

УДК 550.834.05

В.Б. Пийп<sup>1</sup>, Л.Р. Цыдыпова<sup>2</sup>, Н.В. Шалаева<sup>3</sup>, Е.А. Теплякова<sup>4</sup>

## ГЛУБИННОЕ СТРОЕНИЕ ЗЕМНОЙ КОРЫ БЕЛОГО МОРЯ ПО СЕЙСМИЧЕСКИМ ДАННЫМ

Получены новые данные о глубинном строении Белого моря. Приводится интерпретация сейсмических разрезов по региональным профилям общей длиной более 510 км. Установлено, что область Белого моря, через которую проходят профили, характеризуется консолидированной корой, состоящей из двух слоев. На скоростном разрезе по профилям в осадочном слое четко выделяется чередование горстов и грабенов. В центральной части моря наблюдается изометричный прогиб, толщина осадков здесь достигает 7–8 км. Прогиб окружен выступами и разломами восточного и северо-восточного простирания. В нижней части осадочного слоя залегают породы с аномально повышенной скоростью. Мощность верхней коры составляет 5–7 км. Нижняя кора имеет сложное строение, мощность 30 км. Она образует крупную складку, окруженную породами с пониженной скоростью.

*Ключевые слова:* сейсмическая интерпретация, глубинные сейсмические исследования, Белое море, тектоника.

The new data on a deep structure of the White sea are received. The interpretation of seismic sections on regional profiles in length more than 510 km is resulted. It is shown the area of the White Sea is characterized by consolidated crust, consisting from two layers. The alternation of rift blocks is allocated in sediment layer. In the central part of the sea the trough is observed, the depth of sediment deposits here reaches 7–8 km. The trough is surrounded with ledges and faults by east and northeast directions. In the bottom part of a sediment layer deposits with abnormal high velocity are located. Thickness of upper crust makes 5–7 km. Lower crust has a complex structure, has thickness reaching 30 km. It forms large fold, surrounded by rocks with the decreased velocity.

*Key words:* seismic interpretation, deep seismic researches, White Sea, tectonics.

**Введение.** История изучения сейсмическими методами бассейнов северных морей европейской части России насчитывает более 40 лет. Несмотря на достаточно большой объем геолого-геофизических исследований, множество вопросов глубинной тектоники региона, имеющего сложное строение, остаются неразрешенными. Рассмотрены новые данные, полученные по сейсмическим профилям в Белом море. В качестве исходных материалов для построения разрезов использованы годографы по профилям, выполненным методом преломленных волн (МПВ), полученным ОАО «Морская арктическая геолого-разведочная экспедиция» и «Севморгео». Приводится интерпретация сейсмических разрезов по региональным профилям МПВ общей длиной более 510 км. Исследования направлены на выяснение глубинного строения коры рассматриваемого региона.

**Геология района.** Беломорская впадина расположена в области сочленения Балтийского щита и Русской плиты на месте рифейского авлакогена, в регионе, который в четвертичное время неоднократно подвергался оледенениям. Водами Белого моря впадина была затоплена лишь в конце позднего

плейстоцена, и, таким образом, ее геологическое строение и история развития неразрывно связаны с окружающей сушей.

Своеобразие геологического строения Беломорской впадины определяется ее положением на восточном склоне Балтийского кристаллического щита, в зоне перехода от щита к Русской плите. Преобладание восходящих тектонических движений, сопровождавшихся денудацией, обусловило почти полное отсутствие на суше палеозойско-мезозойского и кайнозойского чехла и прерывистость четвертичного покрова на северном и юго-западном обрамлении моря [Девдариани, 1985].

В монографии В.Н. Зандера [Зандер, 1972] на карте глубины залегания дорифейского фундамента в пределах моря выделены авлакогенные структуры: Онежско-Кандалакшский авлакоген, в котором глубина залегания фундамента достигает 3000 м в устье Кандалакшского залива; Лешуконский авлакоген и Нижне-Мезенский прогиб. Отрицательные структуры разделены поднятиями кристаллического фундамента — Кулойским выступом и Архангельским горстом.

<sup>1</sup> Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра сейсмометрии и геоакустики, вед. науч. с., профессор, e-mail: piip@list.ru

<sup>2</sup> Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра сейсмометрии и геоакустики, аспирант.

<sup>3</sup> Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра сейсмометрии и геоакустики, доцент.

<sup>4</sup> Мурманская арктическая геологоразведочная экспедиция, инженер.

