

Глубокие осадочные бассейны в акватории российской Арктики: механизмы образования, перспективы нефтегазоносности, обоснование принадлежности к континентальному шельфу

Е. В. Артюшков¹, член-корреспондент РАН
ФГБУН Институт физики Земли им. О. Ю. Шмидта РАН

П. А. Чехович², доктор геолого-минералогических наук
Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, Музей землеведения

Показано, что сильно утоненная консолидированная кора с повышенными скоростями продольных волн в котловине Подводников, на хребте Ломоносова и на поднятии Менделеева представляет собой верхнюю часть континентальной коры, видоизмененную метаморфизмом. Под разделом Мохо здесь залегает нижняя часть континентальной коры, в которой габброиды перешли в эклогиты с повышением скоростей продольных волн до значений, характерных для мантии. Существование континентальной коры в указанных структурах позволяет относить их к расширенному континентальному шельфу Российской Федерации.

Ключевые слова: сверхглубокие осадочные бассейны, растяжение литосферы, эклогитизация, быстрые погружения коры, нефтегазоносность, внешняя граница континентального шельфа.

Введение

В глубоководной части Центральной Арктики находятся подводные возвышенности хребта Ломоносова и поднятия Менделеева, между которыми расположены котловины Подводников и Макарова (рис. 1). Мощность коры под этими структурами сильно варьирует на площади от 7—10 км в котловине Макарова до 20—30 км на хребте Ломоносова, поднятии Менделеева и на пороге Арлис в котловине Подводников [15]. В большинстве мест она значительно выше средней мощности океанической коры (7 км), но ниже мощности земной коры на континентальных платформах (35—45 км). Существование континентальной коры доказано только для хребта Ломоносова, где вблизи Северного полюса было проведено глубоководное бурение [33]. Природа коры на поднятии Менделеева, в котловинах Подводников и Макарова остается дискуссионной. Утоненная

консолидированная кора включает в них гранитный слой мощностью от 1—2 км до 5—10 км и базальтовый слой мощностью до 20 км. Такое строение необычно как для океанической, так и для континентальной коры. По мнению большинства российских ученых, кора на поднятии Менделеева и в котловине Подводников относится к континентальному типу, что подтверждается отсутствием в типичной океанической коре гранитного слоя [15; 28 и др.]. Зарубежные исследователи считают, что в этих областях распространена кора океанического типа [29; 23]. Ее повышенную мощность вместе с преобладанием в коре базальтового слоя объясняют выплавлением крупных объемов базальтовых магм из мантийного суперплюма. В большинстве областей с океанической корой, образованной спредингом, наблюдаются линейные магнитные аномалии с чередующейся полярностью. На поднятии Менделеева и в котловине Подводников такие аномалии отсутствуют. Это объясняют тем, что океаническая кора формировалась в них во время мелового суперхрона

¹ e-mail: arty-evgenij@yandex.ru.

² e-mail: p.chekhovich@gmail.com.

