

Министерство природных ресурсов и экологии Российской Федерации
Федеральное агентство по недропользованию
Федеральное государственное бюджетное учреждение
«Всероссийский научно-исследовательский геологический
институт им. А.П. Карпинского»
(ФГБУ «ВСЕГЕИ»)

На правах рукописи

Яварова Татьяна Михайловна



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

Специальность 1.6.9. Геофизика

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата геолого-минералогических наук

Научный руководитель:
доктор геолого-минералогических наук,
профессор Кашубин С.Н.

Санкт-Петербург – 2021

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
ГЛАВА 1 СОВРЕМЕННЫЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ О СТРОЕНИИ СЕВЕРО-ЧУКОТСКОГО ПРОГИБА	10
1.1. Геологические данные	10
1.2. Геофизические данные	12
1.3. Основные модели геологического строения Северо-Чукотского прогиба	18
1.4. Выводы по главе 1	31
ГЛАВА 2 ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПРЕДПОСЫЛКИ ВОЗНИКНОВЕНИЯ И ОПЫТ РЕГИСТРАЦИИ ПОПЕРЕЧНЫХ И ОБМЕННЫХ ВОЛН В МОРСКОЙ СЕЙСМОРАЗВЕДКЕ	32
2.1. Предпосылки возникновения поперечных и обменных волн при морских многоволновых исследованиях ГСЗ	32
2.2. Математическое моделирование волновых полей при морских исследованиях для типовых моделей земной коры и верхов мантии	36
2.2.1. Модель 1 – Океаническая кора	53
2.2.2. Модель 2 – Континентальная кора шельфовых морей	57
2.2.3. Модель 3 – Кора подводных хребтов и поднятий	63
2.2.4. Модель 4 – Кора глубоких впадин	70
2.3. Основные типы и классы сейсмических волн, используемые для геологической интерпретации при морских многоволновых исследованиях ГСЗ	82
2.4. Выводы по главе 2	87
ГЛАВА 3 МЕТОДИКА ОБРАБОТКИ И ИНТЕРПРЕТАЦИИ МАТЕРИАЛОВ МОРСКИХ МНОГОВОЛНОВЫХ СЕЙСМИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ ГСЗ	92
3.1. Специализированная обработка трехкомпонентных наблюдений ГСЗ с целью выделения поперечных и обменных волн	96
3.1.1. Преобразование записей произвольно ориентированных горизонтальных компонент в записи радиальной и трансверсальной компонент	92
3.1.2. Выделение поперечных и обменных волн за счет ослабления продольных волн	101
3.2. Лучевое и конечно-разностное моделирование волновых полей продольных, поперечных и обменных волн для повышения информативности и достоверности скоростных моделей за счет использования различных типов волн	109
3.3. Выводы по главе 3	116

ГЛАВА 4 ГЛУБИННОЕ СТРОЕНИЕ СЕВЕРО-ЧУКОТСКОГО ПРОГИБА ПО ДАННЫМ МОРСКИХ МНГОВОЛНОВЫХ СЕЙСМИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ	119
4.1. Сейсмические работы ГСЗ и МОВ-ОГТ на профилях Dream-line и 5-AP	120
4.1.1. Исследования ГСЗ на профилях Dream-line и 5-AP.....	120
4.1.2. Исследования МОВ-ОГТ на профилях Dream-line и 5-AP	122
4.2. Глубинный скоростной разрез (V_p , V_p/V_s) земной коры и верхов мантии по материалам ГСЗ вдоль профиля Dream-line	124
4.2.1. Характеристика волновых полей ГСЗ (P-, PS- и S-волн) по профилю Dream-line.....	126
4.2.2. Лучевое моделирование продольных, поперечных и обменных волн, зарегистрированных на профиле Dream-line	130
4.2.3 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.....	149
4.3. Взаимоувязанная сейсмическая модель по профилю Dream-line и опорному профилю 5-AP	152
4.3.1. Особенности строения осадочного чехла по данным МОВ-ОГТ и ГСЗ в районе пересечения профилей Dream-line и 5-AP	152
4.3.2. Взаимоувязанная сейсмическая модель по профилям Dream-line и 5-AP на всю мощность земной коры	159
4.4. Природа земной коры Северо-Чукотского прогиба по данным многоволновых сейсмических исследований	164
4.5. Альтернативные скоростные и геологические модели Северо-Чукотского осадочного бассейна по профилям 5-AP и Dream-line	168
4.6. Выводы по главе 4.....	171
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	174
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	175

ВВЕДЕНИЕ

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 [Малышев, 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 а, 2016 а] 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 батинальные глубины в кайнозое – 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 выполнялось в программе Tesseral 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. Чиана 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 сейморазведочных 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 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. Результаты диссертационного исследования 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.

ГЛАВА 1 СОВРЕМЕННЫЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ О СТРОЕНИИ СЕВЕРО-ЧУКОТСКОГО ПРОГИБА

Восточно-Арктический шельф на данный момент является недостаточно изученным в связи с удаленностью и труднодоступностью для проведения геолого-геофизических исследований. Планомерное изучение Восточной Арктики начинается с 60-х годов прошлого века. Общие сведения о тектонике и эволюции региона, основанные на геологических и геофизических данных разных лет, освещены в работах российских исследователей: Пушаровского Ю.М., Зоненшайна Л.П., Парфенова Л.М., Русакова И.М., Грамберга И.С., Тильмана С.М., Шипилова Э.В., Косько М.К., Виноградова В.А., Вербы М.Л., Драчева С.С., Хаина В.Е., Поселова В.А., Кима Б.И., Соколова С.Д., Кузьмичева А.Б., Лобковского Л.И. и др. Зарубежными исследователями опубликован ряд работ, посвященных геологии Американо-Арктического бассейна: Embry A., Jokat W., Coakley B., Mosher D., Grantz A., Miller E., Houseknecht D., Pease V., Franke D., Thurston D., Sherwood K. и др.

Северо-Чукотский прогиб, расположенный на шельфе Восточно-Сибирского и Чукотского морей, представляет большой интерес для исследователей, связанный как с углеводородным потенциалом осадочного чехла, так и с изучением глубинного строения на всю мощность земной коры для установления типа коры под прогибом и создания геолого-геофизической модели области перехода от Северной Евразии к области Центрально-Арктических поднятий в Северном Ледовитом океане.

Значительная мощность осадочного чехла Северо-Чукотского прогиба, малая мощность земной коры и расположение на пассивной окраине Евразии в зоне перехода «континент-океан», позволяют причислить его к сверхглубоким впадинам, таким как, Прикаспийская, Южно-Каспийская, Восточно-Баренцевская [Артюшков, 2010]. Мощность таких бассейнов достигает 20 км, а подстилающая их земная кора утонена до 10-15 км, при этом часто возникают вопросы о природе коры и эволюции региона.

1.1. Геологические данные

Регион Восточно-Сибирского и Чукотского морей входит в состав обширной эпикаледонской континентальной плиты, ограниченной на севере позднемезозойским Американо-Арктическим океаническим бассейном, на юге – Верхояно-Колымской и Чукотской складчатыми системами (Рисунок 1.1) [Филатова, 2007; Хаин, 2009; Тектоностратиграфический атлас..., 2020].

Северо-Чукотский прогиб (бассейн), расположенный в северо-восточной части Восточно-Сибирского и северной части Чукотского морей, является крупным структурно-тектоническим элементом Восточно-Арктического региона.

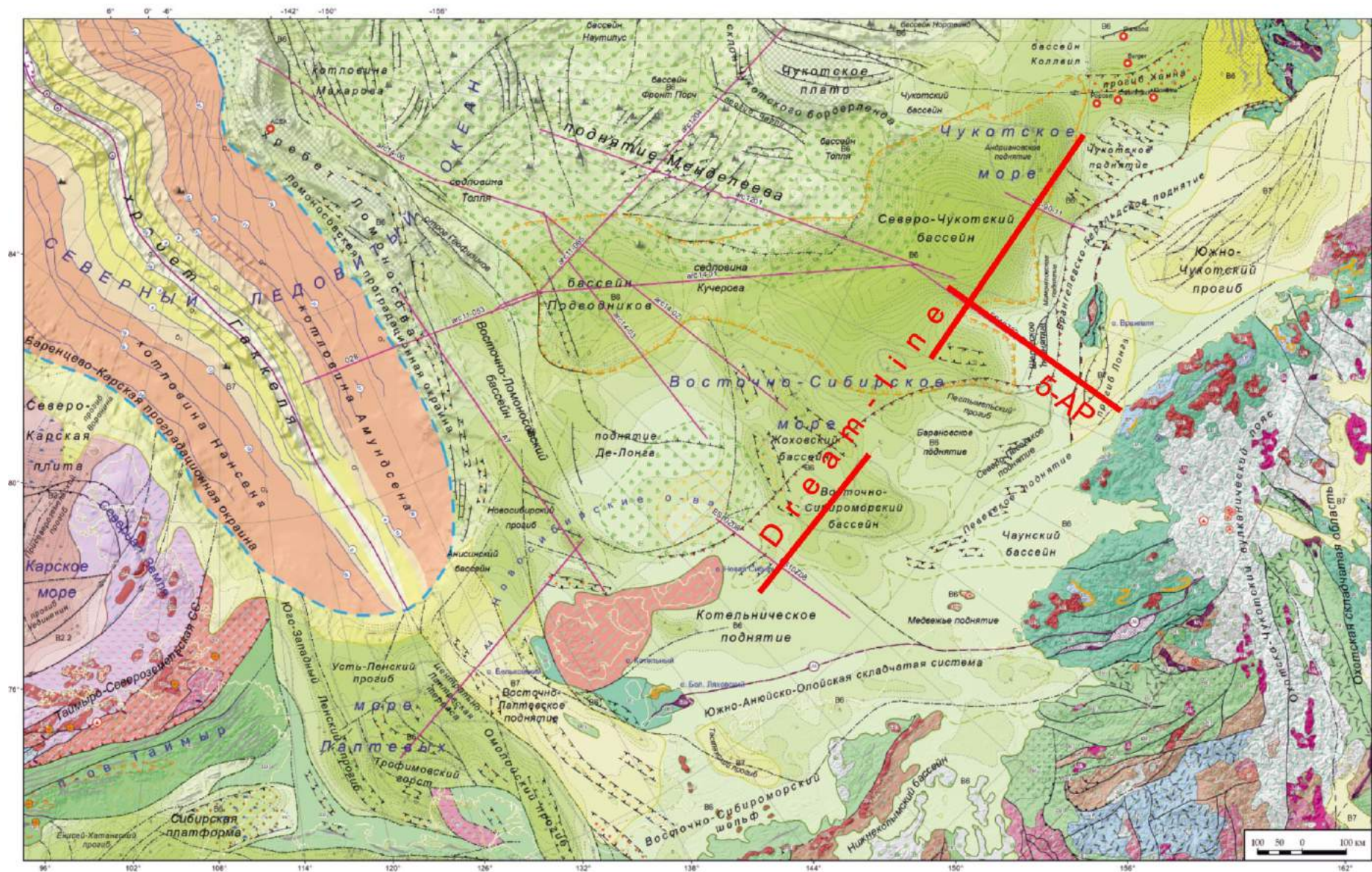


Рисунок 1.1 – Тектоническая карта Восточно-Арктического региона [Тектоностратиграфический атлас..., 2020]

Примечание – Сейсмические профили ГСЗ Dream-line и 5-AP показаны линиями красного цвета.

На западе прогиб граничит с Новосибирским бассейном, на востоке – с осадочным бассейном Колвилл в американском секторе Чукотского моря, отделенным Чукотской системой рифтогенных прогибов и поднятий. На севере бассейн ограничен Северо-Чукотским поднятием субширотной ориентировки, на юге граница проходит по Врангелевско-Геральдскому поднятию, которое обособляет Лонгско-Чукотский осадочный бассейн.

Северо-Чукотский прогиб имеет ассиметричное строение. Южный борт прогиба, образующий по поверхности фундамента наклоненную (до 5°) террасу, в центральной части осложнен протяженным Северо-Чукотским сбрососдвигом субширотной ориентировки. Северный борт прогиба через серию сбросовых уступов высотой 0.2-0.5 км круто воздымается на Андриановское поднятие [Петровская, 2008].

Ввиду труднодоступности региона и отсутствия скважин морского бурения на восточно-арктическом шельфе геолого-тектонические построения ведутся посредством интерпретации геофизических исследований. Недостаток прямых геологических данных приводит к неопределенностям в создании схем стратификации осадочных комплексов. Прямые геологические данные доступны лишь на о. Врангеля и по результатам бурения скважин, расположенных в американском секторе Чукотского моря (Туналик, Клондайк, Крэкерджек, Попкорн, Бургер, Диамонд) [Sherwood, 2009]. Также на значительном удалении от Северо-Чукотского прогиба находятся скважина Айон [Слободин и др., 1990; Каревская и др., 1984; Александрова, 2016a,b], пробуренная на о. Айон, и скважина АСЕХ [Backman et al., 2008], пробуренная на хребте Ломоносова.

1.2. Геофизические данные

Первые геофизические исследования в регионе были проведены еще в 60 гг XX века. Несмотря на это, по степени изученности сейсмическими методами Восточно-Сибирское и Чукотское моря на данный момент относятся к недостаточно изученным акваториям. В большей степени проводились сейсмические исследования по методу отраженных волн в модификации общей глубинной точки (МОВ-ОГТ) с целью изучения осадочного чехла региона. Исследований по методике глубинного сейсмического зондирования (ГСЗ) для изучения земной коры на всю ее мощность проведено крайне мало. На рисунке 1.2 приведены основные профили, вдоль которых выполнялись наблюдения ГСЗ.

В 60-70-е гг. организациями НИИГА и НПО «Севморгео» начато изучение акваторий Восточно-Сибирского и Чукотского морей аэромагнитными и гравиметрическими методами с целью построения кондиционных карт масштабов 1:2 000 000, 1:1 000 000. В 1974-1980 гг. и в 1985 г. этими же организациями выполнены

комплексные сейсмические работы, включающие МОВ, МПВ и ГСЗ. Применялась методика наледных точечных зондирований с дрейфующих станций СП-13 и СП-22. В результате исследований построены скоростные колонки осадочного чехла, установлена тенденция увеличения мощности чехла и утонения верхней части консолидированной коры в северном направлении, а также впервые получен разрез осадочной толщи на континентальном склоне [Геология и полезные ископаемые..., 2004].

В 1976 году Полярной экспедицией НПО «Севморгео» в Чукотском море выполнены первые морские сейсморазведочные работы по методике МОВ ЦЛ [Коган, 1981]. В результате в разрезе осадочного чехла были выделены пять отражающих горизонтов I, II, III, IV и V. Первые три горизонта условно отождествляются с кровлей пород соответственно неогенового, палеогенового и верхнемелового возрастов. Сейсмический горизонт IV связан с литологической границей внутри меловых отложений, а горизонт V — с кровлей киммерийского складчатого фундамента. Также были получены первые сведения о расположении впадины Хоуп, поднятия Шмидта, впадины Шмидта, Врангелевско-Геральдской гряды и Восточно-Геральдского прогиба.

В 1982 году ДМНГ на шельфе Чукотского моря выполнены комплексные геофизические работы, включающие сейсмические исследования МОВ-ОГТ 24* и гравиметрические наблюдения общим объёмом 275 пог. км. Отработано три профиля от Колючинской губы до о. Врангеля. В разрезе выделен фундамент с максимальной глубиной погружения до 4000 м и кайнозойский осадочный чехол, представленный сейсмокомплексами А, Б и В.

В 1987-1988 г.г. в юго-восточной части Чукотского моря ПГО «Севморгеология» было отработано семь региональных профиле МОВ-ОГТ 6* в комплексе с гравимагнитными исследованиями. В результате в разрезе осадочного чехла мощностью до 4500 м выделено шесть сейсмокомплексов, датируемых верхним триасом (?), нижним мелом (?), нижним-верхним мелом (альб-сеноман) (?), верхним мелом (?), палеогеном и неогеном-голоценом. Составлена новая схема рельефа поверхности фундамента и сделан вывод о грабен-рифтовой природе региона [Шипилов, 1989].

В 1989 году Лабораторией региональной геодинамики (ЛАРГЕ) восточнее о. Новая Сибирь было отработано два сейсмических профиля МОВ ОГТ 48* общей протяжённостью около 700 пог. км [Драчев, 2001]. На профиле 89001 длиной 550 км, который начинается в 110 км от побережья Индигирского залива и заканчивается в 20 км восточнее о. Жаннетты, в разрезе маастрихт-кайнозойского осадочного чехла выделяются пять сейсмических горизонтов.

В западной части Восточно-Сибирского моря в 1993-1994 и 1997 гг. существенный объём сейсмических работ МОВ-ОГТ выполнен Институтом геологии и природных ресурсов Германии совместно с трестом «Севморнефтегеофизика». В разрезе осадочного чехла прослежено два опорных горизонта, возраст выделенных комплексов установлен как эоцен-среднемиоценовый и верхнемиоцен-четвертичный [Геология и полезные ископаемые..., 2004].

В 1990 году площадные комплексные геофизические работы в объёме 8872 пог. км (МОВ-ОГТ 60*, магнитометрия, гравиметрия) были проведены СП «Polar Pacific», созданным ДМНГ и Halliburton Geophysical Services. В результате впервые за много лет был получен геофизический материал на новом качественном уровне, позволивший оценить мощность осадочного чехла (свыше 18.0 км), стратифицировать выделенные комплексы, определить положение и взаимоотношение Северо-Чукотского и Лонгско-Чукотского осадочных бассейнов.

В 1991 году в Восточно-Сибирском море этим же СП отработаны рекогносцировочные профили протяжённостью 1540 пог. км, что позволило получить представления о геологическом строении шельфа, определить мощность осадочного разреза (до 11.0 км) и выявить сложный рельеф поверхности фундамента.

В 2006 году на акватории Чукотского моря компанией TGS - NOPEC Geophysical Company совместно с ООО «Интегратор геофизических решений» проведена многоканальная сейсмическая съёмка в объёме 3600 пог. км. Интерпретация полученных данных позволила предположить сходство тектонической истории и условий седиментации российского и американского секторов Чукотского моря. Установленная мощность осадочного чехла достигает 16.0-18.0 км и более в Северо-Чукотском и 5.0-6.0 м в Южно-Чукотском осадочных бассейнах. Благоприятно оценены перспективы нефтегазоносности шельфа Чукотского моря [Verzhbitsky et. al., 2008].

В рамках программы создания государственной сети опорных геолого-геофизических профилей ФГУНПП «Севморгео» в 2008-2010 гг. проведены исследования по профилю **5-АР** (мыс Биллингса – поднятие Менделеева). Длина профиля составила 550 км. Комплекс работ включал набор сейсмических методов (ГСЗ с многокомпонентной регистрацией волнового поля, НСАП, МОВ-ОГТ), гравимагнитные наблюдения и газогеохимическую съёмку. Профиль служит связующим звеном между профилями ГСЗ: высокоширотным ВГКШ-2005 (Арктика-2005), отработанным ФГУП ВНИИОкеанология по программе «Трансарктика» и 2-ДВ (п-ов Кони – о. Врангеля), отработанным СНИИГГиМС. Получены материалы (сейсмические, скоростные, сейсмогеологические разрезы, комплексный геолого-геофизический разрез, сводная

глубинная сейсмогеологическая модель поднятия Менделеева, шельфа Восточно-Сибирского моря и северной части Чукотской складчатой области), позволившие выяснить геолого-структурную связь материковой окраины Северо-Востока России и геологических структур шельфа Восточно-Сибирского моря [Сакулина и др., 2011a].

В 2009 г. по заказу компании British Petroleum в результате международного российско-британского сотрудничества ФГУНПП «Севморгео» был отработан **сейсмический профиль ГСЗ Dream-line с многокомпонентной регистрацией волнового поля**. Профиль проходит с северо-запада на юго-восток вдоль депоцентров мощных осадочных бассейнов Восточно-Сибирского и Северо-Чукотского прогибов. Результаты исследований более подробно описаны в Главе 4 диссертационной работы [Сакулина и др., 2016а; Кашубин и др., 2017, 2018].

В 2010-2011 гг. ДМНГ в западной части Чукотского и в Восточно-Сибирском море выполнены геофизические исследования (МОВ-ОГТ 106*, гравиразведка, магниторазведка) в объёме 8568. 225 пог. км. На стыке морей отработано пять субмеридиональных профилей, в южной части Восточно-Сибирского моря – субмеридиональные и субширотные профили по сети $34\div 50\div 100\times 50$ км.

В 2010-2011 гг. в Чукотском и Восточно-Сибирском морях СВКНИИ ДВО РАН отработано шесть сейсмических профилей ARS10 (МОВ-ОГТ 106*, 108*) объёмом 1808.475 пог. км. В результате работ было охарактеризовано строение акустического фундамента и осадочного чехла, оценены общая и консолидированная мощность земной коры. Выявлены особенности строения осадочного чехла бассейнов, выделены сейсмокомплексы, расчленённые региональными поверхностями несогласий (Рисунок 1.3).

Проведено структурно-тектоническое районирование, установлены этапы развития региона и особенности эволюции бассейнов.

В 2012 г. ОАО «ГНИНГИ» выполнены морские научные исследования в Восточно-Сибирском и Чукотском морях и море Лаптевых. Проводились комплексные гидрографические работы в масштабе 1:1000000 с одновременной батиметрической съёмкой рельефа морского дна, а также комплексные геофизические работы, включающие сейсмические исследования методом отраженных волн МОВ-ОГТ 2D. В результате интерпретации сейсмических материалов установлено, что мощность Северо-Чукотского бассейна достигает 15-18 км с возрастом отложений палеозой-кайнозой. Установлен сложный характер дислоцированности осадочного чехла. Фундамент насыщен гребнеобразными узкими складками, напоминающими структуры протыкания и, вероятно, связанными либо с соляной тектоникой, либо, с глиняным диапиризмом [Шипилов, 2012].

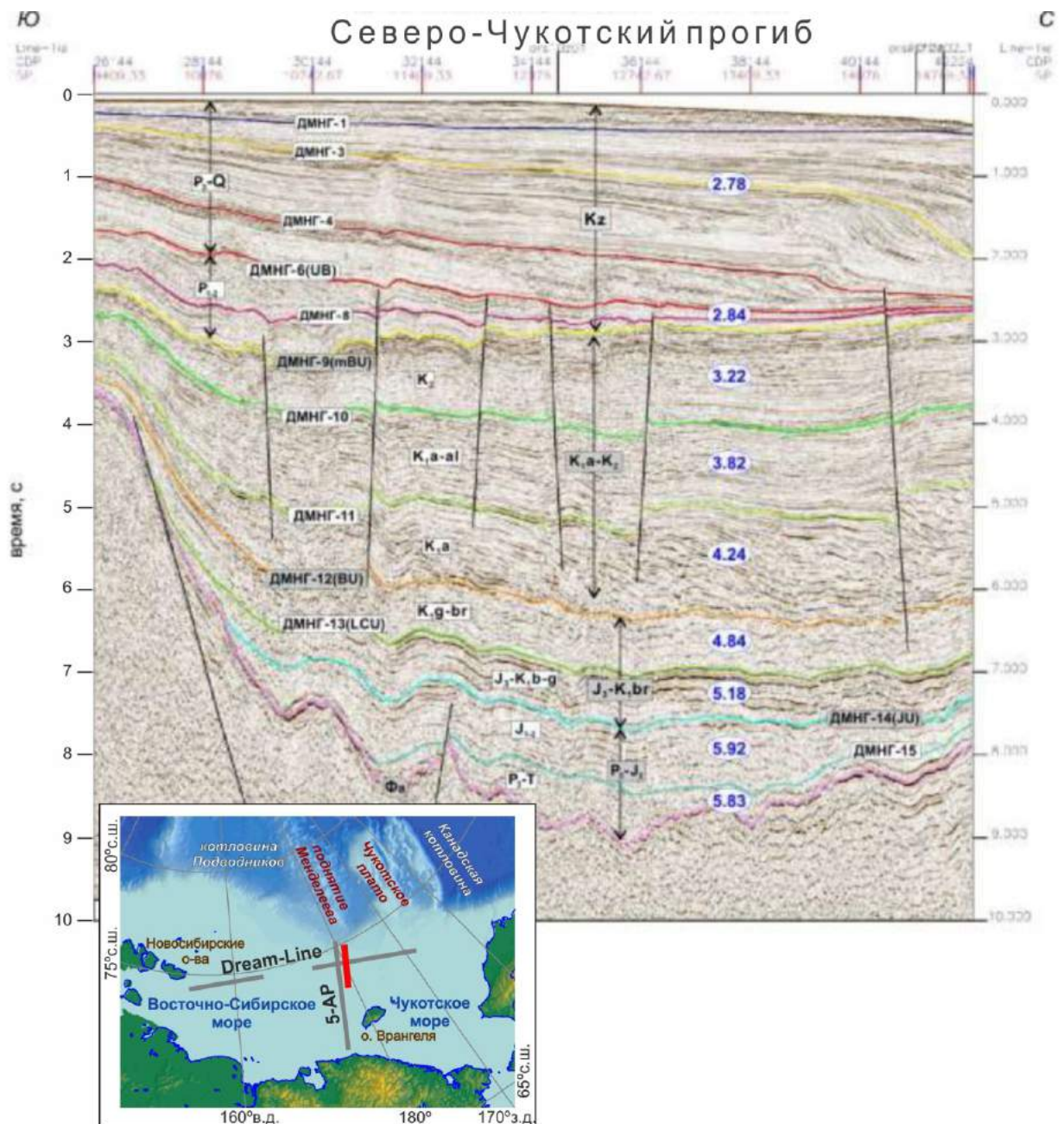


Рисунок 1.3 – Глубинный сейсмогеологический разрез по профилю ES10Z23_m

[Петровская, 2014]

Последние исследования на шельфе Чукотского моря, проводимые ПАО «НК Роснефть» в рамках нефтегазопромысловых работ, показали наличие соляной тектоники в осадочном чехле [Скарятин и др., 2020] (Рисунок 1.4). По данным сейсморазведки выполнена структурная интерпретация, включающая прослеживание отражающих горизонтов и разрывных нарушений, выделение сейсмических комплексов, представленных отложениями, накопление которых происходило синхронно с этапами тектонической активности. Проведенные исследования обозначили новое нефтепоисковое направление в регионе, связанное с соляной тектоникой, уточнили область развития и возможный стратиграфический интервал перспективных отложений Северо-Чукотского бассейна в пределах лицензируемого участка.

