

СТРУКТУРА ЗЕМНОЙ КОРЫ СЕВЕРНОЙ ЧАСТИ БАРЕНЦЕВО-КАРСКОГО РЕГИОНА
ПО ПРОФИЛЮ ГСЗ 4-АР

Т.С. Сакулина, Г.А. Павленкова*, С.Н. Кашубин**

ОАО «Севморгео» Роснедра, 198095, Санкт-Петербург, ул. Розенштейна, 36, Россия

* Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, 123995, Москва, ул. Б. Грузинская, 10, Россия

** ВСЕГЕИ, 199106, Санкт-Петербург, Средний просп., 74, Россия

Опорный профиль 4-АР длиной 1370 км пересекает Северо-Баренцевскую впадину, северное окончание Новоземельского поднятия и Северо-Карскую впадину. На профиле были выполнены комплексные геофизические исследования, включая глубинные сейсмические работы методами ОГТ и ГСЗ. Наблюдения ГСЗ проводились с автономными донными сейсмическими станциями (АДСС) с интервалом 10—20 км и мощным пневмоисточником, возбуждающим сейсмические сигналы с шагом 250 м. В результате были построены детальные скоростные разрезы земной коры и верхней мантии по *P*- и *S*-волнам. Основным методом построения разрезов являлось лучевое моделирование. Земная кора вдоль всего профиля является типично континентальной со скоростями продольных волн 5.8—7.2 км/с в консолидированной ее части. Мощность коры увеличивается от 30 км в районе островов Франца-Иосифа до 35 км под Северо-Баренцевской впадиной, до 50 км под Новоземельским поднятием и до 40 км под Северо-Карской впадиной. Северо-Баренцевская впадина глубиной 15 км отличается необычно низкими скоростями в консолидированной коре: слой верхней коры со скоростями 5.8—6.4 км/с имеет мощность около 15 км под впадиной (обычно этот слой выклинивается под глубокими осадочными бассейнами). Особенным свойством коры Северо-Баренцевской впадины является также разрушенная структура границы М.

Земная кора, сейсмическое профилирование, глубокие впадины.

STRUCTURE OF THE EARTH'S CRUST IN THE NORTHERN PART
OF THE BARENTS-KARA REGION ALONG THE 4-AR DSS PROFILE

T.S. Sakoulina, G.A. Pavlenkova, and S.N. Kashubin

The 1370 km long 4-AR reference profile crosses the North Barents Basin, the northern end of the Novaya Zemlya Rise, and the North Kara Basin. Integrated geophysical studies including common deep point (CDP) survey and deep seismic sounding (DSS) were carried out along the profiles. The DSS was performed using autonomous bottom seismic stations (ABSS) spaced 10–20 km apart and a powerful air gun producing seismic signals with a step size of 250 m. As a result, detailed *P*- and *S*-wave velocity structures of the crust and upper mantle were studied. The basic method was ray-tracing modeling. The Earth's crust along the entire profile is typically continental with compressional wave velocities of 5.8–7.2 km/s in the consolidated part. Crustal thickness increases from 30 km near the islands of Franz Josef Land to 35 km beneath the North Barents Basin, 50 km beneath the Novaya Zemlya Rise, and 40 km beneath the North Kara Basin. The North Barents Basin 15 km deep is characterized by unusually low velocities in the consolidated crust: The upper crust layer with velocities of 5.8–6.4 km/s has a thickness of about 15 km beneath the basin (usually, this layer wedges beneath deep sedimentary basins). Another special property of the crust in the North Barents Basin is the destroyed structure of the Moho.

Earth's crust, seismic profiling, deep basins

ВВЕДЕНИЕ

Структура земной коры шельфовых зон Арктики, как и самой Арктики, привлекает особое внимание геологической общественности. Это связано с ее необычным строением по сравнению с другими океаническими областями и с многими нерешенными проблемами ее формирования. Необычным явля-

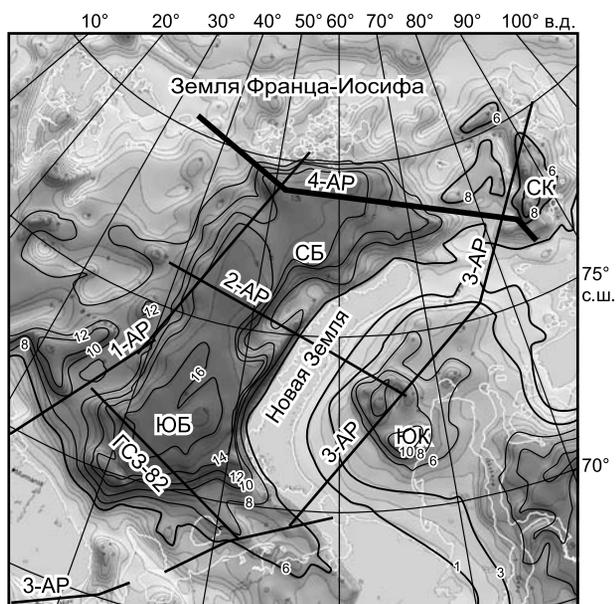


Рис. 1. Схема расположения профилей глубинных сейсмических исследований в Баренцево-Карском регионе и карта мощности осадочного чехла [Кашубин и др., 2013а].

1-AP, 2-AP, 3-AP и 4-AP — профили ОГТ и ГСЗ «Севморгео», ГСЗ-82 — профиль ГСЗ Института физики Земли РАН. Впадины: ЮБ — Южно-Баренцевская, СБ — Северо-Баренцевская, ЮК — Южно-Карская, СК — Северо-Карская.

ется большая мощность земной коры, типичная для континентов, и наличие сверхглубоких впадин с мощностью осадков до 15—20 км. Установлена высокая перспективность этих впадин на нефть и газ. Таким образом, изучение глубинного строения этого региона имеет большое значение для решения многих геодинамических и чисто практических задач. Сведения о геологическом строении, тектонике, магматизме, истории развития региона обобщены в научных трудах [Баренцевская..., 1988; Грамберг, Погребницкий, 1993; Строение...,

2005; Верба, 2008; Barrere et al., 2009; Кашубин и др., 2013а].

В период с 1995 по 2007 г. ФГУНПП «Севморгео» были выполнены комплексные геофизические исследования в пределах баренцево-карского шельфа по четырем опорным геолого-геофизическим профилям (рис. 1): 1-AP, 2-AP, 3-AP и 4-AP. Важной составляющей этих работ являлось комплексирование глубинного сейсмического зондирования (ГСЗ) с методом отраженных волн МОВ-ОГТ. В южной части Баренцева моря эту систему профилей дополняет профиль ГСЗ-83, выполненный Институтом физики Земли РАН [Морозова и др., 1995].

Общей целью работ на опорных профилях было изучение глубинного строения Баренцево-Карской шельфовой плиты и расположенных в ее пределах крупных осадочных бассейнов, их природы и эволюции земной коры. Результаты этих исследований частично опубликованы в основном по данным ОГТ [Sakoulina et al., 2000; Верба и др., 2001; Сакулина и др., 2003, 2009; Матвеев и др., 2005; Строение..., 2005; Ivanova et al., 2006, 2011; Roslov et al., 2009]. Эти исследования показали, что земная кора баренцево-карского шельфа является типичной континентальной корой с мощностью от 30 до 45 км. Мощность коры меняется по площади, она обычно сокращается под глубокими впадинами и увеличивается под Новоземельской грядой.

В настоящей работе описываются результаты глубинных сейсмических исследований по профилю 4-AP (Земля Франца-Иосифа — п-ов Таймыр). Этот профиль совместно с ранее выполненными профилями ГСЗ образует замкнутый каркас, пересекающий основные геологические структуры баренцево-карского шельфа: Южно-Баренцевскую, Северо-Баренцевскую, Южно-Карскую и Северо-Карскую впадины и разделяющее их Новоземельское поднятие (см. рис. 1). Структура осадочного чехла этих впадин была изучена ранее сейсмическими работами методом ОГТ, в результате которых были прослежены основные отражающие горизонты в осадочном чехле и построены первые структурные карты. Позже с учетом результатов данных ГСЗ была составлена карта глубин до фундамента (см. рис. 1).

Экспериментальные данные ГСЗ (сейсмические записи, наблюденные годографы, результаты моделирования) наиболее полно представлены пока только по профилю 2-AP [Сакулина и др., 2009; Roslov et al., 2009]. По профилю 4-AP был опубликован лишь предварительный скоростной разрез по продольным волнам [Ivanova et al., 2011].

Профиль 4-AP пересекает Северо-Баренцевскую и Северо-Карскую впадины, а также северное окончание Новоземельского поднятия; общая протяженность профиля 1370 км. Работы были проведены в 2005—2006 гг. по комплексу геофизических методов, апробированному при выполнении работ на предыдущих опорных профилях [Матвеев и др., 2005; Сакулина и др., 2009]. В состав комплекса входили наблюдения по системе ГСЗ с использованием автономных донных сейсмических станций (АДСС) с 4-компонентной регистрацией волнового поля (три компоненты вектора смещения X , Y , Z и одна компонента всестороннего сжатия H).

