

*На правах рукописи*

**Яварова Татьяна Михайловна**



**ГЛУБИННОЕ СТРОЕНИЕ СЕВЕРО-ЧУКОТСКОГО  
ПРОГИБА ПО ДАННЫМ МОРСКИХ  
МНОГОВОЛНОВЫХ СЕЙСМИЧЕСКИХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ**

*Специальность 1.6.9. Геофизика*

**Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата геолого-минералогических наук**

Санкт-Петербург – 2022

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном учреждении «Всероссийский научно-исследовательский геологический институт имени А.П. Карпинского».

**Научный руководитель:**

доктор геолого-минералогических наук, профессор

*Кашубин Сергей Николаевич*

**Официальные оппоненты:**

*Сальников Александр Сергеевич*

доктор геолого-минералогических наук, акционерное общество «Сибирский научно-исследовательский институт геологии, геофизики и минерального сырья», отдел региональной геофизики, начальник отдела;

*Фрейман Сергей Игоревич*

кандидат геолого-минералогических наук, общество с ограниченной ответственностью «Многоволновые технологии», геолог-аналитик;

**Ведущая организация** – федеральное государственное бюджетное учреждение «Всероссийский научно-исследовательский институт геологии и минеральных ресурсов Мирового океана имени академика И.С. Грамберга», г. Санкт-Петербург.

Защита диссертации состоится 16 сентября 2022 г. в 10:00 на заседании диссертационного совета ГУ 2022.7 Горного университета по адресу: 199106, г. Санкт-Петербург, 21-я В.О. линия, д.2, ауд. № 3321.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Горного университета и на сайте [www.spmi.ru](http://www.spmi.ru).  
Автореферат разослан 15 июля 2022 г.

УЧЕННЫЙ СЕКРЕТАРЬ  
диссертационного совета



ДАНИЛЬЕВА  
Наталья Андреевна

## **ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ**

**Актуальность темы исследования.** Систематические геофизические исследования в Восточно-Сибирском и Чукотском морях стали проводиться с середины XX века, начиная с Международного Геофизического Года (1957 г.). Однако до сих пор недра этих морей остаются наименее изученными в российском секторе Арктики. В последнее время актуальность исследований восточно-арктических акваторий резко возросла в связи со следующими основными факторами: 1) необходимость изучения шельфа восточно-арктических морей и раскрытия перспектив его нефтегазоносности; 2) повышение информативности и достоверности геолого-геофизических исследований за счет расширения типов и классов упругих волн, применяемых при сейсмических исследованиях; 3) усиление геолого-геофизических аргументов по обоснованию политико-географической границы Российской Федерации в Северном Ледовитом океане. Недоступность большей части арктической акватории для прямых геологических наблюдений сделала геофизические исследования основным источником геолого-тектонических построений для этой области. Благодаря развитию и применению методики многоволновых сейсмических исследований появилась возможность существенно повысить информативность и достоверность геолого-геофизических моделей региона в целом.

**Степень разработанности темы исследования.** Северо-Чукотский прогиб, расположенный на шельфе Восточно-Сибирского и Чукотского морей в зоне сочленения поднятия Менделеева с северо-восточной окраиной Евразийского континента, многие годы привлекает к себе внимание исследователей. На происхождение прогиба, возраст и состав слагающих его толщ, тектоническую позицию существует ряд точек зрения.

Мощность осадочного чехла в прогибе оценивалась по результатам плотностного моделирования в 22 км, по сейсмическим данным – в 15-16 км (Косько и др., 2008). Несмотря на появление новых сейсморазведочных данных, представления о мощности осадочного чехла по-прежнему существенно разнятся – 14-16 км (Мальшев, 2010; Сакулина и др., 2016; Хаин, 2009) до 20-24 км

(Артюшков, 2010; Виноградов, 2008; Дараган-Суцова и др., 2014; Петровская, 2014; Поселов и др., 2012; Drachev, 2016). Ряд авторов придерживаются промежуточной точки зрения, оценивая мощность чехла в 18 км (Petrov, 2016).

О природе земной коры, подстилающей Северо-Чукотский прогиб, существуют различные мнения. Согласно одной точке зрения, Северо-Чукотский прогиб представляет собой глубокий рифт, сформированный за счет растяжения континентальной литосферы (Богданов и др., 1995). Другие считают, что крупное погружение коры прогиба, начавшееся в позднем девоне, связывается с уплотнением пород основного состава в нижней коре за счет эклогитизации (Артюшков, 2010). На основе гравиметрических данных в работе (Пискарев-Васильев, 2004) предполагается, что в глубокой части прогиба под осадками залегает базальтовая океаническая кора. В работе (Drachev, 2016) говорится о том, что консолидированная кора прогиба не содержит «гранитно-метаморфического слоя» и непосредственно под осадочным чехлом прогнозируется «серпентинизированная мантия».

С появлением в этом регионе морских сейсмических наблюдений по методике глубинного сейсмического зондирования (ГСЗ) с трехкомпонентной регистрацией волнового поля (Сакулина и др., 2011, 2016) (Рисунок 1) удалось не только существенно уточнить представления о глубинном строении земной коры Северо-Чукотского прогиба, но и построить более обоснованную скоростную модель его осадочного чехла. Это, в свою очередь, позволило предложить новую модель формирования Северо-Чукотского осадочного бассейна. В указанных работах автор принимал непосредственное участие.

**Цель работы** – установление особенностей глубинного строения земной коры и верхов мантии Северо-Чукотского прогиба по данным морских многоволновых сейсмических исследований.

Поставленная в диссертационной работе цель достигается посредством решения нижеуказанных **задач**:

1. Определить основные границы обмена сейсмических волн в земной коре при морских многоволновых сейсмических исследованиях на основе математического моделирования

сейсмических волновых полей ГСЗ для типовых моделей земной коры.

2. Разработать и применить методику обработки трехкомпонентных сейсмических наблюдений с донными станциями на акваториях с целью выделения и последующей геологической интерпретации поперечных и обменных волн.

3. Выполнить с использованием разработанной методики построение глубинной скоростной модели ( $V_p$ ,  $V_p/V_s$ ) земной коры и верхов мантии Северо-Чукотского прогиба по материалам комплексных сейсмических исследований по профилям 5-AP и Dream-line.

**Научная новизна работы:**

1. Обоснованы основные границы обмена сейсмических волн в земной коре при морских многоволновых сейсмических исследованиях по результатам лучевого и полноволнового конечно-разностного моделирования волновых полей ГСЗ.

2. Построена глубинная скоростная модель земной коры и верхов мантии региона по системе двух пересекающихся профилей. Впервые с использованием разработанной методики специализированной обработки трехкомпонентных сейсмических наблюдений определены значения  $V_p/V_s$  в пределах земной коры Северо-Чукотского прогиба.

3. В скоростном разрезе осадочных комплексов Северо-Чукотского прогиба выявлен волновод (слой с пониженной скоростью сейсмических волн), связанный с изменениями условий осадконакопления при формировании этого глубоководного бассейна.