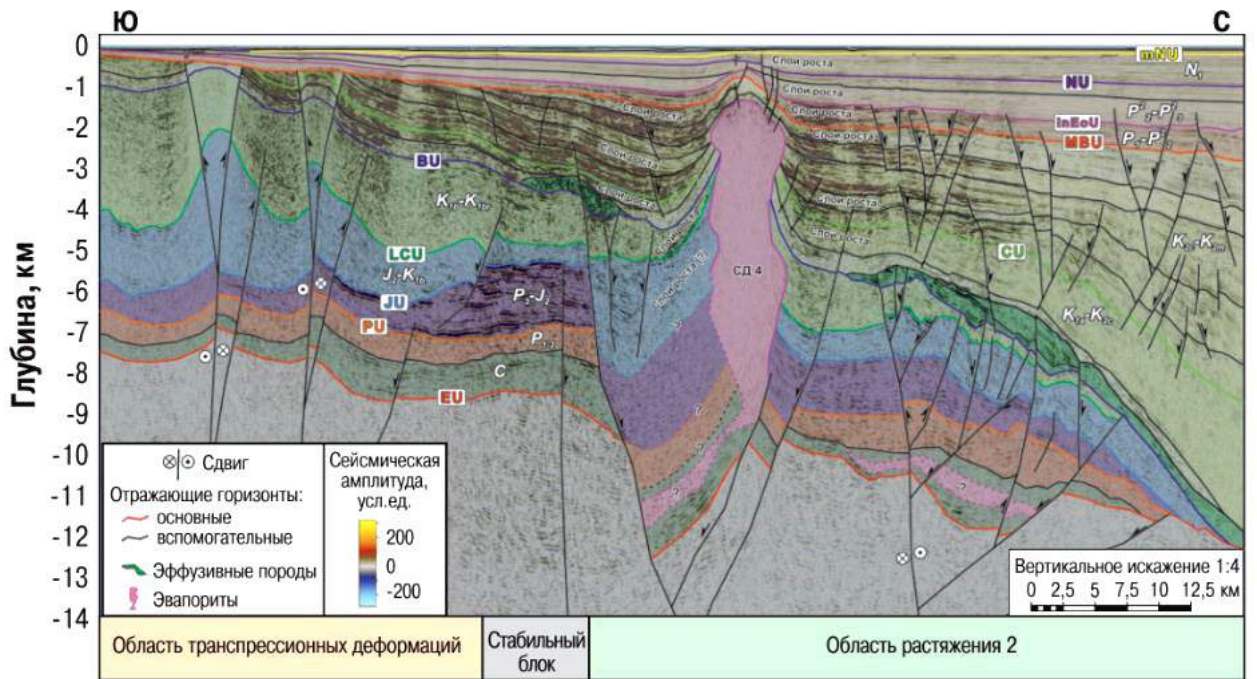


Рисунок 1.4 – Сейсмогеологический разрез через южную часть Северо-Чукотского прогиба [Скарятин и др., 2020]

Также в 2015-2020 гг. на основании анализа и переинтерпретации результатов большого объема сейсмических исследований МОВ-ОГТ разных лет с учетом скважинных данных американского сектора Чукотского моря построены обобщенные схемы стратификации чехла и предложены модели формирования Северо-Чукотского прогиба в мезозойское и кайнозойское время [Никишин и др., 2017, 2019a,b, 2020; Скарятин и др., 2020]. Согласно предложенным моделям, в основании чехла Северо-Чукотского прогиба лежит горизонт BU возрастом баррем-апт.

1.3. Основные модели геологического строения Северо-Чукотского прогиба

В настоящее время в связи с недостатком прямой геологической информации о строении Северо-Чукотского прогиба существует ряд дискуссионных моментов. Среди актуальных проблем, связанных с изучением геологического строения Северо-Чукотского прогиба, выделяются следующие:

- Стратиграфическая привязка сейсмических горизонтов;
- Мощность осадочного чехла;
- Природа земной коры под прогибом.

Отсутствие скважин глубокого бурения в пределах Северо-Чукотского прогиба затрудняет стратиграфическую привязку сейсмических горизонтов. Прямая геологическая информация, как уже упоминалось выше, доступна только на о. Врангеля, геологический разрез которого сложен породами начиная с силурийского возраста до триасового, а также отложениями палеогенового-неогенового возраста. Разрез представлен терригенными осадочными породами в основном алевритами, алевролитами, аргиллитами, глинами и известняком, доломитизированным известняком, доломитом, гипсом [Косько, 2003; Остов Врангеля..., 2003]. В разрезах скважин Айон [Слободин и др., 1990] и АСЕХ [Backman et al. 2008] вскрыты только кайнозойские терригенные отложения.

При выделении сейсмокомплексов в осадочном чехле Северо-Чукотского прогиба обычно ориентируются на стратиграфические подразделения трога Ханна, расположенного в американском секторе Чукотского моря. Стратификация осадочного чехла трога Ханна основана на данных скважин глубокого бурения - Туналик, Клондайк, Крэкерджек, Попкорн, Бургер, Диамонд (Рисунок 1.5), описанных в работе [Sherwood, 1998, 2006, 2009; Thurston, 1987]. Стратиграфические построения охватывают фанерозойские отложения начиная с верхнедевонских и заканчивая неогеновыми отложениями, разделенных стратиграфическими несогласиями. Разрез сложен терригенными осадками и представлен в основном переслаиванием песков, песчаников, алевритов, алевролитов, аргиллитов и глин. В осадочном чехле трога Ханна выделено 8 опорных отражающих горизонтов: ТАВ, PU, JU, LCU, BU, CU, TEu, PPU [Craddock, Houseknecht, 2016; Dinkelman, 2008]. Поверхность ТАВ (top acoustic basement – кровля акустического фундамента) соответствует кровле акустического фундамента, отделяющего девонские и более древние метаморфизованные породы *франклинского комплекса* от выше залегающих пород *элсмирского комплекса*. Внутри элсмирского комплекса прослеживается горизонт PU (Permian unconformity – пермское несогласие). Поверхность PU отделяет раннеэлсмирские отложения от позднеэлсмирских. Несогласие JU (Jurassic unconformity – юрское несогласие) отделяет элсмирский комплекс от выше залегающего *бофортского комплекса* юрско-мелового возраста. Внутри бофортского комплекса выделяется несогласная граница LCU (Lower Cretaceous unconformity – раннемеловое несогласие, готерив-баррем). Породы бофортского комплекса отделяются поверхностью BU (Brookian unconformity – брукское несогласие,

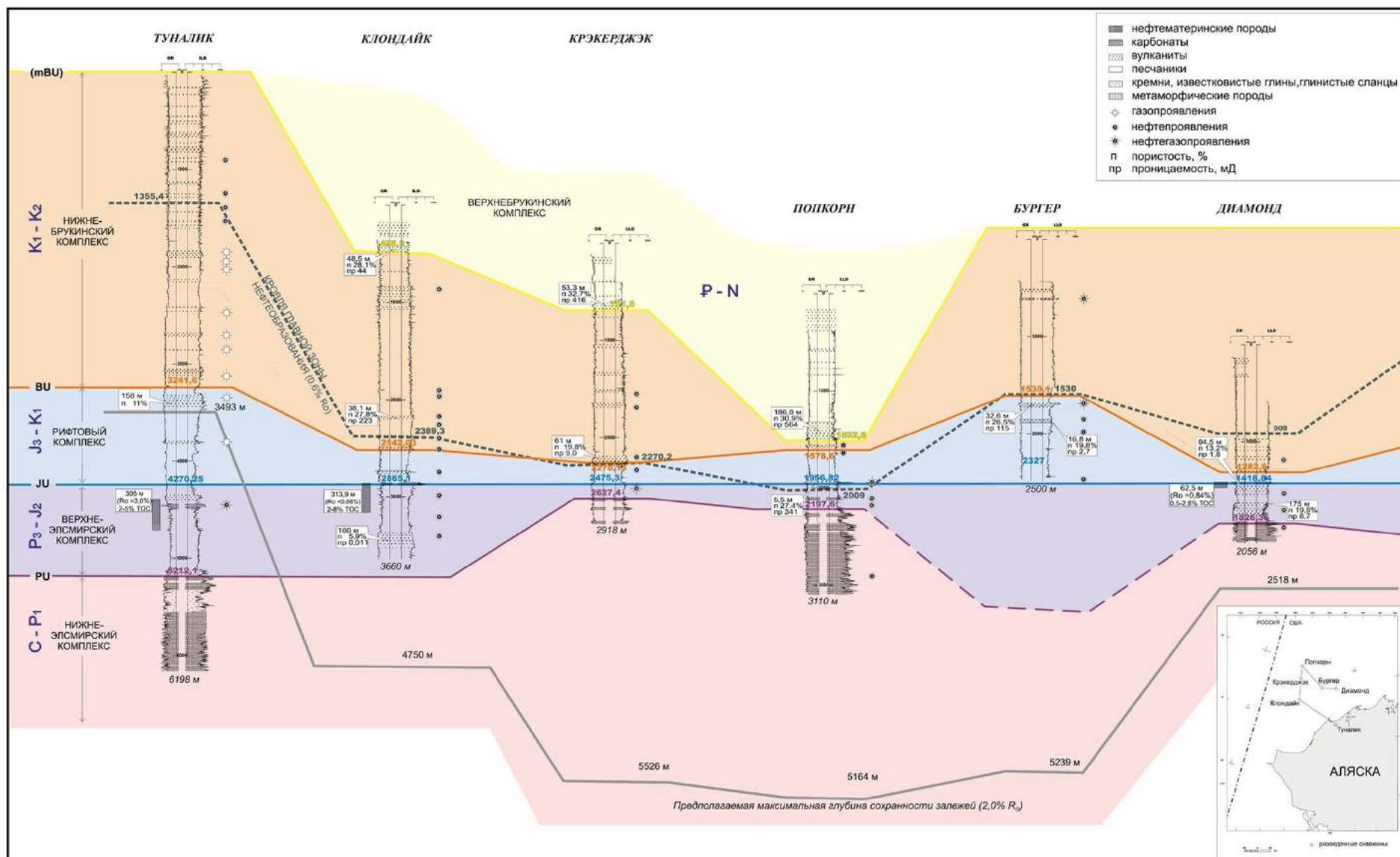


Рисунок 1.5 – Данные скважин глубокого бурения амеразийского сектора Чукотского моря [по Sherwood, 2009]

баррем-апт) от выше залегающего мел-кайнозойского *брукского комплекса*. Внутри брукского комплекса выделяется несогласие mBU (middle Brookian Unconformity – среднебрукское несогласие). В кайнозойских отложениях трога Ханна выделено два несогласия: TEu (Terminal Eocene Unconformity – постэоценовое несогласие) и PPU (Pre-Pliocene Unconformity – предплиоценовое несогласие).

На основании геолого-геофизических данных разными организациями и авторами построено несколько схем стратификации осадочного чехла Северо-Чукотского прогиба [Шипилькевич, 2003; Виноградов, 2008; Малышев, 2010; Сакулина и др., 2011а; Петровская, 2014; Дараган-Суцова и др., 2014, 2015; Заварзина и др., 2017; Поселов и др., 2017; Phan, Coakley, 2018; Никишин, 2017; Скарятин и др., 2020 и др.].

В таблице 1.1 представлены основные схемы стратификации, включающие мощность осадочного чехла, выделяемые отражающие горизонты и предполагаемый возраст сейсмических комплексов осадочного чехла Северо-Чукотского прогиба.

В разрезе Северо-Чукотского прогиба по Н. А. Петровской [Петровская и др., 2008, 2014] выделяется пять сейсмокомплексов, разделенных стратиграфическими несогласиями: 1) карбонский – нижнепермский *нижнеэлсмирский комплекс* (включает Эндикотт и Лисберн по Sherwood, 1998); 2) верхнепермский – среднеюрский *верхнеэлсмирский комплекс* (включает Седлрочит, Шублик, Саг-Ривер, нижний Кингак по Sherwood, 1998); 3) верхнеюрский – нижнемеловой *бофортский (рифтовый) комплекс* (включает верхний Кингак, Купарук, Пелб-Шейл по Sherwood, 1998); 4) ниже – верхнемеловой *нижнебрукинский комплекс* (включает Торок, Нанушук, Колвилл по Sherwood, 1998); 5) кайнозойский *верхнебрукинский комплекс* (включает Сагава-ниркток, Губик по Sherwood, 1998) (Рисунок 1.6).

На возраст осадочного чехла Северо-Чукотского бассейна имеется два господствующих взгляда. Одна группа исследователей считает, что Северо-Чукотский прогиб является аналогом трога Ханна и самые древние породы чехла каменноугольно-пермского возраста [Дараган-Суцова и др., 2015; Заварзина и др., 2017; Кулемин, 2011; Петровская, 2014; Поселов и др., 2017]. Другие авторы считают, что заложение Северо-Чукотского бассейна происходило одновременно с открытием Канадского бассейна или позднее в аптское время и осадочный чехол включает отложения исключительно мезозойского возраста [Phan, Coakley, 2018; Бурмин, 2006; Никишин, 2017; Скарятин и др., 2020].

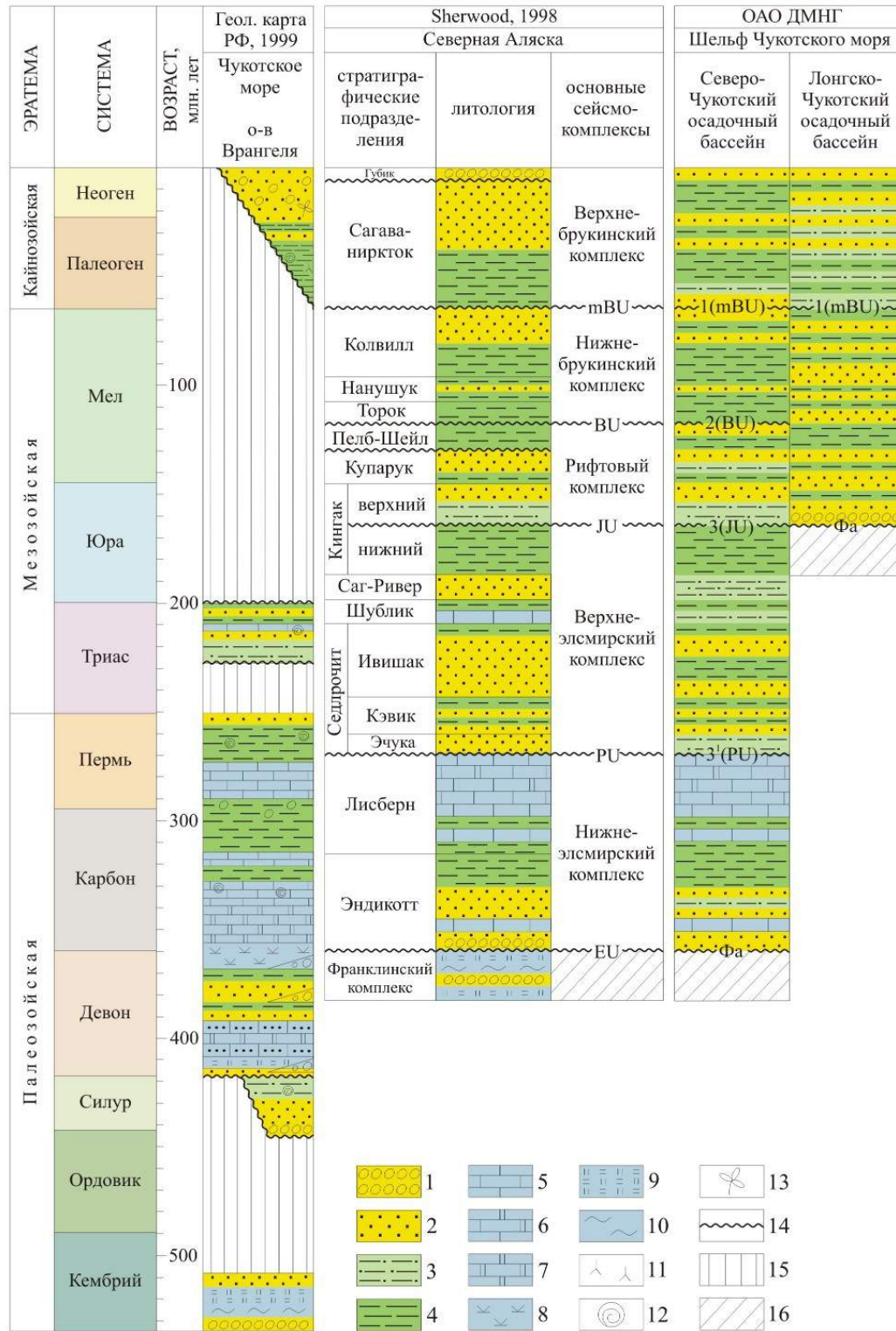
В последнее время, несмотря на появление новых сейсморазведочных данных, представления о мощности осадочного чехла по-прежнему существенно разнятся. Мощность осадочного чехла в прогибе оценивалась по результатам плотностного моделирования в 22 км, по сейсмическим данным – в 15-16 км [Косько и др., 2008]; у других авторов от 14-17 км [Малышев, 2010; Сакулина и др., 2011а, 2016а; Хаин, 2009] до 20-24 км [Артюшков, 2010;

Таблица 1.1 – Сравнение основных стратиграфических схем осадочного чехла Северо-Чукотского прогиба

Авторы	Мощность осадочного чехла	Выделяемые отражающие горизонты и комплексы осадочного чехла	Возраст осадочного чехла	Примечания
Шипилькевич, Бурмин, 2003; Бурмин, Шипилькевич, 2006	20 км	Выделено 3 отражающих горизонта: LCU, BU, MBU. Сейсмокомплексы: рифтовый (нижнемеловой); нижнебрукский (апт-позднемел); верхнебрукский (палеогеновый).	Осадочный чехол возрастом мел-кайнозойский (K ₁ -K _z). В основании бассейна горизонт LCU (готерив-баррем).	Бассейн начинается с отложений бофортского (рифтового) комплекса.
Малышев, 2010; Сакулина и др, 2011а	14-17 км	Выделены отражающие горизонты: CL, PU, JL, J ₂ U, J ₃ U, LCU, mBU. В разрезе осадочного чехла выделены три толщи: палеозойская (P ₂ -T), мезозойская (J-K ₁) и кайнозойская (K ₃ -K _z).	Верхнепалеозойские отложения прослежены только в наиболее погруженной части Северо-Чукотского прогиба, где они ограничены рефлекторами CL в подошве и PU в кровле (соответственно низы карбона и верхи перми). Выделен супракрустальный (промежуточный) комплекс (Pz ₁ -Pz ₂).	В основании чехла выделена толща (Pz ₂ -Pz ₃), сопоставленная с франклинским комплексом силурийско-девонского возраста. В отличие от разреза Аляски, в Северо-Чукотском прогибе кровля комплекса не обладает свойствами акустического фундамента, т.к. под ним в ряде мест прослеживается синфазность, интерпретируемая как седиментационная.
Петровская, Савишкина, 2014; Дараган-Суцова и др., 2014, 2015; Заварзина и др., 2017	20-24 км	Выделено 7 отражающих горизонтов: Фа (ТАВ), ДМНГ-16 (PU), ДМНГ-14 (JU), ДМНГ-13 (LCU), ДМНГ-9 (BU), ДМНГ-6 (TEu).	Осадочный чехол начинается с отложений возрастом P ₁ -T. Нижнеэлсмирский комплекс (C ₁ -P ₂) развит на южном борту Северо-Чукотского бассейна.	Многие горизонты по возрасту и структурно-тектоническому положению соответствуют горизонтам трога Ханна.
Поселов и др., 2017	20-24 км	Выделено 6 опорных горизонтов. Четыре нижних (PU, JU, LCU, BU) аналогично с трогом Ханна. В верхах разреза прослежены 2 дополнительных несогласия pCU (посткаманское) и RU (предмиоценовое).	Осадочный чехол начинается с отложений возрастом C-P ₂ .	Отражающие горизонты BU, LCU и JU непрерывно прослеживаются из Северо-Чукотского прогиба в котловину Подводников.

Продолжение таблицы 1.1

Авторы	Мощность осадочного чехла	Выделяемые отражающие горизонты и комплексы осадочного чехла	Возраст осадочного чехла	Примечания
Phan, Coakley, 2018; Никишин и др., 2017; Скарятин и др., 2020	20 км	Выделены отражающие горизонты: BU, CU, MBU, MU.	Осадочный чехол возрастом мел-кайнозойский. В основании чехла лежит горизонт BU (баррем-апт).	Зафиксирован факт наличия отражений SDR (Seaward Dipping Reflectors), отождествляемые с массивными излияниями базальтов во время рифтинга. Наличие соляной тектоники в разрезе.



1 - конгломераты; 2 - пески, песчаники; 3 - алевриты, алевролиты; 4 - аргиллиты, глины; 5 - известняк; 6 - известняк доломитизированный; 7 - доломит; 8 - гипс; 9 - кварциты; 10 - филлиты; 11 - спикулы губок; 12 - обломки раковин; 13 - панофлора; 14 - стратиграфическое несогласие; 15 - отсутствие отложений (размыв, накопление); 16 - акустический фундамент

Рисунок 1.6 – Принципиальная схема стратиграфии фанерозойских отложений островов Арктики, Северной Аляски, глубоких скважин и осадочных бассейнов на шельфе Чукотского моря, увязывающая стратиграфические построения разных авторов [по Н.А. Петровской, 2008 с изменениями ОАО «Севморгео», 2012 г.]

Виноградов, 2008; Дараган-Суцова и др., 2014; Петровская, 2014; Поселов и др., 2012, 2017; Drachev, 2016] (Рисунок 1.7). Ряд исследователей придерживаются промежуточной точки зрения, оценивая мощность чехла в 18 км [Petrov, 2016]. О строении фундамента также нет единого мнения. Так, академик В.Е. Хаин [Хаин, 2009] считал, что данный бассейн наложен на складчато-метаморфические комплексы континентальной плиты Восточной Арктики.

Автор диссертационной работы с коллегами придерживается точки зрения, что осадочный чехол мощностью 14-15 км сложен породами мезозойского возраста, а отложения бофортского (рифтового) комплекса входят в состав *промежуточного комплекса*, который наложен на верхнепалеозойский складчато-метаморфический фундамент [Сакулина и др., 2016а, Кашубин и др., 2017, 2018] (Рисунок 1.8).

Метаморфизованные осадочные отложения промежуточного комплекса отличаются от выше залегающих осадочных комплексов и ниже залегающего фундамента достаточно высокими значениями скоростей продольных волн 5.0-5.5 км/с, значениями V_p/V_s равными 1.78, близкими к значениям V_p/V_s в консолидированной коре, и характером волнового поля на разрезе МОВ-ОГТ.

О природе земной коры, подстилающей Северо-Чукотский прогиб, существуют различные мнения (Таблица 1.2). 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]. Некоторые исследователи полагают, что консолидированная кора прогиба не содержит «гранитно-метаморфического слоя» и осадочный чехол, начинающийся с юрских отложений, ложится непосредственно на эксгумированную серпентинизированную мантию [Drachev, 2016] (Рисунок 1.9). На основе гравиметрических данных в работе [Пискарев-Васильев, 2004] предполагается, что в глубокой части прогиба под осадками залегает базальтовая океаническая кора (Рисунок 1.10).