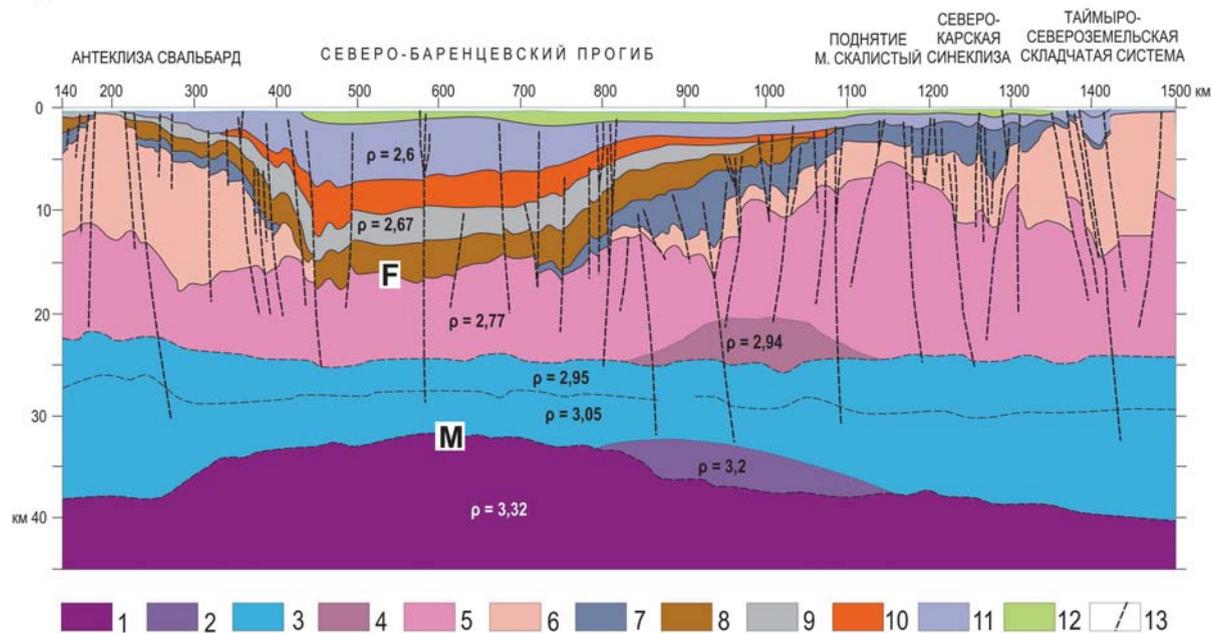


Рис. 3. Строение земной коры в северной части Северо-Баренцевской впадины вдоль профиля 4АР. С изменениями по [25]: 1 – верхняя мантия, 2 – линза пород повышенной плотности («коро-мантийная смесь» в интерпретации авторов профиля), 3 – нижняя консолидированная кора, 4 – линза пород повышенной плотности в нижней части верхней коры, 5 – верхняя консолидированная кора (архей-протерозой), 6 – верхнепротерозойский складчатый комплекс, 7 – рифей – нижний палеозой, 8 – девон, 9 – карбонатный комплекс карбона – нижней перми, 10 – пермский терригенный комплекс, 11 – мезозойский терригенный комплекс, 12 – кайнозойский терригенный комплекс, 13 – разрывные нарушения. Числовые значения ρ – плотность пород, кг/м^3

в течение нескольких сотен миллионов лет. При этом половина мощности осадков (или более) накапливалась в результате погружений, начинавшихся по крайней мере через 100 млн лет после возникновения осадочного бассейна. Так, в Южно-Каспийской впадине за последние 5 млн лет накопилось до 10 км осадков (рис. 2), в то время как погружение коры в ней началось не позднее начала кайнозоя, а скорее всего гораздо раньше — в юре [13]. В Восточно-Баренцевской впадине 10–11 км осадков накопились с поздней перми [16]. Погружение коры началось в ней, вероятно, еще в раннем палеозое, а в позднем девоне во впадине быстро сформировался глубоководный бассейн. Со времени образования глубоководного бассейна в позднем девоне и до начала крупного погружения в поздней перми прошло более 110 млн лет. К этому моменту погружение океанической коры уже давно закончилось бы, что исключает ее существование во впадине.

Во-вторых, мощность осадков в сверхглубоких впадинах значительно выше, чем этого можно было ожидать, если бы при соблюдении изостатического равновесия под ними залегала кора океанического типа [35; 22]. Для заполнения океанической впадины с глубиной воды h_b осадками с учетом изостатического погружения коры под их нагрузкой мощность осадков должна составлять

$$h_{oc} = \frac{\rho_m - \rho_b}{\rho_m - \rho_{oc}} h_b, \quad (1)$$

где $\rho_m = 3330 \text{ кг/м}^3$ — плотность мантии; $\rho_b = 1030 \text{ кг/м}^3$ — плотность морской воды; ρ_{oc} — плотность осадков.

В океанических котловинах глубина воды h_b^0 обычно составляет 5,0–5,5 км. Подставляя это значение в (1), при $\rho_{oc} = 2500\text{—}2600 \text{ кг/м}^3$ находим:

$$h_{oc} = 14\text{—}17 \text{ км}. \quad (2)$$

Эти величины меньше мощности осадков в сверхглубоких впадинах (18–20 км). Более того, в ряде впадин толщина консолидированной коры (примерно 15–20 км) значительно превышает среднюю толщину океанической коры $h_{ок}^0 = 7 \text{ км}$. В этом случае мощность осадков, необходимая для заполнения впадины, значительно уменьшается. С увеличением толщины коры на $\Delta h_k = h_{ок} - h_{ок}^0$ и при соблюдении изостатического равновесия начальная глубина воды в океанической впадине уменьшается по сравнению с (2) на

$$\Delta h_b = \frac{\rho_m - \rho_{kc}}{\rho_m - \rho_b} \Delta h_k, \quad (3)$$

где $\rho_{kc} \approx \rho_{ок}$ — плотность консолидированной коры во впадине.

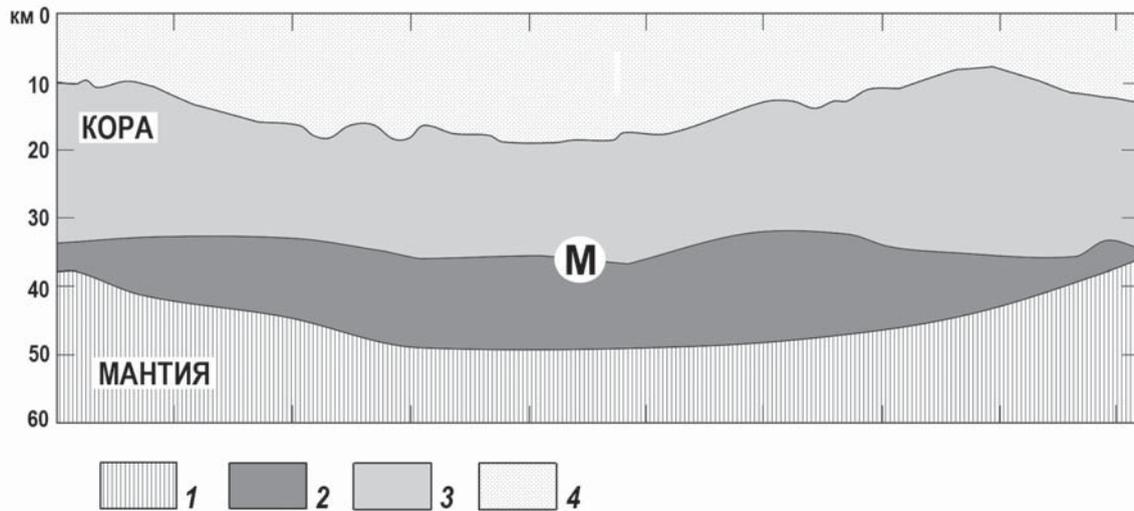


Рис. 4. Слой эклогитов в нижней части континентальной коры сверхглубокой впадины, удерживающий консолидированную кору в аномально глубоко погруженном положении (с изменениями по [22]): 1 – мантийные перидотиты, 2 – глубоко метаморфизованные тяжелые породы основного состава, 3 – верхняя кора, включающая 85% кислых пород и 15% пород основного состава, 4 – осадки, М – раздел Мохо