Работы выполнены по очень плотной системе наблюдений. Донные станции, расставленные вдоль профиля с интервалом 10—20 км, обеспечили регистрацию полезных волн на расстояниях от источника до 250—300 км и глубинность исследований до 40—50 км. Для возбуждения сейсмических колебаний использовались мощные пневмоисточники с объемом камеры 120 л. Интервал между возбуждениями

составлял 2 мин, что при скорости движения судна 4 узла обеспечивает в плане интервал между пунктами взрыва в 250 м. Профиль отработан по четырем расстановкам длиной 240—500 км, сейсмические записи получены на 119 АДСС.

Основная обработка материалов по профилю 4-АР была проведена в Севморгео, детализация скоростного разреза по продольным волнам была выполнена в ИФЗ РАН; обработка поля поперечных волн для восточной части профиля — во ВСЕГЕИ.

В данной статье обсуждаются результаты всего этого комплекса проведенных исследований, описываются экспериментальные волновые поля, методика их обработки и полученные скоростные разрезы земной коры по продольным (P) и поперечным (S) волнам. Для более полной характеристики структуры коры и геологической интерпретации полученного материала используются также данные МОВ-ОГТ.

ХАРАКТЕРИСТИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО МАТЕРИАЛА ГСЗ ПО ПРОДОЛЬНЫМ ВОЛНАМ И МЕТОДИКА ЕГО ОБРАБОТКИ

Сейсмические записи волновых полей ГСЗ на профиле 4-АР характеризуются хорошим качеством. На рис. 2 приведены типичные монтажи сейсмограмм, полученные на разных участках профиля. На них выделены основные продольные (P) волны, которые позволяют охарактеризовать главные особенности структуры земной коры. В первых вступлениях прослеживаются преломленные волны в осадках (P_{sed}), в консолидированной коре (P_g) и в верхах мантии (P_n), во вторых вступлениях — отраженные волны от границы М (P_mP) и отражения от промежуточных границ в коре.

Волновые поля существенно изменяются вдоль профиля. Особенности первых вступлений (волн P_{sed} и P_g) определяются главным образом мощностью осадочного чехла. При малой мощности осадков в районе Земли Франца Иосифа (см. рис. 1) волны P_g выходят в первые вступления со скоростью 5.6—6.0 км/с на удалениях от источника до 10 км (см. рис. 2, *a*), затем их скорость увеличивается до 6.5—6.6 км/с на расстоянии 80—100 км. В Северо-Баренцевской впадине в первых вступлениях до 40—50 км от источника регистрируются волны P_{sed} (см. рис. 2, *b*), их скорость постепенно возрастает от 3.0 до 5.5 км/с. Далее прослеживаются волны P_g , которые обычно затухают на удалении 80—90 км, их кажущаяся скорость не превышает 6.0 км/с. В районе Новоземельского поднятия и Северо-Карской впадины волны P_g записаны в первых вступлениях на удалениях от источника 20—180 км (см. рис. 2, *в*, *г*) с кажущейся скоростью 6.0—6.6 км/с.

Преломленные волны от границы М регистрируются очень редко на удалениях 150—200 км в виде слабых первых вступлений с кажущейся скоростью около 8.0 км/с (см. рис. 2, *a*), протяженность их годографов не превышает 20—30 км.

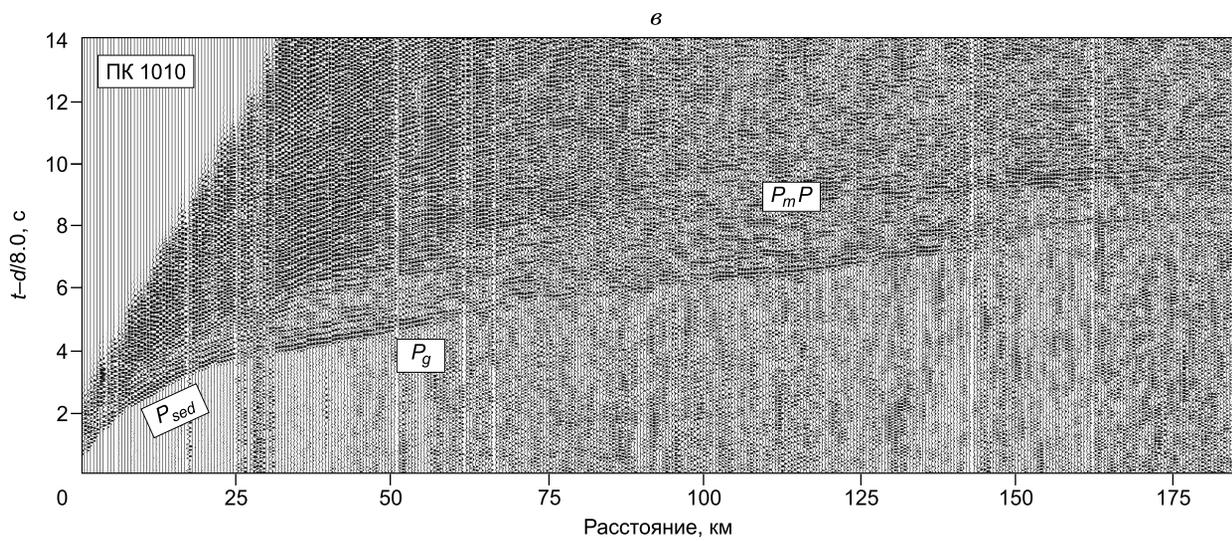
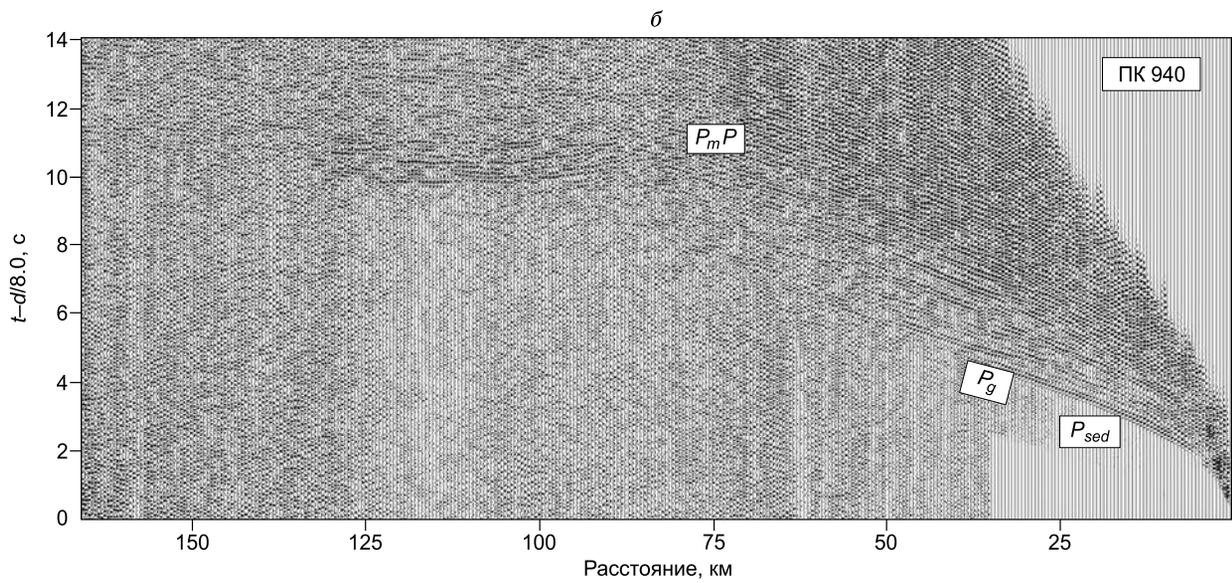
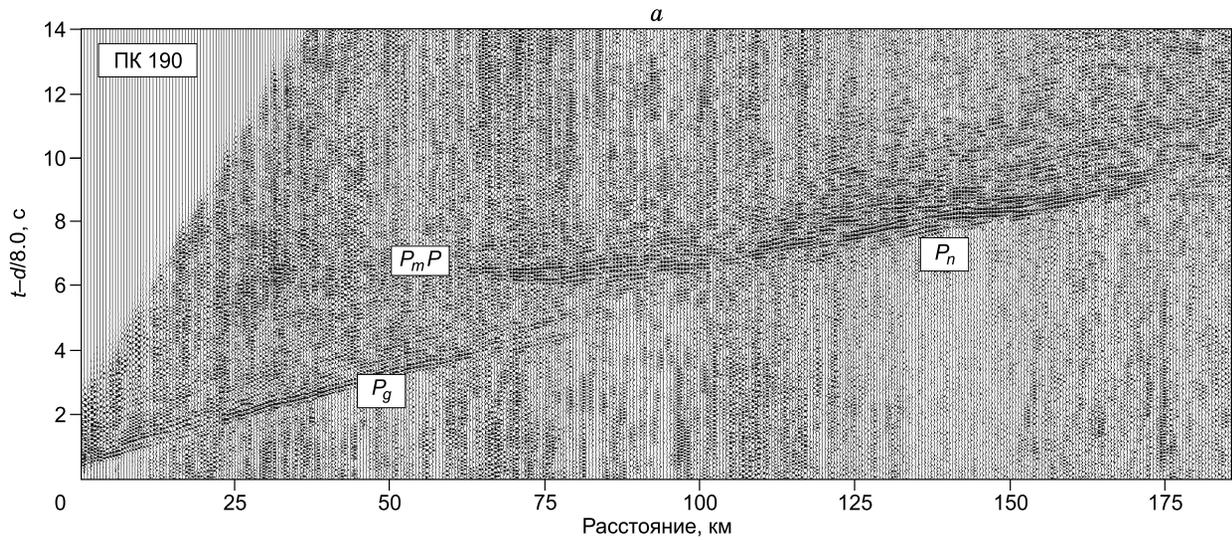
Во вторых вступлениях доминирующими являются отраженные волны от границы М. Они представлены обычно интенсивной многофазовой группой колебаний с кажущейся скоростью около 8.0 км/с. Протяженность интервала регистрации этих волн меняется вдоль профиля, в районе Северо-Баренцевской впадины она чаще всего ограничена 50—60 км (см. рис. 2, *b*), но на остальной части профиля увеличивается до 100—120 км (см. рис. 2, *a*, *в*, *г*). Почти на всех монтажах видно, что эта многофазная группа колебаний состоит из нескольких волн, сменяющих друг друга при удалении от источника (см. рис. 2, *в*, *г*).

