

ЗЕМНАЯ КОРА ГЛУБОКИХ ПЛАТФОРМЕННЫХ ВПАДИН СЕВЕРНОЙ ЕВРАЗИИ И ПРИРОДА ИХ ФОРМИРОВАНИЯ

© 2016 г. Н. И. Павленкова¹, С. Н. Кашубин², Г. А. Павленкова¹

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

²ВСЕГЕИ, г. Санкт-Петербург

E-mail: ninapav@mail.ru, Sergey_Kashubin@vsegei.ru

Поступила в редакцию 23.11.2015 г.

В платформенных областях Северной Евразии выявлено несколько крупных впадин глубиной до 15–20 км: Прикаспийская, Вилуйская, Пур-Гыданская, Карско-Баренцевские впадины. Общими структурными особенностями этих впадин является округлая форма с крутыми склонами и сокращение мощности земной коры. При глубине впадин 15–20 км поверхность фундамента плоская и представлена почти горизонтальной границей. Различаются впадины средними сейсмическими скоростями в консолидированной коре, от 6.2–6.4 до 6.8–7.0 км/с. Различаются впадины типом консолидированной коры, от континентального с мощным гранито-гнейсовым слоем до “субокеанического”, представленного “базитовым” слоем. Для формирования этих впадин предлагается комплексная петро-физическая модель, включающая несколько геодинамических процессов разной интенсивности: рифтогенез, базификация и эклогитизация коры. Кроме этого добавляется процесс оттока из-под впадины вещества по существующему в средней коре слою повышенной пористости и флюидонасыщенности. Это позволяет объяснить большое сокращение гранито-гнейсового слоя при сохранении плоской формы поверхности фундамента и формирование вокруг впадины значительных площадей сноса обломочного материала. Для такого формирования впадин необходим обширный, но достаточно равномерный по площади и долго действующий источник энергии. Наиболее вероятным таким источником является внедрение в низы коры мантийного материала, насыщенного глубинными флюидами или просто продолжительный поток глубинных флюидов.

Ключевые слова: земная кора, глубинное сейсмическое зондирование, глубокие впадины, тип коры, ослабленный слой в коре

DOI: 10.7868/S0002333716050124

ВВЕДЕНИЕ

В пределах Северной Евразии по данным глубинных сейсмических исследований выявлено несколько крупных впадин глубиной до 15–20 км. Это — не только впадины внутренних морей: Южно-Каспийская и Черноморская, но и крупные платформенные впадины: в пределах Восточно-Европейского кратона Днепровско-Донецкая и Прикаспийская впадины, в пределах Сибирского кратона Вилуйская впадина, на Карско-Баренцевской плите Южно-Баренцевская, Северо-Баренцевская и Южно-Карская впадины, на Западно-Сибирской плите — Пур-Гыданская впадина (рис. 1). Наличие такого большого числа глубоких впадин в платформенных областях одного континента является уникальной его особенностью, что представляет особый интерес для изучения геодинамических процессов формирования подобных впадин. Многие из этих впадин нефтеносные, что придает им большое значение и с

точки зрения изучения природы нефтегазоносности осадочных бассейнов.

Строение земной коры отмеченных впадин детально изучено геофизическими методами: осадочный чехол методом МОВ-ОГТ, вся кора и верхи мантии методом глубинного сейсмического зондирования (ГСЗ). Эти работы проводились в разные годы, разными организациями и по разной методике [Павленкова, 1973; 1988; Егоркин, Разинкова, 1980; Егоркин и др., 1988; 1996; Морозова и др., 1995; Верба, Матвеев, 2000; DOBRE..., 2003; Егоркин, 2006; Сакулина и др., 2009; Павленкова, Павленкова, 2014]. Существенно менялась и методика обработки этих данных. Все это затрудняло сопоставление материалов по разным впадинам и выявления общих черт и различий в структуре их земной коры.

В последние годы материалы ГСЗ почти по всем этим впадинам были обработаны авторами по единой методике на основе современных наиболее информативных методов и представлены в

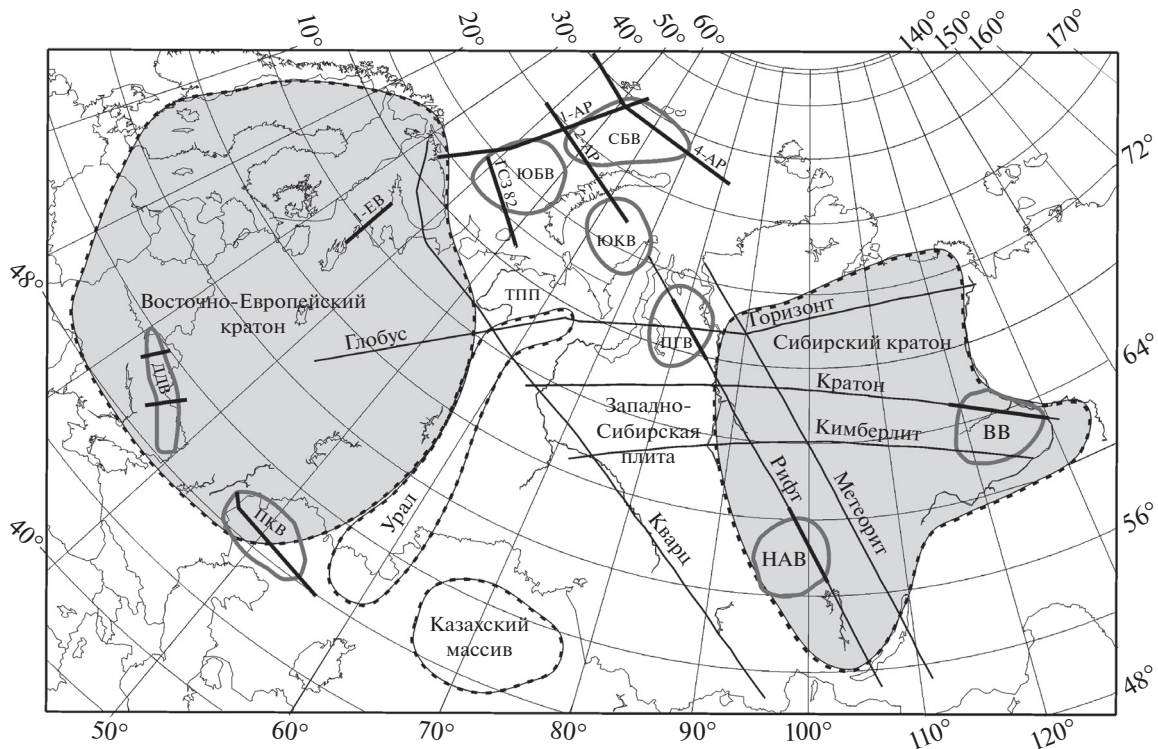


Рис. 1. Схема основных тектонических структур Северной Евразии и расположения глубоких платформенных впадин и сейсмических профилей. ТПП – Тимано-Печорская плита. Впадины: ДДВ – Днепровско-Донецкая, ПКВ – Прикаспийская, НАВ – Нижне-Ангарская, ВВ – Вилуйская, ЮБВ – Южно-Баренцевская, СБВ – Северо-Баренцевская, ЮКВ – Южно-Карская, ПГВ – Пур-Гыданская. На схеме приведены профили ГСЗ с их названиями, на основании которых были выделены глубокие впадины; утолщенными линиями показаны участки профилей, для которых в работе приведены разрезы земной коры.

единой форме, что позволяет достаточно объективно провести сопоставление полученных сейсмических моделей земной коры этих впадин, выделить их общие черты и различия. Результаты такой обработки и обобщения приводятся ниже, они включают фактические данные о структуре земной коры впадин, их деление на различные типы и затем предлагаются возможные модели их формирования.

ТИПИЗАЦИЯ ЗЕМНОЙ КОРЫ ПО ИХ СЕЙСМИЧЕСКИМ МОДЕЛЯМ

В работе [Белюсов, Павленкова, 1989] была предложена общая типизация земной коры по их сейсмическим моделям. Основными характеристиками таких моделей является мощность коры, число слоев с разными скоростями сейсмических волн и толщина этих слоев. Было выделено три основных типа коры: континентальный, океанический и переходный (рис. 2). Различаются они, в основном, средней мощностью коры (от 40–50 км для континентальной коры до 5–10 км для океанической) и скоростями продольных волн в консоли-

рованной части коры (от 6.0–7.0 км/с в континентальной коре до 6.5–7.0 км/с – в океанической).

Базовой моделью континентальной коры с небольшим (не более 5 км) слоем осадочного чехла выбрана трехслойная модель: верхний слой со скоростями продольных волн 6.0–6.4 км/с (“верхняя кора”), промежуточный слой со скоростью 6.5–6.7 км/с (“средняя кора”) и нижний слой (6.8–7.2 км/с, “нижняя кора”). Иногда в низах коры выделяется слой со скоростью 7.3–7.5 км/с, но это редкие случаи.