Сравнение геолого-геофизических моделей Северо-Чукотского прогиба, приведенное в таблицах 1.1 и 1.2, демонстрирует значительные расхождения в базисных позициях, таких как мощность и возраст осадочного чехла, глубина поверхности фундамента, наличие или отсутствие «гранитного» слоя в земной коре. С другой стороны, накопленный массив данных и теоретических построений позволяет вывести на качественно новый уровень представления о строении Северо-Чукотского прогиба, необходимые для формирования согласованной модели

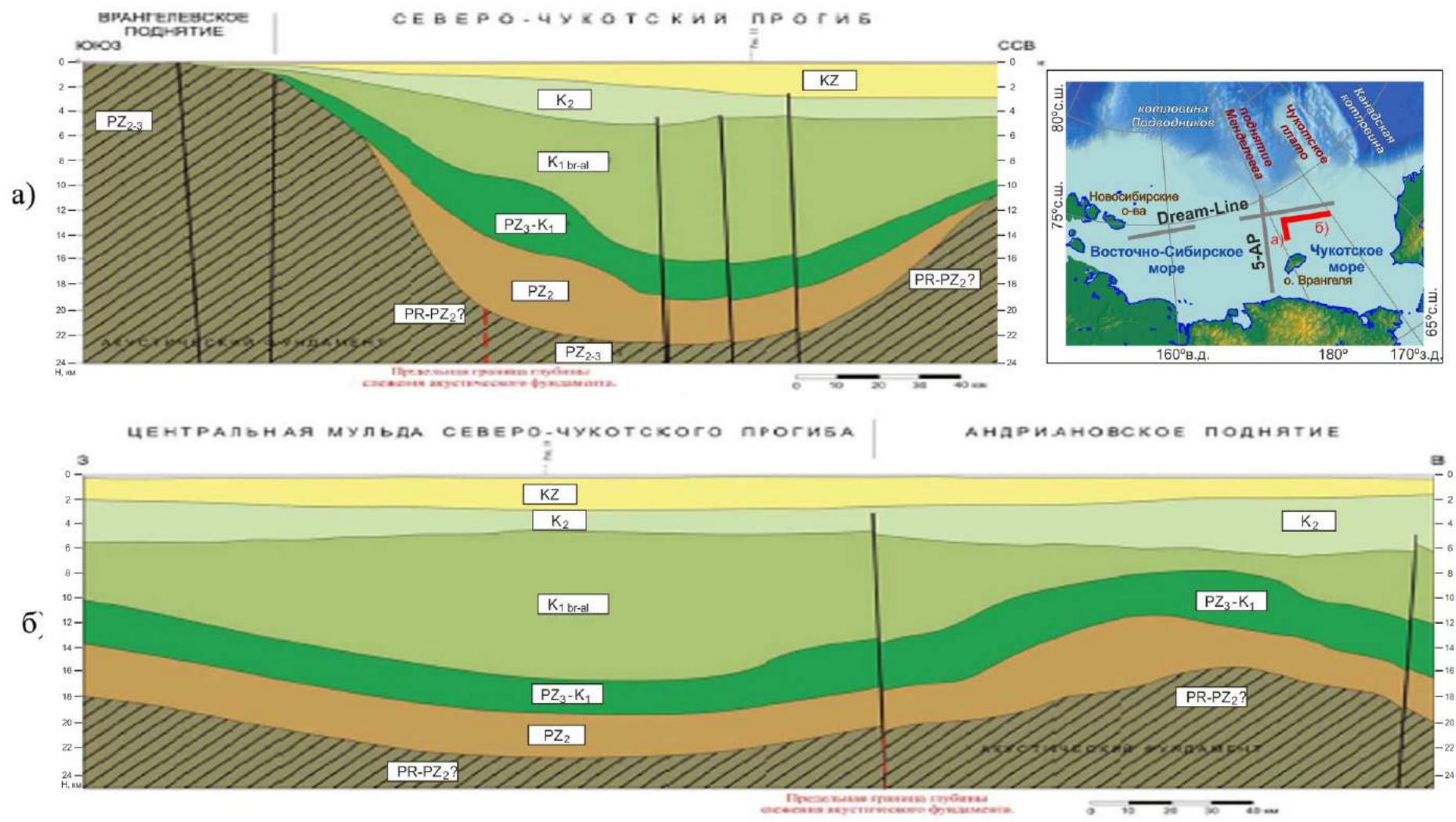


Рисунок 1.7 – Геологический разрез вкрест (а) простирания и по простиранию (б) Северо-Чукотского прогиба [Виноградов, 2008]

Интерпретация отражающих горизонтов, принятая в настоящей работе		BGR K.Hinz et al., 1997 г.	ЛАРГЕ Драчев С.С., 2000 г.	Интерпретация Горячева Ю.В. по материалам МАГЭ и ЛАРГЕ (легенда Лаптево-Сибироморской серии листов ГТК, 2000 г.)			ОАО ДМНГ		Sherwood, 1998 г.	
Южно-Чукотский прогиб	Северо-Чукотский прогиб			шельф		континентальный склон и глубоководная котловина	шельф Чукотского моря		Северная Аляска	
				море Лаптевых	Восточно-Сибирское море		Северо-Чукотский осадочный бассейн	Лонгско-Чукотский осадочный бассейн	стратиграфические подразделения	основные сейсмокомплексы
дно моря	дно моря	дно моря	дно моря	дно моря	дно моря	дно моря	дно моря	дно моря	дно моря	дно моря
N2-Q	N2-Q			N2-Q	N2-Q	N2-Q		N2-Q	Губик	N2-Q
B-VII	B-VII			N1 ²⁻³	N1 ²⁻³	O-VII		0		
			N2-Q			N1 ¹	Верхнебрукский комплекс			
N1	N1	N1 ³ -Q		L-VI	B-VI	O-VI ²⁻³	KZ	N1-P	Сагванирток	Верхнебрукский комплекс
B-V	B-V		Б	P3 ³ -N1 ²	P3 ³ -N1 ²	O-V				N1-P
P	P		N1 ² -N2 ¹	L-V	B-V	O-III				
B-IV(mBU)	B-IV(mBU)	LS3		P1-2	P1-2	P3	1(mBU)	1(mBU)		mBU
		P3 ³ -N1 ²		L-IV	B-IV	O-III				
		LS2		K2k-m(?)	K2k-m(?)	P1-2	Нижнебрукский комплекс			
				L-III	B-III	O-II	K1a-K2	K1a-K2	Коввилл	Нижнебрукский комплекс
K1a-K2	K2s-at(?)			P3 ³					Нанушук	K1a-K2
	B-III ₂			P2 ²		K2			Торак	BV
	K1a-at(?)			P2 ¹			2(BU)		Пелб-Шейл	Рифтовый комплекс
	B-II(BU)	P1 ² -P2		L-II	B-II		Бюфортский комплекс		Купарук	J3(?) - K1neok
	J3(?) - K1neok		K2m(?) - P1	K1(?) ; K1a-at	K1a-at		J3(?) - K1neok		верхний	JU
Фа	B-I(JU)	LS1	А	L-I	B-I	O-I	3(JU)	Фа	нижний	
									Каптак	
							Верхнеэзмирский комплекс		Саг-Ривер	Верхнеэзмирский комплекс
							P2-J2		Шублик	
									Ивишак	P2-J2
							3'(PU)		Кэвик	
							Нижнеэзмирский комплекс		Эчука	PU
							C-P1		Либерн	Нижнеэзмирский комплекс
							Фа		Эндикотт	C-P1
									Франклинский комплекс	EU

Рисунок 1.8 – Корреляция сейсмических горизонтов, выделенных по работам МОВ-ОГТ на шельфе Восточно-Арктических морей

[ОАО «Севморгео», 2012 г.]

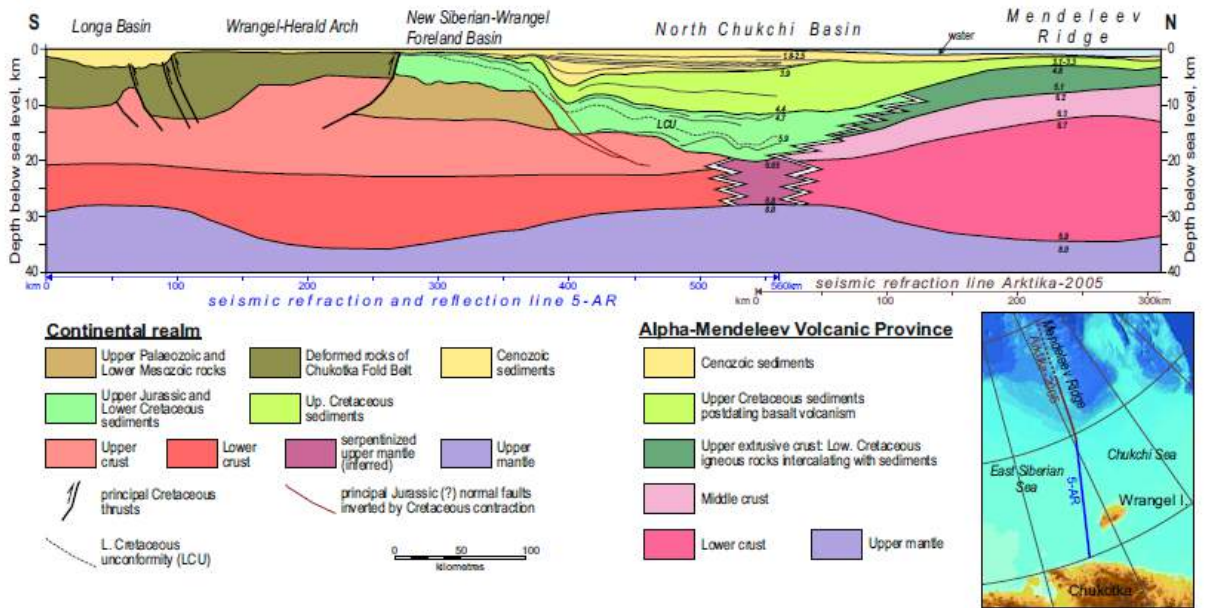


Рисунок 1.9 – Схематический разрез, иллюстрирующий структуру земной коры под Северо-Чукотским прогибом [Drachev, 2016]

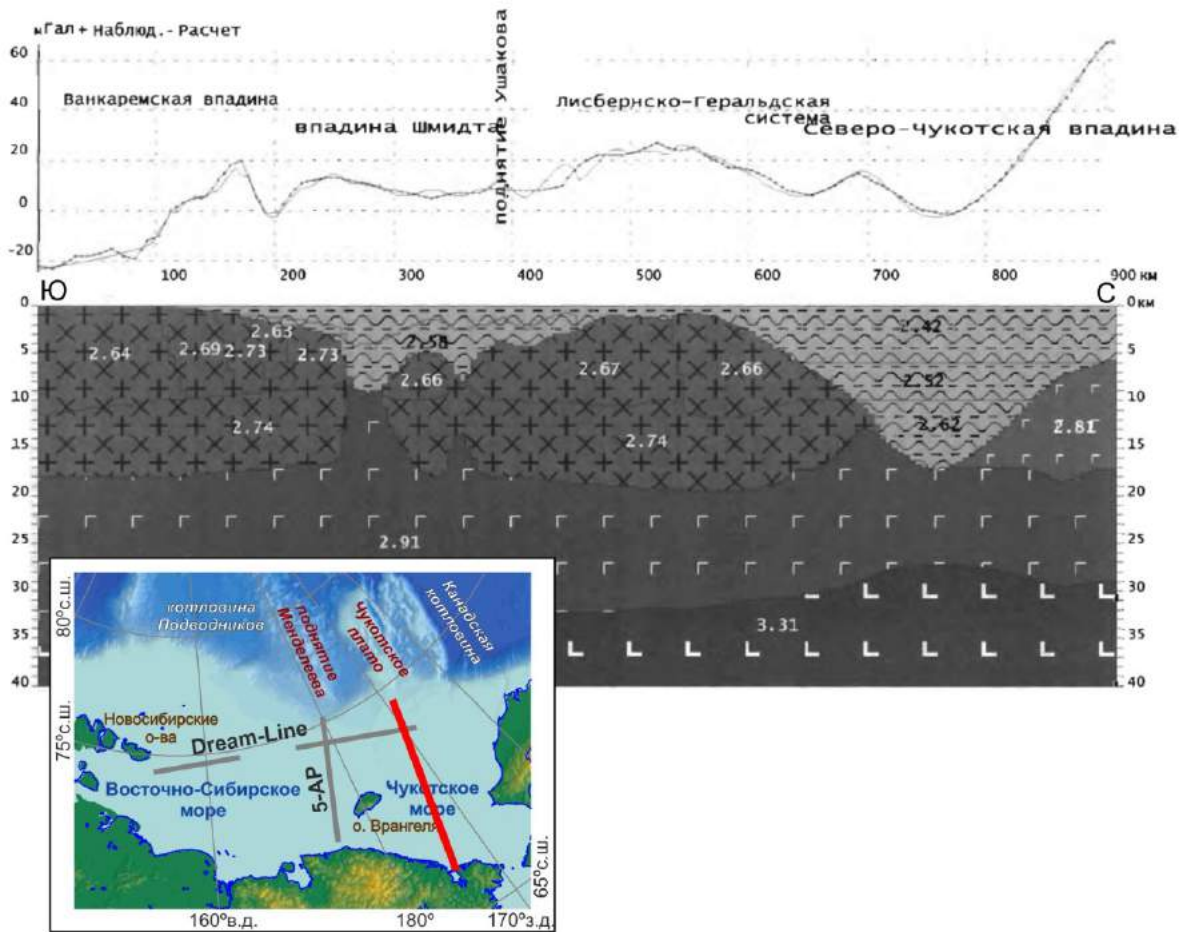


Рисунок 1.10 – Разрез земной коры Чукотского моря, предполагаемый на основе гравиметрических данных [по Пискарев-Васильев, 2004]

Таблица 1.2 – Сравнение основных геолого-геофизических моделей земной коры Северо-Чукотского прогиба

Автор(ы)	Фактический материал	Мощность осадочного чехла	Строение земной коры и природа ее образования	Примечания
Артюшков, 2010	Сейсмические съемки МОВ-ОГТ разных лет в Чукотском море.	Осадочный чехол мощностью до 22 км. Предполагается, что фундамент Северо-Чукотского прогиба имеет позднепротерозойский-среднепалеозойский возраст.	Большая длительность погружения Северо-Чукотского прогиба, его огромная общая величина, а также компенсация начального прогиба в позднем девоне осадками относительно небольшой мощности говорят о коре континентального типа.	Крупное погружение коры, начавшееся в позднем девоне, связывается с уплотнением пород основного состава в нижней коре за счет эклогитизации (перехода габбро в нижней коре в более плотные гранатовые гранулиты и эклогиты).
Сакулина и др., 2011a	Комплексные геофизические исследования вдоль опорного профиля 5-АР, включающие непрерывное сейсмоакустическое профилирование (НСАП), сейсмические наблюдения МОВ-ОГТ, МПВ ГСЗ и набортные гравиметрические и гидромагнитные измерения.	Осадочный чехол мощностью до 17-18 км.	Наблюдается подъем поверхности М в северном направлении от 35-38 км до 26-36 км, сокращение мощности «гранитного» слоя от 12-16 км на юге до 5-8 км на севере.	Предполагается прогрессирующая в северном направлении базификация континентальной коры под влиянием спрединговых процессов в Северном Ледовитом океане.
Drachev, 2016	Интерпретация геолого-геофизических данных, полученных вдоль опорного профиля 5-АР.	Осадочный чехол мощностью до 20 км.	Глубина залегания границы М 28-30 км. Консолидированная кора под прогибом не содержит «гранитно-метаморфического слоя».	Осадочный чехол ложится непосредственно на эксгумированную серпентинизированную мантию.

Продолжение таблицы 1.2

Автор(ы)	Фактический материал	Мощность осадочного чехла	Строение земной коры и природа ее образования	Примечания
Пискарев-Васильев, 2004	Гравиметрические данные, полученные вдоль геотрансекта в Чукотском море. Плотностная модель основана на обобщенных сейсмических данных МОВ-ОГТ разных лет.	Осадочный чехол мощностью 17-18 км.	Глубина залегания границы М 26-27 км. Под осадочным чехлом залегает «базальтовый» слой мощностью 7-8 км.	Предполагается, что в глубокой части прогиба (более 15 км) под осадками залегают полностью размагниченные породы базальтового состава.

эволюции региона, включая, в том числе, возможность дальнейших исследований по выбору мест заложения скважин глубокого бурения.

Глубинная скоростная модель (V_p , V_p/V_s) земной коры и верхов мантии Северо-Чукотского прогиба, построенная по материалам комплексных сейсмических исследований по профилям 5-AP и Dream-line представлена в Главе 4 настоящей работы. По результатам исследований удалось значительно уточнить представления о глубинном строении земной коры Северо-Чукотского прогиба и сделать выводы о природе земной коры, подстилающей прогиб [Сакулина и др., 2011а; Сакулина и др., 2016а; Кашубин и др., 2017, 2018].

1.4. Выводы по главе 1

1. Изучение Восточно-Арктического региона начато с середины прошлого века и продолжается по настоящее время. Исследователями накоплен большой объем геолого-геофизической информации, позволивший выделить основные черты строения осадочного чехла и глубинного строения, сформулировать и описать основные этапы геологической истории региона.

2. Северо-Чукотский прогиб является одним из самых глубоких бассейнов, расположенных на пассивных окраинах континентов, наряду с Южно-Каспийской и Восточно-Баренцевской впадинами.

3. В связи с отсутствием скважин глубокого бурения в Восточно-Сибирском море и российском секторе Чукотского моря существует ряд точек зрения на мощность осадочного чехла Северо-Чукотского прогиба. По данным разных авторов мощность оценивается от 14-16 до 20-24 км. Нет единой общепринятой схемы стратификации осадочного чехла и модели формирования Северо-Чукотского бассейна в целом.

4. Существуют различные мнения о природе коры, подстилающей Северо-Чукотский прогиб. Некоторые авторы предполагают океаническую кору под прогибом, другие говорят о континентальной природе коры, подстилающей Северо-Чукотский прогиб.

5. Появление в этом регионе морских сейсмических наблюдений по методике глубинного сейсмического зондирования (ГСЗ) с трехкомпонентной регистрацией волнового поля определяет актуальность исследований, что позволит существенно уточнить глубинное строение Северо-Чукотского прогиба.

ГЛАВА 2 ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПРЕДПОСЫЛКИ ВОЗНИКНОВЕНИЯ И ОПЫТ РЕГИСТРАЦИИ ПОПЕРЕЧНЫХ И ОБМЕННЫХ ВОЛН В МОРСКОЙ СЕЙСМОРАЗВЕДКЕ¹⁾

2.1. Предпосылки возникновения поперечных и обменных волн при морских многоволновых исследованиях ГСЗ

Впервые идея о совместном использовании продольных (P-) и поперечных (S-) волн в обработке и интерпретации сейсмических записей была предложена в первой половине XX века академиком Г.А. Гамбурцевым. С середины 1960-х годов метод многоволновой сейсморазведки (МВС) развивался академиком Н.Н. Пузыревым и его соратниками

¹⁾ При подготовке данной главы диссертации использованы следующие публикации автора, в которых отражены основные результаты, положения и выводы исследования:

1. 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.
2. **Яварова, Т. М.** Возможности использования конечно-разностного полноволнового моделирования в программе Tesserat 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.
3. Поперечные и обменные волны в морских исследованиях ГСЗ (результаты математического моделирования) / **Т. М. Яварова**, С. Н. Кашубин, А. В. Рыбалка, Т. С. Сакулина. – 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.
4. **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.
5. **Yavarova, T.M.,** Kashubin, S.N., Rybalka, A.V., Sakulina, T.S. Mathematical modeling of shear and converted waves in marine seismic. 35th International Geological Congress. Cape Town, American geosciences Institute, 2016, Paper number 2771. <https://www.americangeosciences.org/igc/14986> (дата обращения 18.04.2022).
6. **Яварова, Т. М.** Волновые поля ГСЗ на акваториях: натурные наблюдения и математическое моделирование / **Т. М. Яварова**. – Текст : электронный // Материалы XXV Международный научный симпозиум имени академика М.А. Усова «Проблемы геологии и освоения недр» / - Томск : Национальный исследовательский Томский политехнический университет, 2021. – С.320–321. URL:https://vk.com/doc294932640_612209505?hash=49437f4e9b8125872b&dl=d458075ebb7644f7c5 (дата обращения: 18.04.2022).

(И.С. Берзон, И.Р. Оболенцева, Т.В. Нефедкина, Е.И. Гальперин и др.). Начиная с 80-х гг. благодаря исследованиям С.В. Крылова, Н.И. Халевина, А.В. Егоркина, В.С. Дружинина, Б.П. Мишенькина, В.В. Суворова, В.С. Селезнева, В.М. Соловьева и многих других метод МВС получил широкое развитие и внедрение в практику современного ГСЗ во второй половине XX века [Пузырев, 1987,1992, Аветистов, 1996, Егоркин, 1996, Кашубин, 1984, 1985, 2001 и др.]. В настоящее время МВС является одним из перспективных направлений в развитии сейсморазведки. В основном он применяется в скважинных исследованиях при разведке нефтегазовых месторождений [Многоволновая сейсморазведка..., 2010]. В течение последних десяти-пятнадцати лет большое внимание уделяется морским многоволновым исследованиям, проводимым на шельфе.

Особый интерес при региональных работах представляет глубинное сейсмическое зондирование (ГСЗ) с использованием в качестве регистраторов автономных донных станций (АДСС) с многокомпонентными приемниками. Региональные исследования ГСЗ с многокомпонентной регистрацией волнового поля проводились ФГУ НПП «Севморгео» в разные годы в Арктическом и Охотоморском регионах [Сакулина и др., 2011b, 2016a,b; Кашубин и др., 2018].

Сейсмические работы ГСЗ с многокомпонентной регистрацией на акваториях обычно проводятся по обращенной системе наблюдения: с перемещающимся по профилю источником возбуждения и неподвижными приемными устройствами (Рисунок 2.1). При обработке сейсмические материалы ГСЗ удобнее группировать по общей точке приёма (сейсмограмма ОТП), но обрабатывать в традиционных сейсмических обрабатывающих системах как сейсмограммы общей точки возбуждения (сейсмограмма ОТВ).

Донные станции с взаимно ортогональными компонентами регистрации волнового поля (три компоненты геофона X-, Y-, Z- и гидрофон Н) устанавливаются на поверхности дна с интервалом 10-20 км. Z-компонента всегда направлена вертикально, X- и Y-компоненты лежат в горизонтальной плоскости, но X-компонента не сориентирована в направлении профиля. Для ориентации горизонтальных компонент в нужных направлениях используется пересчет волнового поля: X- и Y-компоненты пересчитываются в радиальную R-компоненту (направлена вдоль профиля) и трансверсальную T-компоненту (перпендикулярна направлению профиля) (подробнее рассмотрено в Главе 3 настоящей работы). Возбуждение упругих колебаний осуществляется буксируемым источником (пневмоизлучателем), погруженным на 20-40 м в водный слой, с шагом 250 м.

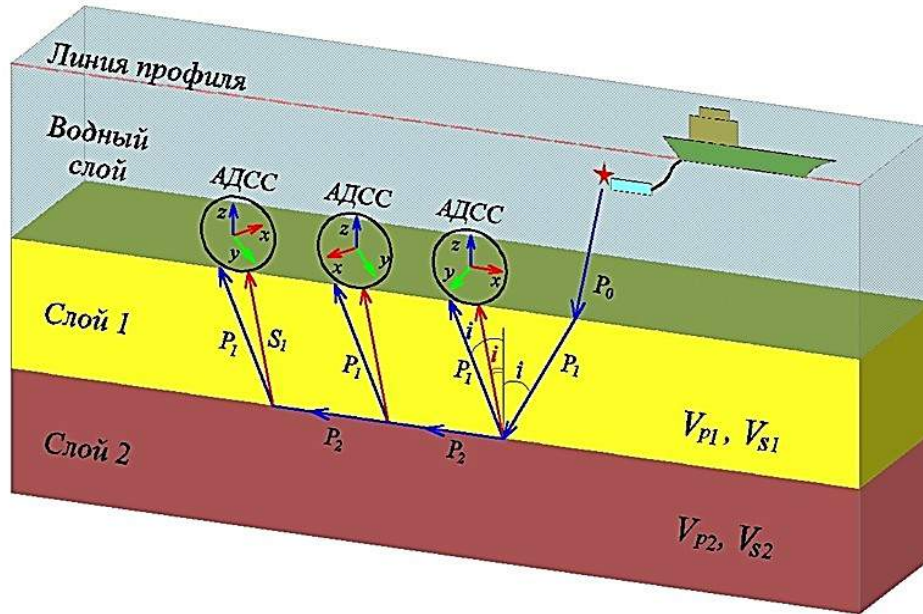


Рисунок 2.1 – Специфика работ ГСЗ на акваториях с многокомпонентной регистрацией волнового поля

Примечание - Работы ГСЗ на акваториях обусловлены следующими факторами: наличие водного слоя; возбуждение сейсмических колебаний в водном слое на глубине 20-30 м; обращенная система наблюдений; Z-компонента всегда направлена вертикально, X- и Y-компоненты лежат в горизонтальной плоскости, но X-компонента не сориентирована в направлении профиля.

Морские региональные многокомпонентные наблюдения ГСЗ позволяют получить дополнительную информацию о строении земной коры, необходимую для решения фундаментальных геодинамических задач. Важную роль играет изучение скоростей **P**- и **S**-волн и их отношения V_p/V_s , позволяющих перейти к корреляции между сейсмическими параметрами и составов кристаллических горных пород. По установленным сейсмическим и физическим характеристикам геологической среды выполняется оценка вещественного состава и условий образования исследуемых объектов [Алейников, 1986; Егоркин, 1996, 1999; Кашубин, 1984, 2011, Крылов, 2003, Лукашин, 2003, Christensen, 1996; Mjælde, 2002; и др.].

Как известно, **P**- и **S**-волны отличаются друг от друга по ряду признаков, среди которых: поляризация, скоростные характеристики, времена регистрации волн, частотные особенности. При распространении сейсмической волны в однородной среде частицы среды совершают колебательные движения: при распространении **P**-волны частицы среды колеблются линейно в плоскости распространения волны вдоль направления ее движения (волны сжатия и растяжения), а при распространении **S**-волны частицы среды колеблются перпендикулярно направлению движения волны (волны сдвига). В жидкой и газообразной среде **S**-волны не распространяются. Скорости распространения **S**-волн в среде всегда

меньше скорости распространения **P**-волн в тех же соях. Соответственно времена регистрации **S**-волн всегда больше по сравнению с временами прихода **P**-волн. Как правило, **S**-волны имеют примерно в 1,5-2 раза более низкую частоту по сравнению с **P**-волнами, что справедливо для наземных сейсмических многоволновых работ [Аки, 1983, Многоволновые сейсмические..., 1987].

Принципиальная модель образования **S**-волн при сейсморазведочных работах на акваториях приведена на рисунке 2.2а и вытекает из принципа Гюйгенса, по которому каждую точку фронта волны можно рассматривать как элементарный источник колебаний.