При обработке волновых полей и построении скоростного разреза земной коры по профилю 4-АР использовались различные методы. Сопоставление полученных ранее результатов по разным профилям позволило оценить возможности каждого метода и выработать из них наиболее рациональный комплекс.

Основными этапами такого комплекса являются: 1 — анализ волновых полей, корреляция опорных волн и определение их природы, 2 — анализ системы наблюдаемых годографов для определения общих особенностей структуры земной коры, 3 — построение приближенной (начальной) двумерной скоростной модели, 4 — математическое моделирование путем решения прямой задачи для начальной модели и выбор на этой основе окончательного скоростного разреза.

Все эти этапы характеризуются многочисленными обратными связями. Например, математическое моделирование используется не только для построения скоростной модели, но и при анализе волнового поля и при определении природы волн. Наиболее ответственным этапом обработки являются анализ волнового поля и системы годографов для определения природы волн и главных особенностей начальной скоростной модели.

Анализ волновых полей и годографов опорных волн. Основной целью анализа волновых полей является выявление опорных сейсмических границ в земной коре и определение их структуры. Для этого в ОАО «Севморгео» используется программное обеспечение подготовки кинематических данных XTomoDPU и система их обработки «Граница» [Сакулина и др., 2003, 2009]. Основным результатом обработки является выделение опорных волн, связанных с протяженными сейсмическими границами, в



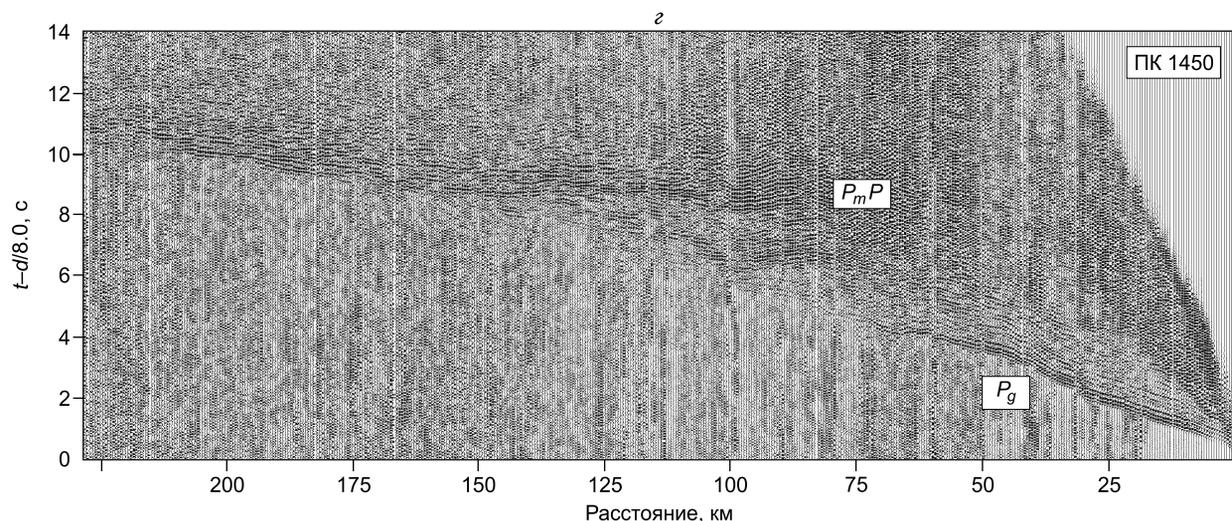


Рис. 2. Монтажи сейсмограмм, полученные на профиле 4-АР для пунктов (ПК) донных станций (АДСС): (а) 190, (б) 940, (в) 1010, (г) 1450 км.

P_{sed} — продольные преломленные волны от осадочного чехла, P_g — от консолидированной части коры и P_m от верхов мантии, отраженные волны $P_m P$ от подошвы земной коры, границы М.

виде считанных времен их прихода, формирование соответствующей системы годографов и приближенное определение глубины и рельефа этих границ на основе решения обратной кинематической задачи, в частности, способом t_0 . Этот способ дает неплохие результаты, когда для определения кинематических параметров выделенных волн используются годографы, наблюдаемые на относительно небольших удалениях источник—приемник, и при спокойном залегании границ. В результате достаточно надежно определяется общая структура земной коры, наличие или отсутствие резких границ и их структурные особенности. Выполненный таким образом анализ волновых полей показал, что на профиле 4-АР наиболее надежно прослеживаются границы в осадочной толще и граница М.

Для анализа наблюдаемых годографов и определения по ним основных особенностей скоростного разреза по профилю 4-АР использовался также метод редуцированных годографов, или метод построения кинематического временного разреза [Павленкова, 1979]. Для этого годографы редуцировались со скоростью редукции $v_r = 8.0$ км/с и трансформировались к середине расстояния источник—приемник (на рис. 3, а приведена часть наблюдаемых годографов с расстоянием между донными станциями не 10—20, а 40—60 км). Огибающая таких редуцированных годографов для волн, зарегистрированных в первых вступлениях, является линией t_0 для границы с граничной скоростью, равной скорости редукции v_r ; на рис. 3, а при $v_r = 8.0$ км/с — для границы М. Годографы отраженных волн от границы М совпадают с этой огибающей в критических точках.

На рис. 3, а показаны также еще две линии: линия t_1 соединяет точки выхода в первые вступления волны P_g , линия t_2 проходит в области смены волн от верхней и нижней коры. Увеличение времен на этих линиях в центре профиля связано с прогибом по поверхности фундамента. Время вдоль линии t_0 ($v_r = 8.0$), характеризующей не только рельеф границы М, но и структуру всей покрывающей толщи, также увеличивается в районе впадины, но при этом разница времен между линиями t_1 и t_0 ($v_r = 8.0$) сохраняется, что свидетельствует о малой изменчивости глубины до границы М в районе впадины. Однако время t_0 ($v_r = 8.0$) существенно различается для начальной и конечной частей профиля, где осадочный чехол имеет небольшую мощность: 6 с на ПК 130—350 км и 8—9 с на ПК 1100—1500. Это означает, что глубина до границы М существенно увеличивается с запада на восток.

Для характеристики волн, связанных с границей М по записям волн $P_m P$ был построен также временной разрез по методике, аналогичной ОГТ: сейсмические записи отраженных волн, наблюдаемых на разных зондированиях, после ввода кинематических поправок были снесены на середину интервала источник—приемник и суммированы (см. рис. 3, б). Такой разрез дает качественную характеристику структуры низов коры и верхней мантии. Как видно из приведенного рисунка, суммарная амплитуда отражений от границы М на временном разрезе меняется вдоль профиля в соответствии с изменением формы и протяженности их годографов: отмечается понижение интенсивности волн от границы М под наиболее глубокой частью Северо-Баренцевской впадины (ПК 500—1000 км). Временной разрез подтверждает также резкое уменьшение глубины до границы М в самой западной части профиля.