В истории геологического развития региона можно выделить, следуя В.Е. Хаину [Хаин, 1977], две стадии — авлакогенную (рифей) и плитную (венд–фанерозой). Плитную стадию на основании проведенных исследований можно подразделить на три этапа: этап обособления Балтийского щита и Русской плиты и заложения Балтийско-Московской синеклизы (венд); этап слабой тектонической активности с преобладанием поднятий (кембрий–начало палеогена); неотектонический этап и образование Беломорской впадины (середина палеогена–голоцен).

При геологической интерпретации данных вместе с профилями М2, М4, М5 в Белом море рассмотрен профиль 3-АР Севморгео. Интерпретация по этому профилю выполнена ранее А.В. Кунициным и В.Б. Пийп [Куницын, Пийп, 2008а, 2008б].

**Методика наблюдений и интерпретации.** В настоящее время сейсмические исследования на акваториях проводятся исключительно невзрывными источниками. Наибольшее распространение имеют пневматические источники.

Основная задача работ — изучение разреза осадочного чехла и кристаллического фундамента. Морские сейсмические работы методом преломленных волн выполнены с использованием автономных донных сейсмических станций (АДСС) аппаратного комплекса «Гном-07» (ФГУП «Техморгео»), с помощью которых осуществлялись прием и регистрация сигналов.

Возбуждение упругих колебаний производилось двумя пневмоисточниками типа ППИ-М через 2 мин., это соответствует расстоянию 250 м при средней скорости судна 4 узла/ч.

Профили М2, М4 и М5 отработаны на судне «Геофизик» в 2007 г. (рис. 1). На профиле М2 длиной 140 км донные станции устанавливали с интервалом 10 км, по профилю М4 — в среднем через 8 км, длина профиля 130 км. На профиле М5, длина которого составляет 140 км, приемники устанавливали примерно через 9–10 км.

Для обработки, интерпретации и построения сейсмических разрезов использован метод однородных функций. Метод однородных функций — метод обращения годографов преломленных волн в двумерно-неоднородный скоростной разрез. Метод основан на локальной аппроксимации реального скоростного распределения непрерывными монотонно возрастающими с увеличением полярного угла однородными функциями произвольной степени [Пийп, 1991; Piiр, 2001].

Начальные модели при построении разрезов не используются. Разрезы по всем профилям вычисляются независимо, поэтому сравнение скоростных кривых в точках пересечения профилей дает представление о точности определения значений скорости волн.

При построении разрезов использована компьютерная программа ГОДОГРАФ — универсальная программа для интерпретации любых систем годографов преломленных волн. Процесс интерпретации полностью автоматизирован. В качестве исходных данных используются годографы преломленных волн. Отождествление преломленных волн от различных границ преломления на годографах из различных источников не требуется, это происходит автоматически. Программа позволяет строить скоростные разрезы, горизонтальные глубинные карты-срезы, криволинейные поверхности (например, рельеф границ раздела), разрезы распределения физических параметров.

Разрезы, полученные методом однородных функций, представлены в виде значений скорости, вычисленных в узлах прямоугольной сетки. В настоящее время для такого представления часто используется термин «гид-модель». Для визуализации гид-моделей и карт разработаны многочисленные программы. В частности, используется представление гид-моделей в виде поверхности с освещенным рельефом. Благодаря тому что с помощью метода однородных функций вычисляются разрезы, в которых содержится информация о границах раздела и разломах, это представление оказывается очень удобным для автоматической визуализации на разрезах границ раздела. При

