В.* Новейшие поднятия земной коры как следствие инфильтрации в литосферу мантийных флюидов // Геология и геофизика. 2012 (в печати).

*Артюшков Е.В., Беляев И.В., Казанин Г.С., Павлов С.П., Чехович П.А., Шкарубо С.И.* Механизмы образования Северо-Баренцевской впадины // Геология и геофизика. 2012 (в печати).

*Артюшков Е.В., Поселов В.А.* Образование глубоководных впадин в российском секторе Американо-Азиатского бассейна в результате эклогитизации нижней части континентальной коры // Докл. РАН. 2010. Т. 431, № 5. с. 680–684.

*Артюшков Е.В., Тесаков Ю.И., Чехович П.А.* Флуктуации уровня океана в ордовике. Быстрые изменения скорости погружения земной коры в Восточной Сибири и Балтоскандии. Геология и геофизика, 2008. № 9. С. 841–861.

*Артюшков Е.В., Чехович П.А.* Изменения уровня моря и быстрые движения земной коры в платформенных областях в позднем палеозое // Геология и геофизика, 2011, № 10.

*Буценко В.В.* Главные тектонические события истории Арктического океана по сейсмическим данным: Автореф. дис. ... докт. геол.-минерал. наук. СПб., 2008. 42 с.

*Верба М.Л., Иванова Н.М., Кацев В.А., Рослов Ю.В., Сакулина Т.С., Телегин А.Н.* Результаты сейсмических исследований по опорным профилям АР-1 и АР-2 в Баренцевом и Карском морях // Разведка и охрана недр. 2001. № 10. С. 3–7.

Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1 : 1 000 000. Лист S-1, 2 – Чукотское море. Объяснительная записка. Авторы: В.А. Виноградов, Ю.В. Горячев, В.И. Чухонцев; ред. В.А. Виноградов. СПб.: ВСЕГЕИ, 2005. 64 с.

Карта новейшей тектоники Северной Евразии. Масштаб 1:5 000 000 / Гл. ред. А.Ф. Грачев // Министерство природных ресурсов России, Российская академия наук, М., 1997.

Неотектоническая карта мира. Масштаб 1:15 000 000 / ред. Н.И. Николаев, Ю.Я. Кузнецов, А.А. Неймарк // М., Мингео СССР, Мин-во. высш. и средн. спец. образ. СССР, 1981.

*Родионова Г.Д., Умнова В.Т., Кононова Л.И., Овнатанова Н.С., Ржонсницкая М.А., Федорова Т.И.* Девон Воронежской антеклизы и Московской синеклизы. М., 1995. 265 с.

*Супруненко О.И., Устрицкий В.И., Зуйкова О.Н. и др.* Геолого-геофизическое районирование севера Баренцево-Карского шельфа по данным сейсморазведки // Геология нефти и газа. 2009. Т. 4. С. 17–25.

Тектоническая карта Баренцева моря и севера европейской части России / под ред. Н.А. Богданова и В.Е. Хаина. 1:2500000. Объяснительная записка. М.: Ин-т литосферы РАН, 1996. 94 с.

*Хлебников П.А., Беленький В.Я., Пешкова И.Н. и др.* Геологическое строение и перспективы нефтегазоносности восточного борта Северо-Баренцевской впадины // Разведка и охрана недр. 2009. №7. С.13–21.

*Artyushkov E.V., Chekhovich P.A.* The East Siberian basin in the Silurian: evidence for no large-scale sea-level changes // Earth Planet. Sci. Lett. 2001. Vol. 193. P.183–196.

*Artyushkov E., Morozov A., Poselov V.* Continental crust in the Lomonosov ridge, Mendeleev high, and in the Makarov and Podvodnikov basins. Formation of the deep-water basin in the Neogene. International conference on Arctic margins, 2011, Fairbanks, Alaska.

*Asudeh I., Green A.G., Forsyth D.A.* Canadian expedition to study the Alpha Ridge complex: results of the seismic refraction study // Geophys. J. Intern. 1988. Vol. 92. P. 283–302.