В настоящее время данные глубокого бурения, изучения ксенолитов и лабораторные исследования физических свойств пород при изменении давления, температуры и напряженности позволяют с большой степенью вероятности дать сейсмическим слоям континентальной коры конкретные петрофизические названия. Глубокое бурение достаточно обосновано показало, что два верхних слоя сложены, в основном, кислыми породами и различаются лишь большей степенью метаморфизма пород средней коры, поэтому верхний слой можно называть гранито-гнейсовым, а средний гранулитно-гнейсовым [Кременецкий и др.,

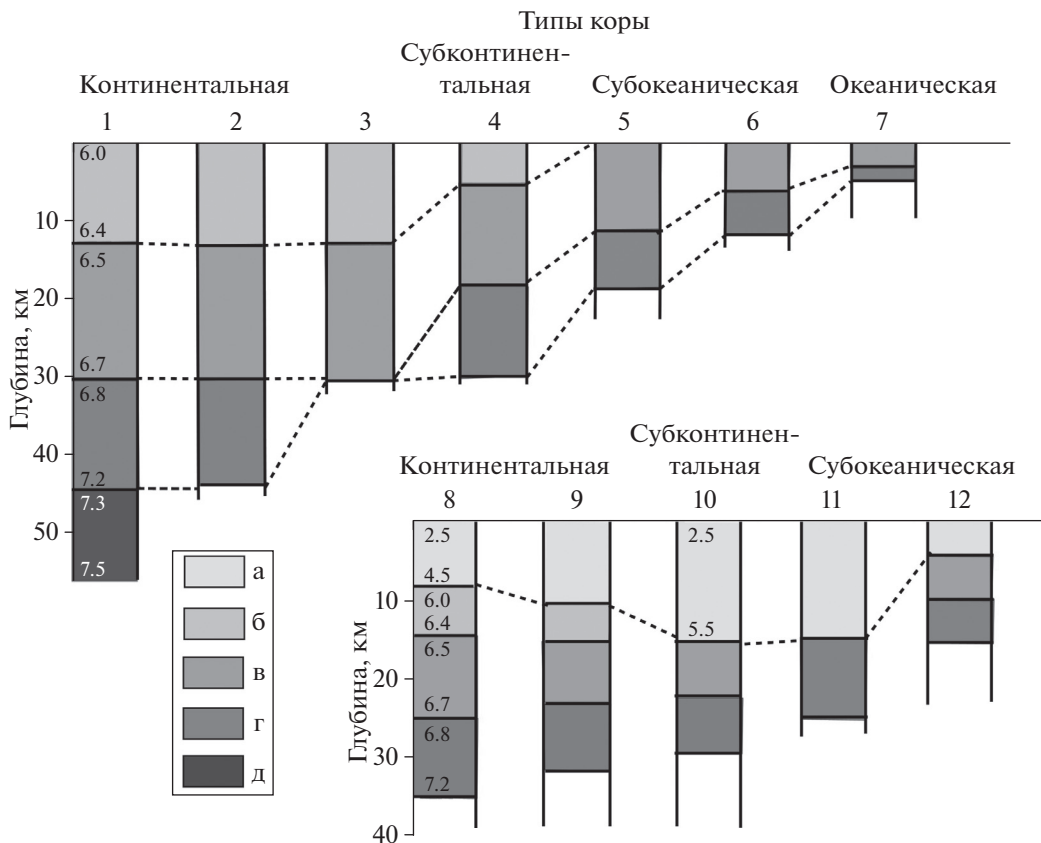


Рис. 2. Типы земной коры [Белоусов, Павленкова, 1989]. Основные слои земной коры: а – осадочный чехол, б – верхняя (гранито-гнейсовая) кора, в – средняя (гранулитогнейсовая) кора, г – нижняя (базитовая) кора, д – коромантыйный слой. Цифрами даны скорости продольных волн в каждом слое.

1987]. Для нижнего слоя целесообразно использовать название “гранулитобазитовый”, подчеркивая основной состав и высокую степень метаморфизма слагающего его вещества [Downes et al., 2002]. Подобное закрепление за геофизическими слоями конкретных петрофизических названий не является достаточно строгим, поэтому ниже будут использоваться и нейтральные названия: верхняя, средняя и нижняя кора.

Консолидированная часть океанической коры по данным глубоководного бурения представлена двумя основными слоями: базальтовым мощностью 2–5 км с сейсмическими скоростями 4–5 км/с и слоем габбро толщиной 5–10 км со скоростями 6.6–7.4 км/с [Блюман, 2013].

Кроме коры континентального и океанического типа выделяется кора переходного типа (рис. 2). В отличие от коры континентального типа, представленной тремя основными слоями примерно одинаковой мощности, для переходных типов характерно сокращение толщины верхнего слоя для субконтинентальной коры и полное его отсутствие в “субокеанической” коре. Следует отметить условность этих названий, особенно название “субокеа-

нической” коры. В литературе такую кору часто называют даже “океанической”, что предполагает базальтовый ее состав.

Для глубоких (более 7–10 км) осадочных бассейнов континентов по сейсмическим моделям их консолидированной части можно также предложить три типа коры: континентальный, субконтинентальный и “субокеанический” (рис. 2). Предполагается, что эти типы также различаются средним составом коры: континентальный и субконтинентальный представлены гранито-гнейсовыми породами, “субокеанический” – гранулитобазитовыми.

СТРУКТУРА ЗЕМНОЙ КОРЫ ГЛУБОКИХ ВПАДИН СЕВЕРНОЙ ЕВРАЗИИ

В пределах Северной Евразии перечисленные выше крупные впадины характеризуются разными типами коры, хотя по геологическим данным они имеют сходное строение и казалось бы сходную историю развития.

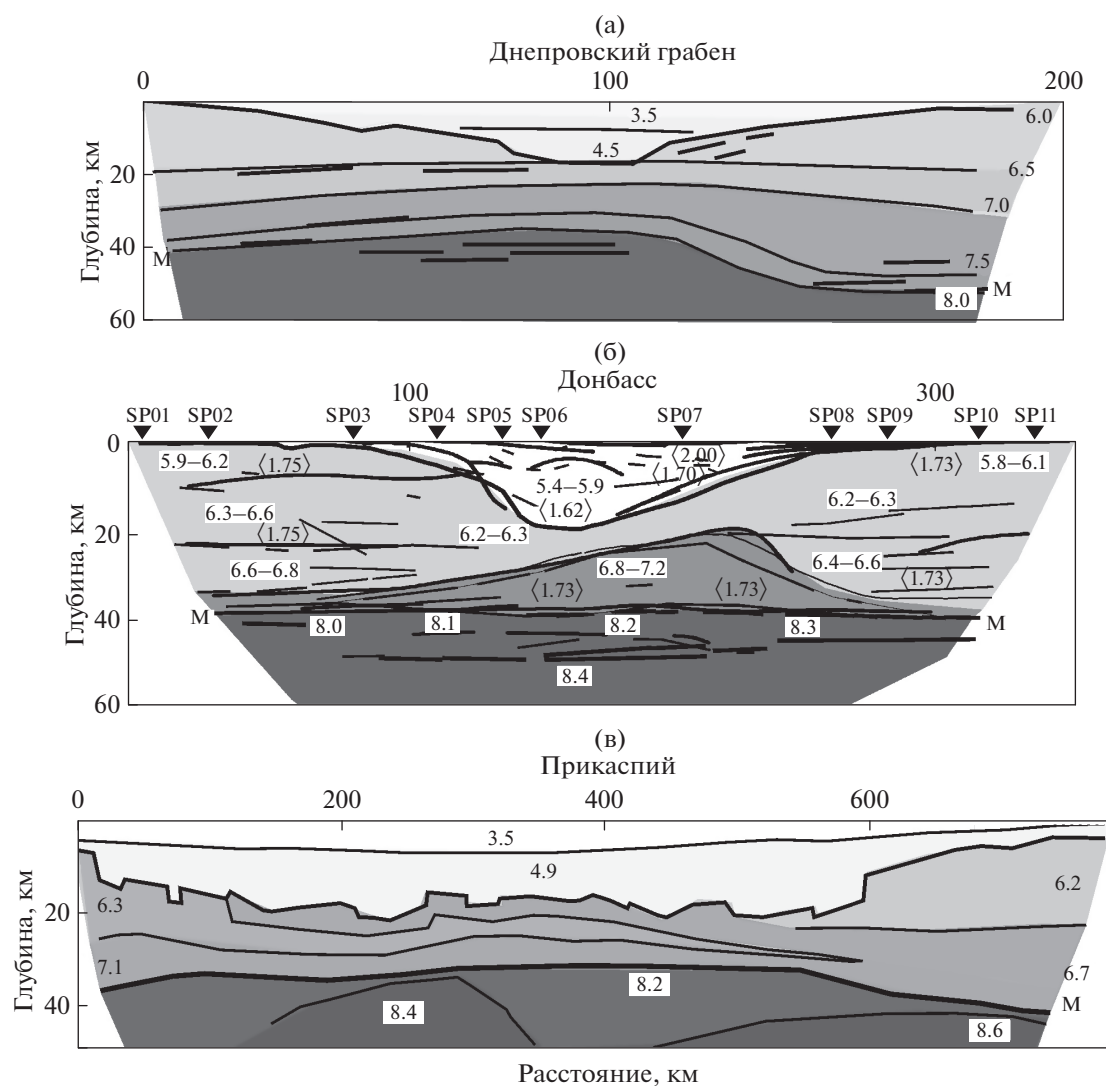


Рис. 3. Сейсмические разрезы земной коры глубоких впадин Восточно-Европейского кратона: (а) – Днепровский грабен [Павленкова, 1973]; (б) – Донбасс [DODRE..., 2003], (в) – Прикаспийская впадина [Егоркин, Разинкова, 1980]. Тонкими линиями даны изолинии скорости, утолщенными – четкие сейсмические границы (М – подошва земной коры – Мохо). Цифры – скорости продольных волн, цифры в скобках – отношение скоростей продольных и поперечных волн.