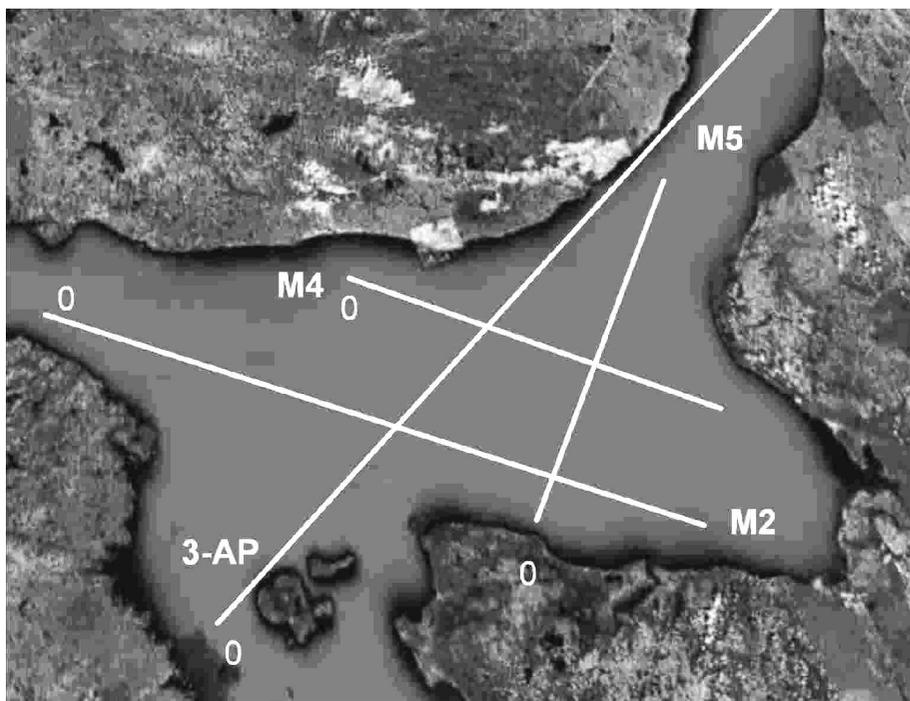


Рис. 1. Схема расположения профилей на акватории Белого моря. Начальные точки профиля отмечены нулем

таким освещении визуализируются границы 1-го и 2-го рода, инверсионные границы раздела и тектонические нарушения. Границы 1-го рода — границы, где сверху вниз происходит скачок скорости. При этом поверхности, где скорость увеличивается, выделяются на разрезе с оттененным рельефом при освещении сверху в виде светлых линий; границы, где скорость скачком уменьшается (инверсионные границы), выделяются темными линиями. Границы 2-го рода — изменение градиента скорости. Увеличение градиента скорости выражается на разрезах с оттененным рельефом в виде светлых областей, а уменьшение градиента — в виде темных зон. Разломы и тектонические нарушения проявляются как темные или светлые линии в зависимости от их наклона и направления смещения.

Разрезы с освещенным рельефом скоростного поля удобно совмещать с изолиниями скорости, чтобы проследить, как скорость изменяется вдоль границ раздела. Кроме того, разрезы представляются как скоростное поле, где значения скорости изображаются цветом. Такое представление разрезов помогает лучше анализировать и интерпретировать полученные данные.

**Результаты геологической интерпретации сейсмических разрезов.** Наблюденные годографы преломленных волн по профилю М2 показаны на рис. 2. Для дополнения системы наблюдений использована интерполяция. Жирными линиями показаны наблюдаемые годографы, тонкими — годографы, дополненные с помощью интерполяции. Для интерполяции между годографами использовано представление системы годографов в виде разреза равных офсетов [Pip, 2001]. При расчете разреза использованы годографы из всех приемных станций (рис. 2).

На других профилях получены системы наблюдений примерно такой же детальности. Сейсмогеологический разрез по профилю М2 изображен на рис. 3. Изолинии проведены с шагом 0,25 км/с. Расстояние между изолиниями обратно пропорционально градиенту скорости, следовательно, величины градиента скорости на разрезе могут быть оценены визуально.

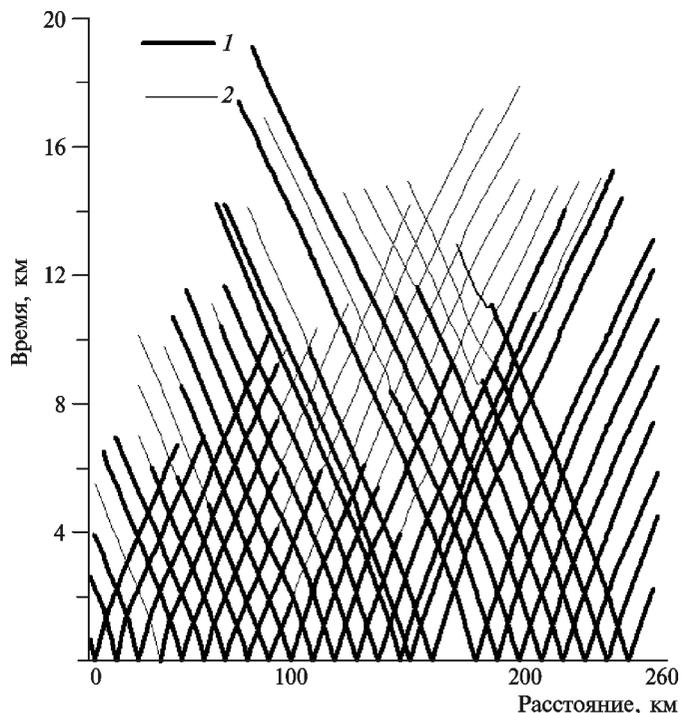


Рис. 2. Система наблюдаемых (1) и интерполированных (2) годографов преломленных волн по профилю М2

На примере профиля М2 (рис. 3 и 4, вверху слева) можно иллюстрировать принципы выделения слоев. Консолидированная кора бассейна Белого моря в целом имеет двухслойное строение.

