

УДК 551.244.2

МЕХАНИЗМ ОБРАЗОВАНИЯ ГЛУБОКИХ ВПАДИН НА КОНТИНЕНТАХ. БАРЕНЦЕВСКИЙ ПРОГИБ

© 2004 г. Член-корреспондент РАН Е. В. Артюшков

Поступило 04.03.2004 г.

Внутри континентов и на их окраинах существуют глубокие прогибы: Прикаспийский, Южно-Каспийский, Баренцевский, Черноморский и др. Мощность осадков достигает в них 15–20 км и более, а в наиболее глубоких частях прогибов скорости продольных волн в утоненной консолидированной коре значительно повышены. Механизм образования таких структур представляет большой интерес для понимания основных процессов, формирующих земную кору, а также для поиска нефти и газа. Тем не менее он остается весьма дискуссионным. Причиной формирования прогибов данного типа часто считается растяжение литосферы [1–3 и др.]. Согласно другому объяснению они образовались главным образом за счет уплотнения пород основного состава в нижней коре вследствие фазовых переходов [4, 5]. Существуют разногласия также по поводу природы сильно утоненной консолидированной коры под впадинами: относится ли она к континентальному типу [2, 4–6] или же представляет собой океаническую кору, образовавшуюся в процессе спрединга [1, 3, 7].

В настоящей работе рассматривается Баренцевский прогиб (рис. 1). Кора в нем имеет докембрийский – байкальский, а местами, возможно, и более древний возраст [2, 3, 6, 7, 9]. В Восточно-Баренцевской впадине прогиб включает до 18–20 км осадков, а консолидированная кора утонена до 12–16 км. Существование в прогибе многочисленных сбросов (рис. 2, 3) указывает на растяжение литосферы. Поэтому обычно считается, что погружение коры в нем обусловлено растяжением [2, 3, 6, 7]. В работе [5] отмечено, что растяжение в прогибе не превышало 9–20%, однако какого-либо обоснования этой оценки не приведено. Образование сбросов действительно указывает на растяжение литосферы. Отсюда, однако, еще не следует, что растяжение было достаточным, чтобы обеспечить наблюдаемое погружение. Оче-

ним интенсивность растяжения литосферы β (отношение конечной ширины растянутой области к ее начальной ширине), которая была бы необходима для образования Баренцевского прогиба за счет растяжения. Мощность осадков h_{oc} , заполнивших прогиб, образованный растяжением платформенной литосферы, равна [4]

$$h_{oc} \approx 26(1 - 1/\beta) \text{ км.} \quad (1)$$

На основной части площади прогиба, за пределами области с сильно утоненной и высокоскоростной консолидированной корой, глубина прогиба достигает $h_{oc} = 10\text{--}12$ км, а местами и 20 км (рис. 2, 3).