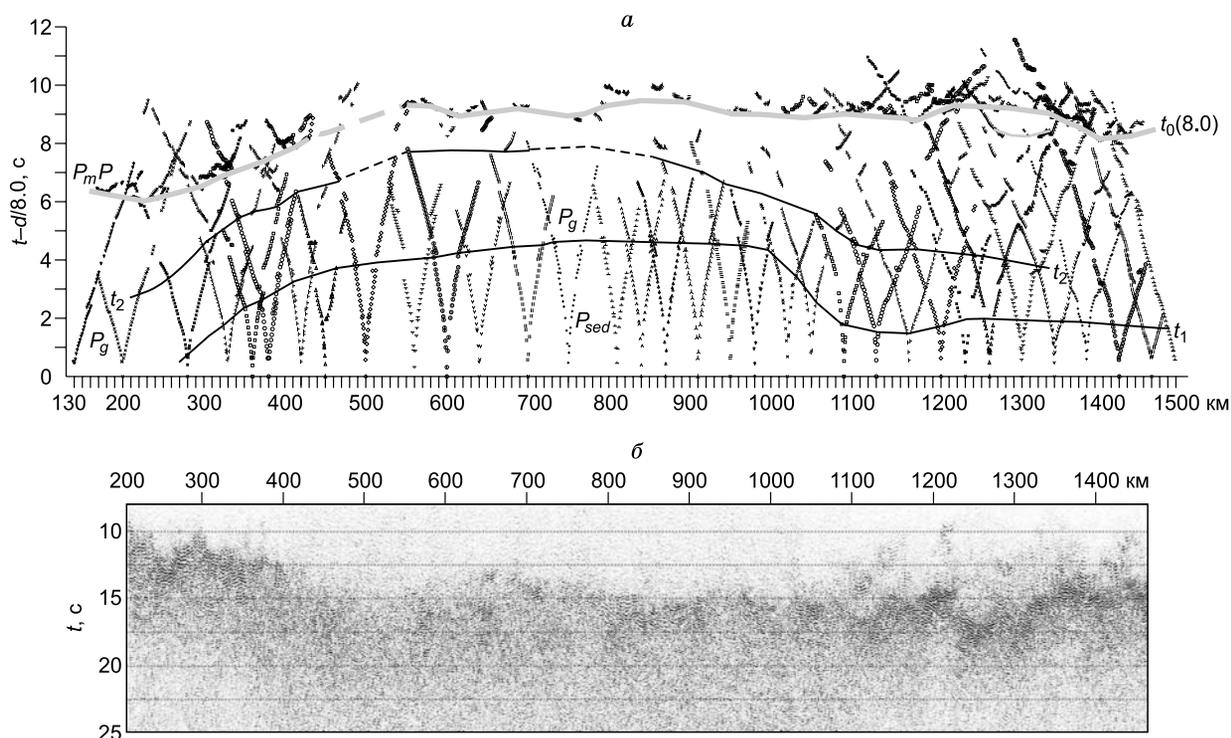


Рис. 3. а — годографы опорных продольных волн, редуцированные со скоростью редукции 8.0 км/с и трансформированные к середине расстояния приемник—источник.

На рисунке приведена четвертая часть отработанных пунктов АДСС. Линия t_0 (8.0 км/с), построенная как огибающая редуцированных годографов, определяет t_0 для волн от границы М; линия t_1 соединяет точки годографов, где в первые вступления выходит волна от фундамента P_g с кажущейся скоростью около 6.0 км/с; линия t_2 определяет область выхода первых вступлений волны P_g с кажущимися скоростями более 6.3 км/с.

б — динамический (волновой) разрез зоны перехода кора—мантия (границы М), построенный по данным ГСЗ (по закритическим отражениям от границы М).

Сопоставление годографов и характера изменчивости вдоль профиля особенностей временного разреза по границе М позволяет выделить три основных типа волновых полей, наблюдаемых на профиле.

Первый тип характерен для западной части профиля (ПК 100—450 км). Интервал прослеживания волны P_{sed} , связанной с осадками на этом участке, резко увеличивается с юга на север от 0 до 20 км, а время выхода в первые вступления волны P_g от фундамента соответственно возрастает от 0 до 4 с. Кажущиеся скорости волн от границ осадочного чехла увеличиваются с удалением от источника незначительно, и в среднем составляют 3.5—4.0 км/с. Волна P_g характеризуется стабильными кажущимися скоростями 6.0—6.3 км/с; лишь на удалениях около 60 км иногда наблюдаются разрывы годографов этой волны и выход в первые вступления отраженных волн от низов коры (например, на уровне линии t_2 для ПК 280 и 330 на рис. 3, а). В последующих вступлениях наблюдаются интенсивные отражения от границы М (см. рис. 3, б). Интервал их прослеживания в этой части профиля составляет от 80 до 120 км, но иногда их можно наблюдать до 180 км, где кажущаяся скорость составляет 6.3—6.4 км/с (см. рис. 2, а). Преломленная волна P_n от границы М выделена на этом участке профиля лишь на двух АДСС в виде коротких осей синфазности малой амплитуды с кажущейся скоростью около 8.0 км/с на времени около 6 с (при скорости редукции 8.0 км/с).

Другой тип волнового поля наблюдается в пределах Северо-Баренцевской впадины (ПК 450—1100 км). Годографы первых вступлений на удалениях от 0 до 30 км аппроксимируются здесь одной кривой с постепенно увеличивающейся кажущейся скоростью от 3.5 до 5.4 км/с (волны P_{sed}). Волна P_g характеризуется низкими скоростями (от 5.6 до 6.0 км/с) и отделить ее от волн осадочного чехла очень трудно. Поэтому время выхода этой волны в первые вступления было определено по характерной смене волн, стабильно наблюдаемой вдоль всей этой части профиля на времени около 4 с (линия t_1 на рис. 3, а). На расстоянии от источника около 80 км эти волны обычно затухают, т.е. консолидированная часть коры под впадиной практически не освещена преломленными волнами.

Отличительными особенностями данного типа волнового поля являются также необычные свойства отраженных волн от границы М. Они представлены очень короткими годографами (не более 40—50 км) прямолинейной формы с кажущимися скоростями около 8.0 км/с. Напомним, что на рис. 3, а дана лишь четвертая часть годографов и поэтому создается впечатление, что в этой части профиля граница М прослеживается с большими перерывами. Фактически это не так, плотная система наблюдений позволяет практически непрерывно проследить эту границу, несмотря на короткие годографы волны P_{mP} . Характерно, что короткие годографы отражений от границы М сочетаются с достаточно большой их интенсивностью (см. рис. 2, б). Это означает, что такие свойства отражений связаны не с изменением контрастности границы, а с изменением ее скоростной модели. На временном сейсмическом разрезе (см. рис. 3, б) граница М характеризуется слабой выразительностью, так как интервалы прослеживания отражений от этой границы в этой части профиля короче обычных.

Существенно другим волновым полем представлен третий самый восточный блок профиля, ПК 1100—1500 км. Мощность осадочного чехла здесь небольшая и волны P_g регистрируются практически от источника. Годографы этих волн существенно искажены приповерхностной неоднородностью, но в среднем они характеризуются стабильным увеличением скорости с удалением от источника от 5.7 до 6.6 км/с. При этом они не затухают на больших удалениях, как в пределах Северо-Баренцевской впадины, и описывают структуру земной коры на всю ее глубину. Отражения от границы М представлены в этом блоке интенсивными многофазовыми группами с протяженными годографами (см. рис. 2, в, г; 3, а, б). Все это обеспечивает надежное определение скоростной модели земной коры в пределах этого блока.

Методика построения скоростного разреза. Наиболее информативным методом построения скоростных моделей и вообще интерпретации данных ГСЗ является метод математического моделирования. Он заключается в многократном решении прямой задачи для некоторых стартовых скоростных моделей, в сопоставлении результатов расчета с наблюдаемыми полями и в выборе на этой основе наиболее обоснованной модели.

Опыт показал, что точность и надежность построения скоростной модели таким методом определяются не только степенью сходимости расчетных и наблюдаемых полей, но и всеми предыдущими этапами интерпретации. Особенно они зависят от качества стартовых моделей, с которых начинается моделирование. Чем ближе стартовая модель к окончательному решению и чем меньше она содержит мелких, мало обоснованных деталей, тем достовернее получается это решение. Проведенный выше анализ наблюдаемых годографов дает возможность построить такую объективную начальную двумерную модель земной коры по профилю 4-АР для дальнейшего уточнения ее в процессе лучевого моделирования и для оценки ее достоверности.

Для получения двумерной стартовой модели используются различные подходы, например, традиционные приемы: построение протяженных границ по сводным годографам или построение «дискретных» скоростных разрезов в виде совокупности одномерных скоростных колонок, рассчитанных по кажущимся скоростям и временам t_0 преломленных волн, и т.д. Как отмечалось выше, в Севморгео для этого используется система «Граница» [Сакулина и др., 2003, 2009], в которой строятся границы в осадочном чехле и опорные сейсмические границы в консолидированной коре (например, поверхность фундамента и граница М), а также определяются пластовые и граничные скорости в основных слоях. Практика показала, что такой подход дает неплохое начальное приближение модели.

Достаточно объективные стартовые модели получаются также на основе временных разрезов, построенных методом редуцированных годографов (см. рис. 3, а).

После построения стартовой модели математическое моделирование можно проводить, используя разные программы вычисления годографов и построения синтетических сейсмограмм. При обработке большого объема данных, например, на опорных профилях, целесообразно использовать программу SeisWide [Zelt, Ellis, 1988]. Она облегчает подбор модели, оперируя сразу с волновыми полями нескольких зондирований. На профиле 4-АР использовалась также программа Seis83 [Cerveny, Psencik, 1983], практически неограниченная по своим возможностям для расчета сложных скоростных моделей (рис. 4).

Результаты математического моделирования во многом определяются не только программой, которая для этого использовалась, но и степенью детальности подбора. Можно ограничиться построением осредненной скоростной модели, удовлетворяющей основным характеристикам опорных волн. При необходимости выделения отдельных деталей разреза нужно проводить последовательное решение прямой задачи по каждому зондированию с подбором всех наблюдаемых волн, определением их природы и с построением отдельных тел и слоев с пониженной или повышенной скоростью, отражающих площадок сложной формы и т.д. Именно такое моделирование было проведено при построении скоростного разреза, представленного на рис. 5, б. Особое внимание было уделено отражающим границам в зоне перехода кора—мантия, которые позволяют изучить структуру границы М и выявить области возможных глубинных разломов.