На всех профилях в Белом море выделены 3 слоя — осадки, верхняя кора и нижняя кора. Каждый слой характеризуется некоторым приблизительно выдержанным интервалом значений скорости. Осадочный слой 3–6,4 км/с; верхняя консолидированная кора (фундамент) — от 6 до 7 км/с, нижняя кора обладает скоростью от 6,4 до 8 км/с. Градиенты скорости в каждом слое характеризуются некоторыми преобладающими значениями. Градиент скорости в осадочном слое имеет повышенные значения. Слои разделены непрерывными инверсионными границами раздела, когда скорость вблизи границы в верхнем слое больше, чем в нижнем.

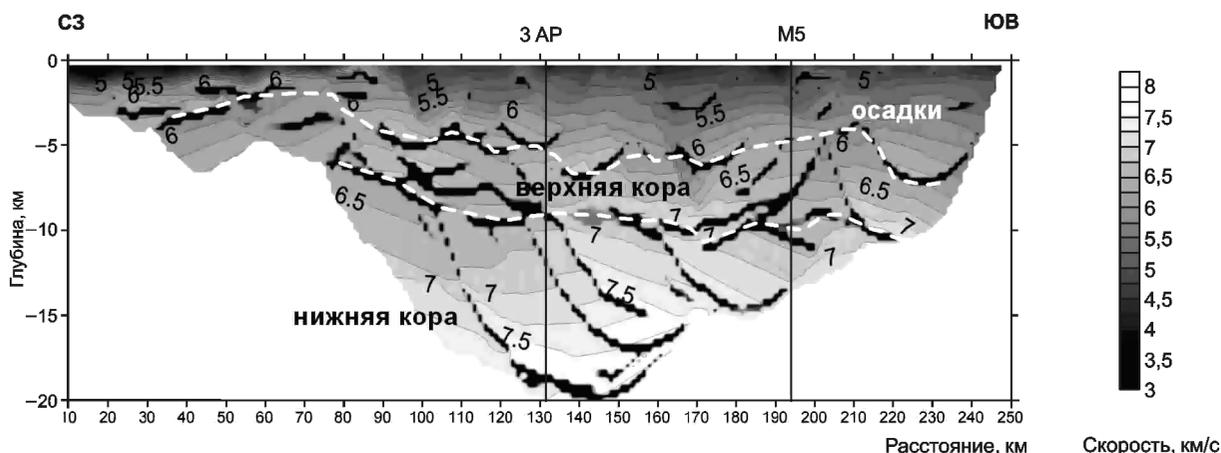


Рис. 3. Сейсмогеологический разрез по профилю М2. Сечение изолиний скорости — 0,25 км/с. Границы раздела слоев коры показаны белым пунктиром