Впадины Восточно-Европейского и Сибирского кратонов

В пределах Восточно-Европейского кратона хорошо изучена структура земной коры Днепровско-Донецкой и Прикаспийской впадин [Павленкова, 1973; DOBRE..., 2003; Егоркин, Разинкова, 1980]. Отмечается, что эти впадины несколько различаются по мощности осадочного чехла и всей коры, по строению области перехода от коры к мантии (по структуре границы М), что свидетельствует о достаточно разной истории их формирования (рис. 3). Эти различия характерны и для отдельных частей Днепровско-Донецкой впадины: Днепровского грабена и Донбасса. Но, в целом, все впадины характеризуются и рядом

общих черт. Главные из них – сокращение мощности коры и увеличение средних сейсмических скоростей в консолидированной ее части. Мощность коры уменьшается за счет подъема границы М, и почти полностью выклинивается слой верхней коры со скоростями сейсмических волн от 5.8 до 6.4 км/с. Различаются впадины средними скоростями в консолидированной коре. Кора Днепровского грабена самая низкоскоростная и ее можно отнести к платформенному типу. В коре Донбасса большую мощность имеет нижний слой, образующий выступ до глубины 20 км. Это – субконтинентальная кора. Некоторая неоднозначность касается коры Прикаспийской впадины. В целом это кора “субокеанического” типа, но в ней есть не-

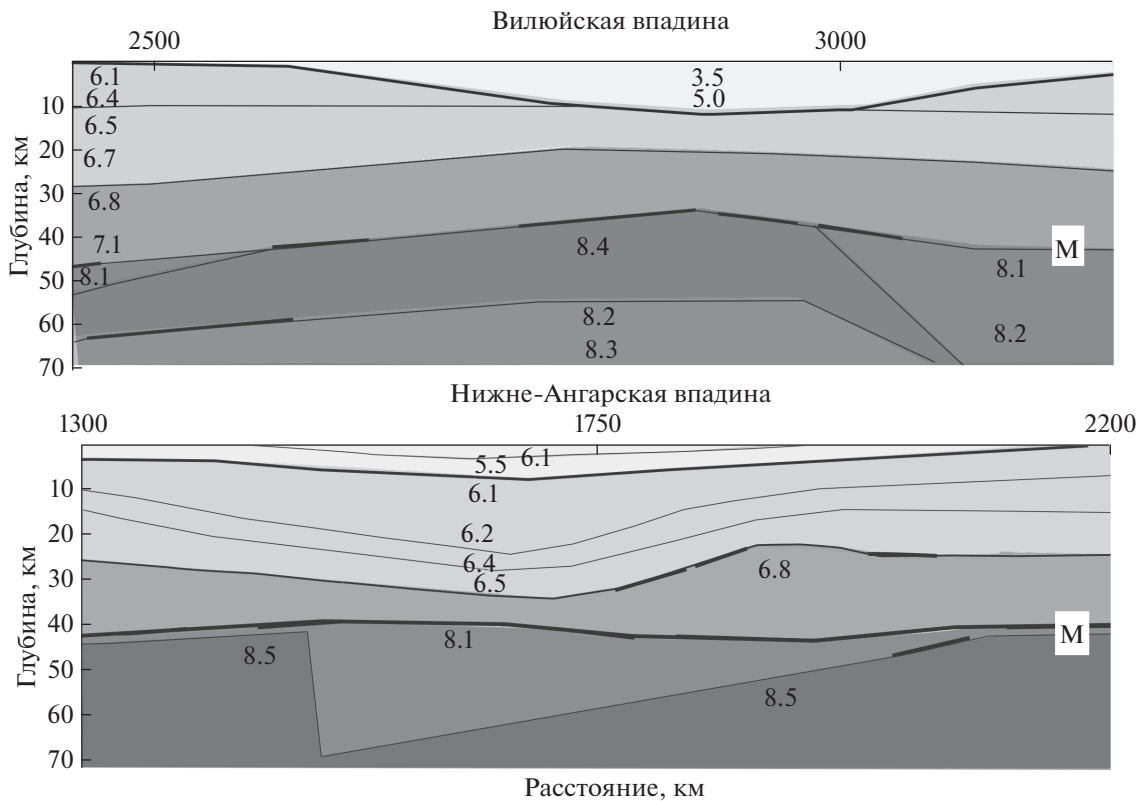


Рис. 4. Сейсмические разрезы земной коры глубоких впадин Сибирского кратона: Вилуйской по профилю “Кратон” [Егоркин и др., 1988] и Нижне-Ангарской по профилю “Рифт” [Павленкова Н.И., Павленкова Г.А., 2014]. Обозначения на рис. 3.

большой слой с пониженной скоростью (6.3 км/с), типичной для субконтинентальной коры. Правда, располагается он не в кровле консолидированной коры, а под слоем со скоростью 6.7 км/с. В таком случае определить пластовую скорость в инверсионной зоне очень трудно.

В пределах Сибирского кратона самой глубокой впадиной является Вилуйская впадина (рис. 4), мощность осадочного чехла в которой достигает 10 км [Егоркин и др., 1988]. По структуре земной коры это – классическая впадина субконтинентального типа: мощность земной коры существенно сокращена в ней за счет верхнего слоя.

В юго-западной части Сибирского кратона (рис. 1) выявлена еще одна достаточно глубокая (до 8 км) впадина – Нижне-Ангарская. Она имеет совершенно другое строение по сравнению со всеми описанными выше впадинами [Павленкова, Павленкова, 2014]. Отличается эта впадина и геологической историей развития. Она является частью обширной Тунгусской синеклизы, большая часть осадочного чехла которой сложена платобазальтами со скоростями до 6.1 км/с. То есть эту впадину трудно относить к типичным платформенным впадинам (рис. 4). Структура ее земной коры существенно отличается пониженными,

а не повышенными сейсмическими скоростями и происходит это за счет существенного увеличения мощности верхней коры и сокращения нижней базитовой части. Это – континентальный тип коры. Необычность этой коры отмечается не только при сравнении ее с другими впадинами, но и в целом, для древних кратонов не характерны такие малые скорости в коре.

Впадины Западно-Сибирской и Карско-Баренцевской молодых плит

В северной части Западно-Сибирской плиты и на Карско-Баренцевском шельфе, представленном, в целом, континентальным типом коры [Кашубин и др., 2013а], выявлено несколько очень глубоких впадин. Это – Южно-Баренцевская и Северо-Баренцевская впадины, Южно-Карская и Пур-Гыданская впадины (рис. 1). Последние детальные глубинные сейсмические исследования этого региона (рис. 5) показали, что эти близкие расположенные и близкие по строению впадины существенно различаются по строению коры. В Южно-Баренцевской и Пур-Гыданской впадинах (рис. 6) при мощности осадков более 15 км консолидированная кора практически полностью пред-

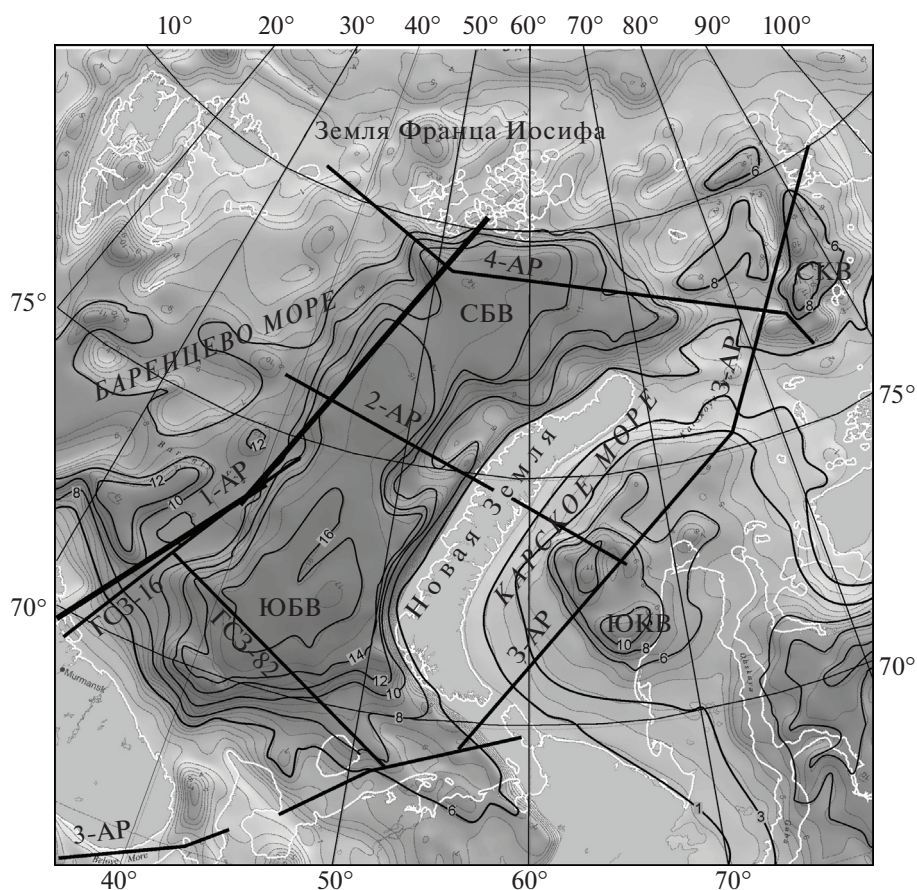


Рис. 5. Схема расположения профилей ГСЗ и карта глубин до поверхности фундамента Карско-Баренцевского шельфа. Обозначения впадин приведены на рис. 1.

ставлена гранулитобазитным слоем со скоростями сейсмических волн 6.6–7.3 км/с. Это – типичная “субокеаническая” кора. В Южно-Карской впадине (рис. 7) кора субконтинентального типа.