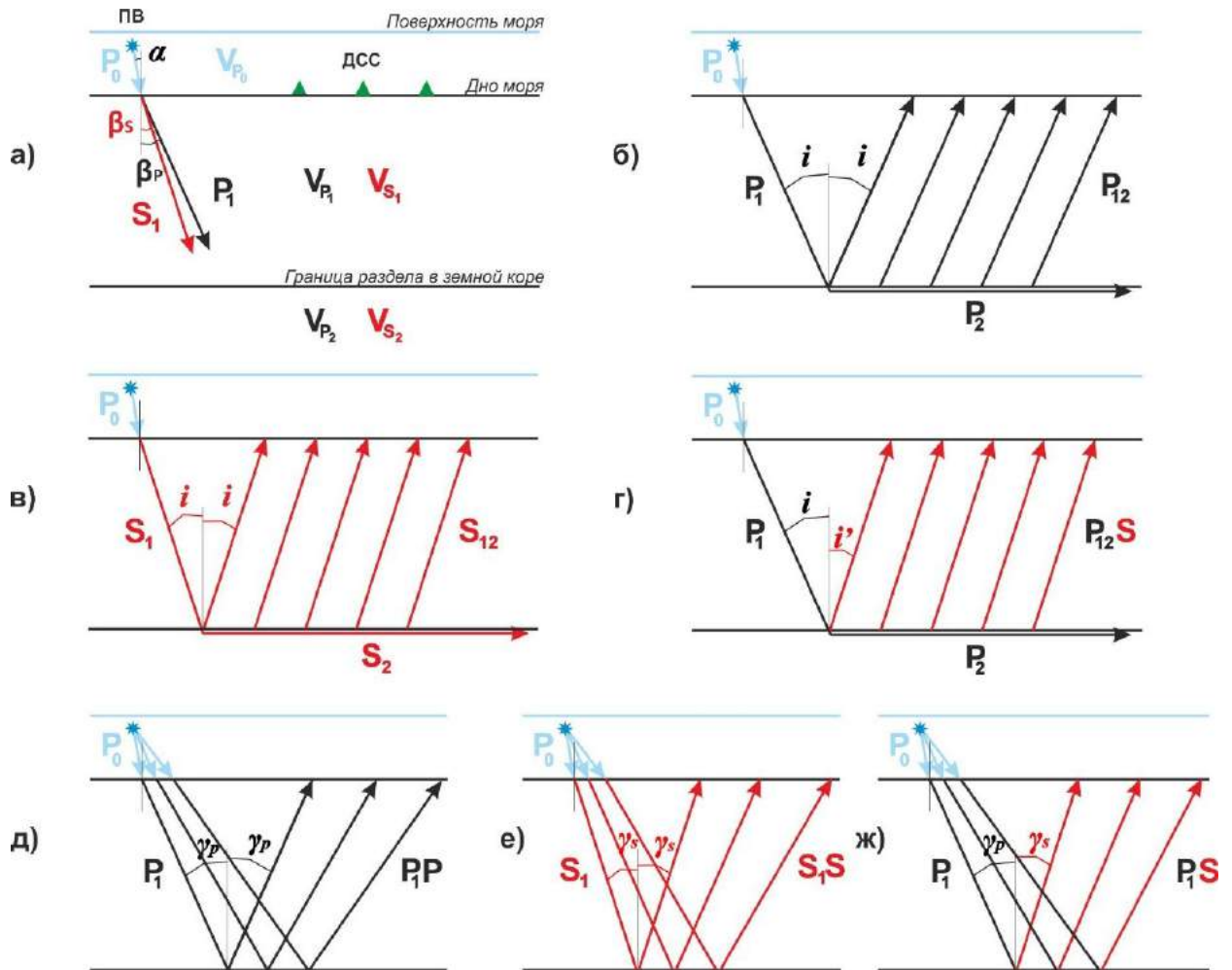


Рисунок 2.2 – Принципиальная модель образования **S**-волн при сейсморазведочных работах на акваториях (а) и лучевые схемы основных волн (б-ж) [Разработать рекомендации..., 2015]

Примечание – Лучевые схемы: головной **P₁₂**-волны (б), головной **S₁₂**-волны (в), обменной головной **P₁₂S**-волны (г), отраженной волны **P₁P**-волны (д), отраженной **S₁S**-волны (е), обменной отраженной **P₁S**-волны (ж) (ПВ – пункт возбуждения; ДСС – донные сейсмические станции).

Согласно этому принципу, фронт продольной волны, распространяющейся из источника в водном слое, после достижения дна моря может рассматриваться как источник

волн, распространяющихся в твердой среде, где могут присутствовать как **P**-, так и **S**-волны. Строго говоря, все поперечные волны в морской сейсморазведке должны рассматриваться как обменные, так как начальную часть пути от источника, расположенного в воде, распространяются как **P**-волны.

В настоящее время среди исследователей нет единой точки зрения на то, где происходит первый **P-S** обмен, и могут ли быть динамически выраженными на записях волны, претерпевшие несколько актов обмена.

Одни исследователи считают, что первый **P-S** обмен происходит на дне моря (точнее в достаточно тонком с точки зрения длины волны придонном слое) [Mjelde et al., 2002; Breivik et al., 2003 и др.]. Другие полагают, что обменной может быть только граница осадочного чехла и консолидированного фундамента, являющаяся наиболее контрастной границей раздела в твердой среде [Chung et al., 1990; Eccles et al., 2009 и др.]. Третьи придерживаются точки зрения, что динамически выразительными могут быть обменные волны, претерпевшие лишь один акт обмена, причем, как правило, на восходящем луче [Duennebier et al., 1987 и др.].

Для того чтобы обоснованно ответить на эти вопросы, а также изучить кинематические и динамические характеристики основных классов и типов волн, генерируемых в водном слое, распространяющихся в твердой среде и регистрируемых на ее поверхности, необходимо смоделировать данный процесс.

2.2. Математическое конечно-разностное моделирование волновых волей при морских исследованиях для типовых моделей земной коры и верхов мантии

Наиболее доступным и достаточно надежным способом моделирования распространения упругих волн является математическое моделирование, основанное на конечно-разностном решении волнового уравнения [Kelly et al., 1976]. Суть метода конечных разностей состоит в следующем. Область непрерывного изменения аргументов, заменяется дискретным множеством точек (узлов), которое называется сеткой или решёткой. Вместо функции непрерывного аргумента рассматриваются функции дискретного аргумента, определённые в узлах сетки и называемые сеточными функциями.

Производные, входящие в дифференциальное уравнение и граничные условия, заменяются разностными производными, при этом краевая задача для дифференциального уравнения заменяется системой линейных или нелинейных алгебраических уравнений (сеточных или разностных уравнений). Такие системы часто называют разностными схемами. Процесс вычисления синтетической сейсмограммы использует формулу волнового уравнения распространения упругих колебаний по дискретным шагам Δt на базе

дифференцирования Δx . Метод является более времяемким и ресурсоемким по сравнению с лучевым синтетическим моделированием [Cerveny et al, 1977], однако позволяет помимо годографов рассчитывать сейсмограммы вертикальных и горизонтальных компонент, наиболее приближенные к реальным зарегистрированным сейсмическим данным, и что особенно важно, дает возможность получать «мгновенные снимки» распространяющихся фронтов волн, которые используются для анализа сложных волновых полей [Разработать рекомендации..., 2015].

Одной из программ, позволяющей моделировать процесс распространения упругих волн, иллюстрируя его мгновенными снимками в различные интервалы времени, а также рассчитывающей теоретические сейсмограммы вертикальной и горизонтальной компонент в двумерной среде, является программа Tesserat 2D (Tesserat Technologies Inc, Канада, www.tesserat-geo.com) [Kostyukevich, 2000; 2008, 2010]. Эта программа предназначена для полномасштабного синтетического конечно-разностного моделирования распространения колебаний в неоднородной среде. Данный пакет позволяет моделировать все типы волн для моделей сложных сейсмогеологических разрезов, включая комбинацию твердых и жидких сред.

На рисунках 2.3-2.4 приведены рассчитанные с использованием программы Tesserat 2D фронты и годографы волн, возникающих на границе жидкой и твердой сред, имитирующей дно моря. Как можно видеть из рисунка 2.3, прямая волна в водном слое (P_0), достигнув дна моря, не только возвращается на поверхность в виде отраженной волны (P_0P), но и образует в твердой среде две проходящие волны разных типов (P_0P_1 и P_0S_1).

При падении волны на границу под углами, больше критического, эти волны формируют следующие волновые фронты (Рисунок 2.4): 1. фронт головной продольной волны ($P_0P_1P_0$), которая на больших удалениях от источника колебаний сменяет в первых вступлениях прямую P_0 -волну; 2. фронт кратной головной продольной волны ($p_0P_0P_1P_0$), который регистрируется с момента времени $t = 5600$ с на удалениях источник-приемник более 6500 м; 3. фронт обменной волны ($P_0P_1S_1$), которая распространяется внутрь твердой среды и не образует годографа на поверхности [Разработать рекомендации..., 2015].

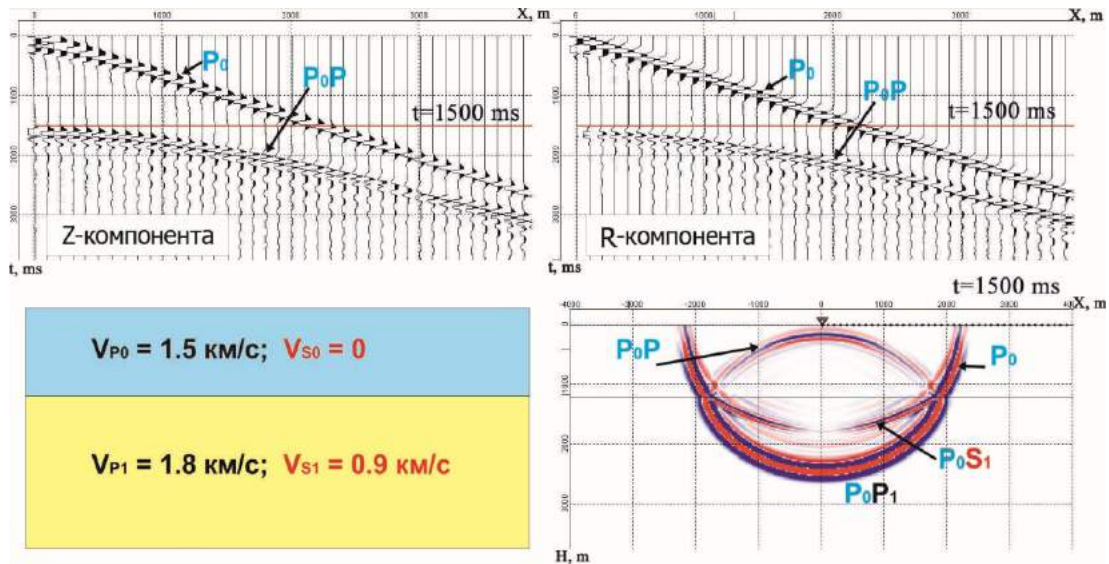


Рисунок 2.3 – Конечно-разностное моделирование в программе Tesseral 2D для упругой изотропной модели среды с одной границей раздела (верхний слой – водный) для удалений вблизи источника сейсмических колебаний

Примечание – Синтетические сейсмограммы Z- и R-компонент (вверху) и мгновенный снимок распространения фронтов сейсмических волн в момент времени $t = 1500$ мс (внизу справа).

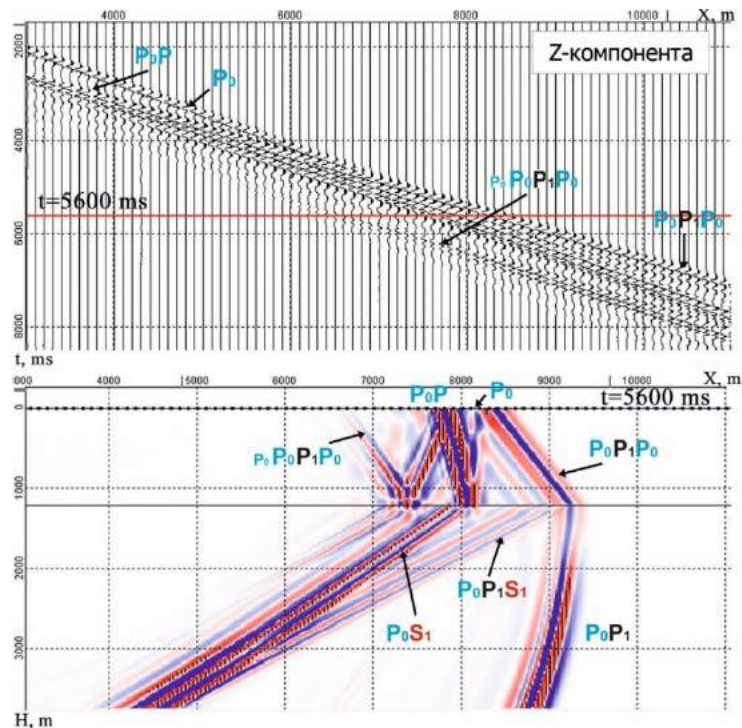


Рисунок 2.4 – Результаты конечно-разностного моделирования в программе Tesseral 2D упругой изотропной модели среды с одной границей раздела (верхний слой – водный) для удалений от источника 3-11 км

Примечание – Синтетическая сейсмограмма Z-компоненты (вверху) и мгновенный снимок распространения фронтов сейсмических волн в момент времени $t = 5600$ мс (внизу).

Для изучения особенностей волновых полей, формирующихся в типичных для морских сейсмических исследований ситуациях, было выполнено моделирование с использованием программы Tesserat 2D для ряда моделей земной коры и верхов мантии акваторий.

Главной задачей, поставленной перед моделированием, было определение основных границ обмена в земной коре и оценка возможности регистрации волн, претерпевших несколько актов обмена. Ниже приводятся результаты моделирования для *принципиальной модели земной коры и верхов мантии*, полученной в результате обобщения опубликованных моделей, построенных при морских многоволновых сейсмических исследованиях на шельфе Арктических и Дальневосточных морей [Кашубин и др., 2011; 2013а; Разработать рекомендации..., 2015].

Принципиальная модель земной коры и верхов мантии, использованная для полноволнового синтетического конечно-разностного моделирования, приведена на рисунке 2.5. Модель состоит из следующих слоев: водный слой мощностью 2 км ($V_p = 1.5$ км/с; $V_s = 0$); осадочный чехол мощностью 6 км, представленный для простоты слоем с градиентным нарастанием скоростей ($V_p = 1.8 \div 4.5$ км/с, $V_s = 0.88 \div 2.60$ км/с, $V_p/V_s = 2.0$); консолидированная кора мощностью 10 км, также представленная единым слоем с градиентным нарастанием скоростей ($V_p = 5.8 \div 6.9$ км/с, $V_s = 3.35 \div 4.00$ км/с $V_p/V_s = 1.73$). Подошва земной коры (граница Мохоровича, М) с граничными скоростями $V_p = 8.0$ км/с, $V_s = 4.60$ км/с находится на глубине 18 км.

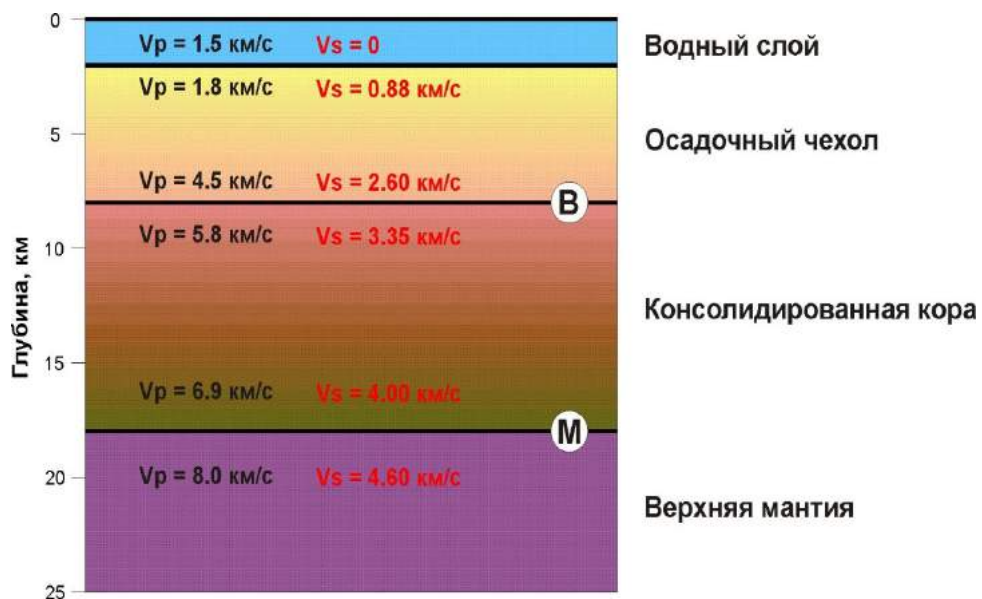


Рисунок 2.5 – Принципиальная модель земной коры и верхов мантии акваторий

Примечание – Обозначения границ: В – поверхность консолидированной коры, М – поверхность верхов мантии (граница Мохоровича).

При моделировании использовалась упругая изотропная горизонтально-слоистая среда, включающая пять слоев. Размер ячейки расчетной сетки установлен по результатам ряда численных экспериментов и равен 17 м. Приемная расстановка располагалась на дне моря от 0 до 100 км по линии наблюдения, шаг между приемниками 500 м. Установлен один точечный источник, находящийся на глубине 35 м в водном слое, который возбуждал сейсмический сигнал (симметричный сигнал Rikker) с частотой 5 Гц. Заданы следующие параметры: длина сейсмической записи 40 с, шаг дискретизации по времени задан 8 мс, длина волны 300 м, минимальная скорость продольных волн 1500 м/с. В качестве граничных условий для устранения эффекта боковых отражений были увеличены расстояния от приемной расстановки до края модели по оси абсцисс (линия наблюдения, км) от -100 км до 300 км, по оси ординат (глубина, км) 40 км. Сейсмические скорости в последнем слое модели (ниже границы М на глубине 20 км) были заданы с обратным градиентом для устранения эффекта появления отраженной волны от нижнего края модели.

В результате конечно-разностного моделирования для этой модели при расположении источника колебаний в водном слое и регистрации на дне моря получены сейсмические записи вертикальной (Z-) и горизонтальной (R-) компонент.

На полученные в результате конечно-разностного полноволнового моделирования сейсмические записи наложены теоретические годографы различных волн, рассчитанные путем лучевого моделирования с использованием программы SeisWide (<http://seismic.ocean.dal.ca/~seismic/utilities/seiswide/index.php>) [Zelt, 1988, 1992, 1999; Chian, 1994].

Ниже на рисунках представлены сейсмограммы с рассчитанными годографами волн и приведены соответствующие этим годографам лучевые схемы. На лучевых схемах для простоты лучи изображены без учета их кривизны и проникания в слоях с градиентным нарастанием скоростей, за исключением лучевых схем 1, 1', 1'', 19, 20 [Разработать рекомендации..., 2015].

Сейсмограмма Z-компоненты, приведенная на рисунке 2.6, демонстрирует интенсивное поле кратных волн, связанных с водным слоем. Эти волны регистрируются в последующих вступлениях, повторяя кинематику первичных волн, и являются наиболее интенсивными помехами при морских сейсмических исследованиях. При обработке реальных сейсмограмм делается все возможное, чтобы исключить или ослабить влияние данных волн. Поскольку свойства водного слоя и глубина моря известны достаточно хорошо, часто это удается сделать с использованием обрабатывающих процедур, например, такой как предсказывающая (прогнозирующая) деконволюция [Сильвия, 1983]. При расчетах программа Tesserall 2D позволяет не моделировать поле кратных волн,

связанных с водным слоем, чтобы не перегружать синтетические сейсмограммы заведомыми помехами.

Таким образом, на полученных при конечно-разностном моделировании сейсмограммах Z- и R-компонент выделяются следующие основные волны (Рисунки 2.6-2.7). Годографы волн, распространяющихся в осадочном слое, показаны желтым цветом, скользящие вдоль поверхности консолидированной коры – светло-коричневым цветом, а волны, связанные с подошвой земной коры и верхов мантии – синим и темно-синим цветами, соответственно.

Прямая волна в водном слое (P_0) (годограф показан светло-голубым цветом) – интенсивная; незначительно затухает с удалением; наблюдается как на Z-, так и на R-компонентах в первых и последующих вступлениях; характеризуется постоянной кажущейся скоростью, соответствующей скорости продольных волн в воде (1.50 км/с). Далее в работе при обозначении обменных и поперечных волн (на самом деле обменных волн, прошедших весь путь в геологической среде как поперечные) префикс P_0 опущен.

Рефрагированная продольная волна в осадочном слое (P_{sed}) (лучевая схема 1, годограф показан желтым цветом) – достаточно интенсивная до удалений порядка 20 км; интервал ее прослеживания ограничивается точкой выхода конечного луча; она наблюдается как на Z-, так и на R-компонентах в первых вступлениях. Ее кажущаяся скорость нарастает с удалением в соответствии со значениями скоростей продольных волн в осадочном слое. Поперечный аналог для данной модели, в которой скорость поперечных волн в кровле осадочного слоя меньше скорости продольных волн в воде, практически не выделяется (лучевая схема б).

Отраженные продольные (P_{VP}) и поперечные (S_{VS}) волны от подошвы осадочного чехла (лучевые схемы 2 и 7, годографы показаны желтым цветом) – достаточно интенсивные и прослеживаются до удалений, ограниченных точкой выхода конечного луча; продольные волны наблюдаются практически только на Z-компоненте; поперечные волны лучше проявлены на R-компоненте, но имеют и заметную вертикальную составляющую.

Головные (рефрагированные) продольные (P_g) и поперечные (S_g) волны, распространяющиеся вдоль поверхности фундамента (поверхности консолидированной коры) (лучевые схемы 3 и 8, годографы показаны светло-коричневым цветом) – достаточно интенсивные, слабо затухающие с удалением; продольные волны лучше проявлены на Z-компоненте, но имеют заметную горизонтальную составляющую. Поперечные волны, напротив, лучше проявлены на R-компоненте, но имеют и вертикальную составляющую.

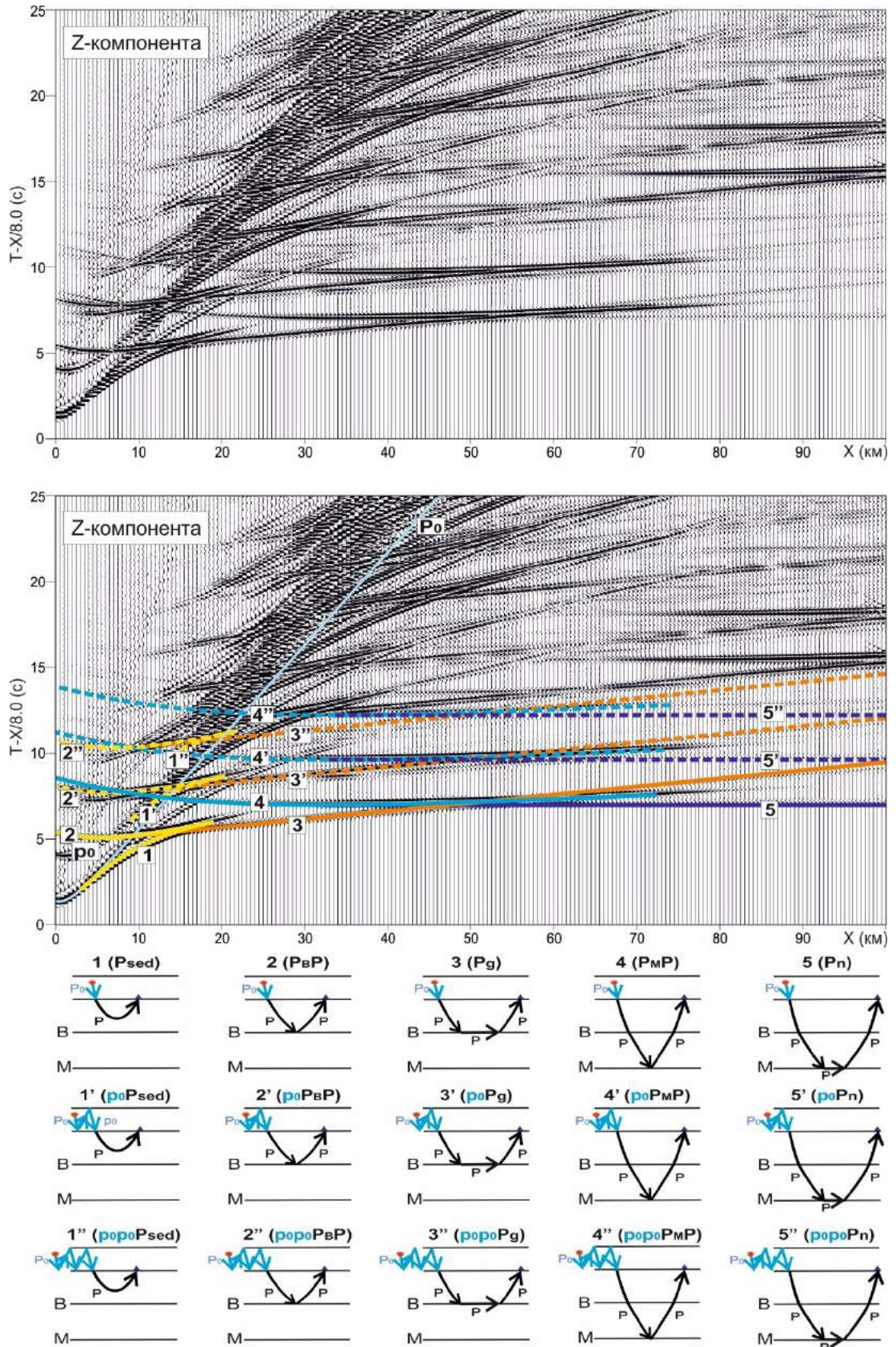


Рисунок 2.6 – Синтетическая сейсмограмма Z-компоненты (вверху), расчетные годографы основных продольных волн, распространяющихся в модели земной коры, и кратных волн, связанных с водным слоем (в центре), и соответствующие этим годографам лучевые схемы (внизу) для модели, представленной на рисунке 2.5

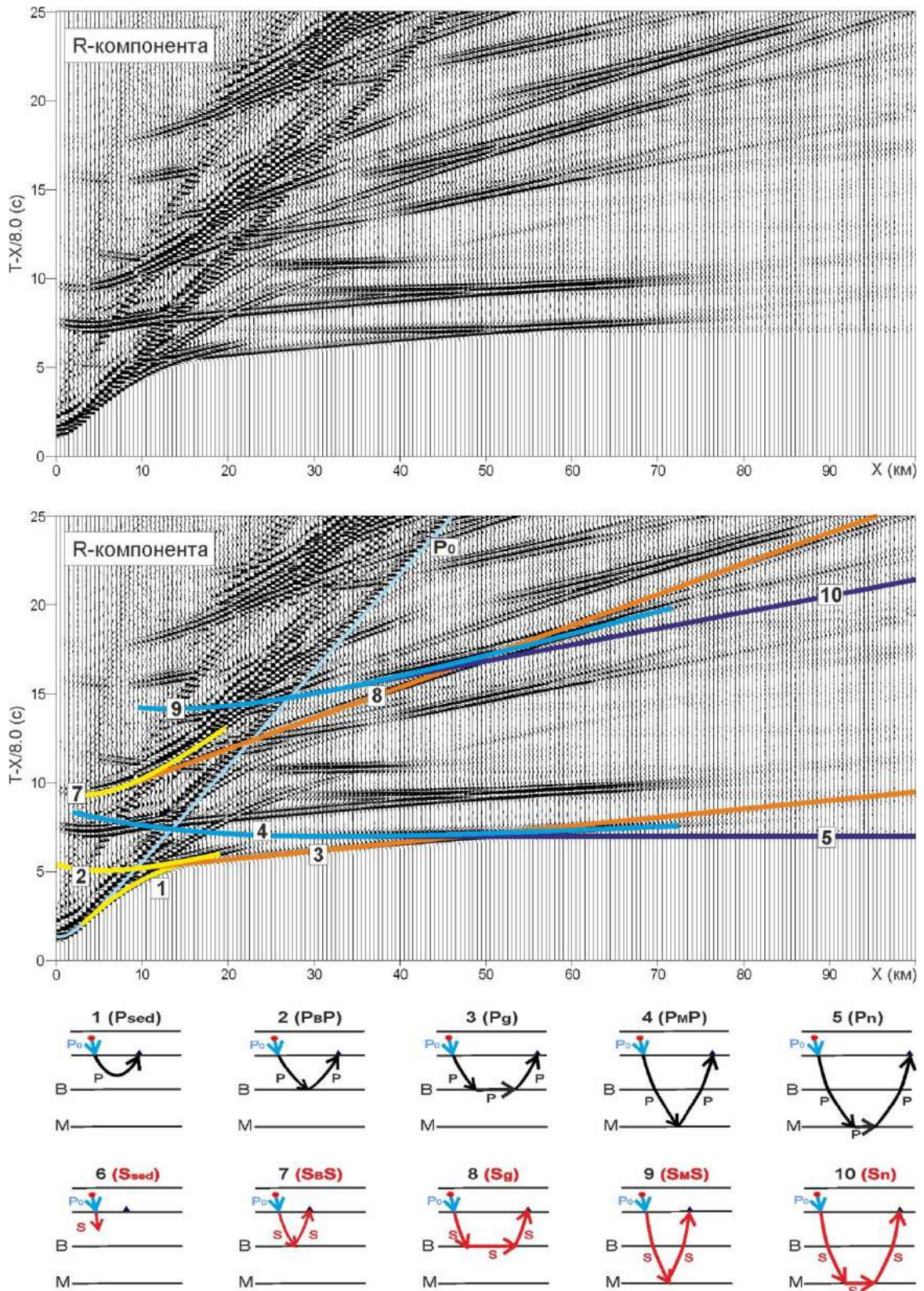


Рисунок 2.7 – Годографы продольных (1-5) и поперечных (7-10) волн на сейсмограмме R-компоненты для принципиальной модели земной коры и соответствующие им лучевые схемы

Примечание – Кратные волны, связанные с поверхностью водного слоя, были отключены при моделировании.