Полагая $\rho_{ок} = 2900 \text{ кг/м}^3$, получаем

$$\Delta h_b = 0,19\Delta h_k. \quad (4)$$

Подставляя эту величину в (1), находим, что увеличение мощности коры на величину Δh_k приводит к уменьшению мощности осадков, необходимой для компенсации впадины, на

$$\Delta h_{oc} = (0,53 - 0,60)\Delta h_k. \quad (5)$$

Например, при мощности консолидированной коры в Северо-Баренцевской впадине $h_k = 16 \text{ км}$ $\Delta h_k = 9 \text{ км}$ и $\Delta h_{oc} \approx 5 \text{ км}$. В таком случае для заполнения впадины потребовалось бы 9–12 км осадков, что по крайней мере на 4 км меньше наблюдаемой мощности $h_{oc} = 14\text{--}16 \text{ км}$. В Северо-Чукотской впадине консолидированная кора сокращена по мощности до $h_k = 11 \text{ км}$, что согласно (5) дает $\Delta h_{oc} = 2 \text{ км}$. При существовании океанической коры над разделом Мохо впадина была бы заполнена 12–15 км осадков. В действительности в осевой части впадины мощность осадков составляет по крайней мере 18 км, что на 3–5 км больше. Это указывает на то, что океаническая кора во впадине залегать не может, и в действительности кора в ней относится к континентальному типу.

Изменение строения коры и ее погружение вследствие метаморфизма

Аномальная погруженность консолидированной коры в сверхглубоких впадинах указывает на то, что под разделом Мохо в них залегают не мантийные перидотиты, а более плотные породы. В противном случае над впадинами наблюдались бы очень

большие отрицательные изостатические аномалии силы тяжести. Характерным примером может служить Северо-Баренцевская впадина с мощностью осадков до 16–18 км (рис. 3).

Если бы под разделом Мохо в ней располагались мантийные перидотиты, то в условиях изостатического равновесия мощность осадков во впадине составляла бы 13 км. В действительности впадина в среднем на 3,5 км глубже. Наложение на изостатически уравновешенную консолидированную кору 3,5 км добавочных осадков сопровождалось бы вытеснением из-под нее слоя более плотных перидотитов такой же мощности. В результате в условиях дефицита массы над впадиной возникла бы отрицательная изостатическая аномалия силы тяжести $\Delta g_{из} \sim 70 \text{ мГал}$ (см. рис. 5 в [10]). Над глубокой частью Северо-Баренцевской впадины существуют, однако, лишь слабые положительные аномалии в свободном воздухе $\Delta g_{св} \sim 20\text{--}30 \text{ мГал}$, что указывает на близость ее литосферы к изостатически равновесному состоянию. Отклонение от наблюдаемого поля $\Delta g_{св} - \Delta g_{из}$ составляет 90–100 мГал.

Отрицательные изостатические аномалии силы тяжести такого масштаба в крупных платформенных областях, расположенных вдали от активных границ между плитами, нигде не наблюдаются. Чтобы скомпенсировать отрицательный вклад в поле силы тяжести порядка 90–100 мГал, обусловленный 3,5 км добавочных осадков, и создать на поверхности слабо положительные аномалии в свободном воздухе, под разделом Мохо в литосфере должен существовать большой объем пород, более плотных, чем мантийные перидотиты с плотностью ρ_m , и создающих на поверхности положительные аномалии порядка 90–100 мГал (рис. 4). Из всех известных пород такими свойствами обладают только

эклогиты [18 и др.]. При их плотности $\rho_3 = 3500 \text{ кг/м}^3$ мощность слоя эклогитов, необходимая для обеспечения добавочного погружения коры при соблюдении изостатического равновесия, должна составлять 18—19 км. Образованием этих пород, более тяжелых, чем мантийные перидотиты, за счет метаморфизма габброидов нижней коры можно объяснить крупные погружения в Восточно-Баренцевской впадине [10].

Поскольку по среднему химическому составу эклогиты идентичны габброидам нижней коры, слой эклогитов, залегающих в Северо-Баренцевской впадине под разделом Мохо, следует относить к консолидированной коре. В этом случае ее мощность, составляющая здесь около 40 км, оказывается примерно такой же, как под большинством платформенных областей с малыми мощностями осадков. Значения скоростей продольных волн в эклогитах и в мантийных перидотитах почти одинаковы, и поэтому различить эти породы по одним только сейсмическим данным не удастся. В результате на сейсмических профилях эклогиты обычно помещают под разделом Мохо, формально относя их к мантии (см. рис. 4). В действительности они представляют собой глубоко метаморфизованную нижнюю часть континентальной коры, в которой скорости продольных волн оказались повышенными до значений, характерных для мантии.