Совершенно другое строение имеет кора Северо-Баренцевской впадины. Мощность осадочного чехла этой впадины более 10 км, мощность коры 35–40 км. Ее консолидированная кора отличается пониженными скоростями: 5.8–6.0 км/с по поверхности фундамента и скорости 6.3–6.4 км/с (верхняя кора) прослеживаются до глубины 25 км. Кроме этого в западной части впадины выделяется мощный (около 10 км) слой со скоростями 5.6–5.8 км/с, который можно отнести и к фундаменту, и к низам осадочной толщи (ПК 300–600 км). Возможно, он соответствует древнему грабену, существовавшему здесь на первых этапах формирования всей впадины. Такая кора относится к континентальному типу. Под Северо-Баренцевской впадиной трудно также отметить подъем границы М. Возможно, это связано с общим увеличением глубины до этой границы с запада на восток, и с изменением структуры ниж-

ней коры, при котором увеличивается мощность высокоскоростной (6.6–7.2 км/с) ее части.

Таким образом, в таком относительно небольшом регионе выделены глубокие впадины всех трех типов: континентального, субконтинентального и “субокеанического”. Они расположены близко друг к другу и не образуют каких-либо регулярных структурных форм. Общими структурными особенностями всех отмеченных впадин является их изометрическая форма и крутые склоны. При глубине порядка 20 км их дно имеет плоскую форму, и поверхность фундамента часто представлена протяженными практически горизонтальными сейсмическими границами. Это существенно усложняет определение природы формирования таких впадин.

МОДЕЛИ ФОРМИРОВАНИЯ ГЛУБОКИХ ВПАДИН

В настоящее время предлагаются различные модели формирования глубоких впадин. Наиболее популярными из них являются рифтогенез, базификация и эклогитизация коры. Анализ структурных особенностей описанных выше впадин позволяет

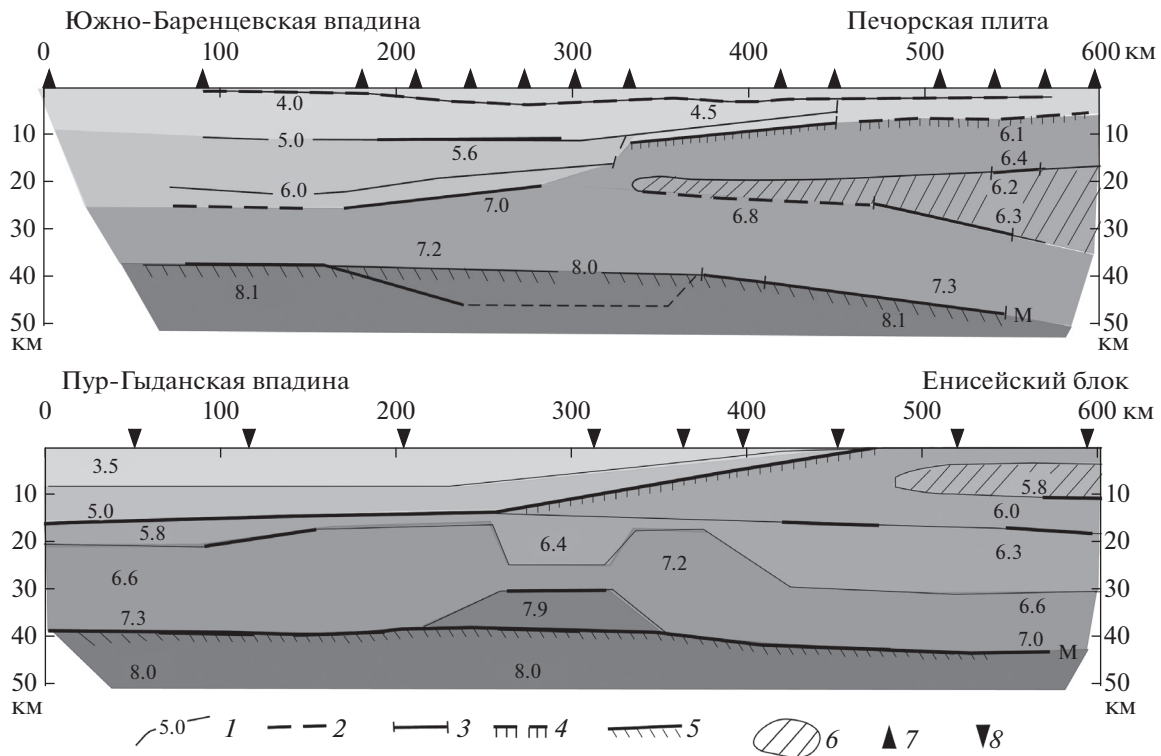


Рис. 6. Сейсмические разрезы земной коры Южно-Баренцевской впадины по профилю ГСЗ-82 (рис. 5) и Пур-Гыданской впадины по профилю “Рифт” (рис. 1). Цифрами даны скорости продольных волн. Условные обозначения: 1 – изолинии скорости, 2 – область их интерполяции, 3 – четкие границы, 4 – поверхность фундамента, 5 – граница М, 6 – зона пониженных скоростей, 7, 8 – пункты взрыва.

определить, какие из этих или каких-либо других процессов являются для них наиболее вероятными.

Рифтогенез

С процессами рифтогенеза чаще всего связывают образование “субокеанических” впадин, когда происходит существенное растяжение коры с образованием глубинных разломов, которые заполняются мантийным материалом. Такая природа высокоскоростной коры наиболее популярна при плейт-тектонических построениях, и для океанических рифтов она представляется достаточно обоснованной. Но как показано в работе [Кашубин и др., 2013б] даже в коре глубокой впадины Охотского моря, вытянутой вдоль Курильской гряды, существует слой со скоростями 6.0–6.4 км/с, типичный для континентальной коры, то есть и эта впадина не является чисто рифтовой. В случае континентальных рифтов разрыв коры и внедрение в нее глубинного вещества наблюдается только в узких зонах, чаще всего линейной формы. Это, например, Байкальский рифт [Крылов, 1980].

Однако небольшие рифты, представленные узкими, но достаточно глубокими (до 5 км) грабенами, отмечаются часто по поверхности фундамен-

та и во многих платформенных впадинах. Примером может служить грабен, выявленный по данным ОГТ по профилю 2-АР в Южно-Карской впадине [Сакулина и др., 2009]. Но эти грабены не являются глубинными и земная кора под ними близка к континентальному типу. В большинстве других впадин поверхность фундамента, как отмечалось, характеризуется удивительно простым строением, это – плоские, практически горизонтальные поверхности без всяких следов рифтоподобных структур (рис. 4 и рис. 7).

Рифтовое происхождение некоторых глубоких впадин иногда предполагалось по их форме. Например, вытянутая Днепровско-Донецкая впадина (ДДВ) часто и вполне обоснованно объяснялась ее формированием вдоль крупной рифтовой зоны, отделившей Воронежский массив от Украинского щита (рис. 1). Отличается ДДВ от других впадин и строением осадочного чехла и поверхности фундамента, представленными границами сложного (не платформенного) строения. Но кора этой впадины субконтинентального типа (рис. 3), то есть она могла образоваться за счет расширения земной коры вдоль крупной зоны нарушений, но без полного разрыва сплошности коры, типичного для классических рифтов.