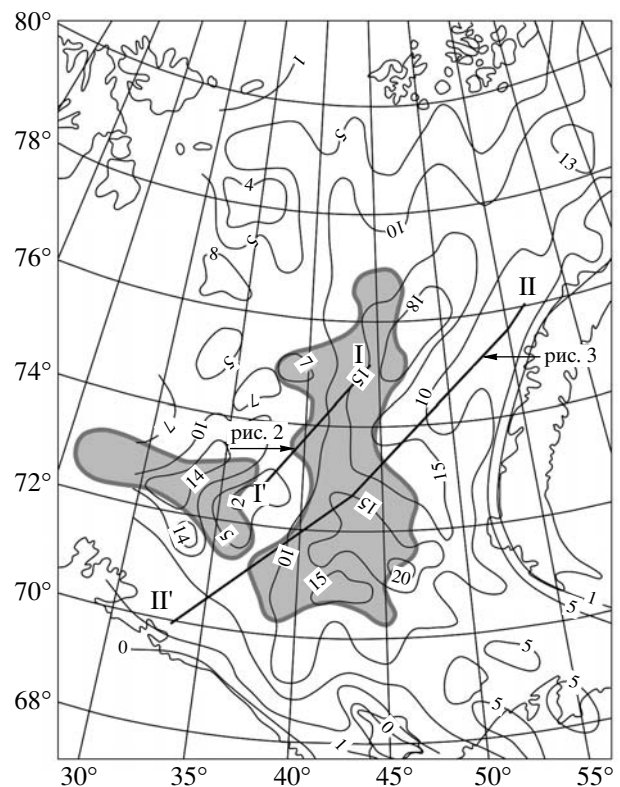


Рис. 1. Мощность осадков (км) в Баренцевском прогибе и область распространения “безграничной” коры, показанная серой заливкой (с изменениями по [6, 8]).

Институт физики Земли им. Г.А. Гамбурцева
Российской Академии наук, Москва

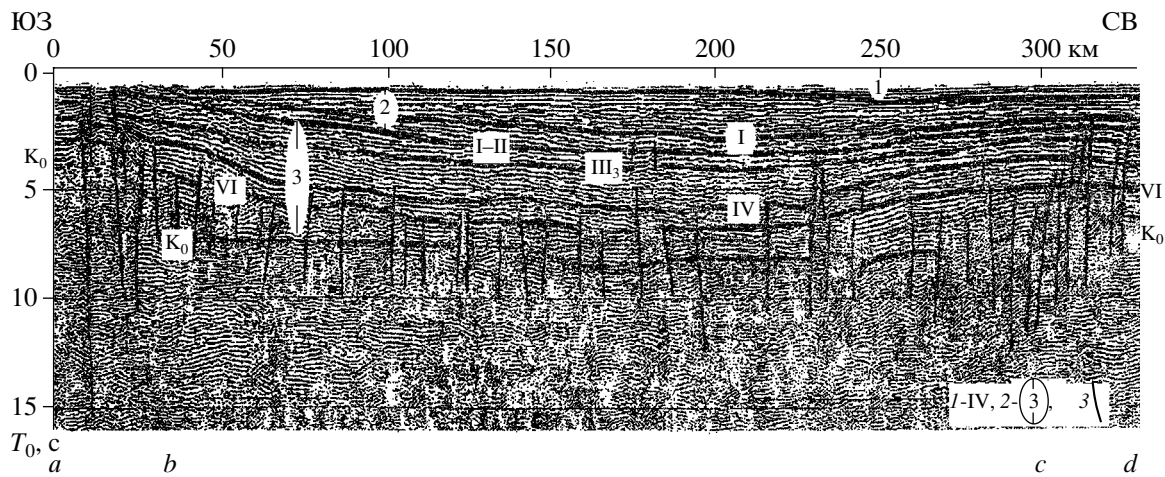


Рис. 2. Временной разрез по профилю широкоугольного сейсмического профилирования I–I' на рис. 1 (с изменениями по [7]). Расположение разреза см. на рис. 1. I – подошва триаса, I–II – кровля карбонатов нижней перми или верхнего карбона, III₃ – подошва верхнего девона, IV – подошва девона, VI – подошва палеозоя, K₀ – кристаллическое основание (подошва слоистого осадочного рифея). 1 – отражающие горизонты, 2 – структурные этажи, 3 – разломы.