Отраженные продольные ($P_M P$) и поперечные ($S_M S$) волны от подошвы земной коры (границы M) (лучевые схемы 4 и 9, годографы показаны синим цветом) – достаточно интенсивные на больших удалениях (в области закритических отражений); продольные волны лучше проявлены на Z -компоненте, но имеют и горизонтальную составляющую в закритической области.

Поперечные волны от границы M лучше проявлены на R -компоненте, но также в закритической области имеют вертикальную составляющую.

Головные (рефрагированные) продольные (P_n) и поперечные (S_n) волны, распространяющиеся вдоль поверхности верхов мантии (лучевые схемы 5 и 10, годографы показаны темно-синим цветом) – очень низкой интенсивности; продольная волна заметна лишь на Z -компоненте в первых вступлениях, поперечная волна в данной модели совсем не видна.

Годографы основных обменных волн показаны на рисунках 2.8-2.9.

На рисунке 2.8 приведены годографы и соответствующие им лучевые схемы таких пар обменных волн (P_0PS) и (P_0SP), которые образуют одинаковые по кинематике годографы и интерферируют в точке регистрации. Однако, несмотря на одинаковые годографы, между этими волнами имеются два существенных отличия. Первое отличие заключается в том, что волны 11–16 претерпевают лишь один P - S обмен, а волны 11а–16а – два (первый P_0 - S обмен при выходе волны из водного слоя и второй S - P обмен внутри твердой среды). Второе отличие заключается в разном типе поляризации (P или S) волны, приходящей в точку регистрации на дне моря. Как и монотипные преломленные, обменные волны той и другой поляризации могут проявляться как на вертикальной, так и на горизонтальной компонентах.

В нашем случае интенсивность смоделированных обменных волн существенно выше на горизонтальной компоненте, что свидетельствует об их приходе в точку регистрации как S -волн. Следовательно, наиболее интенсивными обменными волнами являются PS -волны, претерпевшие лишь один акт обмена. Заметим также, что в отличие от продольных Pg волн (лучевая схема 3) и поперечных Sg волн (лучевая схема 8), распространяющихся вдоль поверхности фундамента, обменные PSg и SgP волны (лучевые схемы 13 и 13а) не имеют заметной интенсивности. Практически не наблюдаются преломленные волны, претерпевшие обмен на границе Мохоровичича (лучевые схемы 15, 15а и 16, 16а).

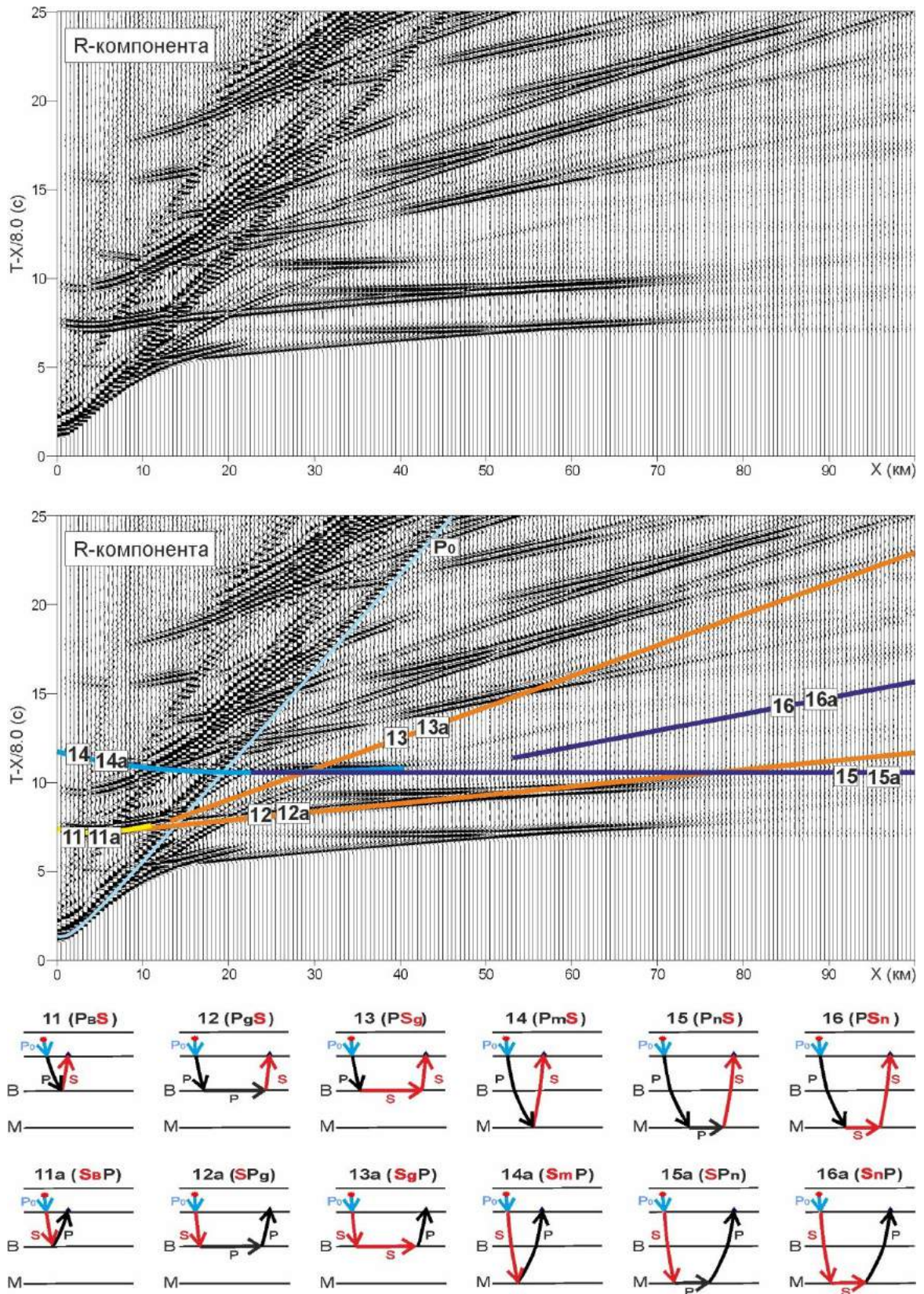


Рисунок 2.8 – Годографы обменных волн, образующих одинаковые по кинематике годографы, для принципиальной модели земной коры и соответствующие им лучевые схемы

Примечание – Кратные волны, связанные с поверхностью водного слоя, были отключены при моделировании.

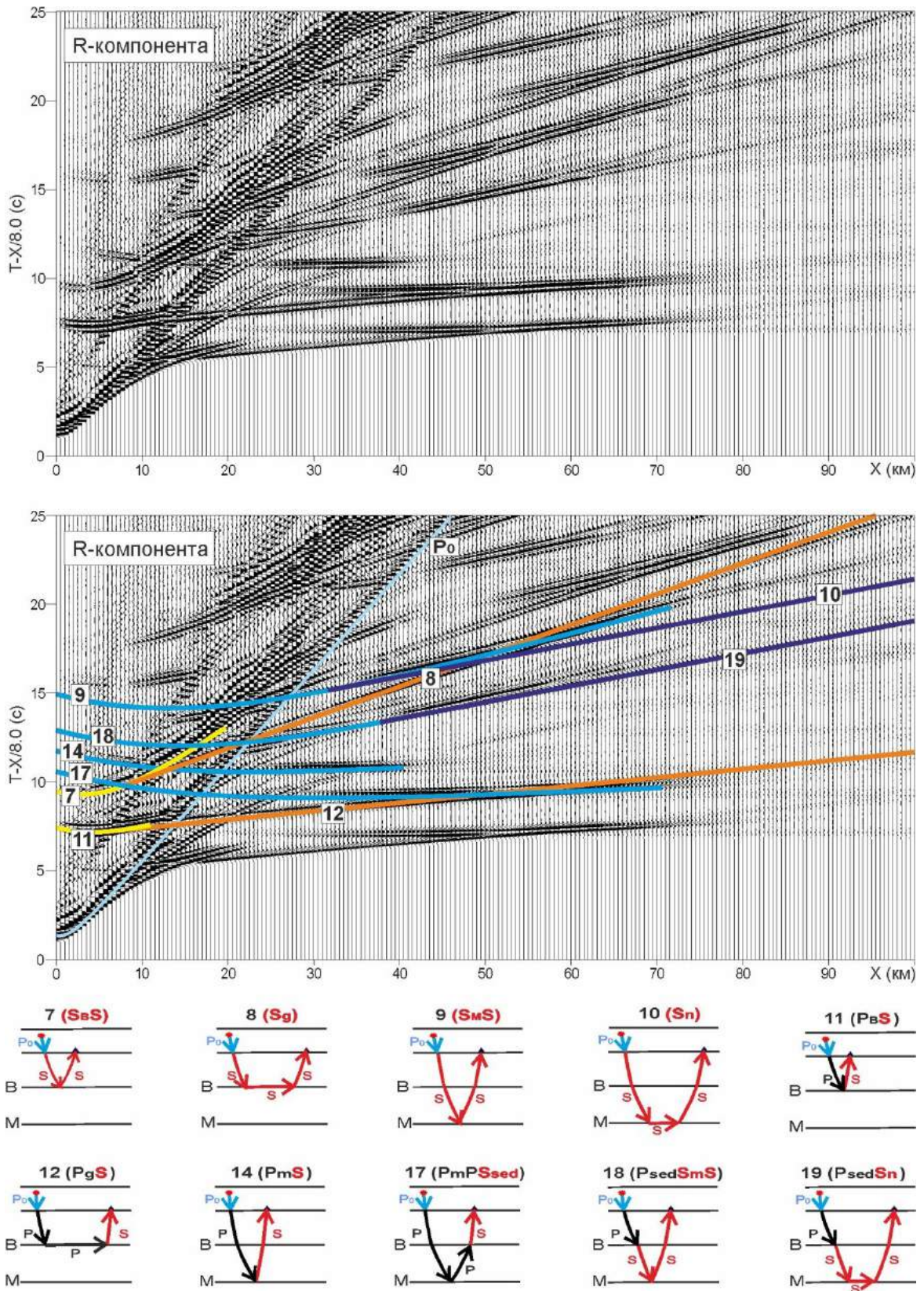


Рисунок 2.9 – Годографы основных (наиболее интенсивных на R-компоненте) поперечных и обменных волн для принципиальной модели земной коры и соответствующие им лучевые схемы

Примечание – Кратные волны, связанные с поверхностью водного слоя, были отключены при моделировании.

На рисунке 2.9 показаны годографы и соответствующие им схемы обмена основных (наиболее интенсивных на горизонтальной компоненте) поперечных и обменных волн для принципиальной модели земной коры и верхов мантии, представленной на рис. 1.4. Кроме уже показанных ранее годографов (лучевые схемы 7–12 и 14), на сейсмограмме горизонтальной компоненты отчетливо фиксируются еще три обменные волны типа **PS**. Это отраженные волны от подошвы земной коры, претерпевающие **P-S** обмен не на самой границе **M**, а на границе осадков и консолидированной коры, на восходящем (схема 17) и падающем (схема 18) лучах. Наблюдается также достаточно интенсивная преломленная волна на границе **M**, образовавшаяся после обмена на границе осадков и консолидированной коры на падающем луче (схема 19). При этом подобная преломленная волна, образовавшаяся после обмена на дне моря (схема 10), почти не видна.

На рисунке 2.10 показаны годографы и лучевые схемы волн, наиболее интенсивных на **Z**-компоненте. Как следует из рисунка это в основном продольные (годографы показаны сплошными линиями) и кратные (годографы показаны пунктиром) волны. Основные границы образования кратных волн те же, что и границы обмена – подошва осадков и подошва земной коры.

В результате анализа синтетических сейсмограмм и расчетных годографов волн для принципиальной модели земной коры и верхов мантии акваторий сделаны следующие выводы:

1. Обменные волны достаточной интенсивности образуются как на падающих, так и на восходящих лучах на всех основных границах модели (дно моря, подошва осадочного чехла и подошва земной коры). Наиболее интенсивными являются **PS**-волны, претерпевшие один акт обмена.

2. На сейсмической записи **R**-компоненты преобладают поперечные и обменные **PS**-волны. Наиболее интенсивными являются поперечные и обменные отраженные волны от подошвы осадочного чехла и подошвы земной коры (от границ **B** и **M**) и преломленные **PS**-волны, скользящие вдоль поверхности консолидированной коры со скоростью продольных волн.

3. На сейсмической записи **Z**-компоненты помимо однократных продольных волн отмечается интенсивное поле кратных волн, связанных не только с дном моря, но и с подошвой осадочного чехла. Обменные волны от границ в земной коре на **Z**-компоненте

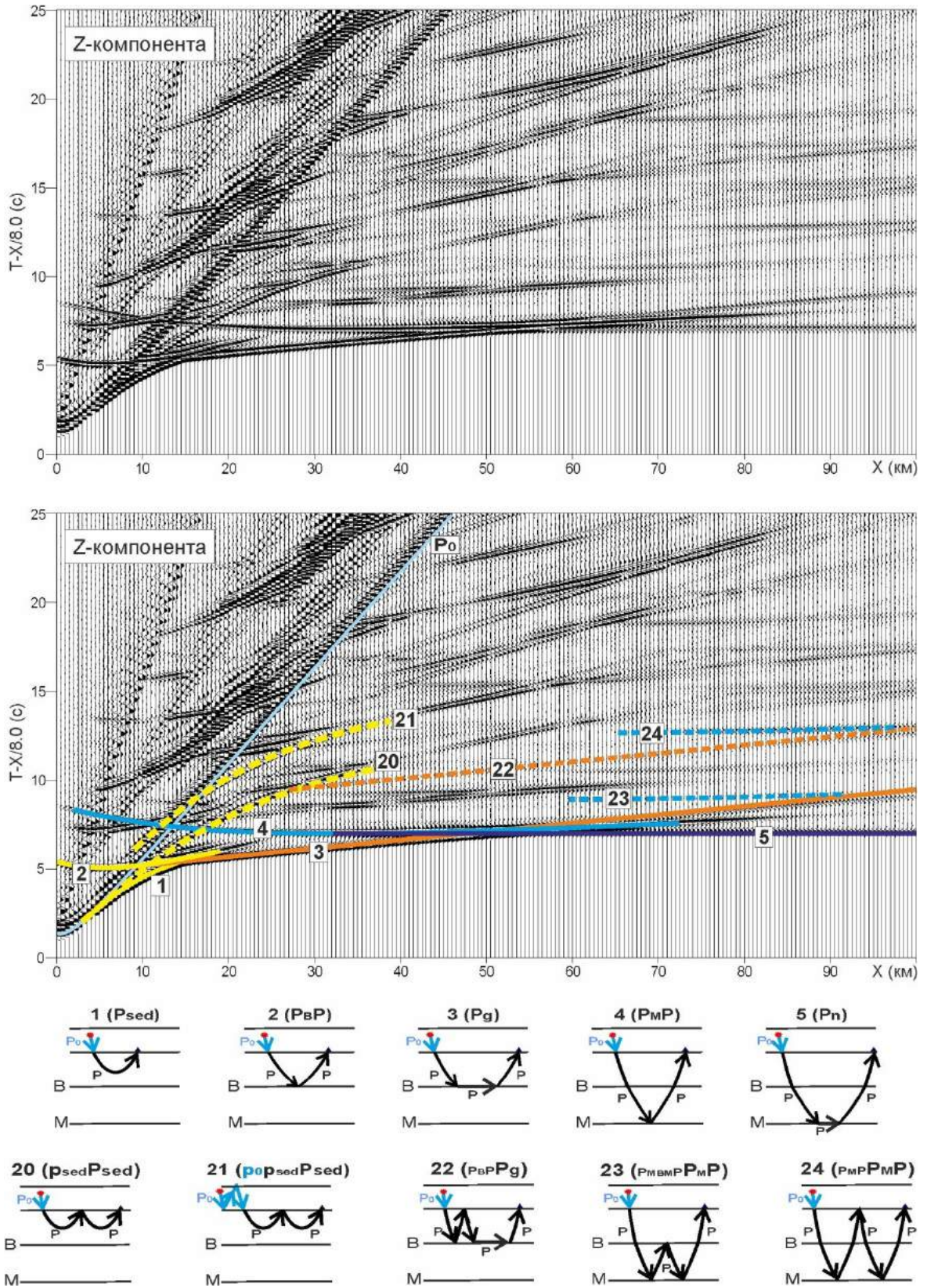


Рисунок 2.10 – Годографы основных (наиболее интенсивных на Z- компоненте) продольных и кратных волн для принципиальной модели земной коры и соответствующие им лучевые схемы

Примечание – Кратные волны, связанные с поверхностью водного слоя, были отключены при моделировании.

динамически выражены слабее, чем на R-компоненте, что может быть связано как с незначительной вертикальной составляющей при подходе к дну моря PS-волн, так и с низкой интенсивностью обменных SP-волн.

Помимо приведенного выше конечно-разностного полноволнового моделирования для принципиальной (упрощенной) модели земной коры акваторий, были выполнены аналогичные расчеты для ряда моделей, построенных на основе опубликованных данных с учетом результатов предыдущих исследований ГСЗ на акваториях (Рисунок 2.11). Для более детального анализа были выбраны четыре модели, отвечающие основным типам земной коры и верхов мантии: (Рисунок 2.12):

- Модель 1 – океаническая кора;
- Модель 2 – континентальная кора шельфовых морей;
- Модель 3 – кора подводных хребтов и поднятий;
- Модель 4 – кора глубоких впадин.

На рисунке 2.13 приведены синтетические сейсмограммы вертикальных и горизонтальных компонент, полученные в результате конечно-разностного моделирования для данных моделей. В волновых полях, представленных на синтетических сейсмограммах, выделяются как общие черты, так и отличительные особенности, характерные для каждой модели земной коры.

Общим для волновых полей всех моделей является:

- на сейсмограммах Z-компонент наблюдается в основном поле продольных и кратных волн, интенсивность поперечных волн намного уступает интенсивности продольных волн;
- на сейсмограммах R-компонент наблюдается интенсивное поле поперечных и обменных волн, причем наиболее динамически выразительным является поле обменных волн. Продольные волны на R-компоненте характеризуются меньшей интенсивностью, по сравнению с теми же волнами на сейсмограммах Z-компонент.

Ниже представлены основные результаты моделирования для выбранных типов земной коры. Для каждой модели приведены синтетические сейсмограммы Z- и R-компонент, рассчитанные конечно-разностным методом. При использовании лучевого моделирования рассчитаны годографы продольных, поперечных и обменных волн, а также приведены соответствующие этим волнам принципиальные схемы образования. Для каждой рассмотренной модели использовалась своя нумерация волн и соответствующих им принципиальных схем образования.

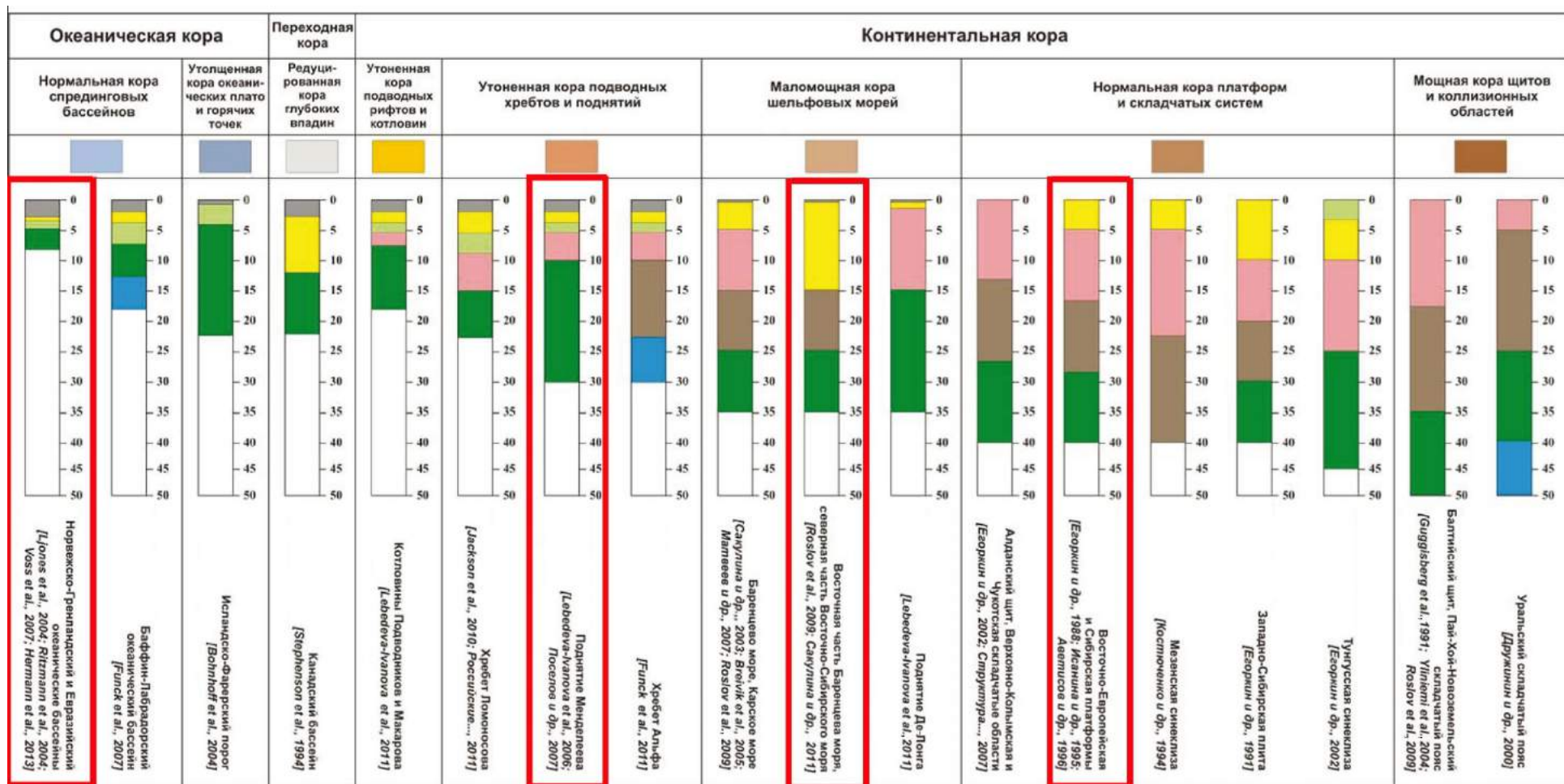


Рисунок 2.11 – Типовые колонки земной коры структур Циркумполярной Арктики, составленные на основе сейсмических профилей в соответствии с обобщенными скоростными параметрами [Кашубин и др., 2013b]

Примечание – Красным выделены колонки земной коры, выбранные для конечно-разностного полноволнового моделирования.