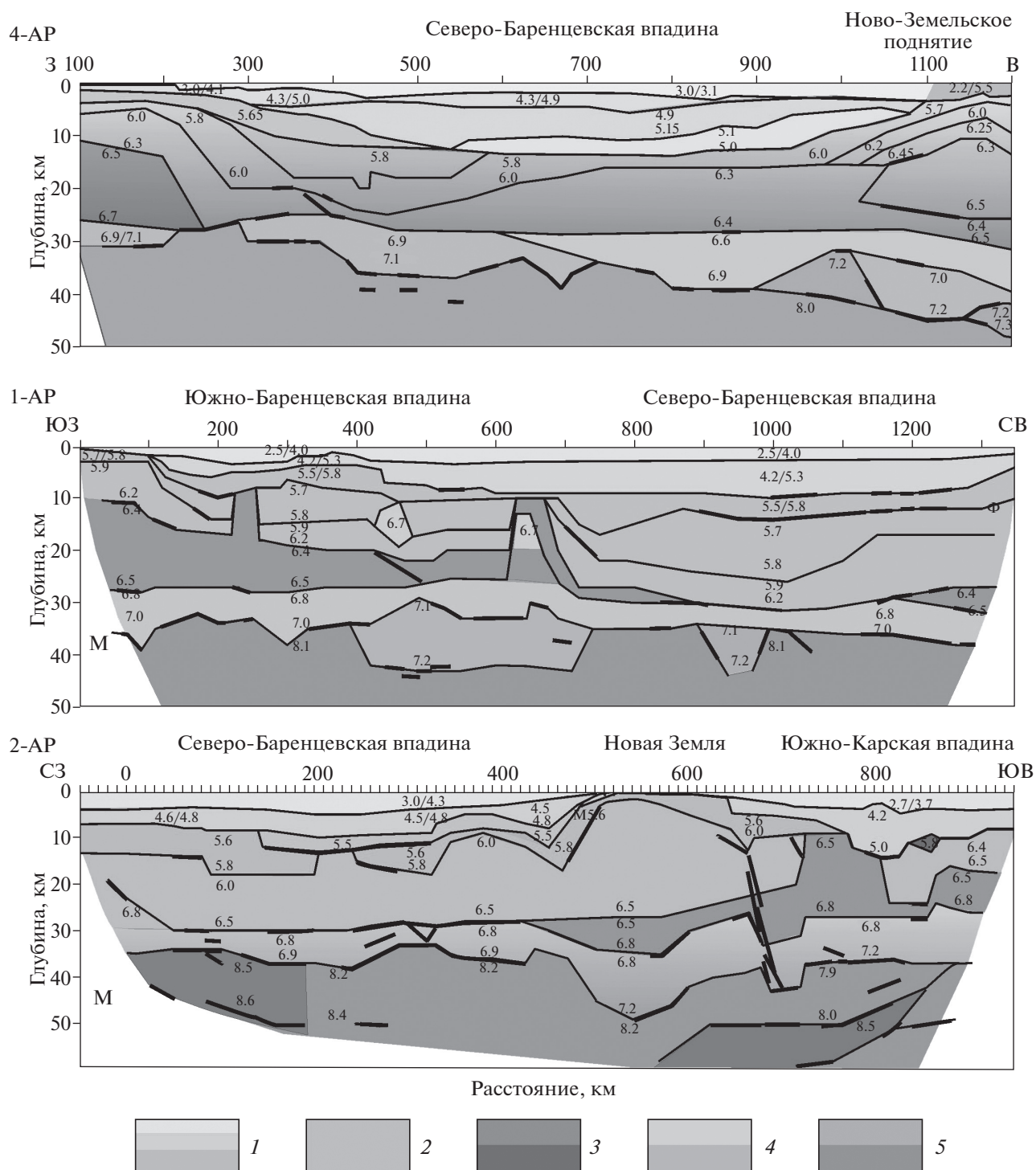


Рис. 7. Сейсмические разрезы земной коры Карско-Баренцевского шельфа по профилям 4-АР, 1-АР и 2-АР (рис. 5). Основные слои земной коры: 1 – осадочный чехол, 2 – верхняя (гранито-гнейсовая) кора, 3 – средняя (гранулитогнейсовая) кора, 4 – нижняя (базитовая) кора, 5 – мантия. Остальные обозначения на рис. 3 и рис. 6.

Для Южно-Баренцевской и Северо-Баренцевской впадин также предполагалось, что они образовались вдоль крупной рифтовой зоны, параллельной Ново-Земельскому поднятию [Верба, Матвеев, 2000]. Но сейсмические исследования показали принципиально разную структуру зем-

ной коры этих впадин: чисто континентальную для Северо-Баренцевской впадины (рис. 7) и субокеаническую для Южно-Баренцевской впадины (рис. 6). Обе они имеют округлую форму, не типичную для классических рифтов, и простую (платформенную) структуру фундамента.

Однако это не означает, что в формировании таких впадин глубинные разломы разного плана не играли большой роли. Все впадины с чисто платформенной спокойной структурой осадочного чехла обычно ограничены крутыми склонами. Например, на западной границе Северо-Баренцевской впадины разломная зона четко проявляется в резком изменении глубины до фундамента и до границ внутри коры на ПК 300–400 км (рис. 7), в наличии круто наклоненных отражающих площадок в низах коры и в резком увеличении глубины до границы М. Но при этом в структуре фундамента центральной части впадины не отмечается никаких серьезных осложнений. Напротив, в интервале ПК 450–680 км на глубине около 12 км на протяжении более 200 км он представлен гладкой субгоризонтальной границей.

Наиболее крупный и четко выраженный в волновом поле разлом выявлен между Южно-Карской впадиной и Ново-Земельским орогеном. Он прослежен по серии наклонных отражающих площадок от поверхности фундамента до границы М (рис. 7). Такие же крупные нарушения ограничивают и другие впадины. То есть наблюдается удивительное сочетание крупных вертикальных опусканий (на 10–20 км) больших по площади блоков коры вдоль крутых зон разломов с сохранением внутренней платформенной структуры блоков. Округлая форма многих впадин означает, что для их формирования большое значение имели разрывные деформации кольцевой, а не линейной формы; и образование впадин происходило за счет достаточно плавного проседания фундамента внутри образовавшихся крутых воронок. Большой возраст впадин означает, что эти погружения были медленными.

Большую роль в формировании глубоких платформенных впадин играли, по всей видимости, и крупные зоны нарушений, разграничивающие разновозрастные литосферные плиты: ведь не случайно эти впадины располагаются, в основном, вдоль границ древних кратонов или орогенных поднятий.

Базификация и эклогитизация земной коры

Хорошо обоснованной моделью формирования глубоких впадин переходного типа является процесс базификации земной коры. Этот термин был предложен В.В. Белоусовым, он означает не только внедрение в кору основного материала, но и трансформацию коры в результате различных процессов метаморфизма, связанных с повышением температуры и давления. Это может быть просто увеличение плотности и сейсмической скорости пород при погружении коры и различные геохимические их преобразования. Эти процессы детально изучены в работах [Перчук, 1987; Фролова, Бурикова, 1997] и их реальность показана

на примере преобразования континентальной коры в шельфовых зонах.

Непосредственное внедрение основного материала в верхнюю часть платформенной коры можно наблюдать на многих сейсмических разрезах. Это, например, высокоскоростные блоки в коре вблизи Южно-Баренцевской (рис. 7) и Пур-Гыданской (рис. 6) впадин и блоки в верхах консолидированной коры Южно-Карской впадины (рис. 7).

Большое значение при формировании глубоких впадин отводится также процессу эклогитизации основного материала, увеличивающему плотность пород нижней коры и тем самым вызывающему ее погружение [Артюшков, 2010]. Эклогиты характеризуются высокой (мантийной) скоростью, то есть их формирование может объяснить подъем под впадинами границы М. Но эклогитизация охватывает главным образом нижний базитовый слой коры, а при образовании глубоких впадин исчезает, в основном, верхний гранито-гнейсовый слой. Кроме того, в работе [Добрецов, Полянский, 2010] отмечается, что для формирования эклогита под впадинами недостаточно литостатического давления и во всех примерах, где обнаружен процесс эклогитизации, объем эклогитов не достаточен для формирования глубокой впадины.

В целом, все перечисленные механизмы формирования глубоких впадин: рифтогенез, базификация и эклогитизация не противоречат и не исключают друг друга, они вполне могут происходить одновременно и энергетически стимулировать друг друга. Но анализ строения земной коры платформенных впадин показывает, что все эти процессы не могут полностью объяснить все их структурные особенности. Наиболее проблемным является процесс полного исчезновения под некоторыми впадинами гранито-гнейсового и гранулитогнейсового слоев. Необходимый для этого интенсивный процесс базификации коры мантийными интрузиями не согласуется со спокойной структурой поверхности фундамента таких впадин, а процессы метаморфизма пород верхней коры не могут довести увеличение сейсмической скорости в них до наблюдаемых величин более 7.0 км/с. Эклогитизация тоже не может уничтожить верхние слои коры, так как она трансформирует, в основном, вещество базитовой ее части.

Нерешенной проблемой остается также, каким образом в платформенных впадинах мог накопиться такой большой объем осадочных пород (до 15–20 км мощности) при отсутствии окружающих их поднятий. Не совсем ясно, какой процесс мог обеспечить формирование долго живущих, круто наклоненных разломов, создающих округлую форму впадин. То есть для формирова-

ния глубоких платформенных впадин необходимо предложить какие-то дополнительные механизмы, позволяющие существенно сократить толщину верхней части консолидированной коры и создать условия накопления большего объема осадочного материала. Необходимо обосновать возможность существования долговременного и постоянно действующего источника энергии для таких преобразований. Ниже предлагаются некоторые дополнительные механизмы и источники энергии, которые объединены в единую комплексную модель формирования глубоких платформенных впадин.

КОМПЛЕКСНАЯ МОДЕЛЬ ФОРМИРОВАНИЯ ГЛУБОКИХ ПЛАТФОРМЕННЫХ ВПАДИН

Описанные выше механизмы образования глубоких впадин платформенного типа основаны на процессах петрофизического преобразования мощной континентальной коры, ее состава и метаморфизма пород. При этом, обычно, не учитывается изменение с глубиной реологических свойств коры. Эти изменения несомненно играют большую роль при всех тектонических преобразованиях, тем более при поступлении в кору дополнительного тепла, увеличивающего пластичность отдельных слоев земной коры. Повышенная пластичность обеспечивает медленные перемещения вещества, его горизонтальное течение, восстанавливающее изостатическую уравновешенность земной коры. Наиболее значительные такие перемещения возможны по ослабленным зонам, выявленными геофизическими исследованиями в средней части коры древних платформ [Павленкова, 2003].

Реологическая модель континентальной земной коры

Наиболее надежные данные о наличии реологически ослабленных зон в древней земной коре были получены на основании детальных сейсмических исследований. Так, первыми же детальными работами ГСЗ, проведенными на Украинском щите, на глубине 8–12 км в земной коре была выявлена протяженная зона инверсии скоростей (сейсмический волновод) [Павленкова, 1973]. При этом наблюдалось не просто уменьшение скоростей с глубиной, а зона инверсии подстилалась резкой сейсмической границей, создающей интенсивные отражения. Тогда это было большой неожиданностью для геологической общественности, так как объяснить природу такой зоны в пределах холодного кристаллического щита температурным влиянием, как это предполагалось для волноводов сейсмически активных регионов, было невозможно. На древних платформах тепловой поток составляет, в основном, 30–40 мВт/м², и на глубине 10–15 км температура не превышает 150°С

[Гордиенко и др., 1982]. Это может уменьшить градиент скорости с глубиной, но не может создать зону инверсии скоростей.

Позже было показано, что эти слои встречаются в земной коре регулярно и на щитах [Grad, Luosto, 1987], и на молодых платформах [Volbers et al., 1990], а также в орогенных областях и рифтовых зонах [Кашубин и др., 2002; Крылов и др., 1980]. При этом чаще всего они встречаются примерно на одних и тех же глубинах 10–20 км (рис. 6).