4. Обоснована континентальная природа земной коры Северо-Чукотского прогиба по многоволновым сейсмическим данным.

**Теоретическая и практическая значимость работы:**

1. Выполненное конечно-разностное полноволновое моделирование позволило определить особенности волновых полей ГСЗ для типовых моделей земной коры акваторий, установить основные границы обмена волн в земной коре, выделить наиболее часто встречающиеся схемы обмена волн, определить, на

восходящем или нисходящем луче происходит смена поляризации волн.

2. Разработанная методика специализированной обработки трехкомпонентных морских наблюдений ГСЗ, включающая преобразование записей произвольно ориентированных компонент в записи фиксированных компонент заданной ориентации и выделение поперечных и обменных волн за счет ослабления продольных волн, позволила использовать для дальнейшей интерпретации поперечные и обменные волны.

3. Выделенный по результатам глубинного сейсмического зондирования в осадочном чехле Северо-Чукотского прогиба волновод при сопоставлении с материалами метода отраженных волн в модификации общей глубинной точки (МОВ-ОГТ) по профилям Dream-line и 5-AP позволил предложить возможные скоростные и геологические модели осадочного бассейна Северо-Чукотского прогиба. В качестве наиболее вероятной модели формирования столь мощного осадочного бассейна в Северо-Чукотском прогибе предполагается модель «бассейн в бассейне», когда источниками сноса попеременно являлись в мезозойское время – область Центрально-Арктических поднятий, а после ее опускания на батимальные глубины в кайнозой – поднятие Врангеля-Геральда и северо-восток Евразийского континента.

4. Построенная глубинная скоростная модель ( $V_p$ ,  $V_p/V_s$ ) земной коры и верхов мантии Северо-Чукотского прогиба вдоль профиля Dream-line совместно с сейсмическими материалами по опорному профилю 5-AP позволила обосновать континентальную природу земной коры под прогибом и сформировать геолого-геофизическую модель области перехода от Северной Евразии к области Центрально-Арктических поднятий в Северном Ледовитом океане.

5. Использование результатов диссертационной работы позволило повысить информативность и достоверность геолого-геофизических исследований за счет расширения типов и классов упругих волн, применяемых при сейсмических исследованиях. Основные положения диссертационной работы использованы при выполнении работ по созданию Государственной сети опорных

геолого-геофизических профилей на акваториях. Результаты работы вошли в итоговые отчеты по Государственным заданиям ФГБУ «ВСЕГЕИ» на 2014-2021 гг., а так же использованы в ходе деятельности ООО «Центр комплексных морских исследований СПбГУ» при проведении морских сейсмических работ с автономными многокомпонентными сейсмическими донными станциями.

**Методология и методы исследования.** Моделирование волновых полей ГСЗ для ряда типовых моделей земной коры выполнено в программе Tesserat 2D методом конечных разностей (Kelly, 1976; Костин, 2011; Wang, 2010).

Обработка трехкомпонентных наблюдений ГСЗ проведена в два этапа:

1. Преобразование записей произвольно ориентированных компонент в записи фиксированных компонент заданной ориентации выполнено в системе обработки данных многокомпонентных скважинных сейсмических наблюдений 3C-INTERACT (НПП «ГЕТЭК», Москва).

2. Выделение поперечных и обменных волн за счет ослабления продольных выполнено в обрабатывающем комплексе Focus 5.4 Paradigm Geophysical. При динамической обработке использовались процедуры веерной фильтрации и вычитание поля продольных волн из суммарного волнового поля.

Построение глубинных скоростных моделей ( $V_p$ ,  $V_p/V_s$ ) по профилям Dream-line и 5-AP выполнено по методике итеративного подбора параметров (геометрии границ, значений скоростей) с последующей проверкой решением прямой задачи методом кинематического лучевого трассирования по алгоритму К. Зельта (Zelt, 1992), реализованным в программе Д. Чiana SeisWide (Chian, 1994).

**На защиту выносятся следующие положения:**

1. По результатам лучевого и полноволнового конечно-разностного моделирования волновых полей при сейсмических исследованиях на акваториях установлено, что основными границами обмена на падающих лучах являются дно моря и подошва осадочного чехла, на восходящих лучах – подошва земной

коры и подошва осадочного чехла, наиболее интенсивными являются обменные волны, претерпевшие один акт обмена на восходящем луче.

2. В скоростном разрезе осадочных комплексов Северо-Чукотского прогиба выявлен волновод, кровля которого фиксирует изменение направления сноса осадочного материала при формировании двухъярусной структуры в депоцентре этого бассейна.

3. По результатам многоволновых сейсмических исследований модель земной коры Северо-Чукотского прогиба соответствует континентальной земной коре глубоких впадин с наличием мощного осадочного чехла, утоненной верхней и утолщенной нижней кристаллической корой.

**Степень достоверности результатов исследования** обеспечена применением широко апробированных в мире методик морских полевых сейсморазведочных работ, использованием наиболее признанных в практике подобных исследований систем обработки данных и интерпретационных моделей. Скоростные модели ( $V_p$ ,  $V_p/V_s$ ) земной коры и верхов мантии проверены решением прямой кинематической задачи с сопоставлением наблюдаемых и расчетных годографов целевых продольных, поперечных и обменных волн. Основные результаты исследований находятся в хорошем соответствии с результатами работ, выполненных другими специалистами в этом регионе, дополняя их многоволновыми сейсмическими данными.

**Апробация результатов.** Основные положения работы доложены и обсуждены на 7 международных (11-я Международная конференция и выставка по освоению ресурсов нефти и газа Российской Арктики и континентального шельфа стран СНГ – RAO / CIS Offshore 2013 (Санкт-Петербург, 2013 г.); IX Международная научно-практическая конкурс-конференция молодых специалистов «Геофизика-2013» (Санкт-Петербург, 2013 г.); Международная научно-практическая конференция молодых ученых и специалистов памяти академика А. П. Карпинского (Санкт-Петербург, 2015 г., 2017 г.); V Международная конференция молодых ученых и специалистов



«Новое в геологии и геофизике Арктики, Антарктики и Мирового океана», посвященная 100-летию со дня рождения В. Н. Соколова (Санкт-Петербург, 2016 г.); «35 сессия Международного геологического конгресса» (ЮАР, Кейптаун, 2016 г.); XXV Международный научный симпозиум имени академика М. А. Усова «Проблемы геологии и освоения недр» (Томск, 2021 г.) и на 3 всероссийских конференциях (IV Всероссийская конференция молодых ученых и специалистов «Новое в геологии и геофизике Арктики, Антарктики и Мирового океана» (Санкт-Петербург, 2014 г.); Всероссийская конференция, посвященная 100-летию со дня рождения академика Н.Н. Пузырева (Новосибирск, 2014 г.); Конференция-конкурс «Актуальные проблемы недропользования 2021» (Санкт-Петербург, 2021 г.).