Значительные отрицательные изостатические аномалии силы тяжести отсутствуют и над Прикаспийской, Южно-Каспийской и Северо-Чукотской впадинами, несмотря на очень большую мощность заполняющих их осадков. Как показал совместный анализ данных глубинного сейсмического зондирования и гравиметрических данных по указанным структурам, это возможно только при залегании в них под разделом Мохо мощных слоев тяжелых эклогитов [10]. Если бы сверхглубокие впадины были заполнены

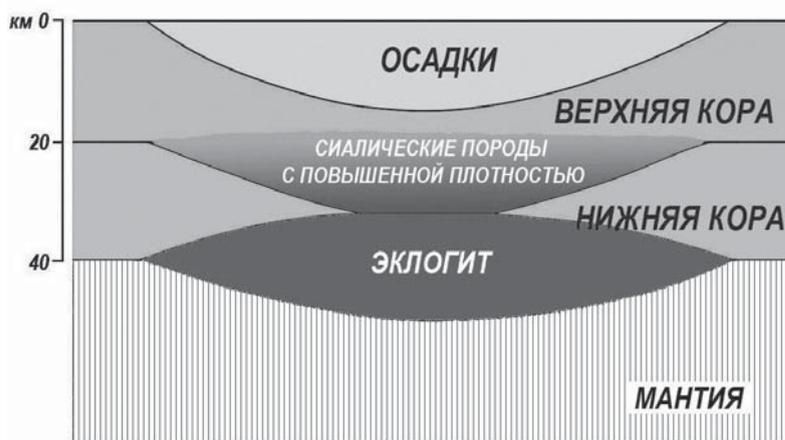


Рис. 5. Строение континентальной коры, испытывающей метаморфизм с уплотнением пород, под сверхглубоким осадочным бассейном

не осадками, а водой, то при сохранении изостатического равновесия глубина воды в них достигала бы 4—7 км. При таких глубинах в отсутствие гравиметрических наблюдений и сейсмических данных о строении коры под впадинами они вполне могли бы рассматриваться как структуры океанического типа.

В породах земной коры интенсивный метаморфизм обычно проявляется в присутствии флюида [12; 21; 31; 19 и др.]. С инфильтрацией флюида в кору из мантии можно связать резкое ускорение погружения, происходившее на некоторых этапах во всех указанных впадинах. Чаще всего оно приводило к образованию глубоководных впадин на месте суши или мелководного шельфа. Так, в Северо-Баренцевской и Прикаспийской впадинах в позднем девоне быстро сформировались глубоководные бассейны глубиной до нескольких километров [3; 10]. Во время плиоцен-четвертичного погружения коры в Прикаспийской впадине глубина воды в ней существенно не изменилась, но за последние 5 млн лет накопилось до 10 км новых осадков.

Повышение плотности и скорости продольных волн в верхней части земной коры под сверхглубокими впадинами до значений, характерных для океанической коры, можно также связать с метаморфизмом пород при инфильтрации мантийного флюида [9; 10]. В верхней коре часто присутствуют большие объемы кислых пород первично-осадочного происхождения — метапелиты, мезократовые гнейсы, кислые метаграувакки и метавулканы с высокой железистостью. При погружении под мощной толщей осадков на глубины 15—20 км давление и температура в породах значительно повышаются. В таких условиях, как и в габброидах нижней коры, в них кристаллизуется гранат [14; 36 и др.]. В результате сиалические породы приобретают повышенную плотность, а скорости упругих волн в них увеличиваются до значений, характерных для базальтового слоя (рис. 5).

Вклад растяжения коры в ее погружение в сверхглубоких впадинах

Основной причиной крупных погружений континентальной коры обычно считается ее сильное растяжение. Этот механизм был впервые предложен для Байкальского рифта [2; 17] и получил в дальнейшем широкое распространение [32; 38 и др.]. Глубина осадочного бассейна $h_{ос}$, образованного растяжением коры с начальной мощностью h_k^0 , связана с его интенсивностью β [3]:

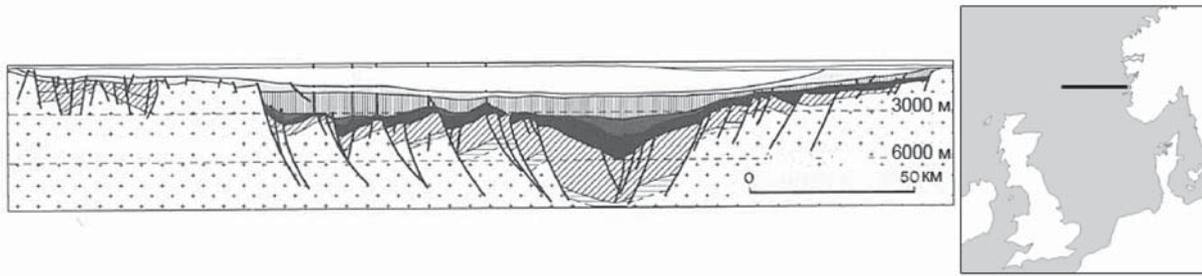


Рис. 6. Деформации фундамента в грабене Викинг, где проявилось значительное растяжение континентальной коры (с изменениями по [39]). На врезке справа показано местоположение разреза

$$h_{oc} = \frac{\rho_m - \rho_k}{\rho_m - \rho_{oc}} h_k^0 \left(1 - \frac{1}{\beta}\right), \quad (6)$$

где $\rho_k = 2830 \text{ кг/м}^3$ — средняя плотность континентальной коры.