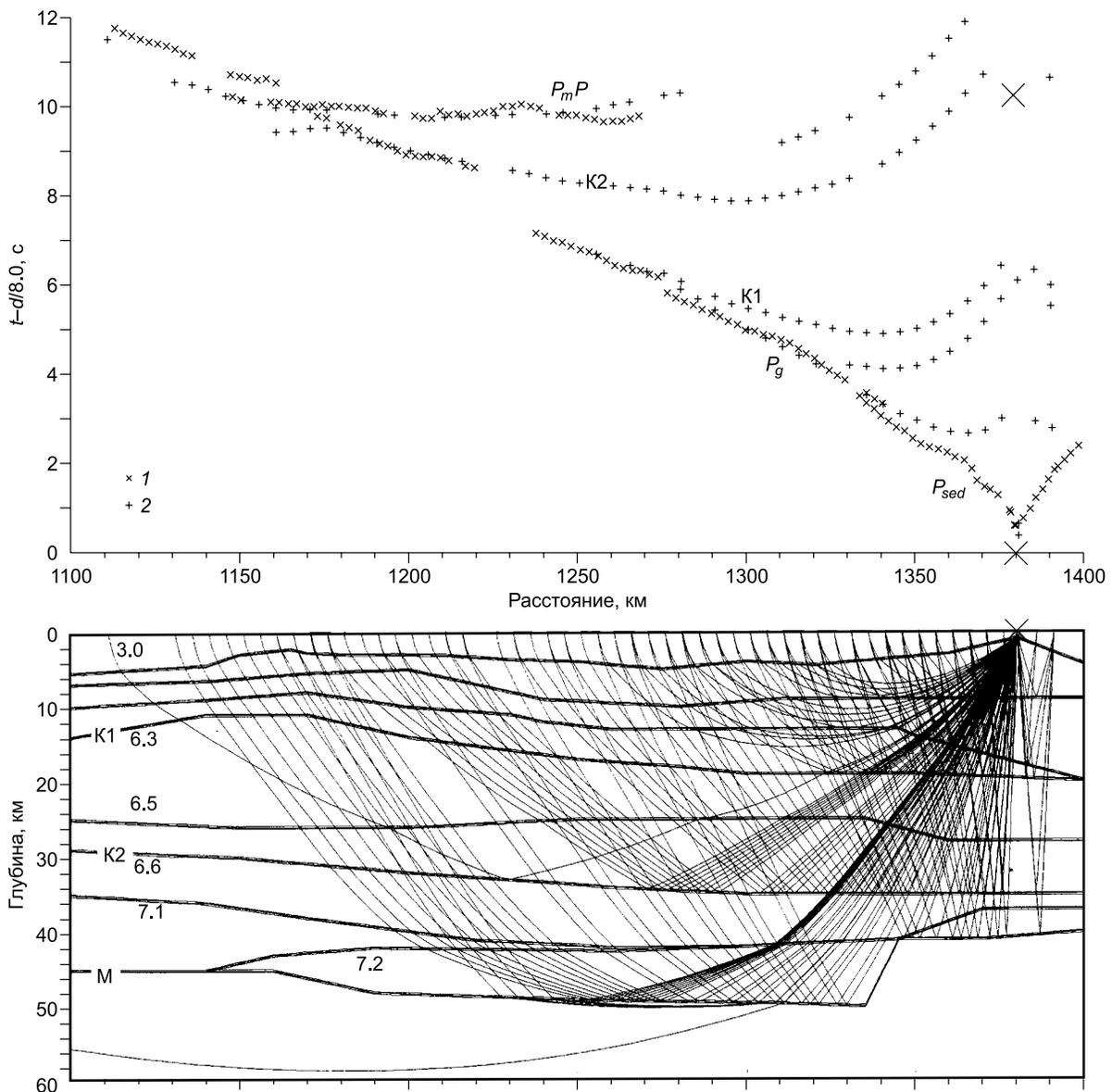


Рис. 4. Сопоставление наблюдаемых (1) и расчетных (2) годографов и лучевая диаграмма для ПВ1380 профиля 4-АР.

Обозн. волн см. на рис. 2. K1 и K2 — годографы отраженных волн от границ K1 и K2 на разрезе.

Важной задачей математического моделирования является не только построение скоростного разреза, но и определение его достоверности и степени возможной неоднозначности. Несмотря на плотную систему наблюдений и качественные записи волновых полей, при построении скоростных моделей земной коры всегда существует объективная неоднозначность. Это касается главным образом определения параметров зон пониженных скоростей. Такой слой выделяется на профиле 4-АР в низах осадочного чехла (см. рис. 5, б). По временному разрыву годографов, связанному с инверсией скорости в слое, невозможно однозначно определить и мощность слоя и величину пластовой скорости в нем. Поэтому скорость в нем задавалась из общих соображений, а в процессе моделирования определялась геометрия слоя.

Неоднозначность в построении скоростной модели по профилю 4-АР наиболее вероятна для низов коры Северо-Баренцевской впадины. Преломленные волны от этой части коры не регистрируются в первых вступлениях, они обычно затухают на удалении от источника более 50 км (см. рис. 2, б, 3, а). Таким образом, определить пластовую скорость в низах коры в данном случае можно только по отраженной волне от границы М. Но годографы этих волн на профиле в пределах впадины очень короткие.

Для оценки возможной неоднозначности решения в этом случае было проведено специальное моделирование: определение формы годографа волны P_mP для различных скоростных моделей нижней

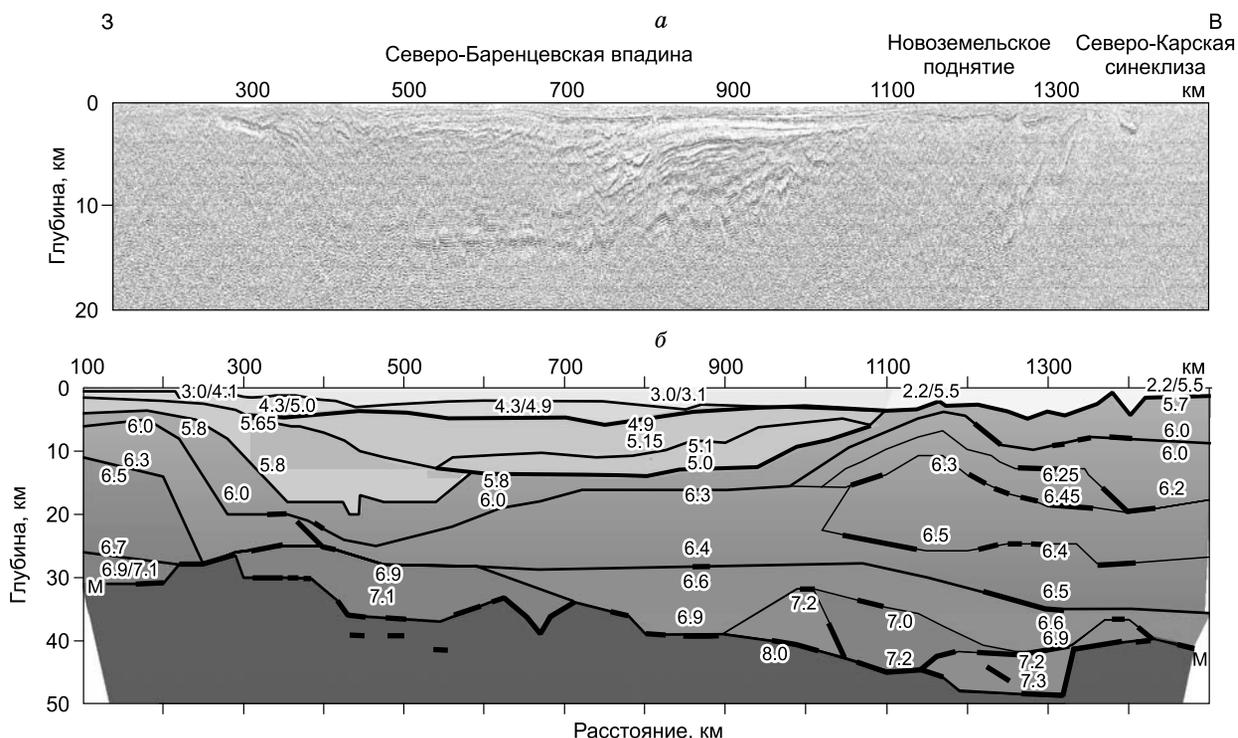


Рис. 5. Сейсмические разрезы земной коры по профилю 4-АР:

a — разрез ОГТ, *б* — скоростной разрез (цифрами даны скорости продольных волн в км/с). Утолщенными линиями на разрезе показаны отражающие площадки.