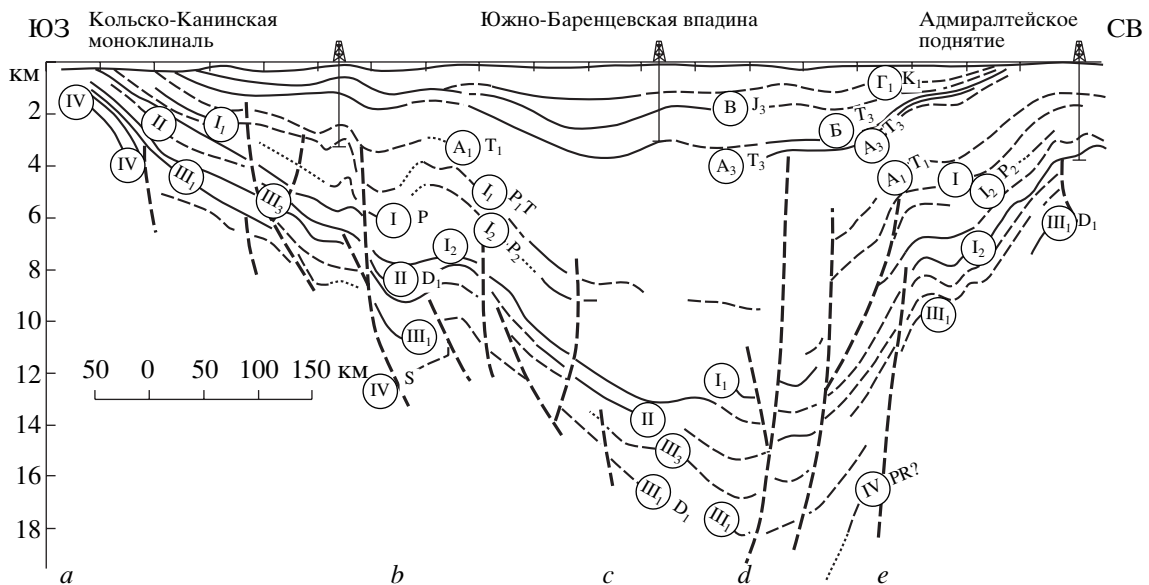


Рис. 3. Сейсмогеологический разрез по профилю Кольский шельф–Предновоземелье, II–II' (с изменениями по [2]). Расположение разреза см. на рис. 1.

Как следует из (1), чтобы образовать за счет растяжения прогиб с глубиной 10–12 км, нужно растянуть литосферу в $\beta = 1.6–1.9$ раз, т.е. достаточно сильно. Для погружения на 20 км интенсивность растяжения должна быть еще выше: $\beta = 4.3$.

Абсолютная величина растяжения, связанного с образованием сбросов (ΔL), равна сумме (Σ) горизонтальных смещений – растяжения одновозрастных слоев или фундамента на всех сбросах. Растя-

жение на отдельном сбросе равно $\Delta l = \Delta h \text{ ctg } \varphi$, где Δh – смещение слоя вдоль сброса по вертикали, а φ – угол падения сброса (рис. 4). Сумма растяжения на всех сбросах

$$\Delta L = \Sigma \Delta l_i = \Sigma \Delta h_i \text{ ctg } \varphi_i. \quad (2)$$

В осадочных бассейнах наблюдаются деформации растяжения двух основных типов [4]. При синтетическом растяжении ограниченные сбросами блоки горизонтальны или наклонены к оси проги-

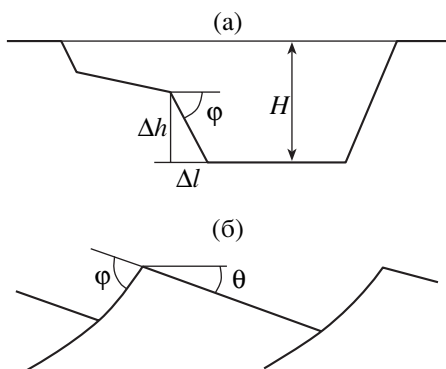


Рис. 4. Структуры синтетического (а) и антитетического (б) растяжения земной коры.

ба (рис. 4а). В этом случае, если поверхность блоков горизонтальна, сумма вертикальных смещений блоков на каждом склоне прогиба равна глубине прогиба H . Тогда

$$\Delta L = 2H \operatorname{ctg} \varphi, \quad (3)$$

где φ – средний угол падения сбросов. В большинстве случаев во впадинах, где существуют крупные сбросы, $\varphi \sim 45^\circ$. Тогда $\operatorname{ctg} \varphi \sim 1$, и если поверхность разделяемых разломами блоков горизонтальна, то $\Delta L \sim 2H$. Относительное растяжение в прогибе