Для определения природы этих слоев большое значение имели магнитотеллурические исследования, которые показали их приуроченность к зонам повышенной электропроводности. Отсюда следовало, что основной причиной формирования таких аномальных зон являются их повышенная трещиноватость и насыщенность флюидами [Ваньян, Павленкова, 2002].

Во многих регионах было также отмечено, что на уровне этих аномальных зон происходит изменение структурного плана коры: ее блоковое строение меняется на горизонтальную расслоенность. Этот факт вытекал также из интерпретации гравитационных и магнитных аномалий. Нижние кромки аномалеобразующих масс совпадают обычно с глубиной до волноводов. Это означает существенное увеличение пластичности вещества на этой глубине. К такому же выводу приводят данные о распределении очагов землетрясений в земной коре. В самых разных регионах отмечается, что их число резко уменьшается в средней коре [Крылов и др., 1980; Parshad et al., 2015]. Даже на Балтийском щите, где регистрируются слабые землетрясения, их очаги чаще всего располагаются в кровле выделенных слоев с пониженной скоростью [Gregersen et al., 1991].

Новые возможности изучения волноводов в земной коре появились с внедрением в практику глубинных сейсмических исследований метода отраженных волн (ОГТ). Анализ данных этого метода показал, что волноводы часто выделяются на разрезах специфическими особенностями структуры земной коры, наличием, например, так называемых листрических разломов. Эти разломы имеют субвертикальную ориентацию вблизи поверхности и выполаживаются на глубинах 10–20 км, плавно переходя в волноводы. Отмечается также, что слои с пониженными скоростями часто выделяются на разрезах ОГТ, как прозрачные зоны или зоны повышенной горизонтальной расслоенности. Примером может служить профиль 1-ЕВ, отработанный методами ОГТ и ГСЗ на Балтийском щите (рис. 1 и рис. 8). На ПК 700–900 км на времени 6–8 с (глубина около 15 км) в области волновода наблюдается смена структурного плана коры с уменьшением степени ее неоднородности.

С точки зрения механики природа листрических разломов освещена в работах [Николаев-



Рис. 8. Временной разрез земной коры северной части Балтийского щита по данным ОГТ, профиль 1-ЕВ (рис. 1) [Берзин и др., 2000].

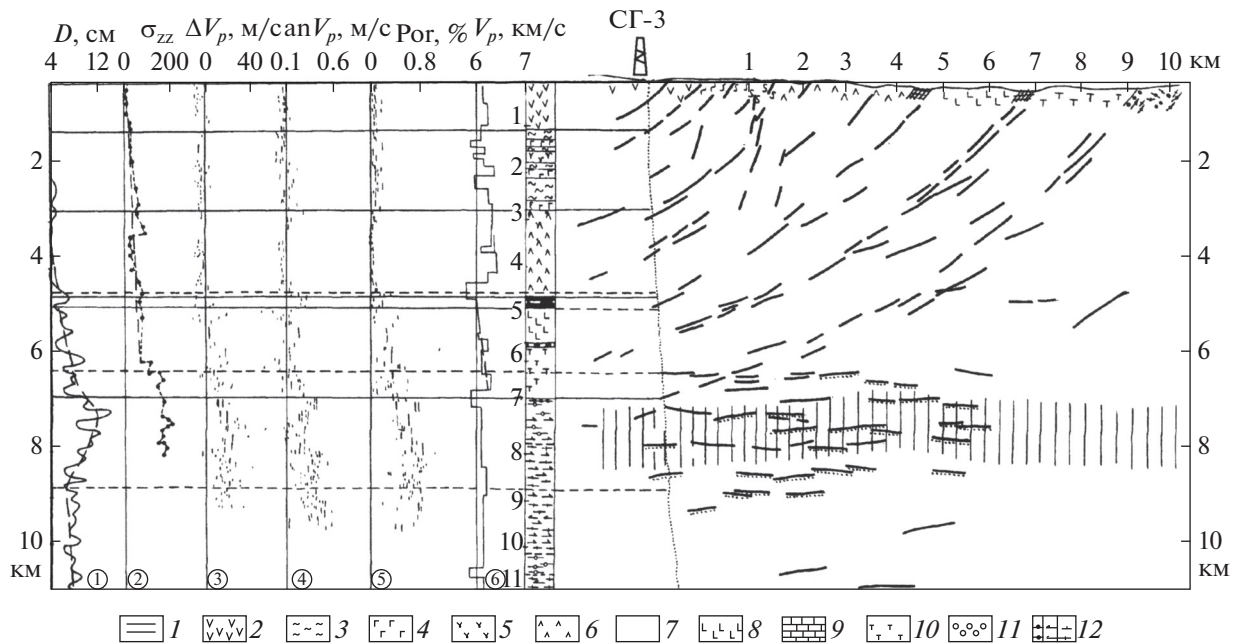


Рис. 9. Данные каротажа, исследования керна и сейсмический разрез по Кольской сверхглубокой скважине СГ-3. Составлено по работам [Козловский, 1984; Кременецкий и др., 1987; Павленкова, 1989]. На разрезе штриховкой отмечена кровля волновода. Породы, вскрытые скважиной: 1 – мигматизированные и гранитизированные биотит-плаггиоклазовые гнейсы, 2 – авгитовые диабазы, 3 – туфы с прослойками, 4 – габбро-диабазы, 5 – верлиты, 6 – актинолитизированные диабазы, 7 – ритмичнослоистые песчаники, 8 – метадиабазы, 9 – доломиты, полимикритовые песчаники, 10 – диабазовые порфириды и сланцы по ним, 11 – биотит-плаггиоклазовые гнейсы, 12 – магнетит-амфиболовые сланцы. Результаты проведенных измерений в скважине: (1) – диаметр скважины D в см, (2) – вертикальная компонента тензора напряжений σ_{zz} , (3) – изменение скорости ΔV_p , см/с, (4) – анизотропия скорости anV_p , (5) – пористость Por , %, (6) – скорость Р-волн V_p , км/с.

ский, 1981; Каракин и др., 2003]. В них показано, что такие разломы возникают как при сжатии, так и при растяжении в реологически расслоенной среде и они выполаживаются к ослабленным зонам. Все эти данные подтверждают предположение, что зоны пониженных скоростей (волноводы), наблюдаемые в земной коре древних платформ, являются зонами разрушенных и флюидонасыщенных пород, и реологически ослабленными зонами, по которым возможны тектонические подвижки.

Такая природа коровых волноводов была подтверждена и данными глубокого бурения. Кольская

сверхглубокая скважина СГ-3 [Козловский, 1984; Кременецкий и др., 1987; Павленкова, 1989] показала уменьшение скоростей на глубине 9–12 км, увеличение объема скважины и пористости пород, что свидетельствует о повышенной их трещиноватости (рис. 9). Последующие, более детальные исследования керна Кольской скважины и выполненные там американскими геофизиками работы методом отраженных волн [Ganshin et al., 1998] показали, что измеренные в скважине скорости особенно резко уменьшаются на глубине 9–10 км (от 6.3 до 5.7 км/с), в то время как скорости,

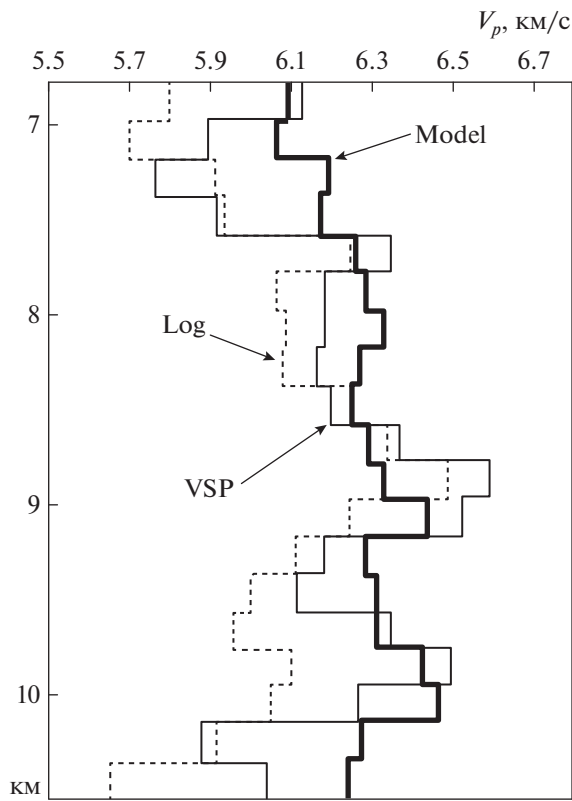


Рис. 10. Скорости сейсмических волн в породах, вскрытых Кольской сверхглубокой скважиной по данным: Log – сейсмокаротажа, VSP – вертикального сейсмического профилирования, Model – рассчитанные для ненарушенных пород по их химическому составу [Ganshin et al., 1998].

рассчитанные для соответствующих по химическому составу пород, должны быть на этой глубине не менее 6.2–6.4 км/с (рис. 10). В Кольской скважине на глубине 9–10 км был отмечен также

большой приток воды. На этой глубине на сейсмическом разрезе резко меняется наклон отражающих площадок и выделяется слой субгоризонтальной расчлененности среды, то есть все то, что обычно наблюдается в коровых волноводах.

Выделенная в земной коре изменчивость с глубиной ее реологических свойств несомненно играет большую роль при любых тектонических перестройках коры. В предлагаемой ниже комплексной модели формирования глубоких платформенных впадин описанному ослабленному слою в средней коре отводится именно такая роль.

Комплексная модель формирования земной коры глубоких впадин разного типа

Проведенный анализ структурных особенностей глубоких платформенных впадин разного типа дает основание представить процесс их формирования следующим образом (рис. 11).