части коры. Результаты моделирования показали, что наилучшее совпадение с наблюдаемыми годографам длиной около 50 км получено при изменении скорости в консолидированной части коры впадины от 6.3 до 6.9 км/с (рис. 6). Но эти определения неустойчивы: заметные изменения формы годографа отраженной волны, связанные с изменением скорости в покрывающей среде, наблюдаются только при их изменении в большую или меньшую сторону на 0.20—0.25 км/с. Правда, глубина до границы М меняется в этом случае в небольших пределах, не более 3 км. Если учесть сложный многофазовый характер записей отражений от границы М и возможные изменения формы их годографов из-за наклона границы, определение скоростной модели в низах коры по таким коротким годографам становится неоднозначной задачей. Только большое число донных станций, как в случае Северо-Баренцевской впадины, позволяет получить осредненные параметры скоростной модели консолидированной коры в пределах 0.2 км/с. При длинных годографах волн P_mP (вне впадины) ситуация меняется: даже при отсутствии первых волн от низов коры (см. рис. 5) их скоростная модель определяется с точностью 0.1 км/с.

ОБРАБОТКА ПОЛЯ ПОПЕРЕЧНЫХ ВОЛН

Глубинные сейсмические исследования на континентах показали высокую информативность данных не только по продольным, но и по поперечным волнам [Алейников и др., 1986; Крылов, Тен, 1994; Кашубин, 2001]. При обработке данных морских исследований ГСЗ обычно ограничивались продольными волнами. Анализ 3-компонентных записей, полученных на профиле 4-АР, показывает, что помимо поля продольных волн, наиболее ярко проявленного на записях гидрофонов и вертикальных компонент геофонов, на горизонтальных компонентах регистрируются волны, по своим кинематическим характеристикам соответствующие поперечным и обменным волнам. Поле этих волн при морских наблюдениях существенно отличается от полей, регистрируемых на суше. Поскольку морские работы выполняются с использованием пневмоизлучателя, располагающегося в водном слое на глубине 20—30 м и, соответственно, генерирующего только P -волну, все регистрируемые донной станцией волны непродольного типа являются обменными, так как в воде они распространяются как продольные волны. Кроме того, наличие резкой акустической границы — дна моря приводит к тому, что на сейсмограммах наблюдаются интенсивные кратные волны, связанные с этой границей. Все это осложняет выделение опорных S -волн на экспериментальных записях и требует применения специальных приемов для вычленения этих волн из интерференционного волнового поля или, по крайней мере, для подчеркивания их.

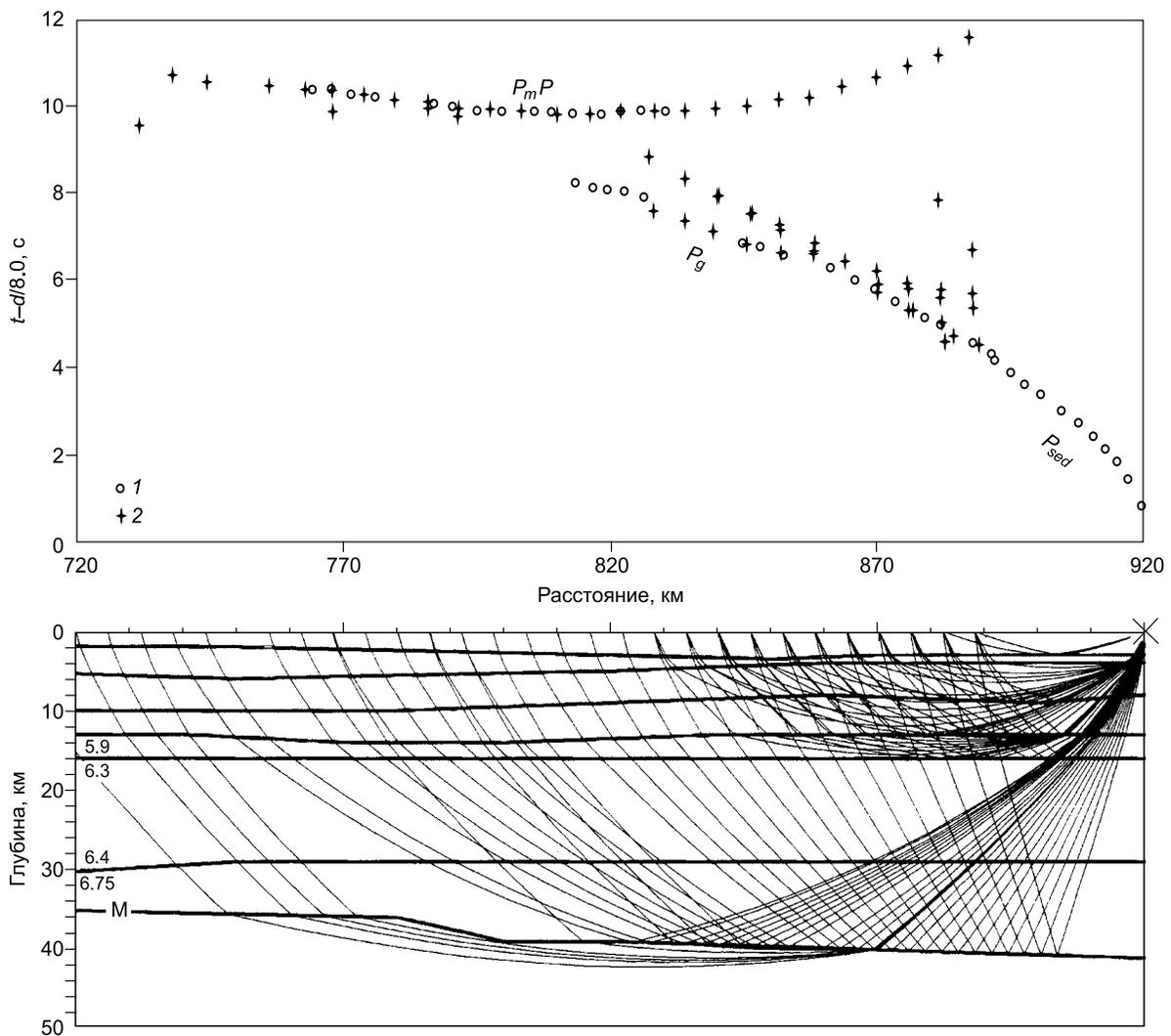


Рис. 6. Сопоставление наблюдаемых (1) и расчетных (2) годографов и лучевая диаграмма для ПК 920 профиля 4-AP.

Обозн. волн см. на рис. 2.

В последние годы во ВСЕГЕИ была разработана методика, позволяющая в массовом масштабе выделять поперечные волны по материалам морских работ ГСЗ [Кашубин и др., 2013б]. В ней предложены различные способы обработки многокомпонентных записей, например: подчеркивание поперечных волн за счет многоканальной фильтрации по кажущимся скоростям (веерной фильтрации); выделение конкурирующих, в первую очередь, продольных волн с последующим вычитанием их из интерференционного поля и другие.

Многокомпонентная обработка на профиле 4-AP выполнена для восточного 600-километрового участка профиля (ПК 900—1500 км). Пример записи поперечных волн в этой части профиля приведен на рис. 7. На нем видно, насколько сложнее волновое поле в области регистрации поперечных волн по сравнению с продольными волнами. Однако основные волны, необходимые для построения скоростного разреза и определения соотношения скоростей P - и S -волн, аналоги опорных продольных волн P_g и $P_m P$, удалось выделить на горизонтальных компонентах — S_g , $S_m S$.

Сопоставление волновых полей P - и S -волн, регистрируемых на профиле 4-AP, показало, что они в целом подобны и их можно интерпретировать в рамках одной и той же геометрии сейсмического разреза. Для большей объективности, для отмеченного участка профиля была проведена совместная обработка продольных и поперечных волн. Были построены скоростные разрезы на основе лучевого моделирования с использованием пакетов программ SeisWide и S83D. Корректировка модели осуществлялась «вручную» путем изменения скоростей, глубины и геометрии границ в области, освещаемой лучами с соответствующих пунктов возбуждения—прием.

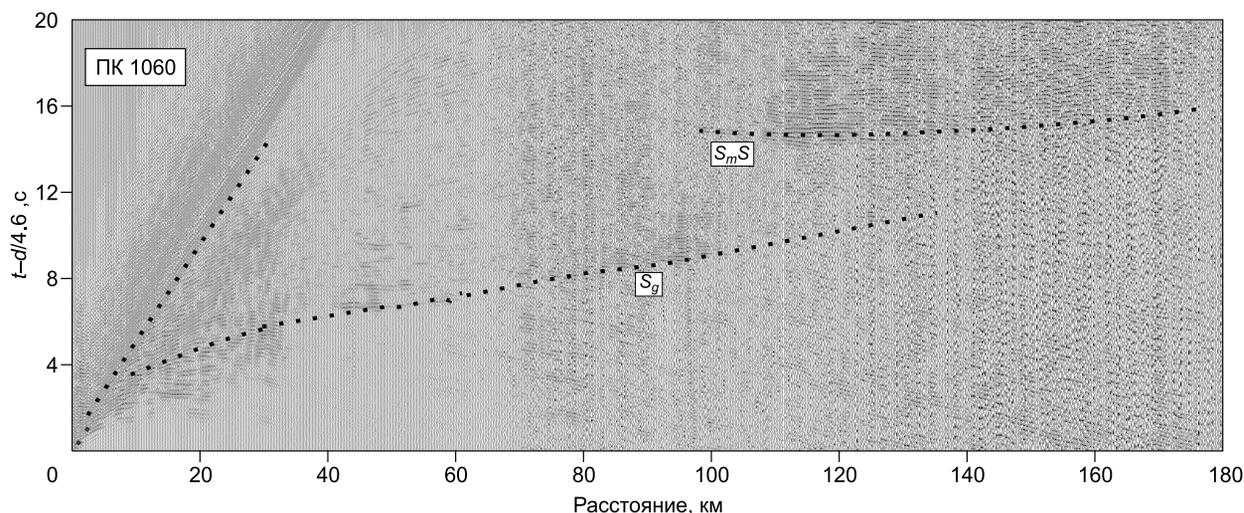


Рис. 7. Монтаж сейсмограмм с записью поперечных волн на ПК 1060.