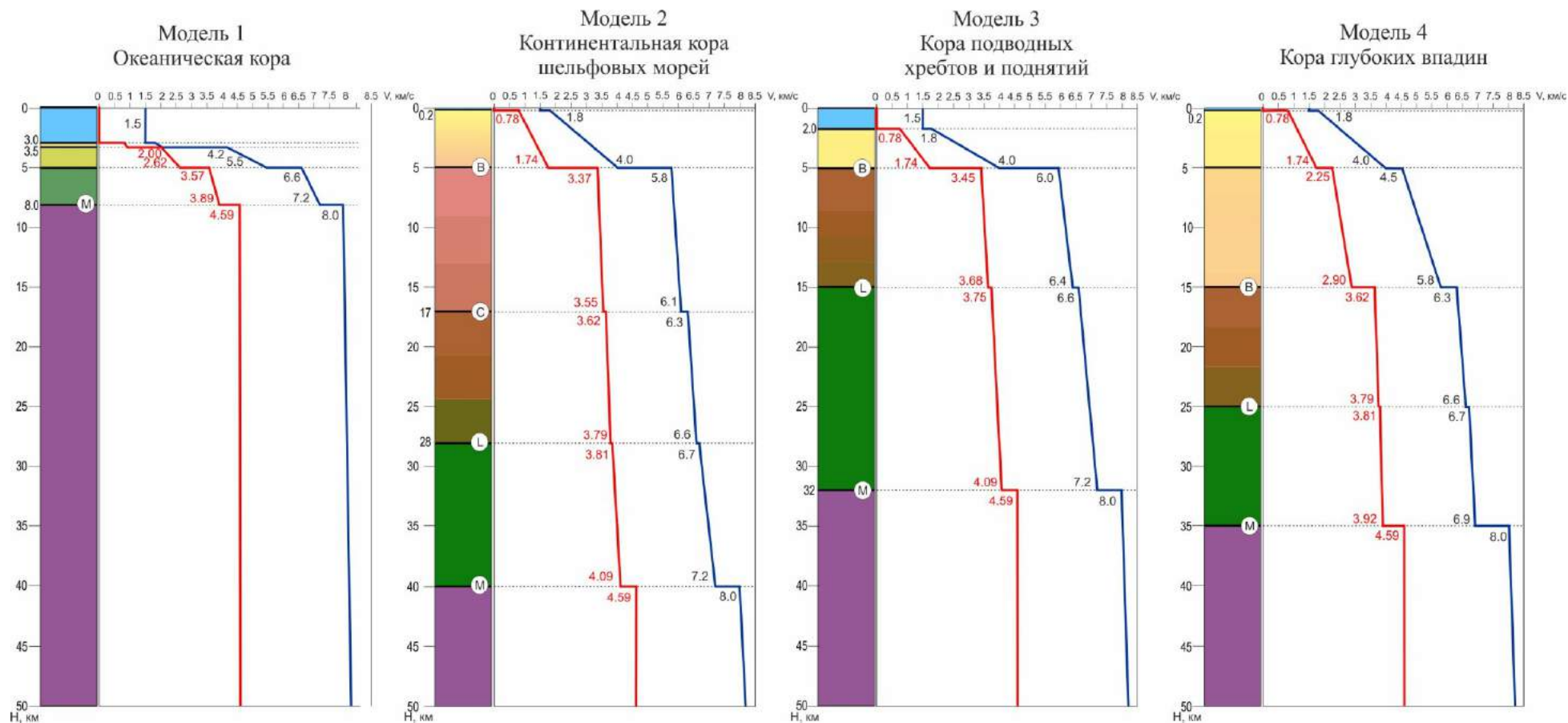


Рисунок 2.12 – Типовые скоростные модели земной коры и верхов мантии, выбранные для конечно-разностного полноволнового моделирования

Примечание – Скорости продольных волн показаны синим цветом, скорости поперечных волн - красным цветом. Обозначения границ: В – поверхность верхней части консолидированной коры; С – поверхность средней части консолидированной коры ; L – поверхность нижней части консолидированной коры; М – подошва земной коры (граница Мохоровича).

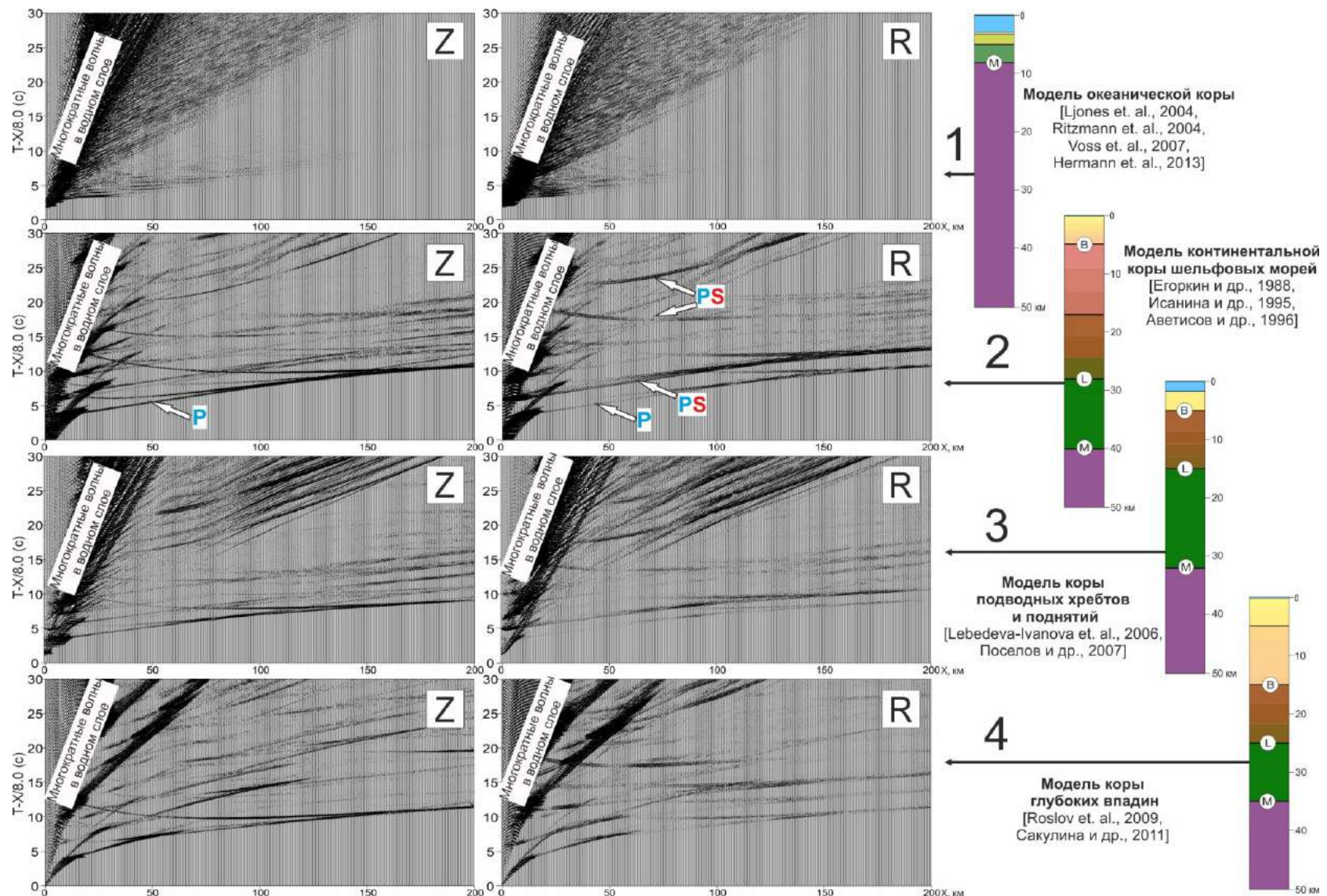


Рисунок 2.13 – Конечно-разностное моделирование волновых волей (Z- и R-компонент) при морских исследованиях ГСЗ для типовых моделей земной коры и верхов мантии

2.2.1. Модель 1 – Океаническая кора

Модель 1 соответствует нормальной океанической коре спрединговых бассейнов, распространенной в Норвежско-Гренландском и Евразийском океанических бассейнах [Ljones et al., 2004, Ritzmann et al., 2004; Hermann et al., 2013]. Максимальная мощность земной коры составляет 5-7 км (иногда до 10-12 км), глубина моря достигает 3 км и более (см. Рисунок 2.12).

При конечно-разностном моделировании были заданы следующие параметры для данного типа земной коры: 1-й слой – слой неуплотненных осадков со скоростями сейсмических волн $V_p = 1.7 \div 1.8$ км/с, $V_s = 0.8 \div 0.85$ км/с ($V_p/V_s = 2.1-2.2$) мощностью до 500 м, 2-й слой (граница 2L) – базальты со скоростями сейсмических волн $V_p = 4.2 \div 5.5$ км/с, $V_s = 2.0 \div 2.62$ км/с ($V_p/V_s = 2.1$) мощностью до 2.5 км; 3-й слой (граница 3L) – перидотиты и габбро со скоростями сейсмических волн $V_p = 6.6 \div 7.2$ км/с, $V_s = 3.6 \div 3.9$ км/с ($V_p/V_s = 1.85$) мощностью до 3 км. Подошва земной коры (граница M) находится на глубине 8 км, скорости сейсмических волн под границей $V_p = 8.0$ км/с, $V_s = 4.6$ км/с ($V_p/V_s = 1.73$) [Кашубин и др., 2013b].

На рисунках 2.14-2.15 показаны теоретические годографы продольных и поперечных волн от границ модели, наложенные на сейсмограммы Z- и R-компонент. Теоретические годографы обменных волн показаны на сейсмограмме R-компоненты на рисунке 2.16.

Продольные волны от подошвы земной коры (от границы M) прослеживаются для удалений источник-приемник порядка 60 км, что обусловлено малой мощностью земной коры. На сейсмограмме Z-компоненты выделяется интенсивная продольная отраженная волна $P_M P$ (схема 5) от границы M, которая регистрируются на временах $t_0 = 4$ с, и продольная головная волна P_n (схема 6). Интенсивными продольными волнами также являются рефрагированная волна (схема 2) от кровли слоя базальтов (границы 2 L) и головная волна (схема 4) от кровли слоя перидотитов и габбро (границы 3L).

На сейсмограмме R-компоненты прослеживаются поперечные отраженная (схема 9) и головная (схема 10) волны от поверхности слоя перидотитов и габбро (граница 3L) и поперечная отраженная волна $S_M S$ (схема 11) от подошвы земной коры (границы M).

Обменные волны на сейсмограмме R-компоненты динамически более выражены, чем продольные и поперечные волны, и прослеживаются на удалениях источник-приемник до 40 км (Рисунок 2.16). В поле обменных волн наибольшую интенсивность имеют обменные отраженные волны от границы M (схемы 17-23). Для этих волн

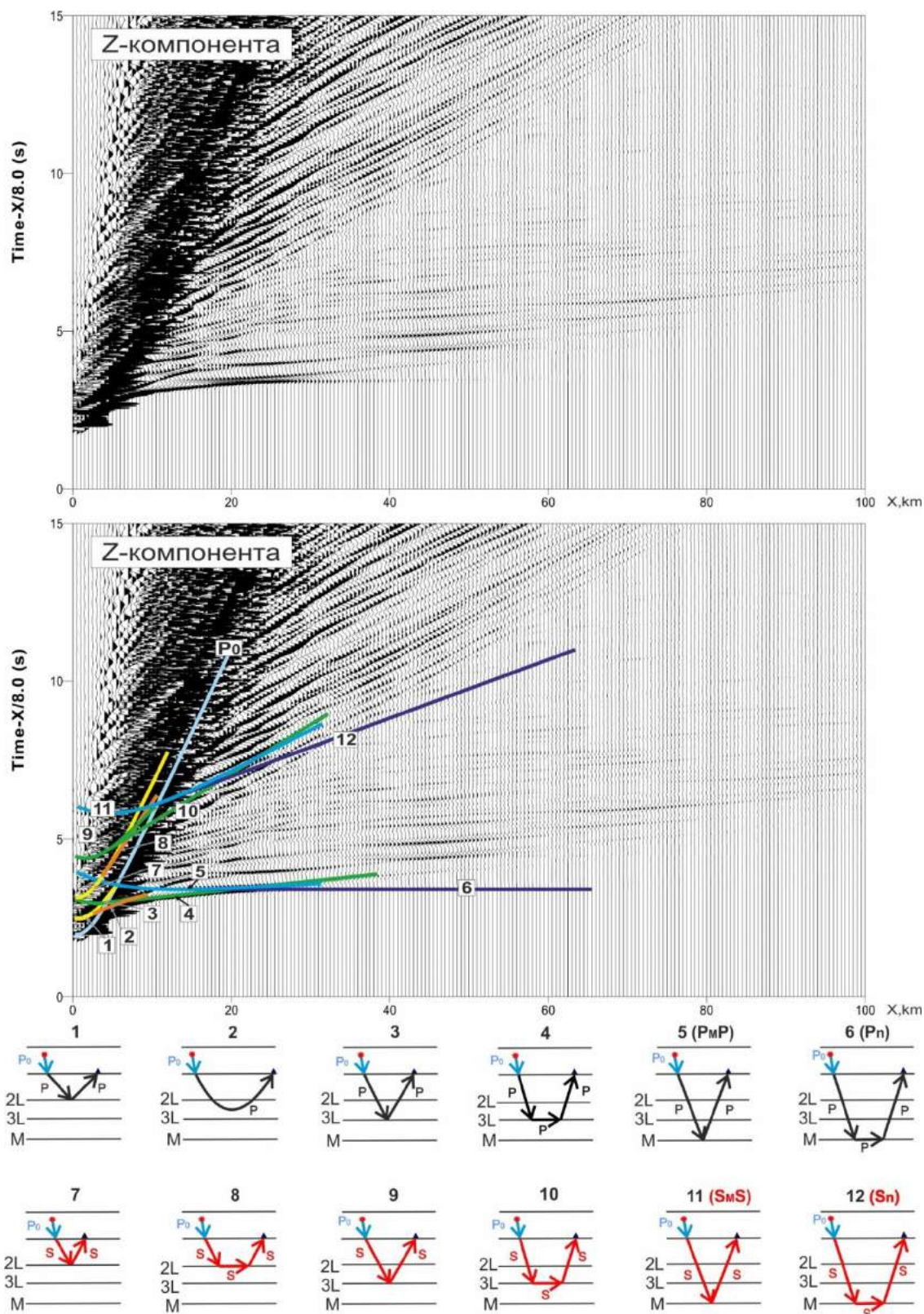


Рисунок 2.14 – Годографы продольных (1-6) и поперечных (7-12) волн на сейсмограмме Z-компоненты для модели 1 (Океаническая кора) и соответствующие им лучевые схемы

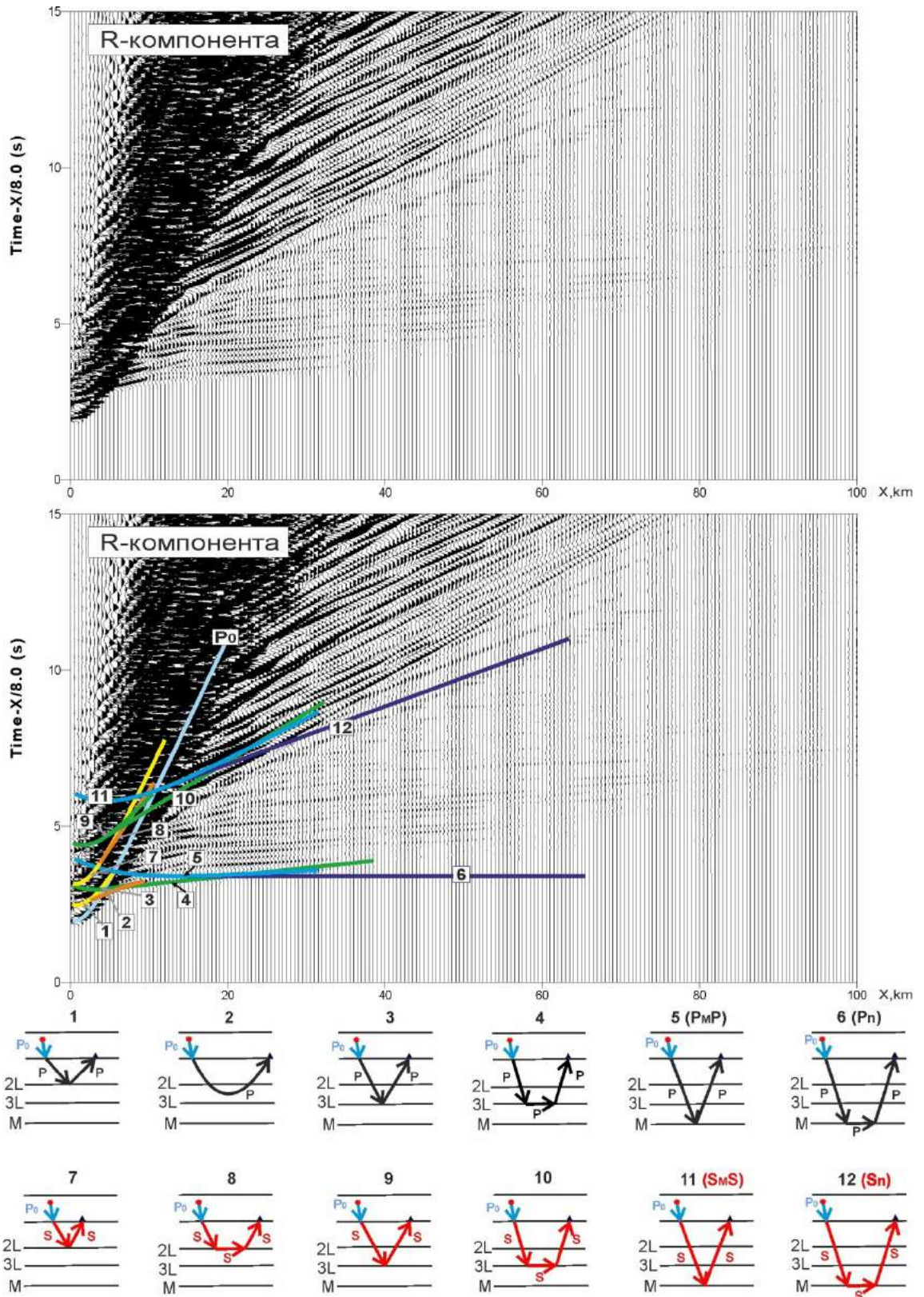


Рисунок 2.15 – Годографы продольных (1-6) и поперечных (7-12) волн на сейсмограмме R-компоненты для модели 1 (Океаническая кора) и соответствующие им лучевые схемы

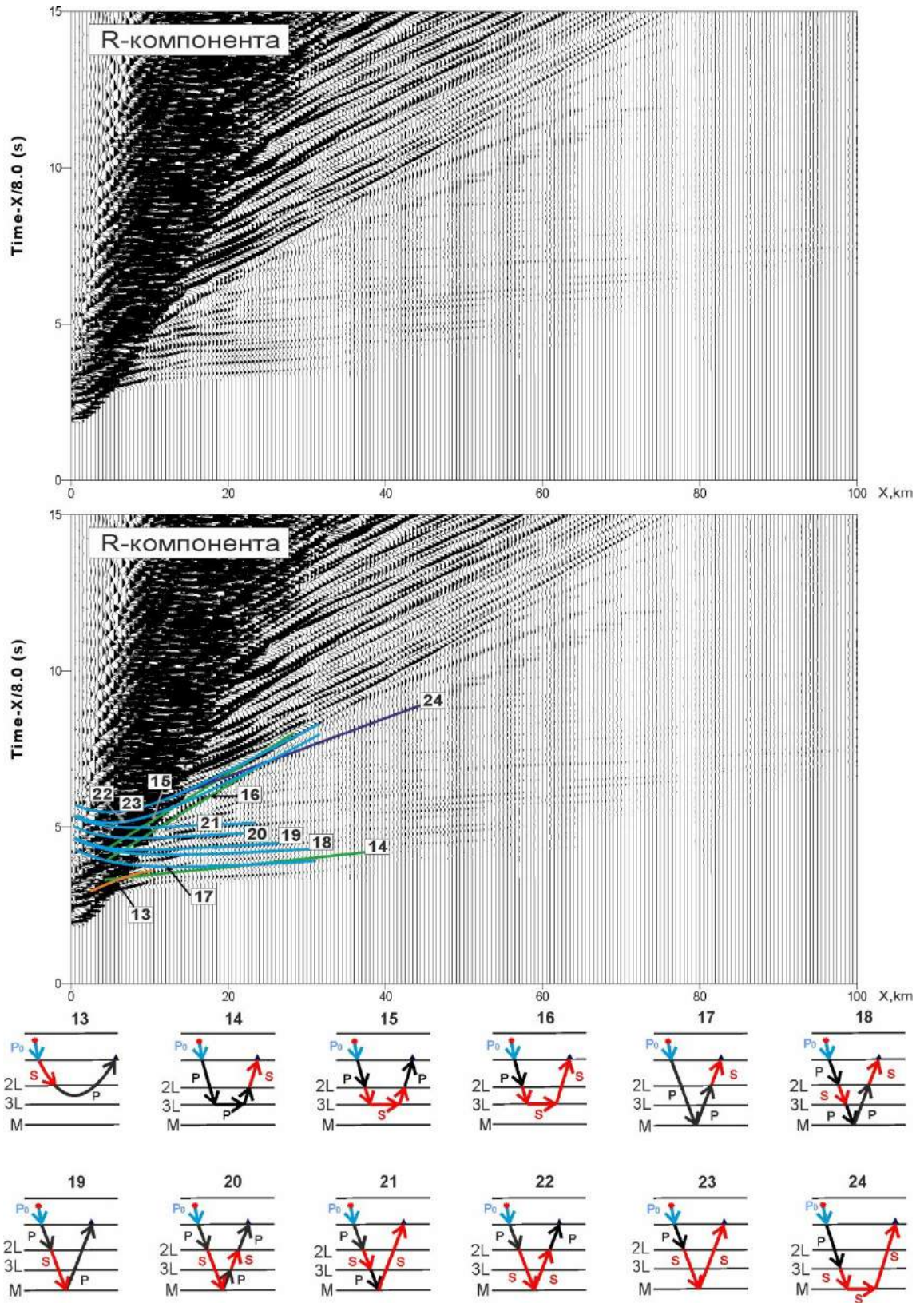


Рисунок 2.16 – Годографы обменных (13-24) волн на сейсмограмме R-компоненты для модели 1 (Океаническая кора) и соответствующие им лучевые схемы

рассчитано несколько актов обмена от 2 до 4 как на падающих, так и на восходящих лучах **P**- или **S**-волн.

Границей обмена чаще всего является кровля слоя базальтов (граница 2L). Среди обменных волн выделяется обменная рефрагированная волна (схема 13) в осадочном слое (граница 2L), прослеживаемая на удалениях источник-приемник от 5 до 10 км, по интенсивности она сопоставима с продольной рефрагированной волной в этом слое.

Обменные головные волны, связанные с кровлей слоя перидотитов и габбро (граница 3L), прослеживаются на удалениях источник-приемник 8-25 км, повторяют кинематику продольной волны (схема 14) и соответствующей поперечной волны (схемы 15, 16). Обменные волны 14 и 16 претерпевают один акт обмена на кровле слоя базальтов (границе 2L), волна 15 совершает двойной обмен на той же границе: на падающих лучах **S**-волн и на восходящих лучах **P**-волн.

2.2.2. Модель 2 – Континентальная кора шельфовых морей

Модель 2 соответствует континентальной коре шельфовых морей, распространенной в шельфовой части Восточно-Европейской и Сибирской платформ [Егоркин и др., 1988; Исанина и др., 1995; Аветисов, 1996]. Земная кора имеет следующее строение (см. Рисунок 2.12): осадочный слой мощностью порядка 5 км, толстая консолидированная кора, включающая верхнюю часть мощностью до 12 км, среднюю часть мощностью 11 км, нижнюю часть мощностью до 12 км. Подошва земной коры находится на глубине 40 км.

При конечно-разностном моделировании были заданы следующие параметры для данного типа земной коры: 1-й слой – осадочный слой со скоростями сейсмических волн $V_p = 1.8 \div 4.0$ км/с, $V_s = 0.78 \div 1.74$ км/с ($V_p/V_s = 2.3$) мощностью 4.8 км, 2-й слой – верхняя часть консолидированной коры (граница В) со скоростями сейсмических волн $V_p = 5.8 \div 6.1$ км/с, $V_s = 3.37 \div 3.55$ км/с ($V_p/V_s = 1.71-1.72$) мощностью 12 км; 3-й слой – средняя часть консолидированной коры (граница С) со скоростями сейсмических волн $V_p = 6.3 \div 6.6$ км/с, $V_s = 3.62 \div 3.79$ км/с ($V_p/V_s = 1.74$) мощностью 11 км; 4-й слой – нижняя кора (граница L) со скоростями сейсмических волн $V_p = 6.7 \div 7.2$ км/с, $V_s = 3.81 \div 4.09$ км/с ($V_p/V_s = 1.76$) мощностью 12 км. Подошва земной коры (граница М) задана на глубине 40 км, скорости сейсмических волн под границей $V_p = 8.0$ км/с, $V_s = 4.6$ км/с ($V_p/V_s = 1.73$) [Кашубин и др., 2013b].

В волновом поле вертикальной Z-компоненты (Рисунок 2.17) выделяются динамически выраженные продольные отраженная **P_BP** (схема 2) и головная **P_g** (схема 3) волны от верхней части консолидированной коры (границы В), чуть менее интенсивные отраженные волны **P_CP** (схемы 4) от границы средней (граница С) и **P_LP** (схема 5) нижней

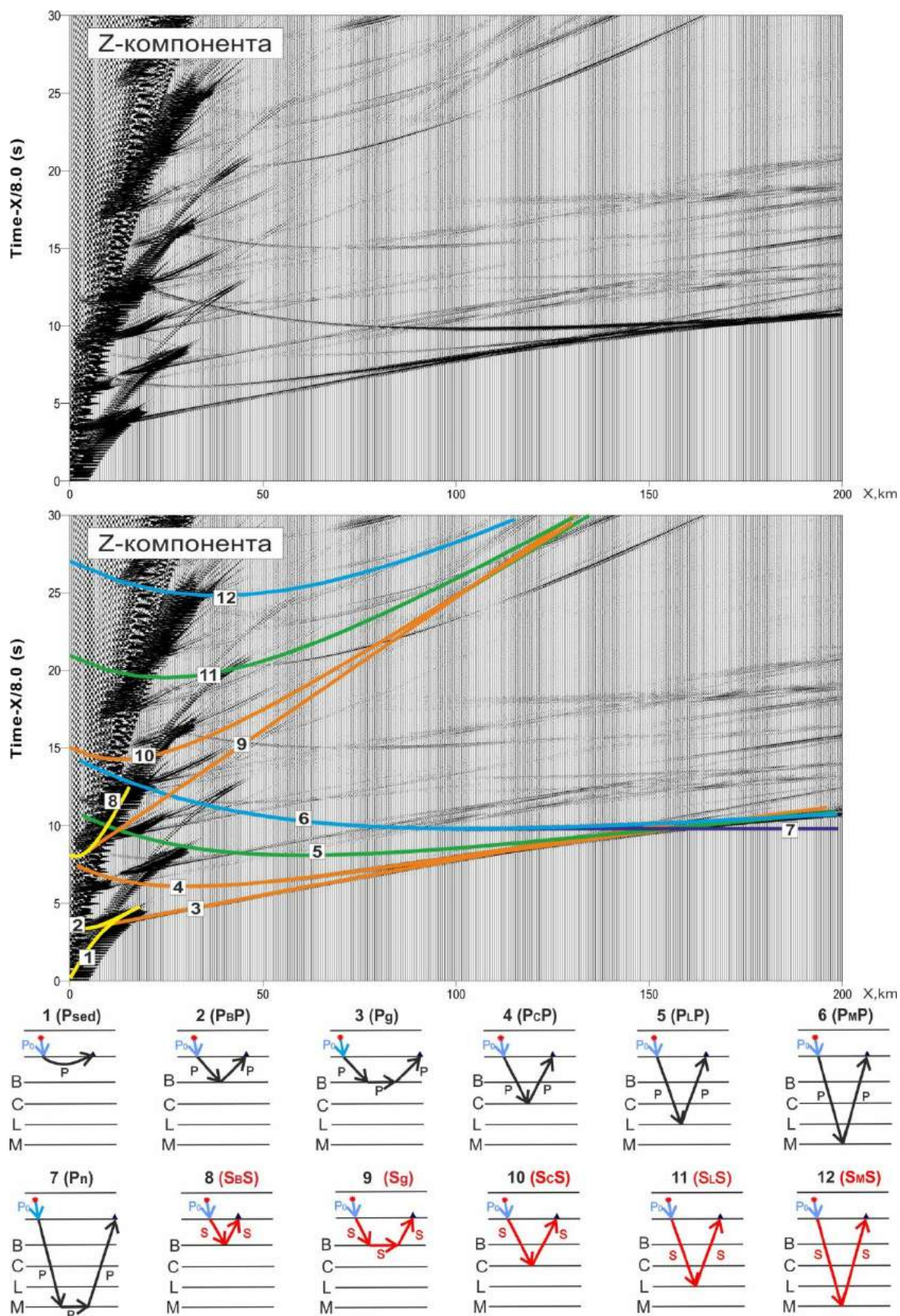


Рисунок 2.17 – Годографы продольных (1-7) и поперечных (8-12) волн на сейсмограмме Z-компоненты для модели 2 (Континентальная кора шельфовых морей) и соответствующие им лучевые схемы

(граница L) частей коры, интенсивная отраженная волны $P_M P$ от границы M (схема 6) с $t_0 = 15$ с.