При $\rho_{oc} = 2550 \text{ кг/м}^3$ и $h_k^0 = 40 \text{ км}$, как следует из (6), для образования осадочного бассейна глубиной $h_{oc} = 15\text{—}20 \text{ км}$ интенсивность растяжения должна быть чрезвычайно высокой: $\beta = 2,4\text{—}4,5$.

Растяжение коры приводит к расколу сбросами ее верхней части на крупные блоки (рис. 6). По мере растяжения блоки испытывают наклон, чтобы покрыть вязко растягивающуюся нижележащую часть коры [30]. Интенсивность растяжения β равна отношению конечной ширины области L_1 к начальной ширине L_0 : $\beta = L_1/L_0$. Величина L_0 может быть подсчитана как сумма ширины поверхности всех блоков фундамента, на которые оказалась разбита верхняя кора. Абсолютное растяжение области $\Delta L = L_1 - L_0$ примерно равно сумме по горизонтали разрывов фундамента между разошедшимися блоками. Подсчитав ΔL для любого сейсмического профиля, достигающего фундамента, можно определить относительное растяжение коры $\Delta L/L_0$ и интенсивность растяжения $\beta = L_1/L_0$. При растяжении в несколько раз разрывы между поверхностью блоков фундамента в сумме должны покрывать основную часть площади бассейна. Но уже при умеренном растяжении на несколько десятков процентов деформации фундамента оказываются весьма значительными (рис. 6).

Такие структуры рифтового типа, где растяжение коры внесло значительный вклад в ее погружение, как в грабенах Северного моря или Восточного Китая, встречаются, однако, достаточно редко [3].

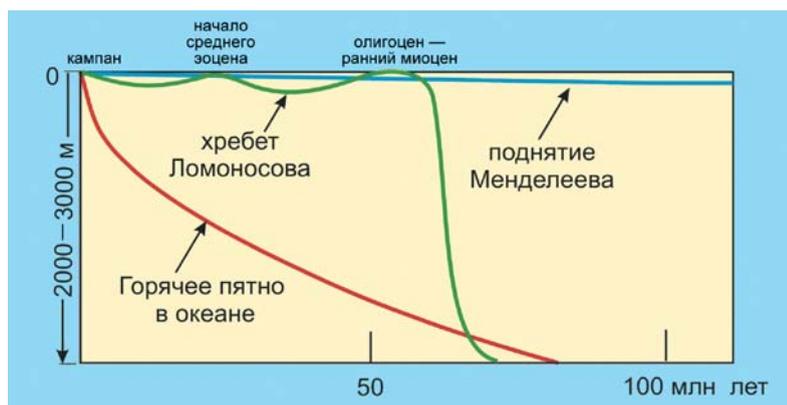


Рис. 7. Изменения во времени глубины воды на хребте Ломоносова, на поднятии Менделеева и на остывающем горячем пятне на коре океанического типа

В рассмотренных нами сверхглубоких впадинах растяжение фундамента было слабым. Так, на профиле 4AP через Северо-Баренцевскую впадину (см. рис. 3) виден ряд сбросов, что указывает на растяжение коры по крайней мере в начальной стадии ее погружения. Подсчет суммы проекций смещений фундамента вдоль сбросов на горизонтальную плоскость показывает, однако, что связанное с ними относительное растяжение очень невелико: $\varepsilon \sim 2\text{—}4\%$, что соответствует $\beta = 1,02\text{—}1,04$ [10]. Как следует из соотношения (6), такое растяжение обеспечило накопление лишь примерно 700 м осадков при их средней мощности во впадине около 10 км. Поэтому основную часть погружения следует связывать с уплотнением пород в коре вследствие метаморфизма.

Глубоководные впадины Центральной Арктики

Из-за сложных ледовых условий эта область значительно хуже охарактеризована сейсмическими данными, чем рассмотренные выше сверхглубокие впадины. Тем не менее по отношению к ее структурам также можно применить критерии, использованные для определения природы коры в других аналогичных структурах. Как показало глубоководное бурение в северной части хребта Ломоносова [33], в отсутствие характерного для горячих пятен вулканизма земная кора располагалась там вблизи уровня моря в течение около 60 млн лет с кампана по ранний миоцен (рис. 7).