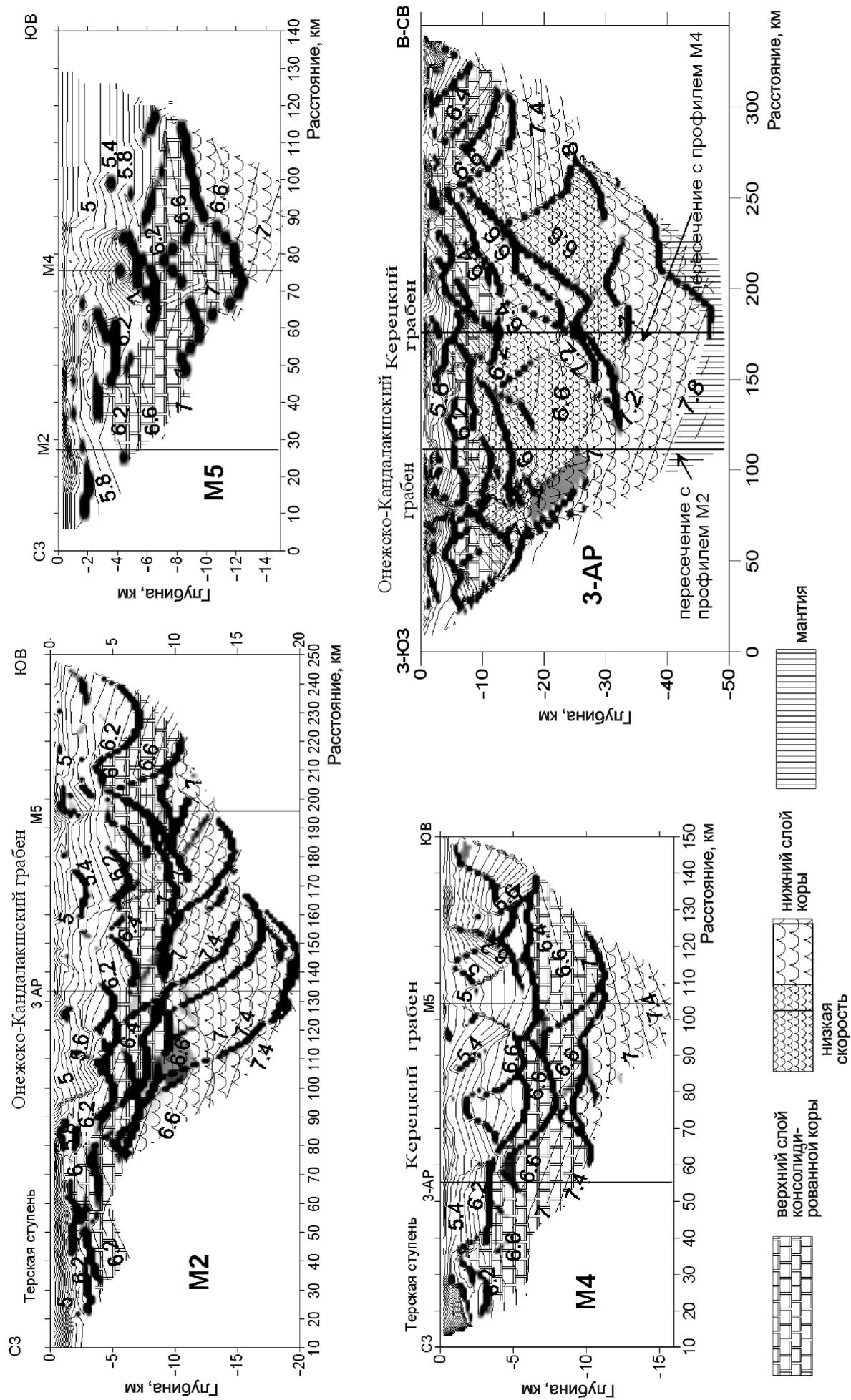


Рис. 4. Сейсмогеологические разрезы по профилям в Белом море. Названия профилей показаны на разрезах. Сечение изолиний скорости  $-0,2$  км/с

Разломы в каждом слое образуют автономную систему и не пересекают границ раздела.

**Профиль М2** проходит вблизи оси Онежско-Кандалакшского грабена. Глубина полученного разреза достигает 20 км.

*Осадочный слой* в районе этого профиля характеризуется повышенным градиентом скорости. Скорость в слое варьирует от 3 км/с у поверхности слоя до 6,4 км/с у подошвы. На западе профиля в районе пикетов от 0 до 70 км мощность слоя сокращена до 1–3 км. Здесь наблюдается ступень фундамента (кровли верхней коры). В центральной части профиля осадки погружены на глубину 7 км. На пикетах 160–180 км выделяется узкая впадина шириной менее 20 км и глубиной до 8 км. Грабен наиболее четко проявляется в фундаменте.

В нижней части осадочного слоя залегают породы с высокой скоростью (до 6,4 км/с). В осадочном слое чередуются приподнятые и опущенные блоки.

*Верхняя кора* (фундамент) прослеживается на глубине от 2 до 7 км. Скорость изменяется по вертикали от 6 до 7 км/с. Мощность слоя составляет около 5 км. Поведение разломов хаотическое.

*Нижняя кора* на профиле выделяется четко и имеет упорядоченное строение. Глубина кровли слоя изменяется от 7 км на западе до 10 км на востоке. Скорость варьирует от 6,4 до 7,7 км/с. Слой представляет собой чередование блоков шириной от 30 до 10 км, падающих на юго-восток под углом около 30°. Блоки разделены листрическими разломами, падающими на юго-восток и имеющими общее окончание на глубине от 20 до 15 км.

**Профиль М4** (рис. 4, слева внизу) проходит приблизительно на 50 км севернее профиля М2. Пересекает Керецкий грабен по его оси. Глубина полученного разреза 16 км.