В качестве исходной модели земной коры принята обобщенная трехслойная петрологическая модель: верхняя кора (гранито-гнейсовый слой), средняя кора (гранулитно-гнейсовый слой) и нижняя кора (гранулитно-базитовый слой), и трехслойная реологическая модель с ослабленным слоем на глубине около 10 км (рис. 11а). При поступлении в нижнюю кору мантийного вещества, насыщенного глубинными флюидами, увеличивается общее давление снизу на всю земную кору. Это вызывает отток вещества из ослабленного слоя средней коры в пограничные регионы и растяжение коры. При достаточно интенсивных подвижках растяжение коры может сопровождаться формированием разломов с внедрением в кору мантийного вещества и дополнительной тепловой энергии (рис. 11б). Это усиливает процессы деформации коры и различных преобразований ее вещества: увеличения его плотности в верхней

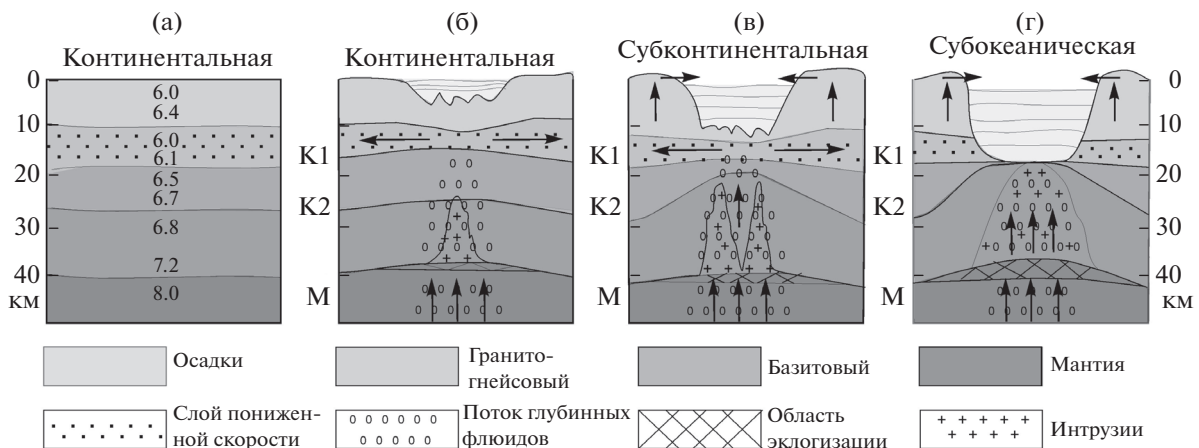


Рис. 11. Комплексная модель формирования глубоких платформенных впадин с разным типом консолидированной коры. К1 – подошва верхней коры, К2 – подошва средней коры, М – подошва земной коры.

части коры за счет метаморфизма, активизации процесса эклогитизации пород нижней коры с соответствующим подъемом границы М и повышения его текучести в области волновода. Все это способствует дальнейшему погружению фундамента и формированию коры субконтинентального типа (рис. 11в).

Образование коры “субокеанического” типа происходит при более интенсивном поступлении мантийного материала в кору и при высоком потоке энергии за счет глубинных флюидов. Это усиливает все описанные выше процессы: увеличение мощности базитового слоя за счет мантийных интрузий, активизацию процесса эклогитизации нижней коры и полное исчезновение верхней и средней коры за счет оттока материала по ослабленным зонам (рис. 11г). На этом этапе, когда глубина впадины достигает величины 15–20 км, нижние слои осадочного чехла, высоко метаморфизованные и сопоставимые по физическим характеристикам с породами консолидированной коры, становятся пластичными и за счет горизонтального течения формируют протяженные практически горизонтальные сейсмические границы, характерные для низов осадочного чехла и поверхности фундамента.

Важным результатом течения материала вдоль ослабленной зоны средней коры является увеличение мощности этого слоя вокруг впадины и связанный с этим подъем дневной поверхности. Таким образом образуются разнонаправленные движения вдоль глубинных разломов, ограничивающих впадину, с погружением коры внутри впадины и с ее подъемом вокруг впадины. Это в свою очередь обеспечивает достаточно интенсивный сносок продуктов эрозии во впадину и формирование мощного осадочного чехла. Такой своеобразный круговорот корового материала позволяет также объяснить формирование крутых склонов платформенных впадин при относительно медленном погружении фундамента с практически горизонтальной поверхностью.

Таким образом, формирование глубоких платформенных впадин происходит в результате сочетания нескольких геодинамических процессов, это и образование небольших локальных рифтов с разрывом верхней коры, поступление в кору мантийных интрузий (базификация коры), метаморфизм пород коры, эклогитизация ее нижней части и отток материала из ослабленной зоны коры. Но для такого формирования крупных по площади впадин необходим обширный, достаточно равномерный и долго действующий источник энергии. Наиболее вероятным таким источником может быть поступление в низы коры мантийного материала, насыщенного глубинными флюидами, или просто продолжительный поток глубинных флюидов. По данным лабораторных

исследований [Летников, 1999] глубинные флюиды, распространяющиеся в верхней мантии в виде сильно уплотненных газов, в верхних слоях Земли разуплотняются с выделением большого количества тепловой энергии. Это обеспечивает равномерное по площади, стабильное поступление в кору тепловой энергии, преобразование вещества нижней коры с увеличением его объема и соответствующего роста напряженного состояния всей коры. Потоками глубинных флюидов, имеющими часто вихревой характер, можно объяснить и округлую форму глубоких платформенных впадин. Но для формирования платформенных впадин эти потоки должны быть достаточно спокойными и длительными, что в свою очередь предполагает существование под впадинами, долговременных проницаемых зон литосферы или глубинных нарушений. Возможно, этим и объясняется расположение глубоких впадин по окраинам древних платформ и вдоль границ между крупными тектоническими структурами.

Но все описанные процессы преобразования континентальной коры не достаточно полно объясняют формирование глубоких впадин чисто континентального типа, например, Северо-Баренцевской и Нижне-Ангарской впадин. Сокращение мощности верхней коры здесь не наблюдается и практически отсутствует слой нижней коры. В этом случае большая роль может принадлежать только эклогитизации нижней коры, но для значительного погружения всей земной коры необходимы какие-то дополнительные процессы. Это может быть отток материала из ослабленных зон не в коре, а в верхней мантии. В мантийной части литосферы такие зоны тоже наблюдаются, например, на глубине около 80–100 км [Павленкова, 1996; Павленкова Н.И., Павленкова Г.А., 2014]. Создаваемые в литосфере напряжения могут приводить к оттоку вещества из этих зон и к соответствующему погружению всей вышележащей толщи. Такой механизм может объяснить образование Северо-Баренцевской и Нижне-Ангарской впадин за счет активизации движений в верхах мантии при формировании срединно-океанического хребта в Арктике и в процессе излияния плато-базальтов на Сибирском кратоне.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На платформах Северной Евразии выявлено несколько глубоких впадин с мощностью осадков более 10–15 км. Земная кора этих впадин обычно несколько сокращена по толщине за счет подъема границы М и средние сейсмические скорости в консолидированной коре повышены относительно средних областей. У разных впадин скорости в коре существенно различаются, что позволяет предполагать разный их состав. В континентальной коре выделяется обычно три основных слоя:

гранито-гнейсовый (скорости продольных волн 6.2–6.5 км/с), гранулитогнейсовый (скорости 6.4–6.7 км/с) и гранулитобазитовый (6.8–7.0 км/с). Разные типы земной коры глубоких впадин различаются мощностью этих слоев: в континентальной коре они имеют примерно одинаковую толщину (Северо-Баренцевская впадина, рис. 7), субконтинентальный тип характеризуется сокращением мощностью двух верхних слоев (Днепровско-Донецкая, Виллюйская и Южно-Карская впадины, рис. 3, рис. 4 и рис. 7), а в “субокеанической” коре эти слои вообще отсутствуют (Прикаспийская, Южно-Баренцевская и Пур-Гыданская впадины, рис. 3 и рис. 6).

Для объяснения природы формирования этих впадин обычно предлагаются различные тектонические процессы: рифтогенез, базификация коры (поступление в кору мантийных интрузий), метаморфизм вещества верхней коры и трансформация нижней коры в результате фазовых переходов (эклогитизация). Но эти процессы не объясняют полное исчезновение верхней коры под глубокими впадинами со спокойным залеганием осадочного чехла и поверхности фундамента. Остается неясным источник накопления в платформенных условиях большой мощности осадков в глубоких впадинах. Для решения этих проблем и формирования впадин разного типа предлагается комплексная модель преобразования континентальной коры, в которой большая роль отводится реологической ее неоднородности и оттоку вещества из-под впадин по ослабленным зонам средней коры. Такие зоны, представленные слоями пониженной скорости и повышенной электропроводности, то есть повышенной пористости, выделяются в коре на глубине 10–20 км. Отток вещества коры из-под впадин вызывает увеличение ее мощности вокруг впадины и соответствующий подъем дневной поверхности, необходимый для постоянного сноса эрозионного материала.

Предлагаемая модель является комплексной, так как она не исключает все другие процессы преобразования коры, но в разной степени их развития для впадин разного типа. Во всех случаях главным источником всех перечисленных выше процессов является поступление в кору с больших глубин мантийного материала с большим объемом тепловой энергии, провоцирующей метаморфизм пород и фазовые переходы при одновременном увеличении их пластичности и горизонтального перемещения. Тип коры определяется интенсивностью этих процессов. Эта модель включает и возможное образование впадин континентального типа за счет оттока материала из ослабленных зон в верхах мантии.