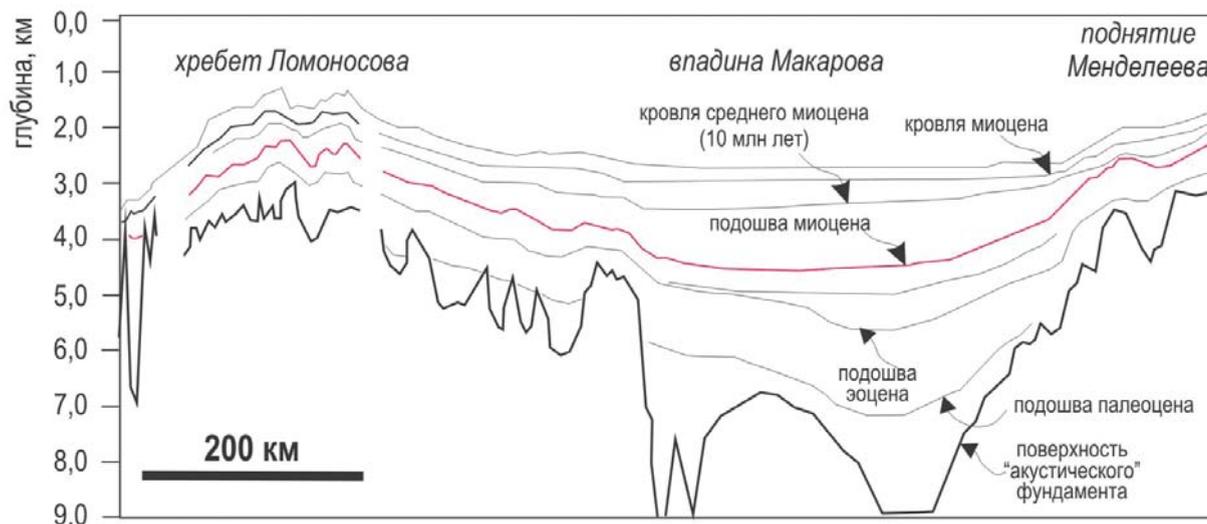


Рис. 8. Основные отражающие горизонты в осадочном чехле и фундамент глубоководных областей Восточной Арктики — хребта Ломоносова, котловины Подводников и западного склона поднятия Менделеева на широте 81° (с изменениями по [37]). Красной линией показано региональное несогласие между мелководными отложениями верхнего эоцена/олигоцена (?) и глубоководными осадками нижнего миоцена

Затем последовало быстрое погружение, сформировавшее глубоководную впадину. Такое развитие погружения во времени исключает существование океанической коры под хребтом и указывает на то, что он подстилается корой континентального типа [4; 8].

Существование континентальной коры на хребте Ломоносова, подтвержденное данными глубоководного бурения, зарубежные ученые не отрицают. Они, однако, считают, что под расположенными восточнее котловинами Подводников и Макарова, а также под поднятием Менделеева залегает кора океанического типа. С конца эоцена и до начала миоцена на хребте Ломоносова формировалось региональное эрозионное несогласие [11]. В более поздних публикациях [37] стратиграфический интервал перерыва определяется как конец олигоцена — середина миоцена (рис. 8). Данные бурения показывают [33], что кора на хребте в это время располагалась вблизи уровня моря. С хребта Ломоносова эрозионное несогласие хорошо прослеживается на восток в котловины Подводников и Макарова и далее на поднятие Менделеева [33]. Это скорее всего указывает на то, что до миоцена в котловине Подводников и на поднятии Менделеева земная кора, как и на хребте Ломоносова, располагалась вблизи уровня моря. Быстрое погружение с образованием глубоководных впадин могло произойти только на коре континентального типа, что и показывает, какого типа кора залегает в котловинах Макарова и Подводников, а также на поднятии Менделеева.

Если удастся установить, что указанные структуры вместе с хребтом Ломоносова не отделяются от азиатского шельфа крупными сдвигами, то они будут представлять собой его естественное продолжение.

В таком случае согласно ст. 76 Конвенции ООН по морскому праву поднятие Менделеева, котловины Макарова и Подводников, а также хребт Ломоносова с прилегающей к нему с запада частью бассейна Амундсена должны относиться к расширенному континентальному шельфу Российской Федерации.

Вдоль южной части поднятия Менделеева был проложен профиль глубинного сейсмического зондирования «Арктика-2005» [27]. Судя по полученным результатам, толщина коры составляет на профиле около 30 км. Как показал совместный анализ сейсмических и гравиметрических данных, при залегании под разделом Мохо мантийных перидотитов над поднятием наблюдались бы отрицательные изостатические аномалии интенсивностью до 100 мГал [10]. В действительности над поднятием существуют слабые положительные аномалии силы тяжести в свободном воздухе. Это означает, что, как и в сверхглубоких впадинах, под разделом Мохо на поднятии Менделеева залегает мощный слой эколлитов, по своему составу относящихся к коре. Вместе с ним толщина коры на поднятии Менделеева оказывается примерно равной 40 км и характерной для континентальных платформ.

Как отмечалось, крупные погружения континентальной коры часто объясняют ее растяжением. Высокая мощность коры на поднятии Менделеева плохо согласуется с таким предположением. Глубина воды на этом поднятии и в котловине Подводников лежит в пределах от 1 до 3 км. Интенсивность растяжения, необходимую для погружения континентальной коры до таких глубин, можно оценить с помощью соотношения (6), если положить в нем $h_{oc} = h_b$ и принять $\rho_{oc} = \rho_b = 1030 \text{ кг/м}^3$. Тогда при $h_b = 1\text{--}3 \text{ км}$ $\beta = 1,13\text{--}1,53$. В действительности

соответствующая региональному несогласию отражающая граница на рис. 8 характеризуется ненарушенным залеганием. Непрерывной является и расположенная глубже граница, соответствующая несогласию в подошве эоцена. Это означает, что крупное погружение в начале миоцена существенным растяжением коры не сопровождалось. В таких условиях погружение можно связать с уплотнением пород в земной коре в результате резкого ускорения метаморфизма при инфильтрации в кору мантийного флюида.