*Осадочный слой* в районе этого профиля характеризует структуры Керецкого грабена. Скорость в слое варьирует от 3 км/с у поверхности слоя до 6,6 км/с у подошвы. На северо-западе профиля в районе пикетов от 0 до 70 км мощность слоя сокращена до 3 км. Здесь наблюдается ступень фундамента. В осадочном слое чередуются резко выраженные горсты и грабены. В центральной части профиля осадочные отложения погружены на глубину 7 км. В нижней части осадочного слоя залегают породы с очень высокой скоростью (до 6,6 км/с).

*Верхняя кора* (фундамент) прослеживается на глубине от 3 до 7 км. Скорость изменяется по вертикали от 6 до 7,4 км/с. Мощность слоя составляет около 5 км. Поведение разломов свидетельствует о наличии надвигов или покровов в верхней коре.

*Нижняя кора* на этом профиле видна только на очень ограниченном пространстве. Характеризуется пониженной скоростью — от 6,4 до 7,4 км/с.

**Профиль М5** проходит в северо-восточном направлении в центральной части Белого моря, он пересекает профили М2 и М4, его длина около 130 км.

Полученный сейсмогеологический разрез изображен на рис. 4 вверху справа. Изолинии проведены с шагом 0,2 км/с. На разрезе выделяются структуры Керецкого грабена.

*Осадочный слой* характеризуется повышенным градиентом скорости. Скорость на поверхности слоя около 3 км/с, у подошвы она достигает 7 км/с. Высокоскоростные слои (скорость до 7 км/с) в подошве осадочного слоя надвинуты один на другой в северо-восточном направлении. Мощность надвигов составляет 2–3 км. Между пластинами-надвигами залегают относительно низкоскоростные осадочные отложения мощностью 1–1,5 км. Глубина грабена 10 км.

Мощность *верхней коры* (скорость у кровли 6–6,2 км/с, у подошвы 7,2 км/с) изменяется по профилю и составляет от 2 до 7 км. В центральной части профиля под Керецким грабеном на подошве верхней коры наблюдается прогиб, заполненный породами с повышенной скоростью. Разломы свидетельствуют об обстановке сжатия.

*Нижняя кора* на профиле расположена на глубине 8–12 км.

**Профиль 3-АР.** Наиболее детальная система наблюдений в рассматриваемом регионе получена на профиле 3-АР. В соответствии с этим разрез очень детальный и сложный. Разрез с геологической интерпретацией приведен на рис. 4 внизу и в статье [Куницын, Пийп, 2008б].

*Осадочный слой* на разрезе характеризуется резко переменной мощностью. Несколько впадин и выступов образуют синклиналь, выполняя Онежско-Кандалакшский грабен. Наибольшую мощность (6 км) осадочные образования имеют в этом грабене.

Между Онежско-Кандалакшским и Керецким грабенами (пикеты 80–170 км) на глубине 15–27 км *верхний слой* консолидированной коры достигает мощности 10 км. Восточный участок верхней коры осложнен несколькими тектоническими нарушениями с восточным падением. Мощность верхнего слоя консолидированной коры здесь значительно уменьшается и составляет менее 3 км в районе пикета 250 км.

*Нижняя кора* имеет значительную мощность. В ее пределах прослеживаются зоны с пониженными значениями скорости. Нижняя кора имеет складчато-надвиговое строение. В нижней части нижней коры (скорость 6,5–7,8 км/с) выделяются надвиговые структуры. Подобные структуры обычно формируются при движении коры, что сопровождается возникновением зоны пластичности, а затем образованием складки, осложненной надвигом. В центре складки и на ее периферии присутствуют породы, отличающиеся пониженными значениями сейсмической скорости (6,2–6,8 км/с). Амплитуда складчато-надвиговой структуры в нижней коре Беломорской впадины составляет 10–15 км, протяженность структуры до 200 км. Аналогичные структуры прослежены на разрезе по профилю 1-АР в пределах Баренцевской плиты [Куницын, Пийп, 2008а].