**Личный вклад автора.** В основу работы положены материалы многоволновых сейсмических исследований ГСЗ по профилям 5-AP и Dream-Line, полученные ОАО «Севморгео» при создании Государственной сети опорных профилей по заказу Федерального агентства по недропользованию «Роснедра» (профиль 5-AP) и по заказу компании British Petroleum в рамках международного российско-британского сотрудничества (профиль Dream-Line). Автор принимал участие в обработке и интерпретации полевых материалов. Лично выполнил математическое моделирование волновых полей для типовых разрезов земной коры акваторий с целью определения основных границ и схем обмена сейсмических волн, произвел обработку и интерпретацию поперечных и обменных волн, осуществил построение скоростных моделей  $V_p$  и  $V_p/V_s$  по профилям ГСЗ с учетом данных МОВ-ОГТ. Совместно с коллегами сформулировал новые геолого-геофизические выводы о глубинном строении Северо-Чукотского прогиба, вытекающие из многоволновых данных.

**Публикации по работе.** Результаты диссертационной работы освещены в 17 печатных работах, в том числе в 4 статьях – в изданиях из перечня рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук (далее – Перечень ВАК), в 1

статье – в издании, входящем в международную базу данных и систему цитирования Scopus, в 1 монографии, посвященной поперечным и обменным волнам в морской сейсморазведке, в главе в тектоностратиграфическом атласе Восточной Арктики, изданном на русском и английском языках, в 9 публикациях материалов конференций и тезисов докладов.

**Структура работы.** Диссертация состоит из введения, 4 глав с выводами по каждой из них, заключения, списка литературы, включающего 138 наименований. Диссертация изложена на 184 страницах машинописного текста, содержит 97 рисунков и 8 таблиц.

**Благодарности.** Автор выражает благодарность и глубокое признание своему научному руководителю д.г.-м.н. С. Н. Кашубину, без которого не состоялась бы данная работа. За полученные профессиональные знания и опыт работы с сейсмическими данными автор искренне благодарит к.ф.-м.н. Т. С. Сакулину. За всестороннюю помощь при подготовке диссертационной работы автор признателен к.г.-м.н. И. Ю. Винокурову, Т. В. Кашубиной, к.ф.-м.н. Н. А. Крупновой, к.г.-м.н. А. В. Рыбалка. За помощь в освоении специализированного ПО, плодотворную совместную работу и обсуждение результатов исследований автор благодарен коллективам ОАО «Севморгео» и Центра глубинной геофизики «ВСЕГЕИ». Особую благодарность автор выражает своей семье за моральную поддержку.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** обоснована актуальность темы, сформулированы цели и задачи исследования, научная новизна диссертационной работы, практическая значимость и основные защищаемые положения.

**В первой главе** рассмотрены современные представления о строении Северо-Чукотского прогиба по геологическим (Sherwood, 1998, 2009; Косько и др., 2008; Артюшков, 2010 и др.) и геофизическим (Виноградов, 2008; Хаин, 2009; Малышев, 2010; Поселов и др., 2012; Дараган-Суцова и др., 2014; Петровская, 2008, 2014; Павленкова, 2016; Пискарев-Васильев, 2004;

Сакулина, 2011, 2016; Drachev, 2016; Petrov, 2016; Verzhbitsky et al., 2008 и др.) данным.

**Во второй главе** рассмотрены теоретические предпосылки и опыт регистрации поперечных и обменных волн в морской сейсморазведке, основные типы и классы сейсмических волн, используемые для геологической интерпретации при морских многоволновых исследованиях ГСЗ. Представлены результаты математического полноволнового моделирования волновых полей ГСЗ для типовых моделей земной коры и верхов мантии.

**В третьей главе** приведена методика обработки результатов трехкомпонентных сейсмических наблюдений ГСЗ с донными станциями на акваториях, позволяющая выделять и использовать для последующей геологической интерпретации поперечные и обменные волны [1, 6]. В главе описываются два этапа обработки сейсмических записей ГСЗ.

На первом этапе обработки выполняется преобразование записей произвольно ориентированных горизонтальных X- и Y-компонент геофонов донной станции в записи горизонтальных фиксированных заданной ориентации: радиальную R-компоненту, находящуюся в плоскости распространения лучей (по профилю), и трансверсальную T-компоненту, расположенную перпендикулярно плоскости распространения лучей (перпендикулярно профилю) (Кашубин и др., 2011; Кузнецов и др., 2004).

Второй этап обработки направлен на улучшение прослеживания поперечных и обменных волн на сейсмических записях ГСЗ. Опробованы два подхода специализированной обработки: 1) выделение продольных волн (в первых вступлениях, а также соответствующих им кратных волн) и последующее их вычитание из полного волнового поля сейсмической записи во временной области в скользящем вдоль профиля окне; 2) двумерная фильтрация в (f-k)-области в заданных диапазонах кажущихся скоростей продольных и поперечных волн (верная фильтрация) в пространственно-временной частотной области по всей сейсмограмма целиком. Установлено, что второй подход наиболее эффективно работает в условиях нерасчлененного морского дна.

Эффективность методики специализированной обработки трехкомпонентных данных ГСЗ проиллюстрирована на двух объектах. Помимо профилей в Северо-Чукотском прогибе приведены сейсмические записи профиля 2-ДВ-М в Охотском море [1, 6], в обработке которых автор принимал непосредственное участие.

**В четвертой главе** даны краткие сведения о методике морских сейсмических работ ГСЗ и МОВ-ОГТ на профилях Dream-line и 5-AP. Представлены глубинный скоростной разрез ( $V_p$ ,  $V_p/V_s$ ) земной коры и верхов мантии по профилю Dream-line, проверенный решением прямой задачи по методике лучевого моделирования и взаимоувязанная сейсмическая модель по профилям Dream-line и 5-AP на всю мощность земной коры. Рассмотрены особенности строения осадочного чехла по данным МОВ-ОГТ и ГСЗ в районе пересечения профилей Dream-line и 5-AP. Обоснована континентальная природа земной коры Северо-Чукотского прогиба по данным многоволновых сейсмических исследований ГСЗ.

Основные результаты отражены в следующих защищаемых положениях.

**1. По результатам лучевого и полноволнового конечно-разностного моделирования волновых полей при сейсмических исследованиях на акваториях установлено, что основными границами обмена на падающих лучах являются дно моря и подошва осадочного чехла, на восходящих лучах – подошва земной коры и подошва осадочного чехла, наиболее интенсивными являются обменные волны, претерпевшие один акт обмена на восходящем луче.**

Автором работы выполнено конечно-разностное моделирование волновых полей акваторий для ряда моделей земной коры, среди которых выделены типовые (Рисунок 2): 1) океаническая кора; 2) континентальная кора шельфовых морей; 3) кора подводных хребтов и поднятий; 4) кора глубоких впадин. Параметры типовых моделей заданы с учетом разрезов и моделей земной коры и верхов мантии, полученных в ходе геолого-геофизических работ на профилях в Арктическом регионе и Охотском море разных лет (Ljones et al., 2004; Ritzmann et al., 2004;

Hermann et al., 2013; Lebedeva-Ivanova et al., 2006; Поселов и др., 2007; Roslov et al., 2009; Сакулина и др., 2011; Егоркин и др., 1988; Исанина и др., 1995; Аветисов и др., 1996).