$$\varepsilon = \beta - 1 = \Delta L / (L - \Delta L). \quad (4)$$

Как видно на рис. 2, 3, а также на многочисленных профилях [2, 3, 6, 7, 9 и др.], на основной части площади прогиба сбросы наклонены к его наиболее глубокой части. Это означает, что в прогибе имело место растяжение синтетического типа. Ширина прогиба L измеряется сотнями километров, что много больше его удвоенной глубины $2H$. Поэтому, как следует из (4), относительное растяжение в нем было заведомо мало ($\varepsilon \leq 0.1$, $\beta \leq 1.1$) и не могло обеспечить наблюдаемое погружение. На большинстве профилей суммарное погружение коры вдоль сбросов значительно меньше $2H$. Так, на профиле рис. 2 в его наиболее глубокой – средней части bc шириной 240 км кристаллическое основание K_0 находится на отметках 7.5–8 с, т.е. на глубинах ~ 17 –20 км. Смещения вдоль разломов блоков фундамента здесь практически отсутствуют. Более значительные вертикальные смещения фундамента, в сумме до ~ 5 км, существуют в левой части профиля ab и в его правой части cd (до ~ 10 км). В сумме смещения блоков фундамента по вертикали на профиле ad $\Sigma \Delta h_i \sim 15$ км в несколько раз меньше удвоенной глубины проги-

ба $2H \sim 40$ км. Большинство сбросов здесь крутые, и средний угол их падения $\varphi \sim 65^\circ$. Как следует из (2), растяжение фундамента составляет $\Delta L \sim \Sigma \Delta h_i \operatorname{ctg} \varphi \sim 7$ км. Согласно (4), при длине профиля $L \sim 330$ км среднее относительное растяжение $\varepsilon \sim 2\%$.

Подшоша палеозоя (VI) в средней части профиля находится на глубинах 15–17 км. Чтобы обеспечить такое погружение коры за счет растяжения, необходимо растянуть литосферу в $\beta = 2.4$ –2.9 раз, т.е. на 140–190%. Вертикальные смещения вдоль сбросов на разделе VI практически отсутствуют, так что $\varepsilon \leq 1\%$. Это означает, что крупное погружение коры за последние 545 млн. лет здесь практически не сопровождалось растяжением литосферы.

В Восточно-Баренцевской впадине фундамент в большинстве мест не прослеживается (рис. 3). Здесь почти на всем протяжении профиля хорошо виден горизонт Π_3 (D_3) – подошва верхнего девона, и от левого края профиля до Адмиралтейского поднятия прослеживается горизонт Π_1 (D_1) – подошва нижнего девона. На некоторых разломах (например, на разломах b , c , d и e) наблюдаются небольшие горизонтальные смещения этих слоев. Непосредственное измерение на профиле показывает, что их сумма $\Delta L \sim \Sigma \Delta h_i \operatorname{ctg} \varphi \sim 10$ км. При общей ширине отрезка профиля ae $L \approx 800$ км это соответствует относительному растяжению $\varepsilon \sim 1\%$.

В широких прогибах сильное растяжение литосферы может быть обеспечено только за счет антитетического растяжения, когда блоки, ограниченные сбросами, запрокинуты в сторону от оси прогиба (рис. 4б) [4]. Такие структуры существуют на континентальных склонах Атлантики, в грабенах Северного моря, в Провинции Бассейнов и Хребтов на западе Северной Америки и во многих других областях (см., например, рис. 28 в [2] и рис. 1.23, 2.30 в [4]). Угол наклона блоков θ связан с интенсивностью растяжения β как $\beta \approx \sin \varphi / \sin(\varphi - \theta)$. При $\varphi \sim 45^\circ$ для образования впадины глубиной 10–12 км за счет растяжения в $\beta = 1.6$ –1.9 раз, наклон блоков θ должен быть весьма значительным: $\theta \sim 19$ –23°. На основной части площади Баренцевского прогиба наклонные блоки встречаются редко (например, рис. 5.11 в [7] и рис. 27 в [10]). На рис. 3 такой блок виден только в подошве силура справа от разлома b . Поэтому антитетическое растяжение в погружении коры в прогибе существенной роли не играло.