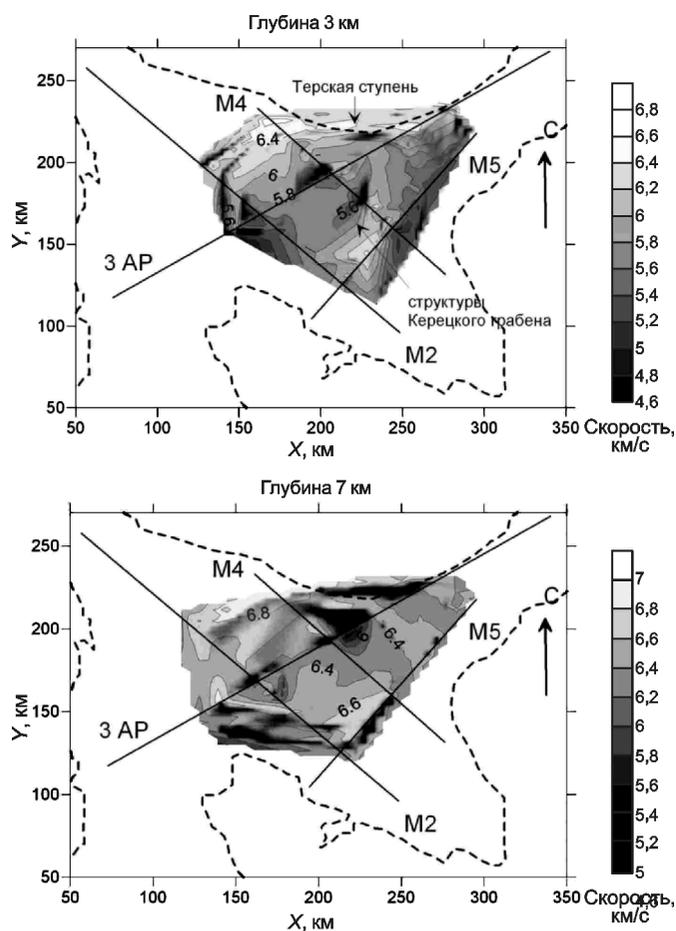


Рис. 5. Горизонтальные скоростные карты-срезы на глубине 3 км (вверху) и 7 км (внизу). Сечение изолиний  $-0,2$  км/с. Штриховыми линиями показаны очертания берегов Белого моря

Мощность нижнего слоя коры составляет около 20 км. Граница Мохо прослежена на глубине 43–45 км.

**Карты-срезы.** Чтобы проследить строение коры в пространстве, мы объединили данные профилей для построения горизонтальных скоростных карт-срезов для различной глубины. Карты-срезы характеризуют центральную часть Белого моря, так как только здесь профили представляют достаточно представительную сеть.

Карты-срезы построены для разной глубины и с разным шагом. В конечном варианте выбраны уровни 3 и 7 км. Эти карты характеризуют строение грабенов в плане.

*Уровень 3 км* (рис. 5, вверху) находится в осадочном слое. На рис. 5 изображен скоростной срез, который соединен с картой, отражающей рельеф скоростного поля с сечением изолиний  $0,2$  км/с и шкалой скорости. Здесь проявляется строение грабенов, а также разломы, разделяющие их. Разломы выглядят, как темные линии. Так как скорость возрастает с глубиной, области с повышенной скоростью (светлые области) — это выступы, а с пониженной скоростью (темные области) — впадины. На рис. 5 видно чередование блоков с повышенной и пониженной скоростью. В районе профиля M4 прослеживаются два грабена северо-восточного простирания и приблизительно одинакового размера. Грабены разделяет горст шириной около 25 км. В целом срез представляет собой изометричную впадину размером  $100 \times 100$  км, окруженную выступами северо-восточного, восточного и северного простирания.

*Карта-срез на глубине 7 км* (рис. 5, внизу). Глубина 7 км примерно соответствует кровле фундамента. На профилях M4 и M2 выделяются два грабена, смещенных один относительно другого. Скорость внутри грабенов  $6-6,2$  км/с, во вмещающих отложениях скорость  $>6,4$  км/с. Впадины имеют северное простирание. В целом на этой глубине выделяется