Выполнен детальный анализ волновых полей продольных, поперечных и обменных волн по синтетическим сейсмограммам вертикальных и горизонтальных компонент волнового поля, выделены особенности волновых полей для каждой модели, а также общие закономерности распространения поперечных и обменных волн.

Представленные в диссертационной работе результаты конечно-разностного моделирования волновых полей ГСЗ, обосновывают основные границы обмена сейсмических волн в земной коре при морских многоволновых сейсмических исследованиях [6].

**2. В скоростном разрезе осадочных комплексов Северо-Чукотского прогиба выявлен волновод, кровля которого фиксирует изменение направления сноса осадочного материала при формировании двухъярусной структуры в депоцентре этого бассейна.**

В скоростной модели Северо-Чукотского осадочного бассейна по данным МОВ-ОГТ не было установлено инверсии скорости, несмотря на достаточно плотные системы наблюдений и значительные базы прослеживания отраженных волн. В то же время на сейсмограммах ГСЗ наблюдаются разрывы годографов волн в первых вступлениях со смещением по времени до одной секунды с образованием «зоны тени» (Рисунок 3). Поскольку разрыв годографов наблюдается при прямых и встречных наблюдениях на одних и тех же удалениях от источника на сейсмограммах пересекающихся профилей, то эта особенность не связана с латеральной неоднородностью, а свидетельствует об инверсии скорости (волноводе – слое пониженной скорости сейсмических волн) в разрезе осадочного чехла.

На разрезах МОВ-ОГТ кровля волновода соответствует четкому отражающему горизонту на времени  $t_0 = 3$  с (глубина залегания границы – 4 км), подошва волновода соответствует отражающему горизонту на времени  $t_0$  около 4.8-5 с (глубина около

7.5 км). Волновод сложен породами, предположительно, палеогенового возраста. Выше кровли волновода фиксируются структуры клиноформ раннего неогена, по характеру которых видно, что в кайнозойское время снос осадочного материала шел с юга со стороны поднятия Врангеля-Геральда. Ниже по рисунку сейсмического разреза МОВ-ОГТ верхнемеловых отложений видно, что снос осадочного материала в меловое время, вероятно, происходил с севера – из области Центрально-Арктических поднятий.

Таким образом, скоростная модель мощного осадочного чехла в депоцентре Северо-Чукотского прогиба демонстрирует двухъярусное строение, что можно интерпретировать как формирование двух наложенных друг на друга бассейнов – модель «бассейн в бассейне» [3].

**3. По результатам многоволновых сейсмических исследований модель земной коры Северо-Чукотского прогиба соответствует континентальной земной коре глубоких впадин с наличием мощного осадочного чехла, утоненной верхней и утолщенной нижней кристаллической корой.**

В результате конечно-разностного и лучевого моделирования с участием автора работы построена скоростная модель земной коры и верхов мантии вдоль профилей Dream-line и 5-AP с привлечением как продольных, так и поперечных и обменных волн (Рисунок 4) (Сакулина, 2016).

Особенности разреза представлены на примере профиля Dream-line. Верхняя часть разреза строилась с учетом сводного глубинного сейсмического разреза по данным МОВ-ОГТ по профилям, которые совпадают или близки по своему положению с профилем ГСЗ Dream-line. Переобработку материалов по единому графу выполнило ОАО «Севморгео» [2].

Общая мощность земной коры вдоль профиля Dream-line составляет 27-30 км с отдельными локальными увеличениями мощности в восточной части профиля до 31-32 км.

*Осадочный чехол.* Мощность осадочного чехла меняется от 7-8 км в западной части профиля до 15-16 км в восточной части. Скорость в осадочном чехле возрастает с глубиной от 1.6 км/с в

кровле верхнего слоя до 4.9-5.3 км/с в подошве нижнего. В пределах осадочного чехла на двух участках профиля выделен слой с относительно повышенной скоростью. Значения отношения скоростей  $V_p/V_s$  в осадках меняются в широких пределах от 1.9 до 2.4.

*Промежуточный комплекс* со скоростями продольных волн 4.6-6.0 км/с и  $V_p/V_s$  1.8 отличается от осадочных толщ по характеру сейсмической записи на разрезе МОВ-ОГТ. Кровля промежуточного комплекса уверенно прослеживается на сейсмических записях западной расстановки профиля (показана сплошной зеленой линией). На восточной расстановке профиля в нижней части осадочного чехла в скоростную модель введены границы (показаны пунктирными линиями), которые прослеживаются на разрезах ОГТ, но не всегда выделяются в волновых полях ГСЗ.

*Кровля кристаллической коры* моделировалась по рефрагированным/преломленным волнам с кажущимися скоростями от 5.7-6.3 км/с, которые уверенно прослеживаются в первых вступлениях (Pg). Мощность верхней коры в западной части профиля составляет 7-12 км, в восточной части – порядка 6-10 км, существенно уменьшается до 2-4 км в районе 800-1050 км профиля. Значения отношения скоростей  $V_p/V_s$  в верхней части кристаллической коры меняются от 1.73 до 1.75.

*Граница раздела в нижней части коры (L).* Глубина залегания этой границы изменяется в пределах 18-24 км. Мощность нижней части коры составляет 7-12 км. Скорость в кровле слоя имеет значение 6.6-6.9 км/с, в подошве слоя – 6.9-7.2 км/с. Значение отношения скоростей  $V_p/V_s$  в нижней коре составляет 1.74.

*Граница M* залегает на глубинах порядка 27-30 км. Это больше, чем для типичной океанической коры, но меньше, чем для типичной континентальной коры. Скорость продольных волн в верхах мантии составляет 8.0 км/с.

Построенные глубинные скоростные модели земной коры и верхов мантии по профилям ГСЗ Dream-line и 5-AP хорошо увязываются. Наблюдается совпадение разрезов в месте пересечения профилей, как по глубине залегания основных границ, так и по значениям скоростей  $V_p$  и отношению скоростей  $V_p/V_s$ .

В разрезе Северо-Чукотского прогиба по данным сейсмических многоволновых исследований ГСЗ для двух пересекающихся региональных профилей получены следующие значения  $V_p/V_s$  для консолидированной коры: в верхней части консолидированной коры  $V_p/V_s = 1.73-1.75$ , в нижней части консолидированной коры  $V_p/V_s = 1.73-1.74$ . Отсутствие высоких значений  $V_p/V_s$  ( $V_p/V_s = 1.8 - 1.90$ ), характерных для океанической коры (Hydman, 1979; Ljones et al., 2004; Mjelde et al., 2009; Кашубин и др., 2013), скоростные параметры и соотношения мощностей основных слоев земной коры позволяют сделать вывод о том, что консолидированная кора Северо-Чукотского прогиба соответствует утоненной континентальной земной коре глубоких впадин (Кашубин и др., 2013; Павленкова, 2016) [2, 4, 5, 7, 8].