Чтобы обеспечить погружение коры за счет растяжения, суммарная ширина разрывов фундамента или слоев осадков на сбросах должна быть сопоставима с суммарной шириной блоков, ограниченных сбросами. В Баренцевском прогибе первая величина много меньше второй. Поэтому вклад растяжения в общее погружение здесь не превышает нескольких процентов. В таких условиях крупное погружение могло произойти только вследствие уплотнения пород в нижней коре за счет фазового перехода габбро в более плотные гранатовые гранулиты или эклогиты [4]. Как следует из условия изостатического равновесия, для образования слоя осадков мощностью h_{oc} и с плотностью ρ_{oc} требуется образование из габбро с плотностью $\rho_{гб}$ слоя гранатовых гранулитов с плотностью $\rho_{гл}$ и с толщиной

$$h_{гл} = (\rho_{гб}/\rho_m)[(\rho_m - \rho_{oc})/(\rho_{гл} - \rho_{гб})]h_{oc}. \quad (5)$$

Здесь $\rho_m = 3350 \text{ кг/м}^3$ – плотность мантии. Положим, например, $\rho_{гл} = 3400 \text{ кг/м}^3$, $\rho_{гб} = 2950 \text{ кг/м}^3$, $\rho_{oc} = 2600 \text{ кг/м}^3$. Тогда при $h_{oc} = 10\text{--}15 \text{ км}$, $h_{гл} = 15\text{--}22 \text{ км}$. Как показывает эта оценка, под разделом Мохо в Баренцевском прогибе располагается мощный слой уплотненных пород основного состава, который с петрологической точки зрения относится к коре. В зависимости от степени метаморфизма скорости продольных волн (V_p) в таких породах изменяются от значений $\sim 7.2 \text{ км/с}$, типичных для нижней части базальтового слоя, до значений $\geq 8.0 \text{ км/с}$, характерных для мантийных перидотитов [11]. Значения V_p под разделом Мохо в прогибе варьируют в широких пределах: от 7.3 до 8 км/с и более [3, 7]. В наиболее глубокой части прогиба под разделом М на глубинах от 30 до 50 км и более расположен слой пород с $V_p = 7.5\text{--}7.9 \text{ км/с}$ толщиной $\geq 20 \text{ км}$ (рис. 7.4 в [7]). Такие скорости характерны не для мантии, а для гранатовых гранулитов с плотностями, близкими к плотности мантии, или с более высокими плотностями [11]. При толщине консолидированной коры над разделом М в 14 км [2] общая толщина этого слоя под прогибом должна составлять 29–36 км, что характерно для многих платформенных областей. Гравиметрические данные также указывают на существование под разделом М мощного слоя пород, более плотных, чем мантия [12]. Под Южно-Баренцевской впадиной ниже раздела М на глубинах от 34 до 52 км наблюдаются отражающие границы с $V_p = 6.0\text{--}6.4 \text{ км/с}$ [2]. Крупные объемы пород с такими скоростями в мантии отсутствуют, и они характерны только

для коры. Это подтверждает существование под разделом М, определяемым по сейсмическим данным, мощного слоя пород, по своему составу относящихся к земной коре.

Баренцевский прогиб – это крупный нефтегазоносный бассейн. Характерная особенность таких бассейнов – быстрые погружения коры с образованием глубоководных впадин [4]. В Баренцевом море быстрые погружения имели место, по крайней мере, дважды. В карбоне–ранней перми в нем накопился слой карбонатов толщиной 1–2 км [2, 6], что свидетельствует о существовании мелководных условий. Карбонаты резко перекрыты терригенными клиноформами высотой $\sim 1 \text{ км}$ [2, 10 и др.]. Это указывает на быстрое образование впадины с глубиной воды $\sim 1 \text{ км}$. Второе погружение произошло в поздней юре одновременно с погружением в Западной Сибири, где началось отложение баженовской свиты. В это время в Баренцевом море на мелководном шельфе сформировалась впадина с глубиной воды $\sim 0.5 \text{ км}$.