На сейсмограмме R-компоненты (Рисунок 2.18) продольные волны имеют меньшую интенсивность, по сравнению с продольными волнами Z-компоненты. Поперечные волны динамически выражены слабо, прослеживается лишь поперечная отраженная волна $S_M S$ от границы M (схема 12). Наиболее динамически выраженными являются обменные волны (Рисунок 2.19).

Обменные волны, наиболее динамически выраженные в волновом поле, претерпели один акт обмена типа P-S на границах В и М. Среди них выделяются волны с двумя схемами обмена:

1) волны, претерпевшие обмен на самой границе образования волны (В или М) при выходе луча из границы:

– обменные волны, связанные с границей В: обменная отраженная волна (схема 13) и обменная головная волна (схема 14), повторяющая кинематику продольной головной волны (схема 3),

– обменная отраженная волна от границы М (схема 22);

2) волны от границ С, L и М, претерпевшие акт обмена на вышележащей границе В на проходящем (восходящем или падающем) луче, при этом более интенсивными являются волны с обменом на падающем луче:

– отраженная волна от границы С (схема 16), претерпевшая обмен на границе В на падающем луче S-волны, и обменная головная волна от границы С (схема 17) с обменом на восходящем луче S-волны,

– головная волна от границы L (схема 20), претерпевшая обмен на границе В на восходящем луче S-волны, повторяющая кинематику продольной головной волны (схема 5),

– отраженные волны от границы М, претерпевшие обмен на границе В на восходящем (схема 21) и на падающем (схема 24) луче S-волны.

Кроме рассмотренных выше интенсивных обменных волн на сейсмограммах наблюдаются более слабые обменные отраженные и головные волны от границ в средней и нижней консолидированной коре (границы С и L), характеризующихся небольшим контрастом скоростей сейсмических волн (схемы 15, 18, 19).

Некоторые обменные отраженные волны, которые присутствуют на сейсмограмме R-компоненты, также прослеживаются и на сейсмограмме Z-компоненты (Рисунок 2.20): обменная отраженная волна от границы В (схема 13), обменные отраженные волны от границы М (схемы 23-25), претерпевшие один или два акта обмена. Из них более

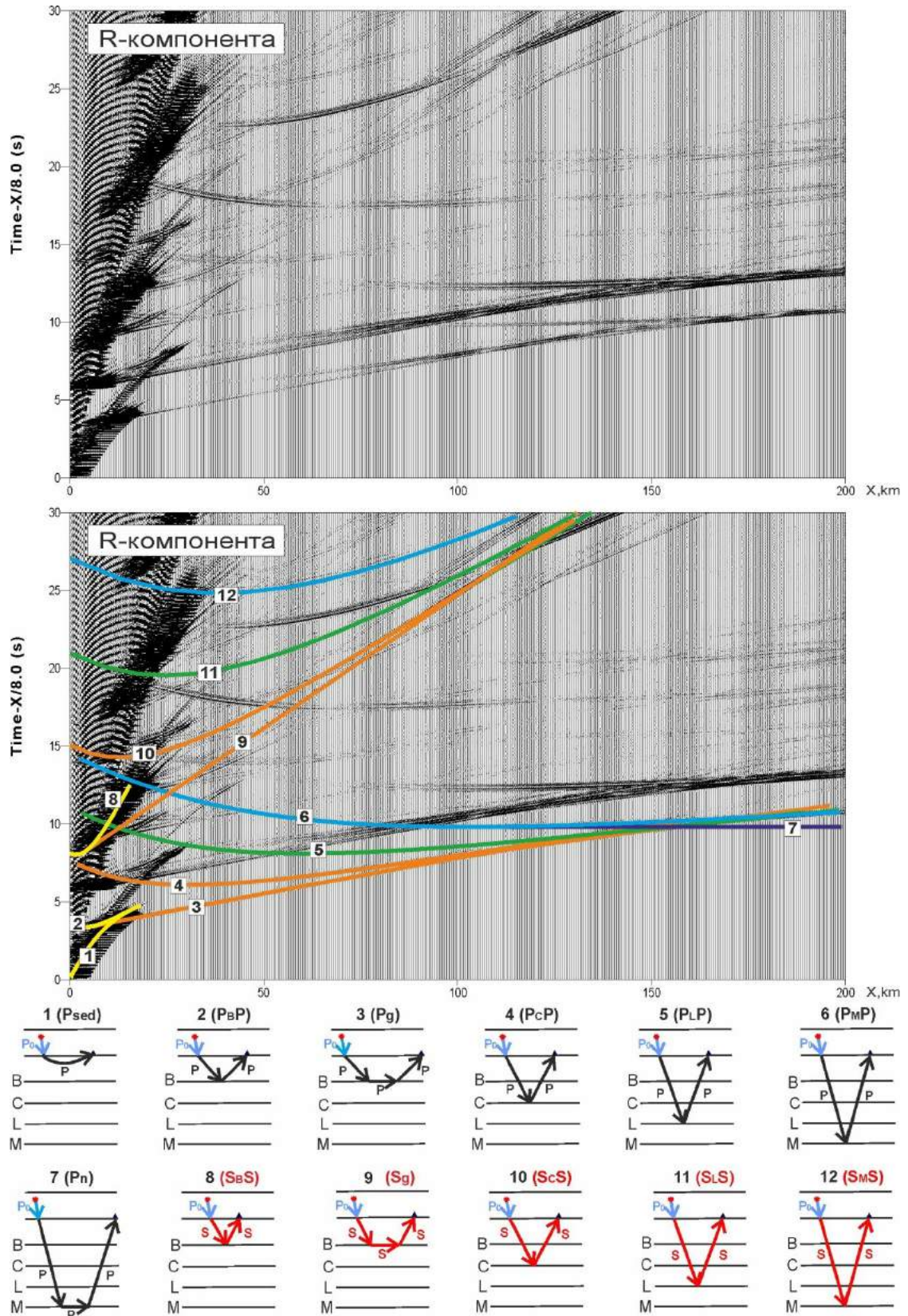


Рисунок 2.18 – Годографы продольных (1-7) и поперечных (8-12) волн на сейсмограмме R-компоненты для модели 2 (Континентальная кора шельфовых морей) и соответствующие им лучевые схемы

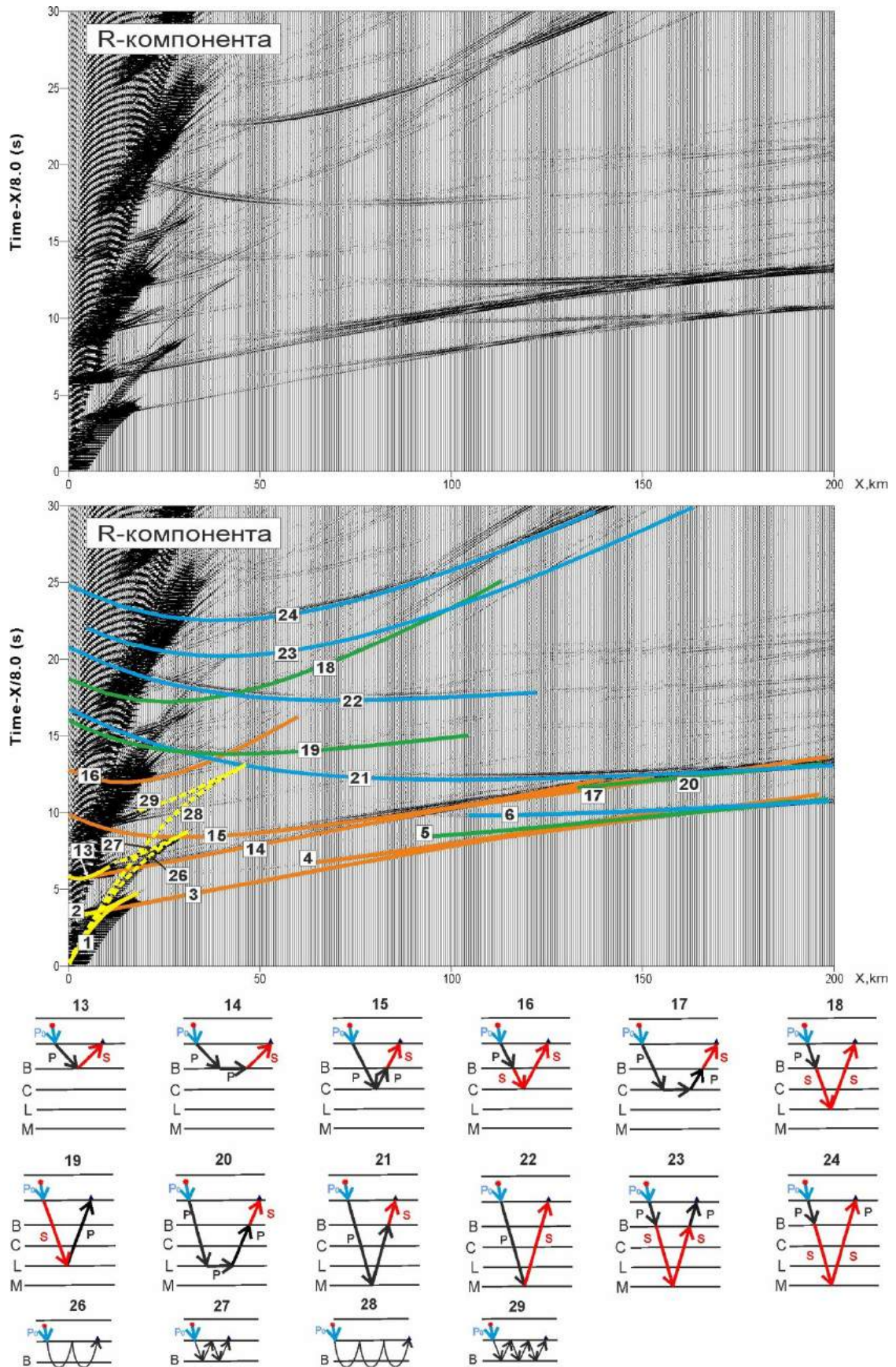


Рисунок 2.19 – Годографы обменных (13-24) и кратных (26-29) волн на сейсмограмме R-компоненты для модели 2 (Континентальная кора шельфовых морей) и соответствующие им лучевые схемы

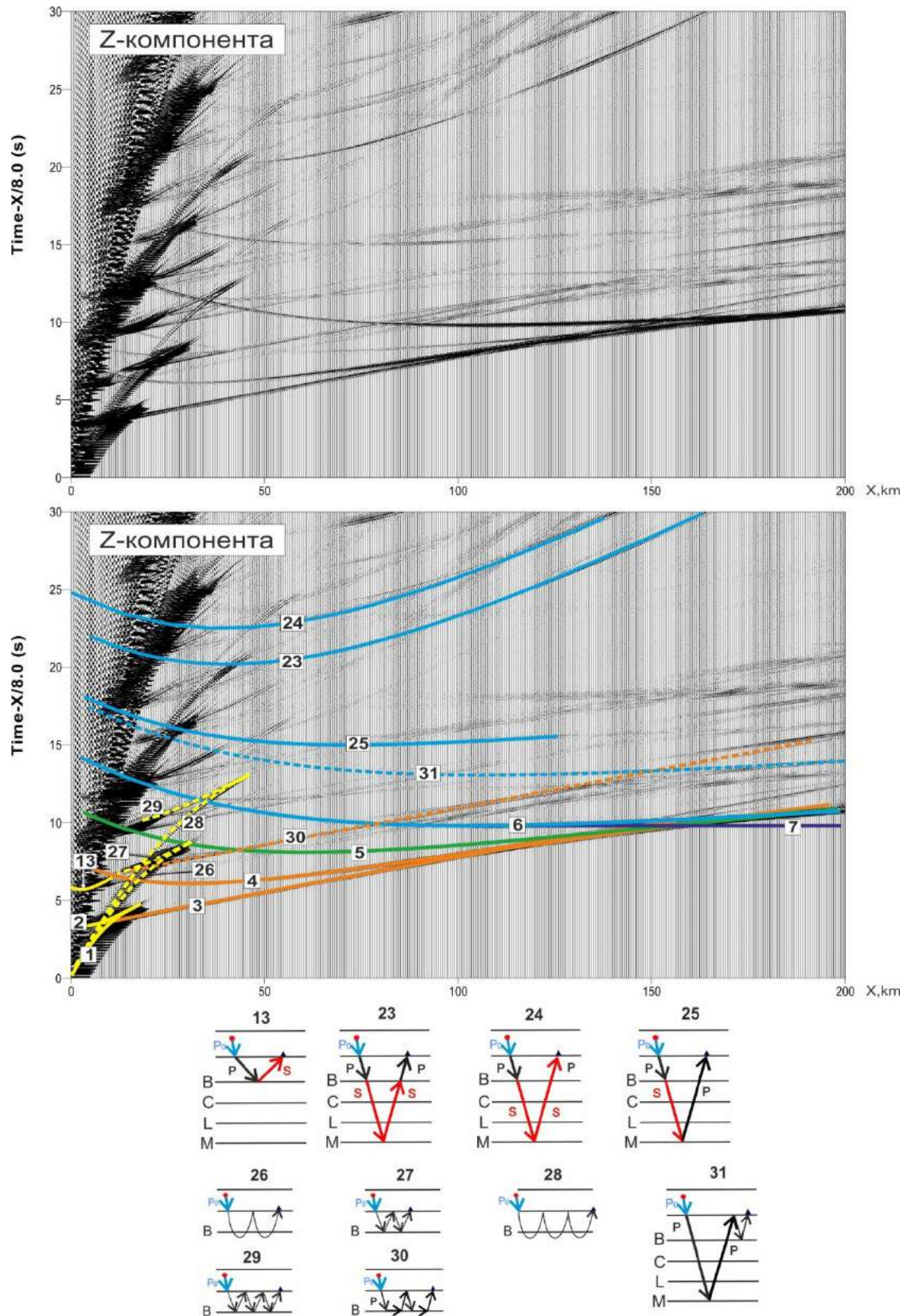


Рисунок 2.20 – Годографы обменных (13-25) и кратных (26-31) волн на сейсмограмме Z-компоненты для модели 2 (Континентальная кора шельфовых морей) и соответствующие им лучевые схемы

являются волны, которые подходят к приемнику как продольные.

Кратные волны наблюдаются на сейсмограммах как Z-, так и R-компоненты (Рисунок 2.20). К ним относятся интенсивные двукратные и трехкратные отраженные и рефрагированные волны, связанные с границей В (схемы 26-30), а также частично кратная отраженная волна от границы М (схема 31).

На рисунках 2.21-2.22 приведено сопоставление волнового поля синтетической сейсмической записи R-компоненты и волнового поля, зарегистрированного вдоль опорного профиля 2-AP в Баренцевом море в районе Северо-Баренцевской впадины. Сейсмические записи R-компоненты синтетической сейсмограммы и зондирования 04 (40 км по профилю) представлены в редукции 8.0 км/с и 4.6 км/с.

На сейсмической записи зондирования 04 продольные волны в первых вступлениях уступает по интенсивности полю обменных волн, так же как и на синтетической сейсмической записи. Среди поперечных волн наибольшую интенсивность имеет головная (рефрагированная) волна ($S_g?$), связанная с верхней консолидированной корой, а также отраженная поперечная волна ($S_M S?$), связанная с подошвой земной коры. Интенсивная обменная волна ($P_g S?$), связанная с поверхностью верхней консолидированной коры, прослеживается на удалениях источник-приемник 40-60 км, повторяет кинематику продольной волны. Обменную отраженную волну ($P S_M S?$) от границы М, можно выделить, начиная с удалений источник-приемник 110-115 км, она повторяют кинематику поперечной волны. Слабая по интенсивности волна в области существования обменной отраженной волны ($P_M S?$) от границы М выделяется на удалениях источник-приемник 70-120 км.

В целом можно отметить, что в волновом поле зондирования прослеживаются основные поперечные и обменные волны, выделяемые на синтетической сейсмограмме. Волновая картина зондирования осложнена шумовой составляющей, а также значительно влияние рельефа границ на кривизну годографов волн, что, несомненно, затрудняет выделение и идентификацию тех или иных типов и классов волн.

2.2.3. Модель 3 – Кора подводных хребтов и поднятий

Модель 3 соответствует коре подводных хребтов и поднятий, распространенной в Арктических морях, например, на поднятии Менделеева [Lebedeva-Ivanova et al., 2006; Поселов и др., 2007], а также в Охотском море в районе Центрально-Охотоморского поднятия [Сакулина и др., 2011b] Мощность земной коры достигает 30-32 км при глубине моря около 2 км (см. Рисунок 2.12). В земной коре выделяются следующие слои: осадочный чехол мощностью 3 км, верхняя часть консолидированной коры мощностью порядка 10 км, нижняя часть консолидированной коры, отличающаяся большой мощностью порядка 15-17 км. Подошва земной коры находится на глубине около 32 км.

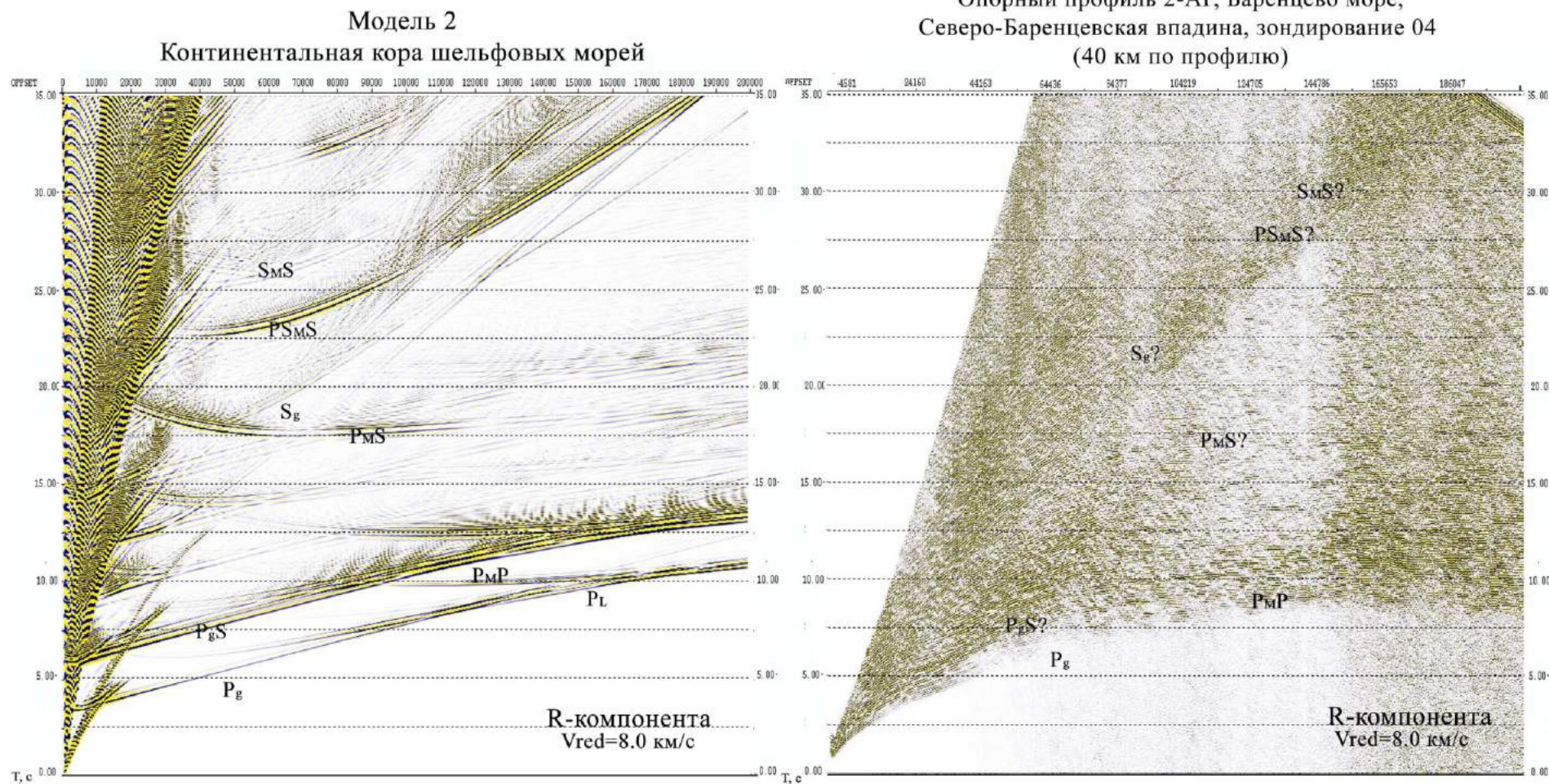


Рисунок 2.21 – Сопоставление волнового поля синтетической сейсмограммы R-компоненты модели 2 (Континентальная кора шельфовых морей) с волновым полем, зарегистрированным вдоль опорного профиля 2-АР в Баренцевом море (зондирование 04, 40 км по профилю) в редукации 8.0 км/с

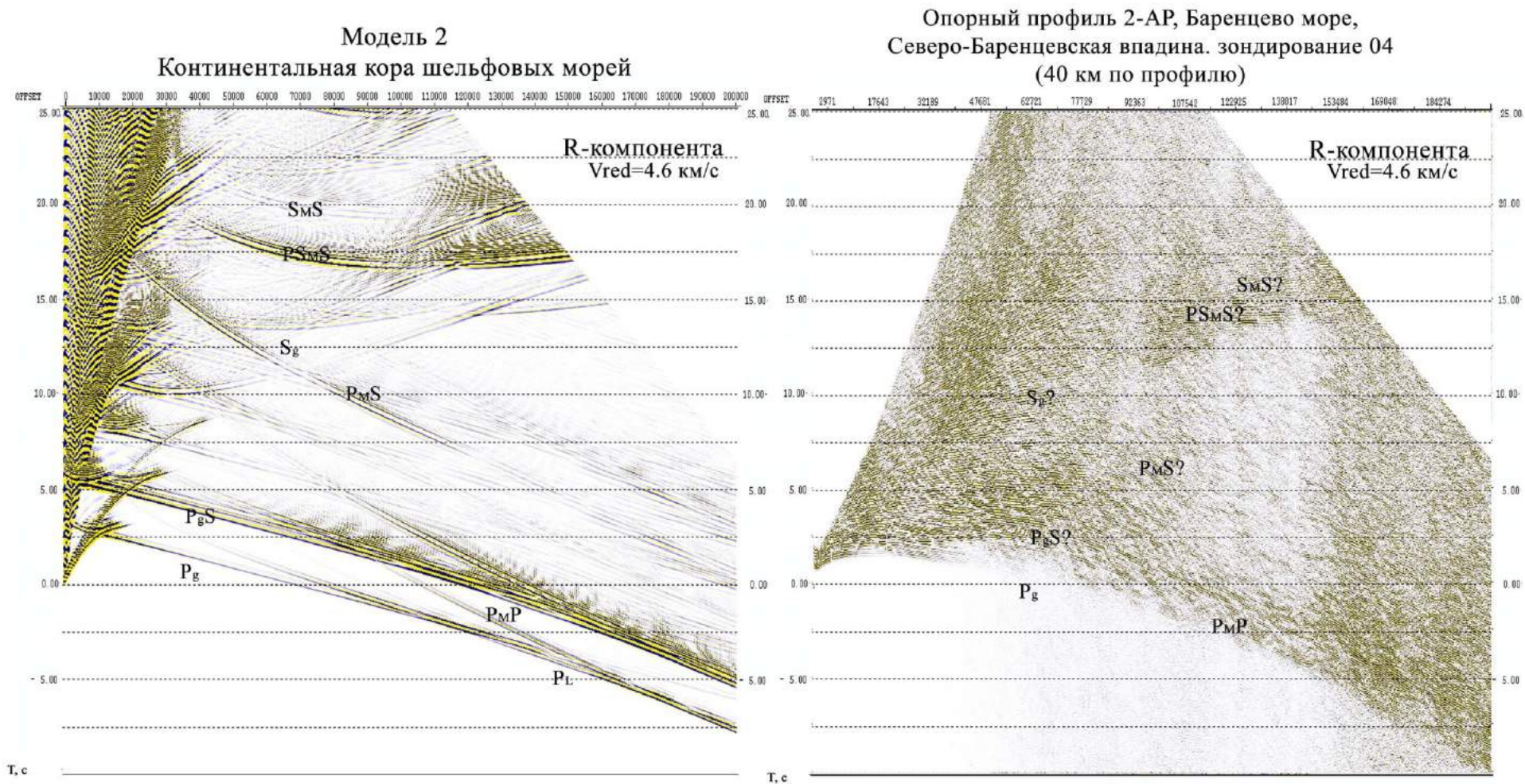


Рисунок 2.22 – Сопоставление волнового поля синтетической сейсмограммы R-компоненты модели 2 (Континентальная кора шельфовых морей) с волновым полем, зарегистрированным вдоль опорного профиля 2-AP в Баренцевом море (зондирование 04, 40 км по профилю) в редуции 4.6 км/с

При конечно-разностном моделировании были заданы следующие параметры для данного типа земной коры: 1-й слой – осадочный слой со скоростями сейсмических волн $V_p = 1.8 \div 4.0$ км/с, $V_s = 0.78 \div 1.74$ км/с ($V_p/V_s = 2.3$) мощностью 3 км, 2-й слой – верхняя часть консолидированной коры (граница В) со скоростями сейсмических волн $V_p = 6.0 \div 6.4$ км/с, $V_s = 3.45 \div 3.68$ км/с ($V_p/V_s = 1.74$) мощностью 10 км; 3-й слой – нижняя кора (граница L) со скоростями сейсмических волн $V_p = 6.6 \div 7.2$ км/с, $V_s = 3.75 \div 4.09$ км/с ($V_p/V_s = 1.76$) мощностью 22 км. Подошва земной коры (граница М) находится на глубине 32 км, скорости сейсмических волн под границей $V_p = 8.0$ км/с, $V_s = 4.6$ км/с ($V_p/V_s = 1.73$) [Кашубин и др., 2013b].