### **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

Диссертация представляет собой законченную научно-квалификационную работу, в которой предлагается новое решение актуальной научной задачи – установление особенностей глубинного строения земной коры и верхов мантии Северо-Чукотского прогиба по данным морских многоволновых сейсмических исследований.

По результатам выполнения диссертационной работы сделаны следующие выводы и рекомендации:

1. По итогам конечно-разностного моделирования для типовых моделей земной коры акваторий установлено, что обменные волны достаточной интенсивности образуются как на падающих, так и на восходящих лучах на основных границах раздела земной коры (дно моря, подошва осадочного чехла и подошва земной коры). Наиболее интенсивными из обменных являются PS-волны, претерпевшие один акт обмена на восходящем луче. На сейсмической записи R-компоненты преобладают поперечные и обменные PS-волны. Наиболее интенсивными являются поперечные и обменные отражённые волны от подошвы осадочного чехла и подошвы земной коры и преломлённые PS-волны, скользящие вдоль поверхности консолидированной коры со скоростью продольных волн.



2. Методика обработки, реализованная при морских наблюдениях ГСЗ с донными станциями, позволяет выделять и использовать для интерпретации продольные, поперечные и обменные волны, связанные с границами в осадочном чехле, верхней и нижней кристаллической корой и границей М.

3. По данным современных сейсмических исследований, включающих профилирование МОВ-ОГТ и детальные наблюдения ГСЗ с донными станциями, удалось существенно уточнить скоростную модель осадочного чехла Северо-Чукотского прогиба. Выявленный в его разрезе волновод позволил обосновать модель формирования Северо-Чукотского бассейна в два этапа, когда источниками сноса попеременно являлись: в мезозойское время – область Центрально-Арктических поднятий, а после ее опускания на батиметрические глубины в кайнозой – поднятие Врангеля-Геральда и северо-восток Евразийского континента. Установленные особенности глубинного строения могут быть использованы как для совершенствования прогноза нефтегазоносности, так и для развития представлений об эволюции Арктического бассейна.

4. Разрезы ГСЗ по двум пересекающимся профилям Dream-line и 5-AP хорошо увязаны между собой. Демонстрируют модель земной коры и верхов мантии, типичную для континентальных глубоких впадин с наличием мощного осадочного чехла, утоненной верхней и мощной нижней кристаллической корой.

В целом многоволновые сейсмические исследования являются перспективным направлением в сейсморазведке, позволяющем повысить достоверность сейсмических построений не только морских, но и сухопутных наблюдений за счет использования волн разных типов и классов при интерпретации волновых полей.

#### **СПИСОК ОСНОВНЫХ РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

*Публикации в изданиях из Перечня ВАК:*

1. Сакулина, Т.С. Геологическая модель Охотоморского региона по данным опорных профилей 1-ОМ и 2-ДВ-М / Т.С. Сакулина, А.П. Каленич, А.И. Атаков [и др.]. – Текст :

непосредственный // Разведка и охрана недр. – 2011. – №10. – С. 11–17.

2. Сакулина, Т.С. Глубинное строение земной коры и верхней мантии Северо-Чукотского прогиба по профилю GC3 Dream-line / Т.С. Сакулина, С.Н. Кашубин, О.В. Петров [и др.]. – Текст : непосредственный // Региональная геология и металлогения. – 2016. – №68/2016. – С. 52–65.

3. Кашубин, С.Н. Волновод в осадочном разрезе Северо-Чукотского прогиба: сейсмические данные и возможные геологические модели / С.Н. Кашубин, О.В. Петров, Т.М. Яварова [и др.]. – Текст : непосредственный // Региональная геология и металлогения. – 2017. – №72/2017. – С. 5–14.

4. Кашубин, С.Н. Структура земной коры зоны сочленения поднятия Менделеева с Евразийским континентом по геофизическим данным / С.Н. Кашубин, О.В. Петров, Е.Д. Мильштейн [и др.]. – Текст : непосредственный // Региональная геология и металлогения. – 2018. – №74/2018. – С. 5–18.

*Публикация в издании, входящем в международную базу данных и систему цитирования Scopus:*

5. Kashubin, S.N. Deep Structure Model. Tectonics of Asia (Northern, Central and Eastern Asia). / Kashubin S.N., Petrov O.V., Milshtein E.D. et al. / Springer Geology. 2021. P. 33–61. URL: <https://doi.org/10.1007/978-3-030-62001-1> (дата обращения: 15.06.2022).

*Публикации в прочих изданиях*

6. Кашубин, С.Н. Поперечные и обменные волны при глубинных сейсмических исследованиях на акваториях: монография / С.Н. Кашубин, О.В. Петров, А.В. Рыбалка [и др.]. – Санкт-Петербург : ВСЕГЕИ, 2019. – 155 с. – (Труды ВСЕГЕИ. Новая серия. Т. 360). – ISBN 978-5-93761-278-6. – Текст : непосредственный.

7. Кашубин, С.Н. Строение земной коры (широкоугольное сейсмическое зондирование) / С.Н. Кашубин, Е.Д. Мильштейн, А.В. Рыбалка [и др.]. – Текст : непосредственный // Тектоностратиграфический атлас Восточной Арктики : монография / Отв. ред.: О.В. Петров, М. Смелроп. – Санкт-Петербург : ВСЕГЕИ, 2020. – С. 65–71. – ISBN 978-5-93761-296-0.

8. Kashubin, S.N. Crustal structure (wide-angle seismics). / Kashubin S.N., Milshtein E.D., Sakulina T.S. et al. / Tectonostratigraphic atlas of the Arctic. (Eastern Russia and adjacent areas). Saint-Petersburg, VSEGEI Press, 2019. P. 64–72. ISBN 978-5-93761-268-7.

9. Пыжьянова, Т.М. Методика обработки многокомпонентных сейсмических наблюдений ГСЗ на морских региональных профилях / Т.М. Пыжьянова, Н.А. Крупнова, Л.А. Пантелеева. – Текст : непосредственный // Труды 11-й Международной конференции и выставки по освоению ресурсов нефти и газа Российской Арктики и континентального шельфа стран СНГ (RAO / CIS Offshore 2013), 10-13 сент. 2013 г. – Санкт-Петербург : ХИМИЗДАТ, 2013. – С. 514–519.

10. Пыжьянова, Т.М. Методика обработки многокомпонентных сейсмических наблюдений ГСЗ на северном фрагменте морского опорного профиля 2-ДВ-М в Охотском море / Т.М. Пыжьянова. – Текст : непосредственный // Геофизические методы исследования Земли и ее недр: Материалы IX Международной научно-практической конкурс-конференции молодых специалистов «Геофизика-2013», 7-11 окт. 2013 г. - Санкт-Петербург : Санкт-Петербургский Государственный Университет, 2014. – С. 82–85.

11. Яварова, Т.М. Возможности использования конечно-разностного полноволнового моделирования в программе Tesseral 2D для анализа волновых полей многокомпонентных наблюдений ГСЗ на акваториях / Т.М. Яварова. – Текст : непосредственный // Материалы IV Всероссийской конференции молодых ученых и специалистов «Новое в геологии и геофизике Арктики, Антарктики и Мирового океана» / – Санкт-Петербург : ФГУП «ВНИИОкеангеология им. И.С. Грамберга», 2014. – С. 32–34.