S_g — преломленная волна в консолидированной коре, $S_m S$ — отражение от границы М.

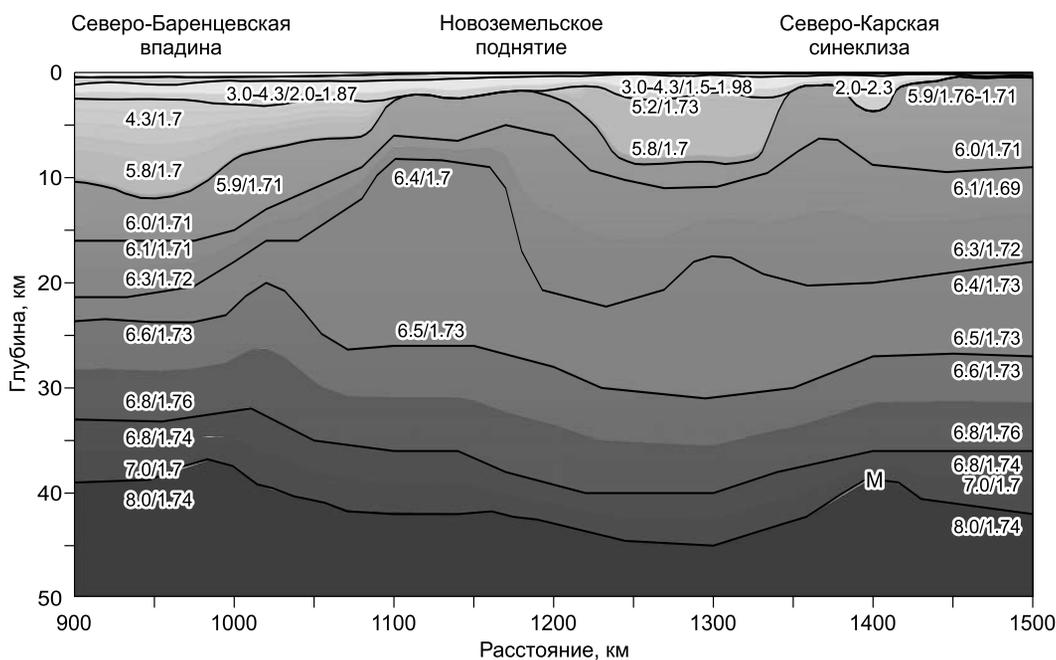


Рис. 8. Скоростной разрез по продольным и поперечным волнам для восточной части профиля 4-АР.

На разрезе даны скорости продольных волн (км/с) и значения отношения v_p/v_s

После построения разреза v_p в той же геометрии подбирался разрез v_s . Для этого скорости продольных волн пересчитывались в скорости поперечных волн с коэффициентом 1.73. Далее в интерактивном режиме осуществлялась корректировка значений v_s без изменения геометрии разреза до достижения удовлетворительного совпадения расчетных годографов преломленных и отраженных S -волн с наблюдаемыми волновыми полями на горизонтальных компонентах. Результаты построений приведены на рис. 8.

Сопоставление разрезов (см. рис. 5, б, 8), построенных по продольным волнам независимо разными исследователями, показывает, что в целом эти разрезы не отличаются по осредненным параметрам, характеризуясь лишь разной детальностью. Для определения главного параметра разреза, соотношения скоростей P - и S -волн, по которому проводится уточнение состава земной коры, это не имеет значения. Полученные по профилю 4-АР соотношения v_p/v_s достаточно стабильны, они постепенно увеличивают-

ся с глубиной от средних 1.70—1.72 в верхней части консолидированной коры до 1.74—1.76 в ее низах (см. рис. 8), что характерно для состава типичной континентальной коры.

СТРУКТУРА ЗЕМНОЙ КОРЫ ПО КОМПЛЕКСУ СЕЙСМИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Основные результаты глубинных сейсмических исследований по профилю 4-АР представлены в виде трех разрезов земной коры, которые отражают главные особенности строения пересекаемых профилем геологических структур: сейсмический разрез ОГТ (см. рис. 5, *a*) характеризует структуру осадочного чехла, скоростные разрезы ГСЗ (см. рис. 5, *b*; 8) — структуру земной коры на всю ее мощность по продольным и поперечным волнам.

Данные ОГТ отражают детали строения осадочной толщи Северо-Баренцевской впадины. По этим данным впадина имеет очень крутой западный борт, представленный, очевидно, глубинным разломом (ПК 350—430 км, см. рис. 5, *a*). Почти пятикилометровая толща осадков смята в этой части впадины в складки. Центральная часть впадины (ПК 450—680 км) характеризуется спокойным залеганием осадочной толщи. Восточный склон впадины (ПК 700—1100 км) — более пологий, но осадки над ним сильно деформированны. Эта специфическая особенность структуры впадины, восточная часть которой испытала, очевидно, существенные тектонические перестройки в процессе формирования Новоземельского поднятия.

Необычной является структура фундамента в центральной части впадины. Вместо наблюдаемой часто сложной формы, осложненной рифтовыми структурами, как, например, в центре Южно-Карской впадины по профилю 2-АР [Сакулина и др., 2009], на профиле 4-АР фундамент представлен в интервале ПК 450—680 км на протяжении более 200 км практически гладкой субгоризонтальной границей, четко выраженный по докритическим и закритическим отражениям (см. рис. 5, *a*). Это — необычное явление, которое, возможно, объясняется большой глубиной границы, которая не отражает первичного строения поверхности фундамента, а образовалась в результате преобразования вещества при высоком давлении и температуре с увеличением его пластичности и соответствующего выравнивания неоднородностей.

Строение более глубокой части консолидированной коры изучено на профиле 4-АР только по данным ГСЗ. На полученном скоростном разрезе с запада на восток наблюдается общее увеличение толщины земной коры с увеличением мощности нижнего высокоскоростного (6.6—7.2 км/с) слоя.

На этом фоне выделяются несколько блоков коры с разной структурой. Самый западный блок (ПК 0—300 км), соответствующий южному склону Земли Франца-Иосифа, характеризуется тонкой (30 км) и низкоскоростной корой с аномально малой толщиной (0—4 км) ее нижней высокоскоростной части (скорости 6.9—7.1 км/с). По своей структуре кора этого блока близка к западноевропейскому типу, в то время как кора всей остальной части профиля ближе к коре Восточной Европы: как известно, кора европейского континента четко делится по линии Тейссейера—Торнквиста на мощную (40—50 км) кору с толстой (не менее 10 км) нижней корой Восточной Европы и тонкую (25—35 км) низкоскоростную кору в Западной Европе [Павленкова, 2006].

И на профиле 4-АР этот западный блок отделяется от Северо-Баренцевского блока крупным разломом. Он проявляется в изменении глубины до фундамента и до границ внутри коры на ПК 300—400 км, в наличии крутонаклоненных отражающих площадок в низах коры и в резком увеличении глубины до границы М на ПК 400 км.

Собственно Северо-Баренцевская впадина тоже четко делится на два блока с границей на ПК 700 км. Они различаются не только описанным выше разным строением осадочного чехла, но и строением консолидированной земной корой. В западном блоке 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 до формирования всей впадины.

В целом структура консолидированной коры Северо-Баренцевской впадины отличается пониженными скоростями по сравнению с другими впадинами: 5.8—6.0 км/с по поверхности фундамента и 6.3—6.4 км/с в средней коре до глубины 25 км. Обычно под глубокими впадинами скорости в консолидированной коре повышены. В Южно-Карской впадине по профилю 2-АР они составляют 6.4—6.5 км/с [Сакулина и др., 2009], под Южно-Баренцевской впадиной около 7.0 км/с [Морозова и др., 1995]. Такие же цифры типичны и для глубоких впадин на континенте [Павленкова, 2006]. Под всеми этими впадинами наблюдается также подъем границы М, но под Северо-Баренцевской впадиной его трудно отметить на фоне общего увеличения глубины до этой границы с запада на восток. Правда, граница М, как отмечалось выше, плохо прослеживается под впадиной, и в интервале ПК 500—1000 км незначительный, в пределах погрешности, подъем этой границы возможен.

Следующим крупным блоком земной коры по профилю 4-АР является Новоземельское поднятие (ПК 1100—1300 км). Он отличается утолщенной корой (глубина до границы М составляет в нем 45—50 км). По скоростному разрезу такую кору можно назвать нормальной континентальной корой с нали-

чием трех основных слоев примерно одинаковой мощности: верхняя кора со скоростью 5.8—6.4 км/с, средняя — со скоростью 6.4—6.5 км/с и нижняя кора со скоростью 6.6—7.2 км/с. От соседних блоков она отличается утолщенной нижней корой.