Большой возраст платформенных впадин, плоская структура фундамента и спокойное залегание осадочных пород свидетельствуют о том, что

описанные преобразования земной коры происходят постепенно в течение длительного времени. Это означает существование под впадинами в течение всего этого времени относительно небольшого по мощности, но постоянного действующего источника тепла. Наиболее вероятным источником всех описанных процессов является флюидная адвекция, то есть подъем мантийного материала, насыщенного флюидами, или просто поток глубинных флюидов. Округлая форма платформенных впадин подтверждает это предположение, что означает наличие под глубокими впадинами мантийных каналов повышенной флюидной проницаемости. Предполагаются эти каналы обычно вдоль границ платформенных плит разного возраста.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Артюшков Е.В.* Механизм образования сверхглубоких осадочных бассейнов. Растяжение литосферы или эклогитизация? // Геология и геофизика. 2010. Т. 51. № 12. С. 1675–1686.
- Белоусов В.В., Павленкова Н.И.* Типы земной коры Европы и Северной Атлантики // Геотектоника. 1989. № 3. С. 3–14.
- Берзин Р.Г., Кулаков С.И., Сулейманов А.К., Андреев С.И., Заможная Н.Г., Ступак В.М.* Отображение современной структуры Балтийского щита в волновых полях отраженных волн по материалам опорного профиля 1-ЕВ // Региональная геология и металлогения. 2000. № 10. С. 111–116.
- Блюман Б.А.* Земная кора океанов. По материалам международных программ глубоководного бурения в Мировом океане. Л.: Изд-во ВСЕГЕИ. 2013. 344 с.
- Ваньян Л.Л., Павленкова Н.И.* Слой пониженной скорости и повышенной электропроводности в основании верхней части земной коры Балтийского щита // Физика Земли. 2002. № 1. С. 1–9.
- Верба М.Л., Матвеев Ю.И.* Эволюция Земной коры Баренцево-морского шельфа на основе данных глубинных сейсмических исследований // Региональная геология и металлогения. 2000. № 12. СПб (ВСЕГЕИ). С. 175–185.
- Гордиенко В.В., Завгородняя О.В., Якоби Н.М.* Тепловой поток континентов. Киев: Наукова думка. 1982. 184 с.
- Добрецов Н.Л., Полянский О.П.* Механизм формирования глубоких осадочных бассейнов: достаточно ли данных для доказательства эклогитизации? // Геология и геофизика. 2010. Т. 51. № 12. С. 1687–1696.
- Егоркин А.В.* Строение коры и мантии нефтегазоносных провинций по сейсмическим данным. Генезис углеводородных флюидов и месторождений / Под ред. Дмитриевского А.Н., Валяев Е.М. М: ГЕОС. 2006. С. 239–251.
- Егоркин А.В., Зюганов С.К., Павленкова Н.А., Чернышев Н.М.* Результаты исследования структуры литосферы на профилях в Сибири // Геология и геофизика. 1988. № 5. С. 120–128.
- Егоркин А.В., Павленкова Н.И., Романюк Т.В., Солодилов Л.Н.* Структура верхней мантии по профилю Байкал-Ямал “Рифт”, полученная с применением

- ядерных взрывов. Геология и геофизика. 1996. Т. 37. № 9. С. 66–76.
- Егоркин А.В., Разинкова М.И.* Прикаспийская впадина. Сейсмические модели литосферы основных геоструктур территории СССР / Под ред. Зверева С.М., Косминской И.П. М.: Наука. 1980. С. 90–96.
- Каракин А.В., Курьянов Ю.А., Павленкова Н.И.* Разломы, трещиноватые зоны и волноводы в верхних слоях земной оболочки. М.: МПР, РАЕН, ВНИИгеосистем, “Дубна”. 2003. 221 с.
- Кашубин С.Н., Рыбалка А.В., Кашубина Т.В., Назаров А.И.* Обработка и интерпретация материалов. Геотраверс “ГРАНИТ”: Восточно-Европейская платформа — Урал—Западная Сибирь (строение земной коры по результатам комплексных геолого-геофизических исследований) / Под ред. Кашубина С.Н. Екатеринбург: ФГУГП “Баженовская геофизическая экспедиция”. 2002. 312 с.
- Кашубин С.Н., Павленкова Н.И., Петров О.В., Мильштейн Е.Д., Шокальский С.П., Эринчек Ю.М.* Типы земной коры Циркумполярной Арктики // Региональная геология и металлогения. 2013а. № 55. С. 5–20
- Кашубин С.Н., Сакулина Т.С., Лукашин Ю.П., Павленкова Н.И.* Современные методы проведения и интерпретации глубинных сейсмических зондирований в окраинных морях России. Актуальность идей Г.А. Гамбурцева в XXI веке. М.: 2013б. С. 175–194.
- Козловский Е.А.* (ред.) Кольская сверхглубокая. Недра. 1984. 440 с.
- Кременецкий А.А., Овчинников Л.Н., Нартеков В.Д., Липидус И.В.* Комплексные геохимические и петрологические исследования глубоких и сверхглубоких скважин. Глубинные исследования земной коры в СССР / Под ред. Козловского Е.А. Л.: МинГео СССР. 1987. С. 43–58.
- Крылов С.В.* О глубинах байкальских землетрясений и сейсмоконтролирующих факторах // Геология и геофизика. 1980. № 5. С. 83–97.
- Летников Ф.А.* Флюидные фации континентальной литосферы и проблемы рудообразования. Смирновский сборник—99 (научно-литературный альманах). М.: Фонд имени академика В.И. Смирнова РАЕН. 1999. С. 63–98.
- Морозова Е.А., Павленкова Н.И., Хербст Р.* Сейсмическая модель земной коры юго-восточной части Баренцево моря и проблемы неоднозначности ее построения // Физика Земли. 1995. № 2. С. 73–83.
- Николаевский В.Н.* Трещиноватость и пластичность земной коры. Вопросы нелинейной геофизики. М.: ВНИИЯГГ. 1981. С. 15–22.
- Павленкова Н.И.* Волновые поля и модели земной коры (континентального типа). Киев: Наукова думка. 1973. 219 с.
- Павленкова Н.И.* Кольская скважина и ее значение для глубинных сейсмических зондирований // Советская геология. 1989. № 6. С. 17–23.
- Павленкова Н.И.* Структура земной коры глубоких осадочных бассейнов континентов по сейсмическим данным // Изв. АН СССР. Сер. Физика Земли. 1988. № 4. С. 72–82.
- Павленкова Н.И.* Роль флюидов в формировании сейсмической расслоенности земной коры // Физика Земли. 1996. № 4. С. 51–61.
- Павленкова Н.И.* Структура земной коры и верхней мантии и механизм движения глубинного вещества. Проблемы глобальной геодинамики, второй выпуск / Под ред. Рунквиста Д.В. М.: ОГГГН РАН. 2003. С. 168–182.
- Павленкова Н.И., Павленкова Г.А.* Строение земной коры и верхней мантии Северной Евразии по данным сейсмического профилирования с ядерными взрывами. Серия аналитических обзоров “Очерки по региональной геологии России”, выпуск 10. М.: ГЕОКАРТ. ГЕОС. 2014. 192 с.
- Перчук Л.Л.* Базификация как магматическое замещение. Очерки физико-химической петрологии. М.: Наука. 1987. Вып. 14. С. 39–64.
- Сакулина Т.С., Рослов Ю.В., Павленкова Г.А.* Методы и результаты обработки комплексных сейсмических исследований по профилю 2-AP (Баренцево-Карский шельф) // Физика Земли. 2009. Т. 45. № 3. С. 56–63.
- Фролова Т.И., Бурикова И.А.* Магматические формации современных геотектонических обстановок. М.: Изд-во МГУ. 1997. 320 с.
- DOBREfraction’99 Working Group, Grad M., Gryn D., Janik T., Keller R., Lang R., Lyngsie S.B., Omelchenko V., Starostenko V.I., Stephenson R.A., Stovba S.M., Thybo H., Tolkunov A. “DOBREfraction’99”, velocity model of the crust and upper mantle beneath the Donbas Foldbelt (East Ukraine) // Tectonophysics. 2003. V. 371. P. 81–110.
- Downes H., Pchtonen P., N’Ianttari I., Sharkov E.V.* Proterozoic Zircon Ages from Lower Crustal Granulite Xenoliths, Kola Peninsula, Russia: Evidence of Crustal Growth and Reworking. I. Geol. Soc. 2002. V. 159. P. 485–488.
- Ganchin Y.V., Smithson S.B., Morozov I.B., Smyth D.K., Garipov V.Z., Karaev N.A., Kristofferson Y.* Seismic studies around the Kola Superdeep Borehole, Russia // Tectonophysics. 1998. 288. P. 1–16.
- Grad M., Luosto U. Seismic models of the crust of the Baltic shield along the SVEKA profile in Finland // Annales Geophysica. 1987. V. 06 B. P. 639–649.
- Gregersen S., Korhonen H., Husebye E.S.* Present-day earthquake activity and Fennoscandian dynamics // Tectonophysics. 1991. 184. P. 333–344
- Parshad R., Srivastva P., Rani R., Ganju A.* A seismic Layer Detected in the Mid-Crust of Nubra-Siachen Region, India Using Local Seismic Data // International J. Geosciences. 2015. 6. P. 993–1006. doi 10.4236/ijg.2015.69079
- Volbers R., Jodicke H., Untiedt J.* Magnetotelluric study of the earth’s crust along the deep seismic reflection profile DECORP-2N // Geol. Rundsch. 1990. V. 79. P. 581–601.