12. Яварова, Т.М. Поперечные и обменные волны в морских исследованиях ГСЗ (результаты математического моделирования / Т.М. Яварова, С.Н. Кашубин, А.В. Рыбалка [и др.]. – Текст : непосредственный // Геофизические методы исследования земной коры. Материалы Всероссийской конференции, посвященной 100-летию со дня рождения академика Н.Н. Пузырева (Новосибирск, 8–13 декабря 2014 г.) – Новосибирск: Изд-во ИНГГ СО РАН, 2014. – С. 291–296.

13. Яварова, Т.М. Математическое моделирование волновых полей глубинных сейсмических зондирований для типовых моделей земной коры и верхней мантии акваторий / Т.М. Яварова. – Текст : непосредственный // Материалы IV Международной научно-практической конференции молодых ученых и специалистов памяти академика А.П. Карпинского (Санкт-

Петербург, 16-20 февр. 2015 г.) – Санкт-Петербург: Изд-во ВСЕГЕИ, 2015. – С. 585–588.

14. Яварова, Т.М. Волновод в осадочном разрезе Северо-Чукотского прогиба: сейсмические данные и возможные геологические модели / Т.М. Яварова, С.Н. Кашубин, Н.А. Крупнова [и др.]. – Текст : непосредственный // Материалы V Международной конференции молодых ученых и специалистов «Новое в геологии и геофизике Арктики, Антарктики и Мирового океана», посвященная 100-летию со дня рождения В.Н. Соколова / – Санкт-Петербург : ФГБУ «ВНИИОкеангеология», 2016. – С. 76–77.

15. Yavarova, T.M. Mathematical modeling of shear and converted waves in marine seismic / T.M. Yavarova, S.N. Kashubin, A.V Rybalka [et al.]. – Text : electronic // 35th International Geological Congress. - Cape Town: American geosciences Institute. – 2016. – 2771. – URL: <https://www.americangeosciences.org/igc/14986> (дата обращения: 15.06.2022).

16. Яварова, Т.М. Строение консолидированной земной коры Северо-Чукотского прогиба по данным ГСЗ / Т.М. Яварова, Н.А. Крупнова, А.В. Разматова [и др.]. – Текст : электронный // Взаимодействие учреждений Роснедра, Минобрнауки России и РАН при региональном геологическом изучении территории Российской Федерации и ее континентального шельфа: Материалы V Международной конференции молодых ученых и специалистов памяти академика А.П. Карпинского / Минприроды России, Роснедра, ВСЕГЕИ. – Санкт-Петербург : Изд-во ВСЕГЕИ, 2017. – С. 592–595. – URL: [https://vsegei.ru/ru/conf/summary/index.php?ELEMENT\\_ID=98063](https://vsegei.ru/ru/conf/summary/index.php?ELEMENT_ID=98063) (дата обращения: 15.06.2022).

17. Яварова, Т.М. Возможности морской многоволновой сейсмометрии методом ГСЗ для верификации континентального типа земной коры / Т.М. Яварова. – Текст : электронный // Материалы конференции-конкурса «Актуальные проблемы недропользования 2021» / – Санкт-Петербург : Санкт-Петербургский Горный Университет, 2021. – С. 121-126. URL : <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=46279439&selid=47142181> (дата обращения: 15.06.2021).

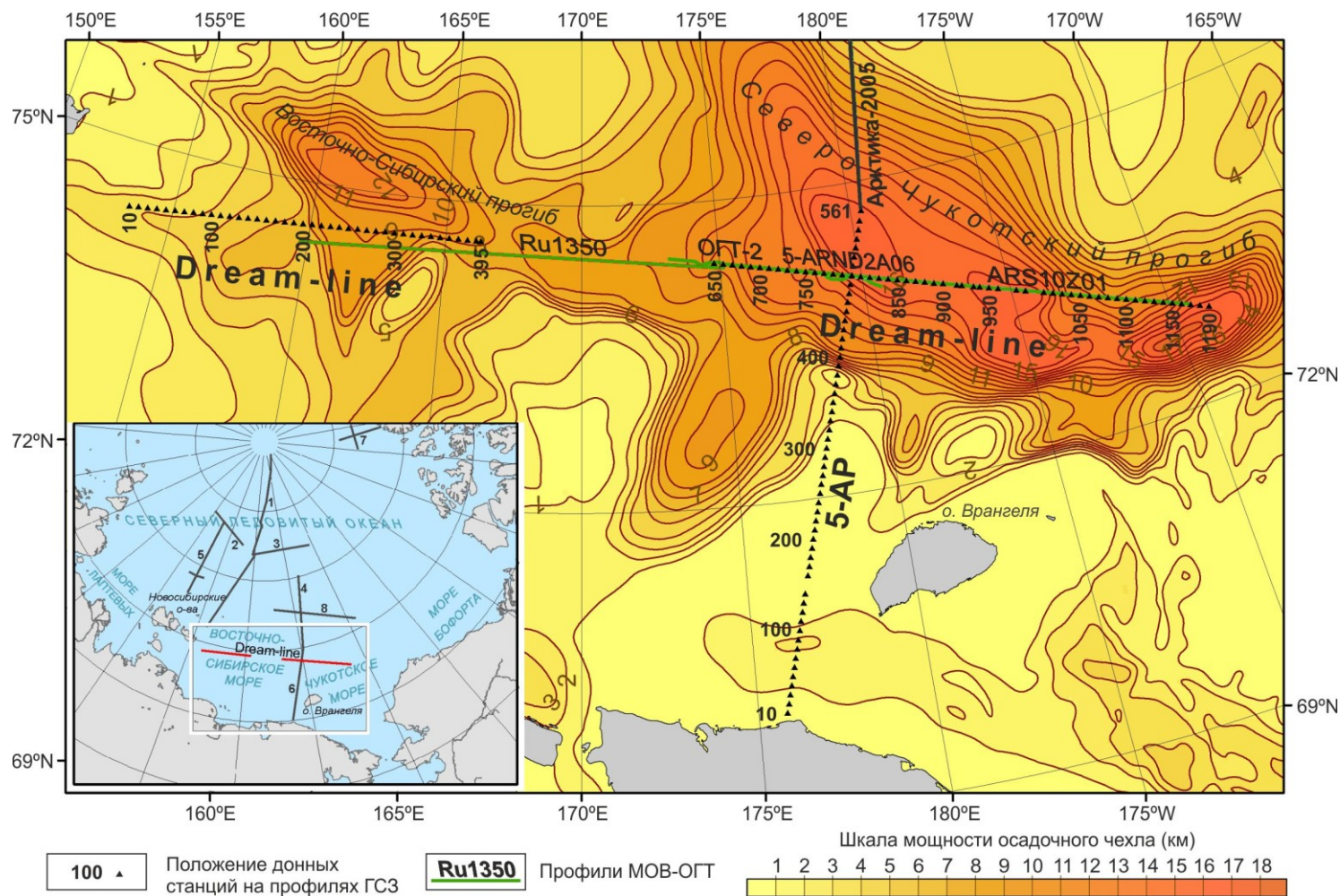


Рисунок 1 – Схема расположения профилей ГСЗ 5-AP и Dream-line и профилей МОВ-ОГТ, близко расположенных к линии профиля Dream-line, на карте мощности осадочного чехла Северо-Чукотского бассейна (Petrov, 2106)