Скоростная модель самого восточного блока профиля (ПК 1300—1500 км) практически такая же, как у Северо-Земельского блока, но мощность коры в нем уменьшается (до 40 км) за счет сокращения нижней высокоскоростной коры. Выделение этого блока как самостоятельной структурной единицы проведено по глубинному разлому на ПК 1300, четко выделяемому на разрезе ОГТ (см. рис. 5, *a*). Этот разлом проявляется и в изменчивости структуры границы М как на скоростном (см. рис. 5, *б*), так и на динамическом (см. рис. 5, *a*) разрезах.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Выше отмечалось, что глубинные сейсмические исследования Баренцева моря имеют большое значение для решения важных геодинамических проблем. Изучение структуры земной коры шельфовых зон дает возможность решать общие проблемы формирования океанических впадин и коры разного типа. В этом плане шельфовые зоны Арктики представляют особый интерес, поскольку они отличаются необычным строением земной коры по сравнению с другими океаническими областями.

Как отмечалось выше, необычным является большая мощность земной коры, типичная для континентов, и наличие сверхглубоких впадин платформенного типа с мощностью осадков до 15—20 км. Данные по профилю 4-АР подтвердили эти необычные особенности арктического шельфа и выявили ряд новых его особенностей.

Сейсмические исследования на профиле 4-АР интересны и с методической точки зрения, они показали эффективность комплексирования МОВ-ОГТ и ГСЗ для изучения структуры земной коры. Работы МОВ-ОГТ обеспечивают детальное изучение осадочного чехла с прослеживанием его основных границ, а ГСЗ — изучение фундамента и глубинных границ в консолидированной коре, включая границу М. Именно этот комплекс дает возможность изучить общую расслоенность земной коры, ее блоковое строение и по сейсмическим скоростям оценить возможный состав слагающего ее вещества.

Проведенные исследования не только подтвердили континентальный тип коры этой шельфовой зоны. Они показали также, что строение коры шельфа сложное: резко меняется толщина осадочного чехла, мощность коры и ее внутренняя структура. Это свидетельствует о высокой тектонической активности шельфа, в результате которой существенно преобразовалась вся кора.

Важным выводом проведенных исследований является необычная структура земной коры Северо-Баренцевой впадины, существенно отличающейся от других глубоких впадин не только Баренцево-Карского шельфа, но и всей Северной Евразии. Типичной особенностью коры многих глубоких впадин является сокращение под ними мощности земной коры за счет подъема границы М и увеличение сейсмической скорости в консолидированной части коры. Формирование таких впадин обычно связывают с различными геодинамическими процессами, увеличивающими плотность вещества консолидированной коры и тем самым вызывающих его погружение. Один из таких процессов предложен для Северо-Баренцевской впадины в работе [Артюшков и др., 1014]. Но кора под Северо-Баренцевой впадиной характеризуется пониженными скоростями по сравнению с другими впадинами. В ней наблюдаются скорости 6.3—6.4 км/с до глубины более 20 км, а слой средней коры (скорости 6.5—6.7 км/с) практически отсутствует. Это означает, что формирование Северо-Баренцевой впадины проходило по особому сценарию в результате прогиба всей коры без существенных ее внутренних преобразований. Механизм формирования таких впадин не изучен, можно только предположить, что такой прогиб связан с более глубокими процессами: не в коре, а в верхах мантии [Добрецов, Полянский, 2010].

Другой интересной особенностью структуры земной коры по профилю 4-АР являются выделенные зоны нарушения. Одна из них ограничивает с запада Северо-Баренцевскую впадину. В этой зоне происходит смена типа земной коры, т.е. можно предполагать, что она разделяет блоки земной коры разного возраста. Другая зона нарушений отделяет Северо-Земельское поднятие от блока Северо-Карской синеклизы (см. рис. 5, *a*). С тектонической точки зрения этот разлом представляет особый интерес, так как, возможно, он отделяет Северо-Земельское поднятие от Таймырской складчатой системы, с которой он часто объединяется [Верба, 2008].

ЛИТЕРАТУРА

Алейников А.Л., Немзоров Н.И., Халевин Н.И. Многоволновая сейсмика при изучении недр рудных районов. М., Наука, 1986, 112 с.

Артюшков Е.В., Беляев И.В., Казанин Г.С., Павлов С.П., Чехович П.А., Шкарубо С.И. Механизмы образования сверхглубоких прогибов: Северо-Баренцевская впадина. Перспективы нефтеносности // Геология и геофизика, 2014, т. 55 (5—6), с. 821—846.

Баренцевская шельфовая плита / Ред. И.С. Грамберг. Л., Недра, 1988, 263 с.

Верба М.Л. Сравнительная геодинамика Евразийского бассейна. СПб., Наука, 2008, 191 с.

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

Грамберг И.С., Погребницкий Ю.В. Геодинамическая система, глубинное строение и структурная эволюция Северного Ледовитого океана. Эволюция геологических процессов в истории Земли. М., Наука, 1993, с. 146—158.

Добрецов Н.Л., Полянский О.П. О механизмах формирования глубоких осадочных бассейнов: достаточно ли данных для доказательства эклогитизации? // Геология и геофизика, 2010, т. 51 (12), с. 1687—1696.

Кашубин С.Н. Сейсмическая анизотропия и эксперименты по ее изучению на Урале и Восточно-Европейской платформе. Екатеринбург, УрО РАН, 2001, 182 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.

Крылов С.В., Тен Е.Н. Оценка прочности кристаллических пород по данным глубинного сейсмического зондирования на *P*- и *S*-волнах // Геология и геофизика, 1994 (5), с. 20—30.

Матвеев Ю.И., Верба М.Л., Липилин А.В., Рослов Ю.В., Эринчек Ю.М. Основные итоги десятилетних региональных комплексных геофизических исследований на Баренцево-Карском шельфе // Разведка и охрана недр, 2005, № 1, с. 3—6.

Морозова Е.А., Павленкова Н.И., Хербст Р. Сейсмическая модель земной коры юго-восточной части Баренцева моря и проблемы неоднозначности ее построения // Физика Земли, 1995, № 2, с. 73—83.

Павленкова Н.И. Метод редуцированных годографов и математическое моделирование // Обратные кинематические задачи взрывной сейсмологии / Ред. С.М. Зверев. М., Наука, 1979, с. 107—123.

Павленкова Н.И. Структура земной коры и верхней мантии по сейсмическим данным // Строение и динамика литосферы Восточной Европы. Результаты исследований по программе EUROPROBE / ред. А.Ф. Морозов, Н.В. Межеловский, Н.И. Павленкова. Вып. 2. М., ГЕОКАРТ, ГЕОС, 2006, с. 559—599.

Сакулина Т.С., Рослов Ю.В., Иванова Н.М. Глубинные сейсмические исследования в Баренцево- и Карском морях // Физика Земли, 2003, № 6, с. 5—20.

Сакулина Т.С., Рослов Ю.В., Павленкова Г.А. Методы и результаты обработки комплексных сейсмических исследований по профилю 2-АР (Баренцево-Карский шельф) // Физика Земли, 2009, № 3, с. 56—63.

Строение литосферы российской части Баренц-региона. Петрозаводск, 2005, 318 с.

Barrère C., Ebbing J., Gernigon L. Offshore prolongation of Caledonian structures and basement characterisation in the western Barents Sea from geophysical modeling // Tectonophysics, v. 470, № 1—2, 2009, p. 71—88.

Červený V., Pšeničák I. SEIS 83-numerical modelling of seismic wave fields in 2-D laterally varying layered structure by the ray method // Documentation of earthquake algorithms, World Data Cent. A. for Solid Earth Geophys. / Ed. E.R. Engdahl. 1983, Boulder, Rep. SE-35, p. 36—40.

Ivanova N.M., Sakoulina T.S., Roslov Yu.V. Deep seismic investigation across the Barents—Kara region and Novozemelskiy Fold Belt (Arctic Shelf) // Tectonophysics, 2006, v. 420 (1—2), p. 123—140.

Ivanova N.M., Sakulina T.S., Belyaev I.V., Matveev Yu.I., Roslov Yu.V. Depth model of the Barents and Kara seas according to geophysical surveys results / Eds. A.M. Spencer, A.F. Embry, D.L. Gautier, A.V. Stoupakova, K. Sørensen // Arctic Petrol. Geol., Geol. Soc., 2011, London, Memoir 35, p. 209—221.

Sakoulina T.S., Telegin A.N., Tichonova I.M., Verba M.L., Matveev Y.I., Vinnik A.A., Kopylova A.V., Dvornikov L.G. The results of deep seismic investigations on geotraverse in the Barents Sea from Kola Peninsula to Franz Joseph Land // Tectonophysics, 2000, v. 329, p. 319—331.

Roslov Yu.V., Sakoulina T.S., Pavlenkova N.I. Deep seismic investigations in the Barents and Kara Seas // Tectonophysics, 2009, v. 472, p. 301—308.

Zelt C.A., Ellis R.M. Practical and efficient ray tracing in two-dimensional media for rapid traveltimes and amplitude forward modeling // Can. J. Explor. Geophys., 1988, v. 24, № 1, p. 16—31.