Перспективы нефтегазоносности

Характерной особенностью развития крупных нефтегазоносных бассейнов являются быстрые высокоамплитудные погружения земной коры [6; 3]. Такие погружения имели место на нескольких этапах в Северо-Баренцевской впадине. Вместе с существованием в ней многочисленных положительных структур это с большой вероятностью позволяет предполагать существование во впадине запасов углеводородов, измеряемых миллиардами тонн условного топлива [10]. В котловинах Подводников и Макарова быстрое погружение коры произошло в миоцене. На значительной части их площади мощность осадков составляет несколько километров, а на юге котловины Подводников она достигает 6 км и более. В таких условиях в этих областях также можно ожидать существования крупных запасов углеводородов. В настоящее время их освоение вряд ли возможно. Однако в связи с быстрым развитием новых технологий достаточно вероятно, что в обозримом будущем добыча в этих регионах станет экономически оправданной и экологически безопасной.

Заключение

В ряде глубоких осадочных бассейнов под мощным слоем осадков залегает консолидированная кора с повышенными скоростями продольных волн, утоненная до 10–20 км. Многие исследователи относят такую кору к океаническому типу [26; 24 и др.]. Погружение океанической коры начинается сразу после ее образования и продолжается в течение примерно 80 млн лет со скоростью, быстро затухающей во времени. Во многих глубоко погруженных областях, например, в Восточно-Баренцевской впадине и на поднятии Менделеева, погружение продолжалось в несколько раз дольше. Это возможно только в том случае, если под ними залегает кора континентального типа. Быстрое погружение коры со сменой мелководных условий на глубоководные, которое произошло в миоцене на хребте Ломоносова, в котловине Подводников и на поднятии Менделеева, также могло произойти лишь на континентальной коре. Быстрые высокоамплитудные погружения коры являются характерным признаком крупных нефтегазоносных бассейнов. Это позволяет с большой вероятностью

утверждать, что к данному типу относятся и указанные структуры.

Проведенное рассмотрение показывает, что сильно утоненная консолидированная кора с повышенными скоростями продольных волн в котловине Подводников, на хребте Ломоносова и на поднятии Менделеева представляет собой верхнюю часть континентальной коры, видоизмененную метаморфизмом. Под разделом Мохо в этих структурах залегает нижняя часть континентальной коры, в которой габброиды перешли в эклогиты с повышением скорости продольных волн до значений, характерных для мантии. Существование континентальной коры в указанных структурах позволяет относить их к расширенному континентальному шельфу Российской Федерации.

Литература

1. Аглонов С. В. Новые данные о геодинамике Прикаспийского бассейна // Рос. геофиз. журн. — 1995. — № 5–6. — С. 35–42.
2. Артемьев М. Е., Артюшков Е. В. О происхождении рифтовых впадин // Изв. АН СССР. Сер. геол. — 1968. — № 4. — С. 58–73.
3. Артюшков Е. В. Физическая тектоника. — М.: Наука, 1993. — 456 с.
4. 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. — 2010. — № 11. — С. 1515–1530.
5. Артюшков Е. В. Вертикальные движения земной коры на континентах как отражение глубинных процессов в коре и мантии Земли: Геологические следствия // Вестник РАН. — 2012. — Т. 82, № 12. — С. 1–17.
6. Артюшков Е. В., Беэр М. А. О механизме образования нефтегазоносных бассейнов Западно-Сибирской плиты и Русской платформы // Геология и геофизика. — 1987. — № 11. — С. 25–36.
7. Артюшков Е. В., Егоркин А. В. Физический механизм образования сверхглубоких осадочных бассейнов. Прикаспийская впадина // Докл. РАН. — 2005. — Т. 400, № 4. — С. 494–499.
8. Артюшков Е. В., Поселов В. А. Образование глубоководных впадин в российском секторе Американо-Сибирского бассейна в результате эклогитизации нижней части континентальной коры // Доклады РАН. — 2010. — Т. 431, № 5. — С. 680–684.
9. Артюшков Е. В., Беляев И. В., Казанин Г. С. и др. Образование сверхглубоких осадочных бассейнов вследствие метаморфизма с уплотнением пород в континентальной коре // Доклады РАН. — 2013. — Т. 458, № 5. — С. 567–571. — doi:10.7868/S0869565214290209.
10. Артюшков Е. В., Беляев И. В., Казанин Г. С. и др. Механизмы образования сверхглубоких прогибов: Северо-Баренцевская впадина

на. Перспективы нефтегазоносности // Геология и геофизика. — 2014. — № 5—6. — С. 821—846.

11. Буценко В. В. Главные тектонические события в Арктическом океане по сейсмическим данным: Автореф. дис. ... д-ра геол.-минерал. наук / ВНИИОкеангеология. — СПб., 2008. — 43 с.

12. Винклер Г. Петрология метаморфических горных пород. — М.: Мир, 1973.

13. Глумов И. Ф., Маловицкий Я. П., Новинов А. А., Сеннин Б. В. Региональная геология и нефтегазоносность Каспийского моря. — М.: Недра, 2004. — 344 с.

14. Кориковский С. П. Фации метаморфизма метapelитов. — М.: Наука, 1979. — 264 с.

15. Поселов В. А., Аветисов Г. П., Каминский В. Д. Российские арктические геотраверсы. — СПб., 2011. 172 с.

16. Хлебников П. А., Бельский В. Я., Пешкова И. Н. и др. Геологическое строение и перспективы нефтегазоносности восточного борта Северо-Баренцевской впадины // Разведка и охрана недр. — 2009. — № 4. — С. 13—20.