На врезке указаны номера профилей ГСЗ: 1 – Трансарктика 89-91 (Поселов, 2011, Lebedeva-Ivanova, 2011); 2 – Трансарктика-92 (Поселов, 2011); 3 – Арктика-2000 (Поселов, 2011, Lebedeva-Ivanova, 2006); 4 – Арктика-2005 (Поселов, 2011); 5 – Арктика-2007 (Поселов, 2011); 6 – 5-AP (Сакулина, 2011); 7 – ARTA (Funck, 2011); 8 – Арктика-2012 (Кашубин, 2011).

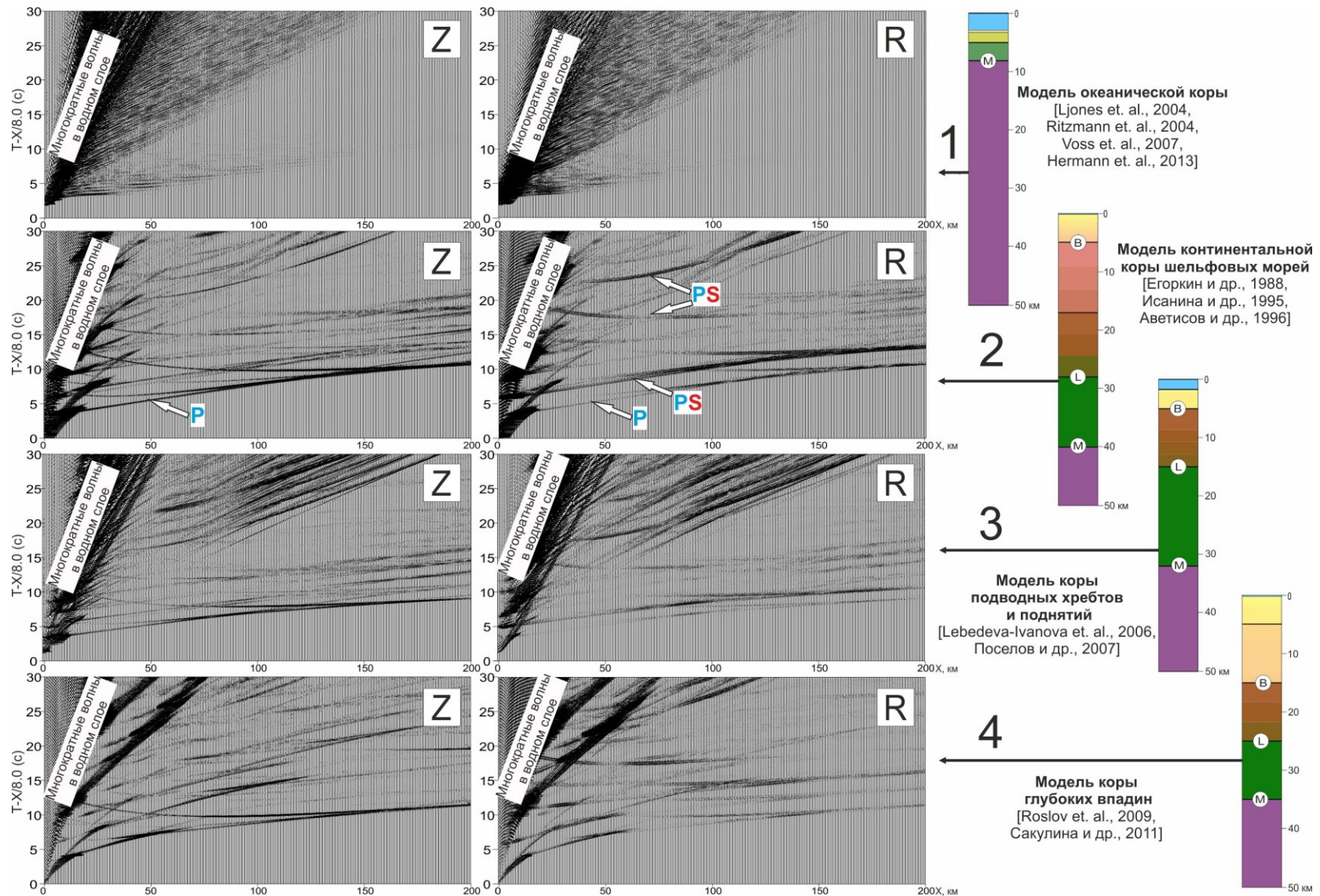


Рисунок 2 – Конечно-разностное моделирование волновых волей (Z- и R-компонент) при морских исследованиях ГСЗ для типовых моделей земной коры и верхов мантии