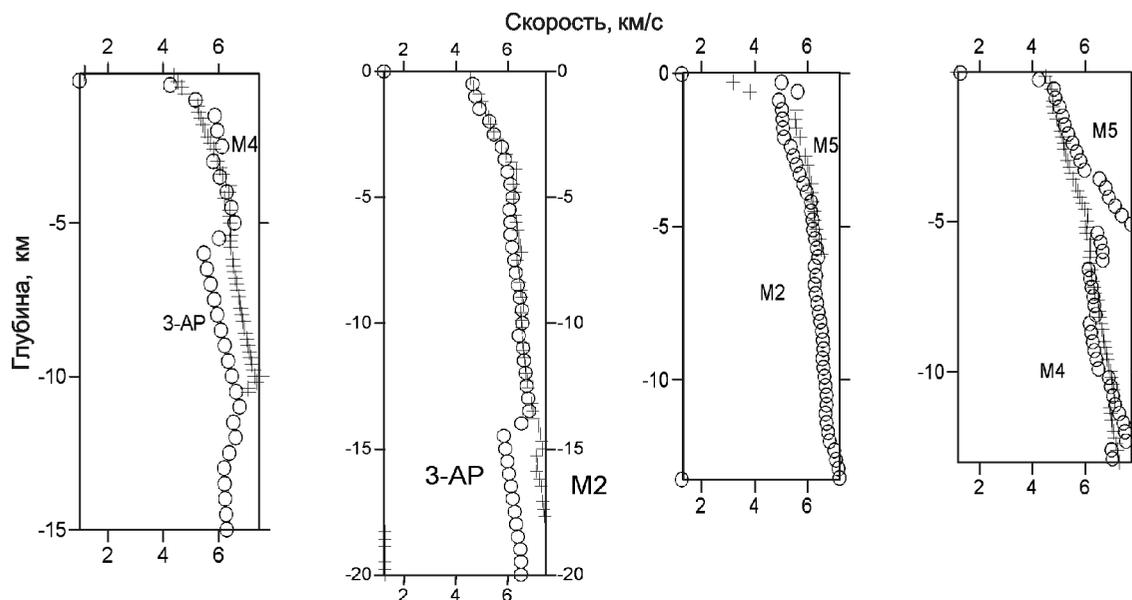


Рис. 6. Сравнение скоростных кривых в точках пересечения профилей. Названия соответствующих профилей показаны на графиках

крупная впадина, окруженная выступами и разломами северо-восточного и восточного простирания.

**Достоверность разрезов.** Изучены достоверность разрезов и погрешности определения скорости путем сопоставления скоростных кривых на линиях пересечения профилей. Среднеквадратическое отклонение скоростных кривых составляет не более 0,2 км/с. На графиках, приведенных на рис. 6, видно, что изменение углов наклона и смена границ раздела совпадают на различных профилях.

Сейсмические профили проходят в пределах крупных геологических структур, известных ранее. Эти структуры отобразились и на разрезах. Главные новые геологические результаты касаются глубинных частей коры, где все другие методы дают низкую детальность или недостаточную достоверность. В результате проведенных нами исследований удалось обобщить и проанализировать строение консолидированной коры. Обработка и интерпретация сейсмических исследований методом преломленных волн в Беломорском регионе позволили выявить новые черты его глубинного строения. Результаты

свидетельствуют о высокой эффективности метода в условиях детальной системы наблюдений и сложного неоднородного строения шельфа северных морей России (на примере Белого моря).

**Выводы.** 1. Область Белого моря, через которую проходят профили, характеризуется консолидированной корой, состоящей из 2 слоев. Мощность верхней коры составляет 5–7 км. Нижняя кора имеет сложное строение, мощность до 30 км и образует крупную складку, окруженную породами с пониженной скоростью.

2. На скоростном разрезе по профилям в осадочном слое четко выделяется чередование горстов и грабенов, положение которых известно из предыдущих исследований.

3. В центральной части моря наблюдается прогиб, толщина осадочных отложений здесь достигает 7–8 км. Прогиб окружен выступами и разломами восточного и северо-восточного простирания. В нижней части осадочного слоя залегают осадки с аномально высокой сейсмической скоростью.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

*Девдариани Н.А.* Геологическое строение Беломорской впадины. М., 1985. 230 с.

*Зандер В.Н.* Геологическое строение и перспективы рудоносности фундамента склонов Балтийского щита. Л.: Наука, 1972. 150 с.

*Куницын А.В., Пийп В.Б.* Строение коры Баренцево-Карского региона и северных морей по данным детальных исследований методом глубинного сейсмического зондирования. Статья 1 // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2008а. № 3. С. 55–63.

*Куницын А.В., Пийп В.Б.* Строение коры Баренцево-Карского региона и северных морей по данным детальных

исследований методом глубинного сейсмического зондирования. Статья II // Там же. 2008б. № 6. С. 40–48.

*Пийп В.Б.* Локальная реконструкция сейсмического разреза по данным преломленных волн на основе однородных функций // Физика Земли. 1991. № 10. С. 24–32.

*Хаин В.Е.* Региональная геотектоника. Внеальпийская Европа и Западная Азия. М.: Недра, 1977. 359 с.

*Piip V.B.* 2D inversion of refraction traveltimes using homogeneous functions // Geophys. Prospecting. 2001. N 49. P. 461–482.

Поступила в редакцию  
03.08.2010