Рассмотрим, может ли консолидированная кора в Восточно-Баренцевской впадине иметь океаническую природу. В океанических котловинах на коре толщиной $\sim 7 \text{ км}$ глубина воды составляет 5–5.5 км. В Восточно-Баренцевской впадине начальная глубина воды на океанической коре толщиной 14 км была бы 3.5–4 км. С учетом изостатического погружения коры под нагрузкой осадков для заполнения такой впадины их потребовалось бы 10–12 км. Это гораздо меньше мощности осадков во впадине, достигающей 16–20 км.

Погружение океанической коры, образовавшейся на оси спрединга, практически заканчивается через 80 млн. лет [13 и др.]. Судя по наличию во впадине осадков начала девона ($Ш_1, D_1$ на рис. 3), а скорее всего, и более древних, океаническая кора могла образоваться в ней только до девона, т.е. $\geq 420 \text{ млн. лет}$ назад. Ее погружение закончилось бы не позже раннего карбона $\sim 340 \text{ млн. лет}$ назад. Судя по отложению мелководных карбонатов (С–Р на профилях AA' и DD' в [6]), к этому времени начальная депрессия была уже заполнена осадками. Подошва карбона здесь залегает на глубине 16 км на юге и 14 км на севере (см. профили AA' и DD' в [6]). На нижележащие осадки остается 4–6 км, и, с учетом изостатического погружения коры под нагрузкой осадков, океаническую впадину они заполнить не могли.

Основная часть осадков (14–16 км) отложилась во впадине после того, как погружение океанической литосферы должно было прекратиться. В отсутствие сильного растяжения такое погружение могло произойти только вследствие уплотнения за счет фазовых переходов пород основного состава в слое толщиной $\geq 20 \text{ км}$ под разделом Мохо.

Тогда вместе с консолидированной корой толщиной ~14 км над разделом М общая мощность консолидированной коры составляет ≥ 34 км, что характерно для континентальных областей.

Можно, в принципе, допустить, что в ранней перми глубоководные условия в Восточно-Баренцевской впадине существовали потому, что в это время океаническая впадина, возникшая здесь до девона, еще не была заполнена осадками. Мелководные условия во впадине были достигнуты в конце перми. К этому времени – через ≥ 180 млн. лет после предположительного образования океанической коры ее погружение прекратилось бы. В действительности в триасе, юре и мелу во впадине накопилось еще до 10–12 км осадков, что было возможно только в результате уплотнения за счет фазовых переходов мощного слоя пород в нижней части континентальной коры. Это еще одно указание на отсутствие океанической коры во впадине.

Природа повышенных скоростей в консолидированной коре в Восточно-Баренцевской впадине требует отдельного рассмотрения. Отметим, однако, что в верхней части “базальтового слоя” в “безгранитном окне” в Северо-Баренцевской впадине показаны значения $V_p = 6.1–6.4$ км/с (рис. 6 в [3]). Эти скорости характерны не для базальтового слоя с $V_p \geq 6.8$ км/с, а для гранитов. Действительно, на рис. 5, 6 в [3] такие же скорости показаны во многих местах в гранитном слое под осадочным чехлом. При современной точности данных нельзя исключить, что породы кислого и среднего составов, типичные для континентальной коры, залегают в верхней части консолидированной коры под всей Восточно-Баренцевской впадиной.