*Austrheim H.* The granulite-eclogite facies transition: a comparison of experimental work and natural occurrence in the Bergen Arcs, western Norway // Lithos. 1990. Vol. 25. P. 163–169.

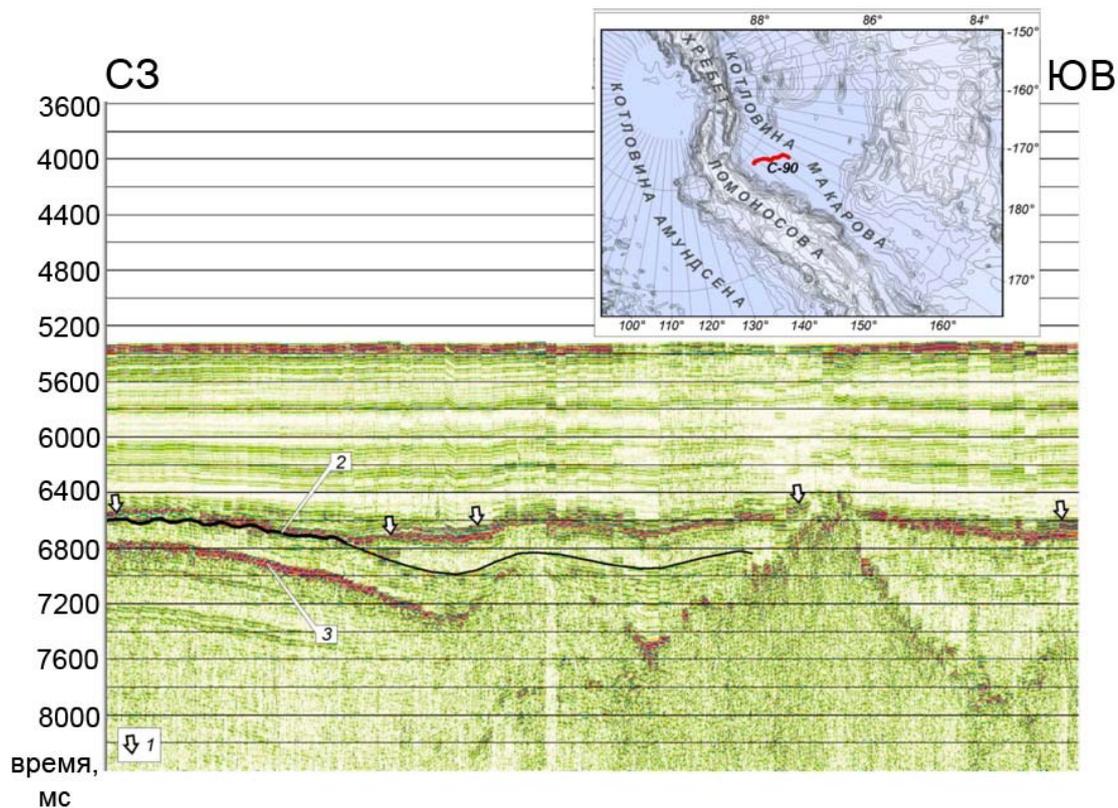
*Egorokin A.V., Zukanov S.K., Pavlenkova N.I., Chernyshev N.M.* Results of lithospheric studies from long range profiles in Siberia // Tectonophysics, 1987. Vol. 140. P. 29–47.

*Haq B.U., Al-Qahtani A.M.* Phanerozoic cycles of sea-level change on the Arabian Platform // GeoArabia. 2005. Vol. 10, N. 2. P.127–160.

*McKenzie D.* Some remarks on the development of sedimentary basins // Earth and Planet. Sci. Lett. 1978. Vol. 40. P. 25–32.

*Moran K., Backman J., Brinkhuis H. et al.* The Cenozoic palaeoenvironment of the Arctic Ocean // *Nature*. 2006. Vol. 441. P. 601–605.





**Рис. 3. Эрозионный срез в олигоцене и раннем миоцене нижнего этажа осадков в котловине Макарова (с изменениями по [Буценко, 2008])**  
 1 – региональное несогласие; 2 – эрозионный срез осадочных пород, подстилающих региональное несогласие; 3 – акустический фундамент