17. Artemjev M. E., Artyushkov E. V. Structure and isostasy of the Baikal rift and the mechanism of rifting // J. Geophys. Res. — 1971. — Vol. 76. — P. 1197—1211.

18. Christensen N., Mooney W. Seismic velocity structure and composition of the continental crust: A global view // J. Geophys. Res. — 1995. — Vol. 100. — P. 9761—9788.

19. Chopin C. Ultrahigh-pressure metamorphism: tracing continental crust into the mantle // Earth and Planetary Science Letters. — 2003. — 212. — P. 1—14.

20. Drachev S. S., Malyshev N. A., Nikishin A. M. Tectonic history and petroleum geology of the Russian Arctic Shelves: an overview // Petroleum Geology Conference series. — 2010. — Vol. 7. — P. 591—619.

21. Ferry J. M. A historical review of metamorphic fluid flow // J. Geoph. Research. — 1994. — Vol. 99. — P. 15487—15498.

22. Gac S., Huisman R. S., Podladchikov Yu. Yu., Faleide J. Y. On the origin of the ultradeep East Barents Sea basin // J. Geophys. Res. — 2012. — Vol. 117. — B04401. — doi:10.1029/2011JB008533, 2012.

23. Grantz A., Hart P. E., Childers V. A. Geology and tectonic development of the Amerasia and Canada Basins, Arctic Ocean // Arctic Petroleum Geology: Geological Society Memoirs: Vol. 35 / Ed. by A. M. Spencer et al. — London, 2011. — P. 771—799.

24. Guryanov F., Berry J., Bourne N. et al. Onshore to offshore regional-scale evolution of the area of the Eastern seas // 3P Arctic, The Polar Petroleum Potential Conference, Abstracts, Norway, Stavanger 15—18 October 2013. — P. 46.

25. Ivanova N. V., Sakulina T. S., Belyaev I. V. et al. Depth model of the Barents and Kara seas according to geophysical surveys results // Arctic Petroleum Geology: Geological Society Memoirs: Vol. 35 / Ed. by A. M. Spencer et al. — London, 2011. — P. 209—221.

26. Jackson J., Priestley K., Allen M., Berberian M. Active tectonics of the South Caspian Basin // Geophys. J. Int. — 2002. — Vol. 148. — P. 214—245.

27. Kashubin S., Poselov V., Sakulina T., Sal'nikov A. Velocity model of the Earth's crust and upper mantle for Mendeleev Rise and its transition to Siberian shelf: a composite seismic profile 2-DV-5AR // Arctic 2005: Fourth working meeting of Russian, Danish, Canadian and US Surveys national programs for delimitation of extended continental shelf in the Arctic, November 10—12, 2010, St. Petersburg.

28. Kazmin Y., Nikishin A., Glumov I. et al. Geological structure of sedimentary sequences of the Amerasia basin in Central Arctica based on seismic data interpretation // International conference «Geological structure and evolution problems of the Arctic basin within the Submission of the outer limits of the continental shelf of the Russian Federation in the Arctic Ocean», St. Petersburg, May 26—30, 2014.

29. Lawver L. A., Grantz A., Gahagan L. M. Plate kinematic evolution of the present Arctic region since the Ordovician // Tectonic evolution of the Bering Shelf-Chukchi Sea-Arctic Margin and Adjacent Landmasses / E. L. Miller, A. Grantz, S. L. Klemperer, eds. — [S. l.], 2002. — P. 333—358. — (GSA Spec. Pap.; vol. 360).

30. Le Pichon X., Sibuet J. C. Passive margins: A model of formation // J. Geophys. Res. — 1981. — Vol. 86. — P. 3708—3720.

31. Liou J. G., Maruyama S., Cong B. Introduction to geodynamic for high- and ultrahigh-pressure metamorphism // The Island Arc. — 1998. — № 7. — P. 1—5.

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

33. Moran K., Backman J., Brinkhuis H. et al. The Cenozoic palaeoenvironment of the Arctic Ocean // Nature. — 2006. — Vol. 441. — P. 601—605. — doi:10.1038/nature04800.

34. Pease V., Drachev S., Stephenson R., Zhang X. Arctic lithosphere // A Rev. Tectonophysics. — 2014. — Vol. 628. — P. 1—25. — doi:10.1016/j.tecto.2014.05.033.

35. Ritzmann O., Faleide J. I. The crust and mantle lithosphere in the Barents/Kara Sea region // Tectonophysics. — 2009. — Vol. 470. — P. 89—104.

36. Semprich J., Simon N. S. C., Podladchikov Y. Y. Density variations in the thickened crust as a function of pressure, temperature, and composition // Int. J. Earth Sci. — 2010. — Vol. 99. — P. 1487—1510. — doi:10.1007/s00531-010-0557-7.

37. Weigelt E., Jokat W., Franke D. Seismostratigraphy of the Siberian Arctic Ocean and adjacent Laptev Sea Shelf // The Polar Petroleum Potential Conference, Norway, Stavanger 15—18 October 2013.

38. Wernicke B. Uniform-sense normal simple shear of the continental lithosphere // Canadian J. of Earth Sciences. — 1985. — Vol. 22. — P. 108—125.

39. Ziegler P. A. North Sea rift system // Tectonophysics. — 1992. — Vol. 208. — P. 55—75.