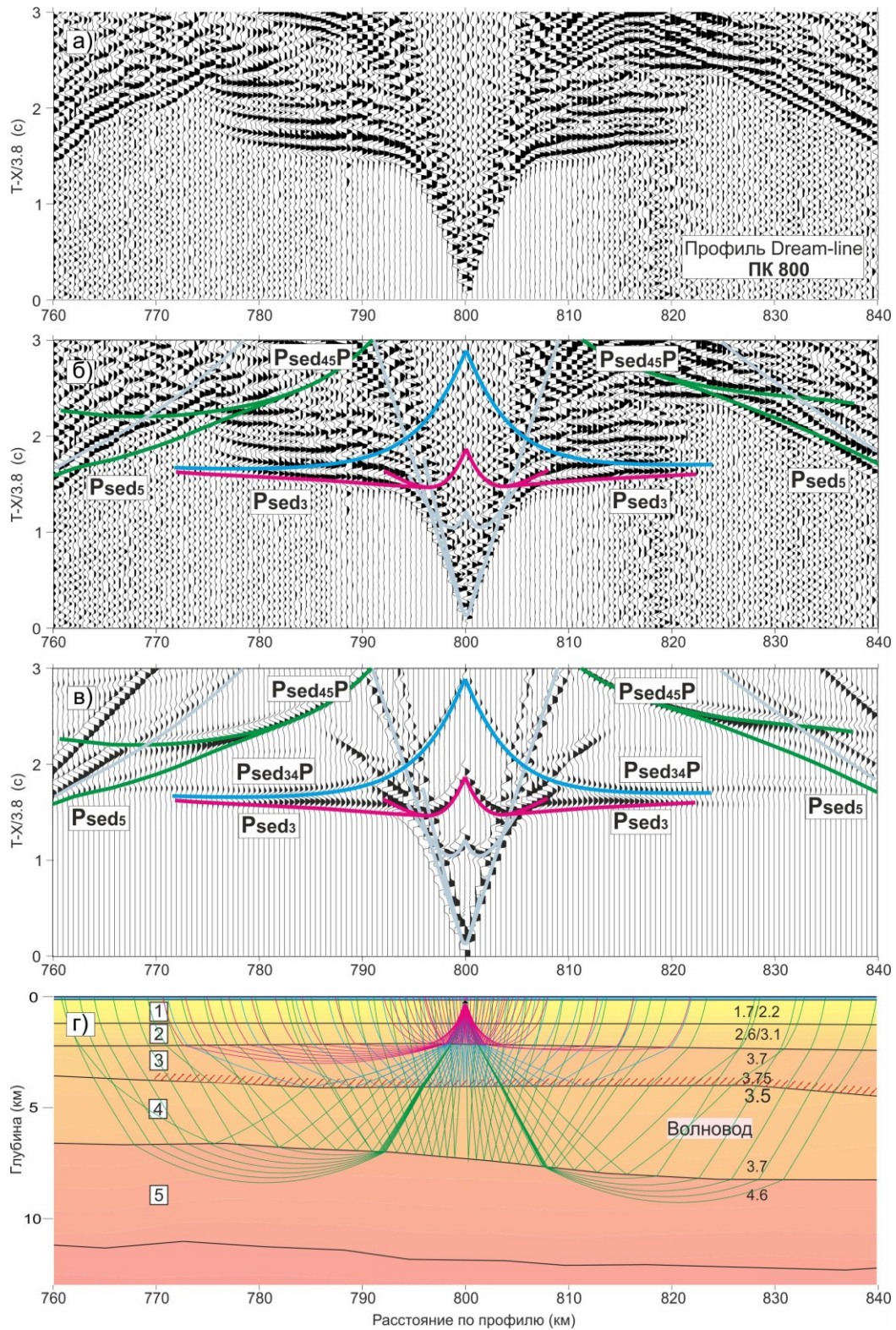


Рисунок 3 – Сейсмограмма, демонстрирующая разрыв годографов первых волн (а), с наложенными на нее теоретическими годографами (б), синтетическая сейсмограмма (в) и фрагмент скоростной модели по профилю Dream-line (г)

Обозначения волн:  $P_{sed3}$  – рефрагированные волны в слое 3;  $P_{sed34P}$  – отраженные волны от границы между слоями 3 и 4;  $P_{sed45P}$  – отраженные волны от границы между слоями 4 и 5;  $P_{sed5}$  – рефрагированные волны в слое 5; цифры на разрезе – скорости продольных волн в км/с; цифры в квадратах – номера слоев модели.

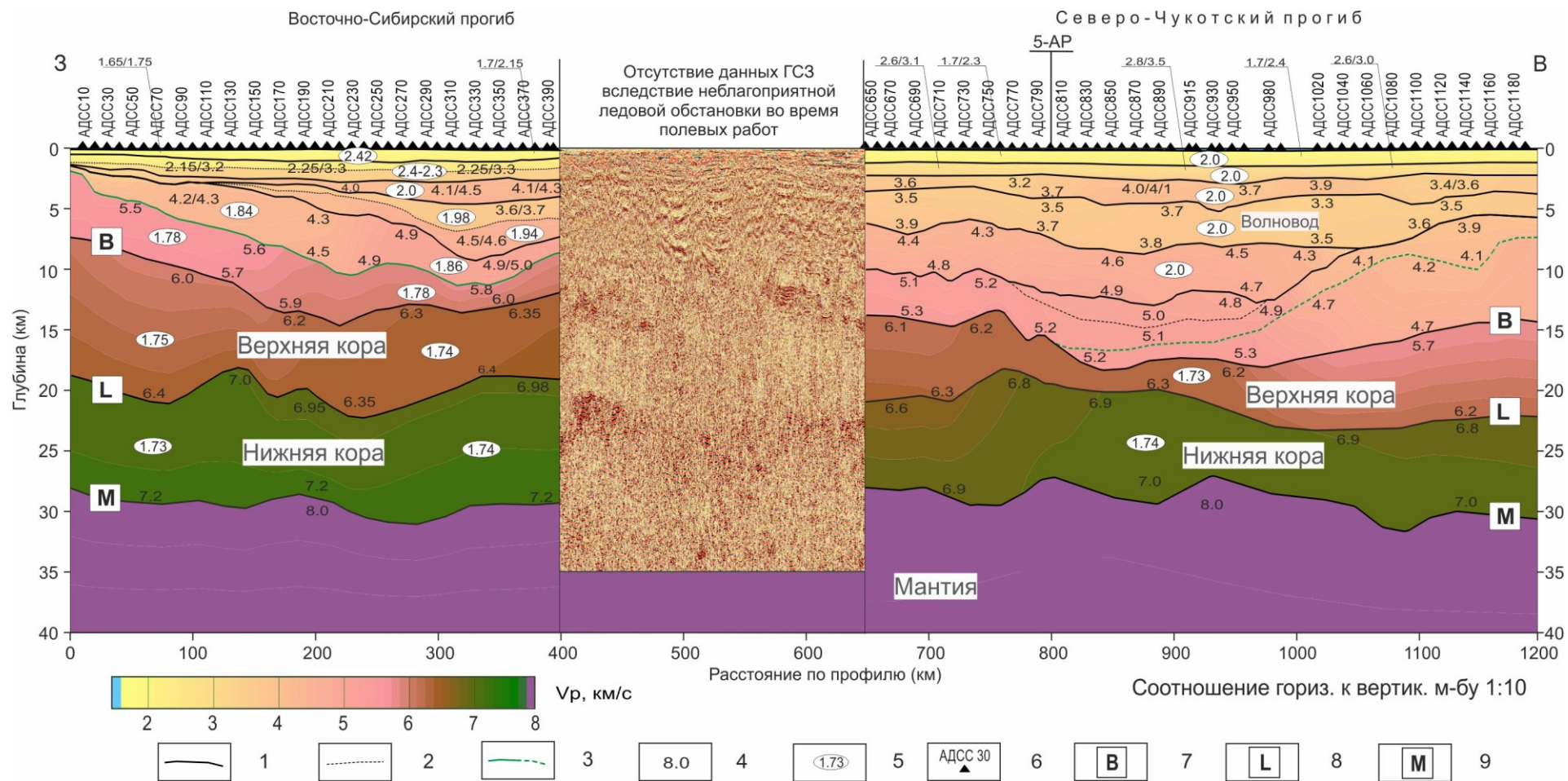


Рисунок 4 – Скоростная модель земной коры и верхней мантии по профилю ГСЗ Dream-line

1 – уверенно прослеживаемые границы; 2 – границы, введенные по данным МОВ-ОГТ; 3 – кровля промежуточного слоя; 4 – значения скоростей  $V_p$  в км/с; 5 – значения отношения скоростей  $V_p/V_s$ ; 6 – положение АДСС; 7 – кровля верхней коры (поверхность фундамента); 8 – кровля нижней коры; 9 – подошва земной коры (граница М).