В ранней перми в этой впадине существовал глубоководный бассейн. В это же время глубоководный бассейн быстро сформировался и на остальной части Баренцевского прогиба. В последних областях быстрое погружение произошло вследствие фазовых переходов в нижней коре и растяжением коры не сопровождалось. Поэтому наиболее вероятно, что и в Восточно-Баренцевской впадине относительно глубоководная депрессия образовалась в то же время и за счет того же механизма – уплотнения пород в нижней коре вследствие фазовых переходов. Быстрые погружения коры данной природы сопровождаются резким размягчением литосферы [14, 15]. Поэтому нельзя исключить, что после быстрого погружения в перми во впадине действительно проявилось растяжение. Сейсмическое профилирование обеспечивает здесь надежное разрешение только до глубины 12–14 км. В менее глубоких слоях, хорошо видных на сейсмических профилях, например на рис. 3, растяжение не превышает нескольких процентов. Можно, однако, предположить,

что в нижней части разреза во впадине присутствуют наклонные блоки, образовавшиеся вследствие растяжения континентальной коры [2]. Сильного растяжения коры в ней в любом случае не было, поскольку консолидированная кора, включающая слои, расположенные как выше, так и ниже Мохо, имеет здесь большую толщину, характерную для платформ. Поэтому, если на каком-то этапе здесь и проявилось растяжение, то оно вряд ли превышало ~10% ($\beta \sim 1.1$). Согласно соотношению (1), такое растяжение могло обеспечить накопление до 2.4 км осадков, т.е. до ~12% от общей мощности осадков во впадине. Оценить интенсивность в ней растяжения можно будет только после получения данных о структуре наклонных блоков, если они здесь существуют.

Проведенный анализ позволил получить следующие основные результаты: 1) весь Баренцевский прогиб подстилается корой континентального типа; 2) за пределами Восточно-Баренцевской впадины погружение в прогибе не сопровождалось существенным растяжением литосферы и было обусловлено уплотнением пород основного состава в нижней коре за счет фазовых переходов; 3) при современной точности данных нельзя исключить, что на ранних этапах развития в Восточно-Баренцевской впадине проявилось умеренное растяжение литосферы, но основное погружение коры здесь также было обусловлено фазовыми переходами в ее нижней части.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант 03–05–64166.)

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Зоненшайн Л.П., Кузьмин М.И., Натанов Л.М.* Тектоника литосферных плит территории СССР. М.: Недра, 1990. Кн. 2. 335 с.
2. *Шипилов Э.В., Тарасов Г.А.* Региональная геология нефтегазоносных осадочных бассейнов Западно-Арктического шельфа России. Апатиты, 1998. 308 с.
3. *Верба М.Л., Иванова Н.М., Кацев В.А. и др.* // Разведка и охрана недр. 2001. № 10. С. 3–7.
4. *Артюшков Е.В.* Физическая тектоника. М.: Наука, 1993. 456 с.
5. *Коган Л.И., Маловицкий Я.П., Мурзин Р.Р.* // Разведка и охрана недр. 2002. № 8. С. 52–58.
6. Тектоническая карта Баренцева моря и севера Европейской части России. 1:2500000 / Под ред. Н.А. Богданова и В.Е. Хаина. М.: Ин-т литосферы РАН, 1996.
7. Сейсмогеологическая модель литосферы Северной Европы / Под ред. Ф.П. Митрофанова и Н.В. Шарова. Апатиты: 1988. Ч. 1. 238 с.; Ч. 2. 206 с.

8. *Ostistiy B.K., Fedorovsky Y.F.* In: Arctic Geology and Petroleum Potential. Amsterdam: Elsevier, 1992. P. 243–252.
9. Баренцевская шельфовая плита / Под ред. И.С. Грамберга. Л.: Наука, 1988. 264 с.
10. *Виноградов А.В.* // Изв. АН СССР. Сер. геол. 1987. № 12. С. 74–86.
11. *Sobolev S.V., Babeiko A.Yu.* // Surv. Geophys. 1994. V. 15. P. 515–544.
12. *Кабан М.К.* // Рос. журн. наук о Земле. 2001. Т. 3. № 2. С. 143–163.
13. *Turcotte D.L., Schubert J.* Geodynamics. Cambridge: Cambridge Univ. Press, 2002. 528 p.
14. *Artyushkov E.V., Mörner N.-A., Tarling D.L.* // Geophys. J. Intern. 2000. V. 143. P. 752–776.
15. *Артюшков Е.В.* // Геотектоника. 2003. № 2. С. 39–56.