В волновом поле на сейсмограмме Z-компоненты прослеживаются интенсивные продольные волны P_{BP} , P_g (схемы 2, 3), связанные с поверхностью верхней консолидированной коры (границей В), и продольная отраженная волна P_{MP} (схема 6), связанная с подошвой земной коры (границей М) со временем $t_0 = 11.5-12$ с (Рисунок 2.23).

На сейсмограмме R-компоненты продольные волны менее интенсивны по сравнению с теми же волнами, наблюдаемыми на сейсмограмме Z-компоненты (Рисунок 2.24).

Поперечные волны, наблюдаемые на сейсмограмме R-компоненты, по динамической выразительности уступают обменным волнам. Выделяется только поперечная отраженная волна от подошвы земной коры S_{MS} (схема 12), которая прослеживается на удалениях источник-приемник 30-80 км как на сейсмограмме R-компоненты, так и на сейсмограмме Z-компоненты. Поперечная головная волна S_g (схема 9) от поверхности консолидированной коры (границы В) слабо прослеживается.

На сейсмограмме R-компоненты наиболее интенсивными являются обменные волны с одним актом обмена $P-S$ на границах В и М (Рисунок 2.25). Среди них выделяются волны с двумя схемами обмена:

- 1) Волны, претерпевшие обмен на самой границе образования волны (В или М) при выходе луча из границы:
 - обменная отраженная волна (схема 13) и обменная головная волна (схема 14) от границы В, повторяющая кинематику продольной головной волны,
 - обменная отраженная волна (схема 19) с одним обменом при падении P -волны на границу М.
 - обменная головная волна от границы L (схема 17), претерпевшая обмен на восходящем луче и повторяющая кинематику соответствующей продольной головной волны,
 - обменная отраженная волна от границы М (схема 18), претерпевшая обмен на восходящем луче и характеризующаяся наибольшей интенсивностью в околоритической и закритической области,
 - обменная отраженная волна от границы М (схема 21), претерпевшая обмен на падающем луче и прослеживаемая на удалениях источник-приемник 25-150 км как на R-, так и на Z-компоненте.

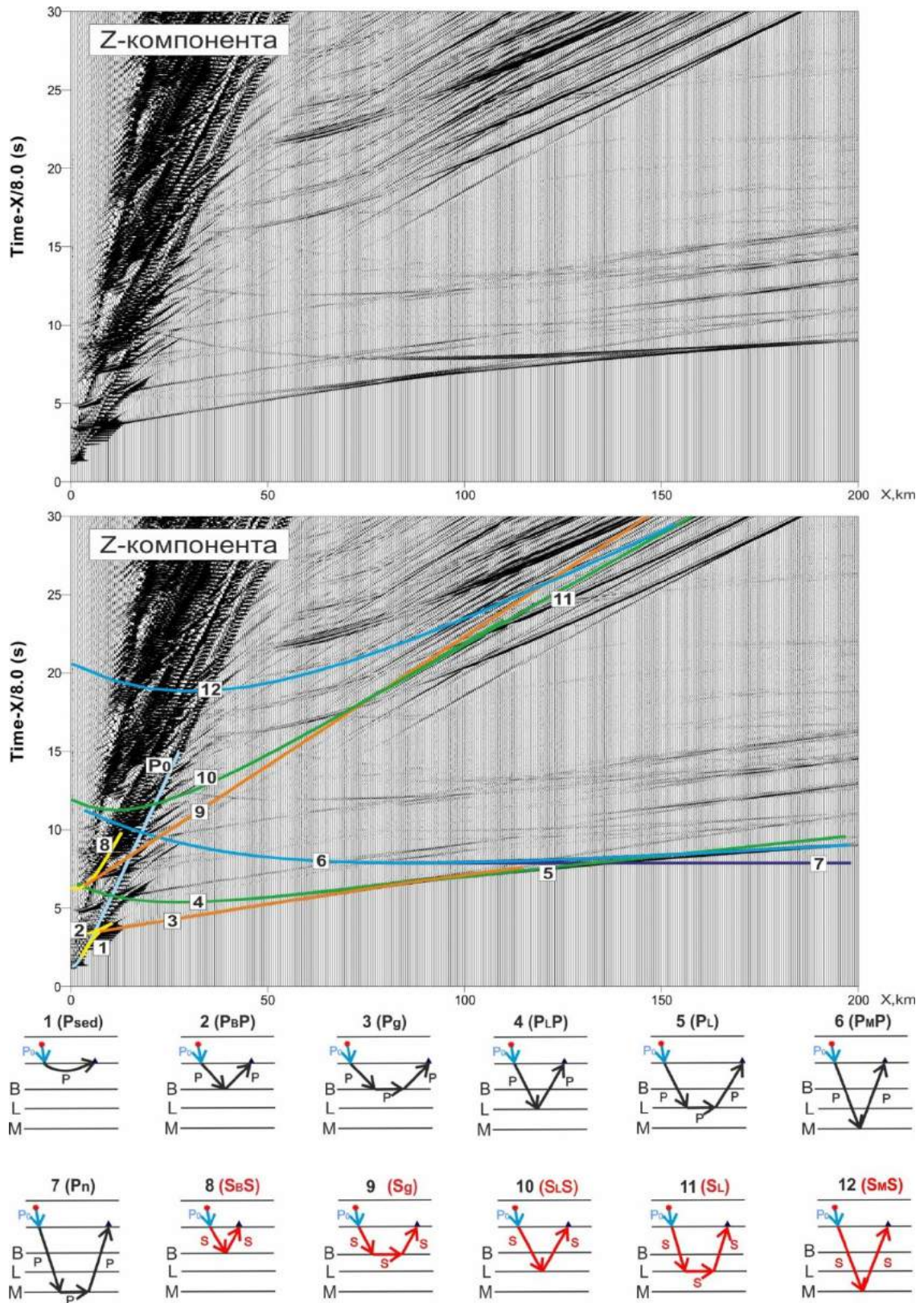


Рисунок 2.23 – Годографы продольных (1-7) и поперечных (8-12) волн на сейсмограмме Z-компоненты для модели 3 (Кора подводных хребтов и поднятий) и соответствующие им лучевые схемы

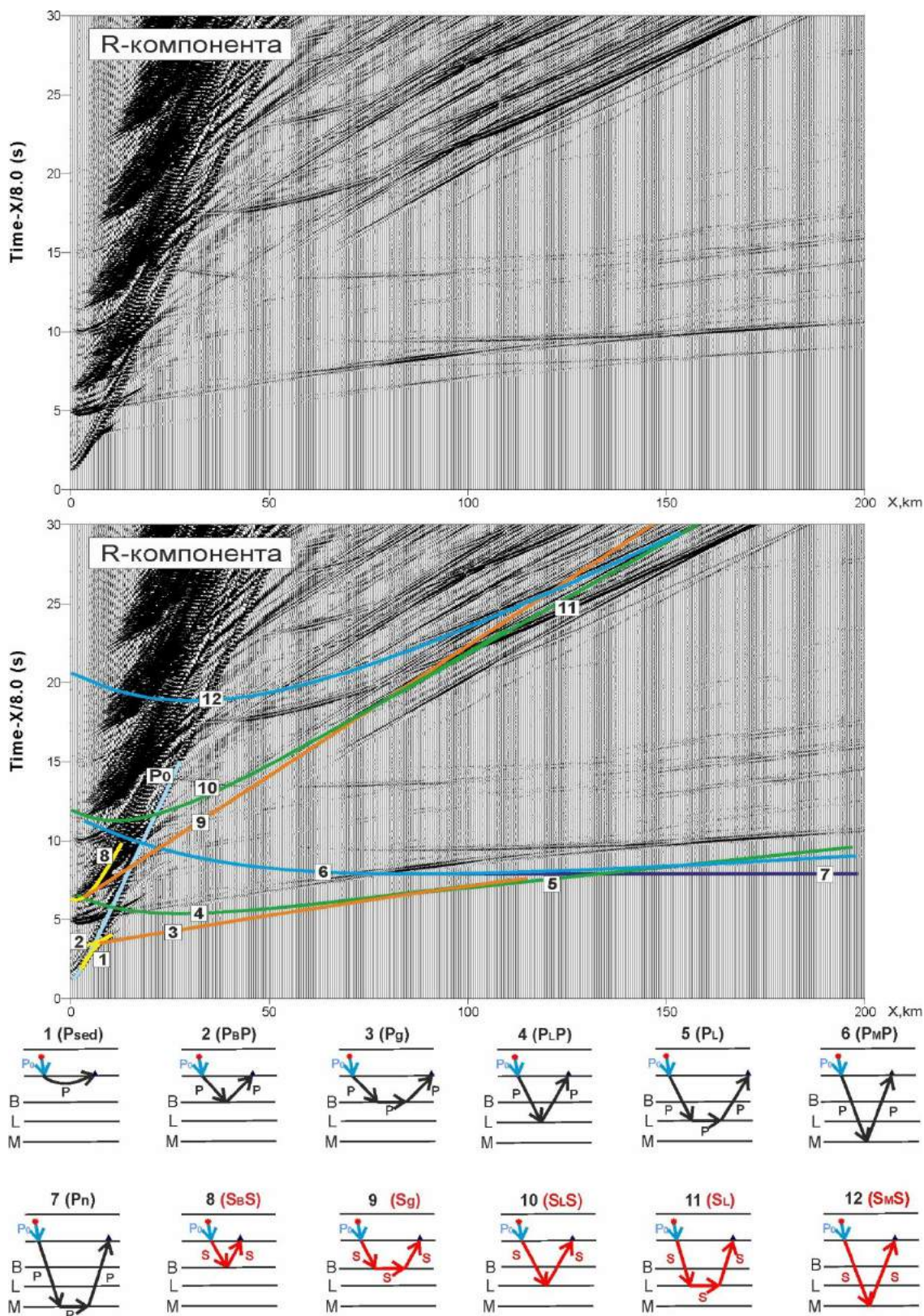


Рисунок 2.24 – Годографы продольных (1-7) и поперечных (8-12) волн на сейсмограмме R-компоненты для модели 3 (Кора подводных хребтов и поднятий) и соответствующие им лучевые схемы

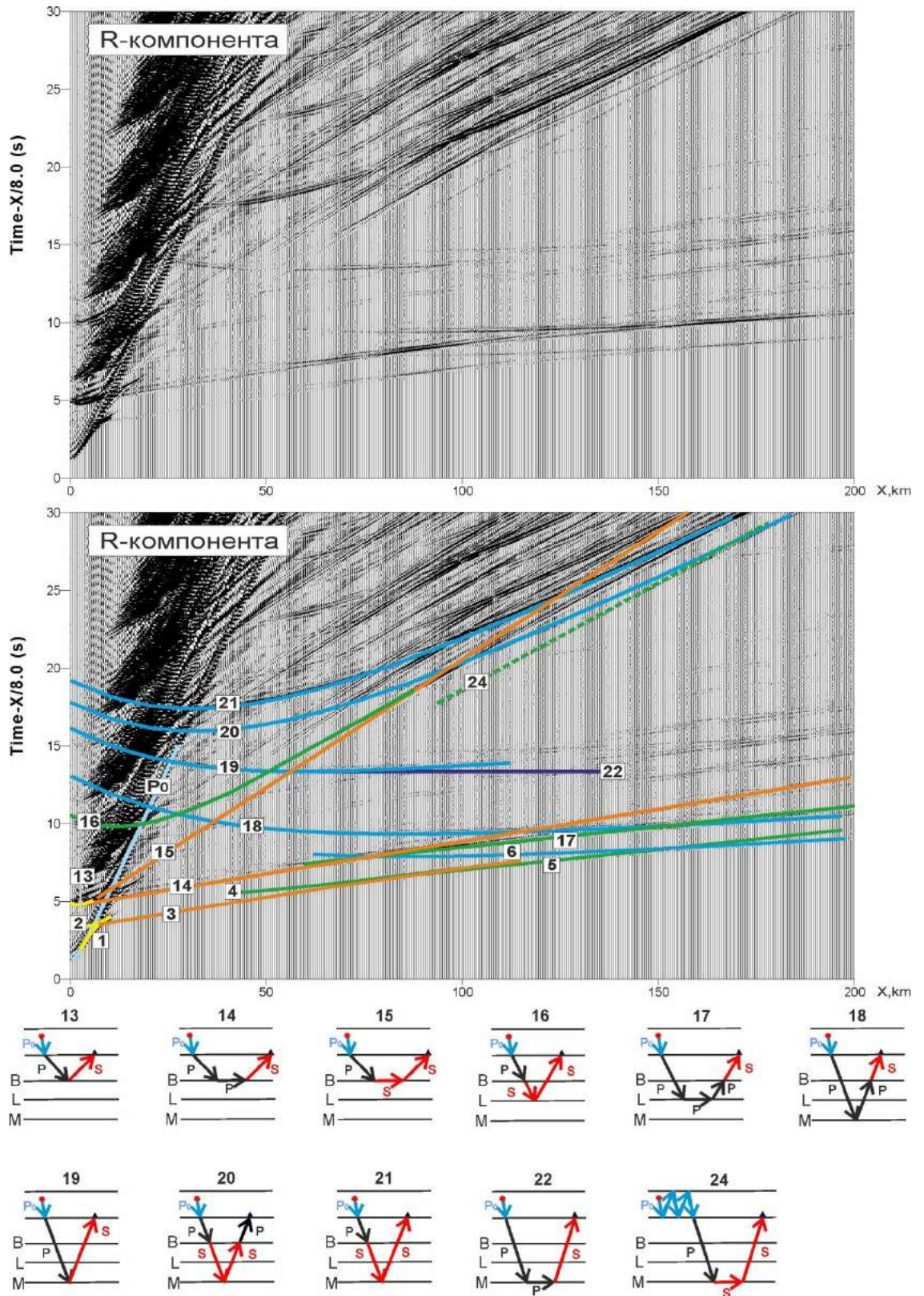


Рисунок 2.25 – Годографы обменных (13-22) и кратных обменных (24) волн на сейсмограмме R-компоненты для модели 3 (Кора подводных хребтов и поднятий) и соответствующие им лучевые схемы

2) Волны от границ L и M, претерпевшие акт обмена на вышележащей границе В на проходящем (восходящем или падающем) луче.

На сейсмограмме Z-компоненты (Рисунок 2.26) прослеживается обменная отраженная волна от границы М (схема 23), которая не выделяется на сейсмограмме R-компоненты. Волна претерпевает два обмена: обмен типа **P-S** на границе М и обмен типа **S-P** на восходящем луче на границе В.

Кроме однократных волн на сейсмограмме Z-компоненты выделяются кратные и частично кратные волны. Среди них наиболее интенсивными являются кратные и двукратные волны от поверхности верхней консолидированной коры (границы В), а также частично кратные отраженные волны от поверхности мантии (границы М) (схемы 24-34).

На рисунках 2.27-2.28 приведено сопоставление волнового поля синтетической сейсмической записи R-компоненты и волнового поля, зарегистрированного вдоль опорного профиля 2-ДВ-М в Охотском море в районе Центрально-Охотского поднятия. Сейсмические записи R-компоненты синтетической сейсмограммы и зондирования 355 (355 км по профилю 2-ДВ-М) представлены в редукации 8.0 км/с и 4.6 км/с.

На сейсмической записи горизонтальной компоненты зондирования 355 продольные волны в первых вступлениях менее выразительны, чем обменные волны. В поле поперечных волн прослеживается преломленная (рефрагированная) волна, связанная с поверхностью верхней части консолидированной коры (**Sg?**), а также интенсивная отраженная поперечная волна (**S_MS?**), связанная с подошвой земной коры.

Интенсивные обменные волны, связанные с верхней частью консолидированной коры, прослеживаются на удалениях источник-приемник 15-60 км, повторяя кинематику продольных (**PSg?**) и поперечных волн (**PgS?**).

Интенсивная обменная волна (**PS_MS?**), связанная с подошвой земной коры, прослеживается на удалениях источник-приемник 80-130 км, повторяет кинематику поперечной волны на меньших временах. Слабая по интенсивности волна в области существования обменной отраженной волны (**P_MS?**) от границы М выделяется на удалениях источник-приемник 70-110 км.

В целом волновое поле на синтетических сейсмограммах не противоречит волновому полю, наблюдаемому на сейсмограмме зондирования. Следует отметить, что невысокое соотношение сигнал-шум на реальных материалах не всегда позволяет однозначно выделить и идентифицировать поперечные и обменные волны.

2.2.4. Модель 4 – Кора глубоких впадин

Модель 4 соответствует утоненной континентальной коре глубоких впадин с мощным осадочным чехлом (Рисунок 2.12). Кора такого типа встречается в Арктических морях, в качестве примера можно привести западный борт Северо-Баренцевской впадины в Баренцевом море и Южно-Карскую синеклизу в Карском море [Сакулина и др., 2003; Roslov et al., 2009].

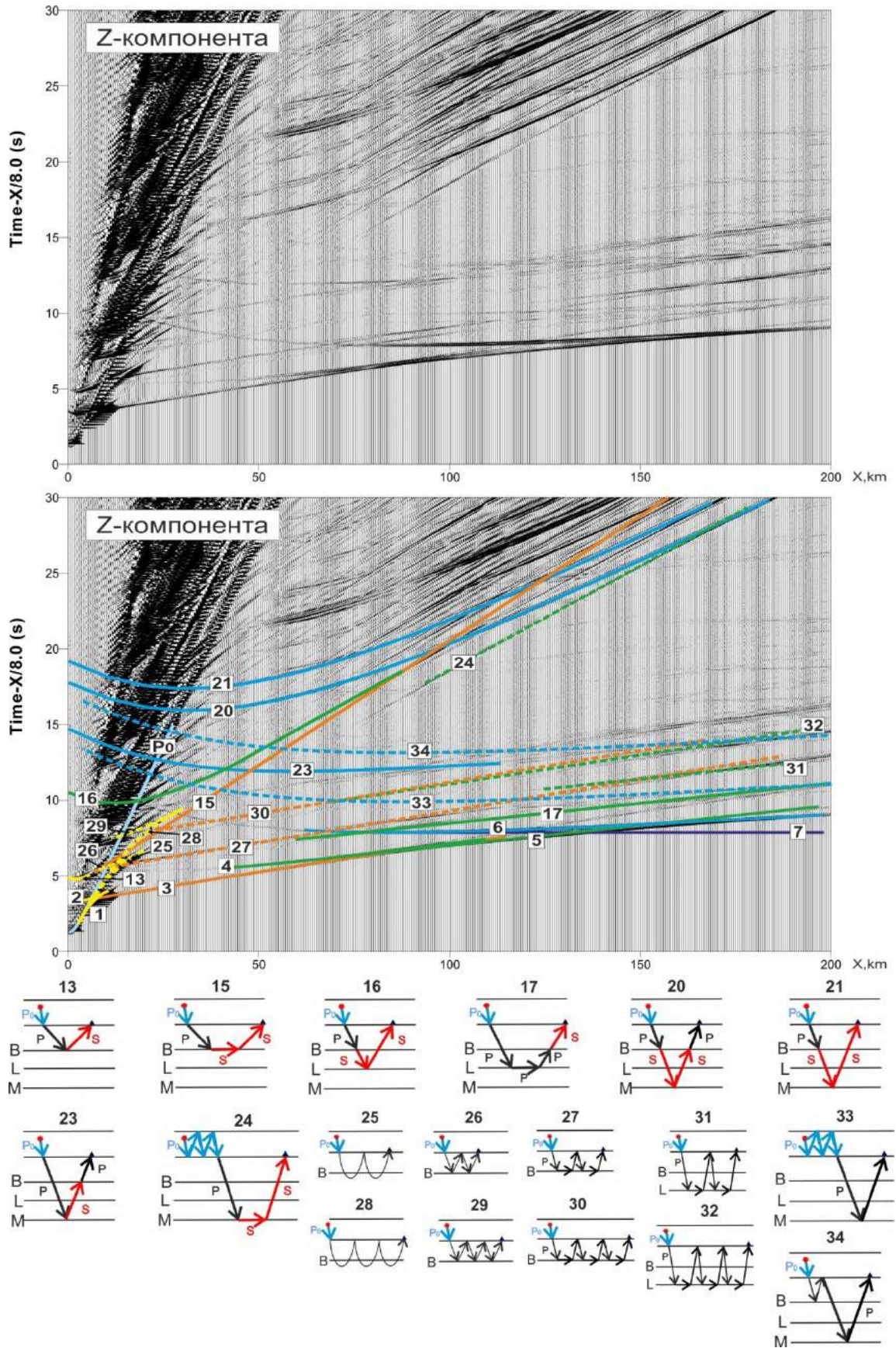


Рисунок 2.26 – Годографы обменных (13-32), кратных обменных (24), кратных и частично-кратных (25-34) волн на сейсмограмме Z-компоненты для модели 3 (Кора подводных хребтов и поднятий) и соответствующие им лучевые схемы

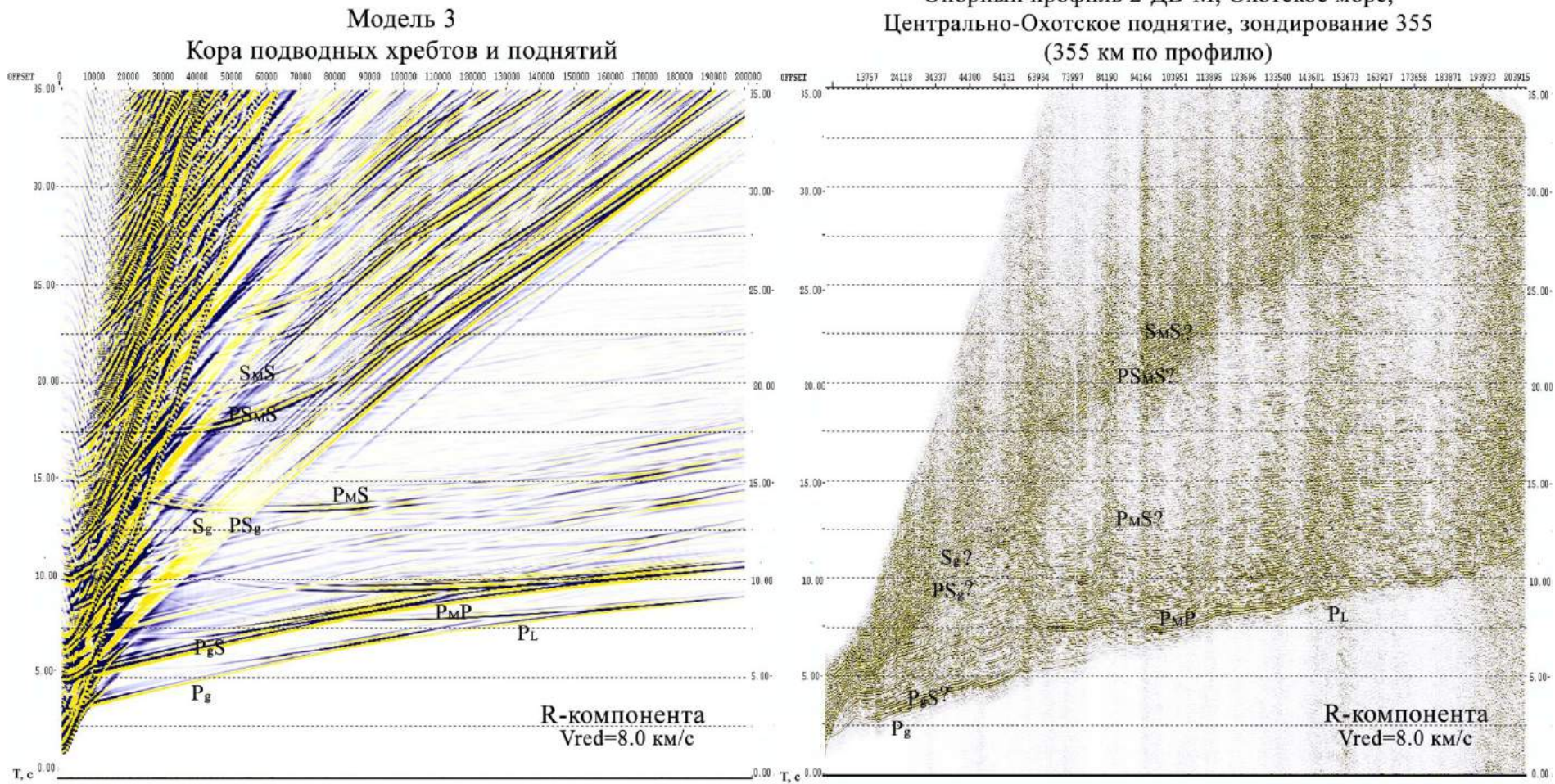


Рисунок 2.27 – Сопоставление волнового поля синтетической сейсмограммы R-компоненты модели 3 (Кора подводных хребтов и поднятий) с волновым полем, зарегистрированным вдоль опорного профиля 2-ДВ-М в Охотском море (зондирование 355, 355 км по профилю) в редукции 8.0 км/с

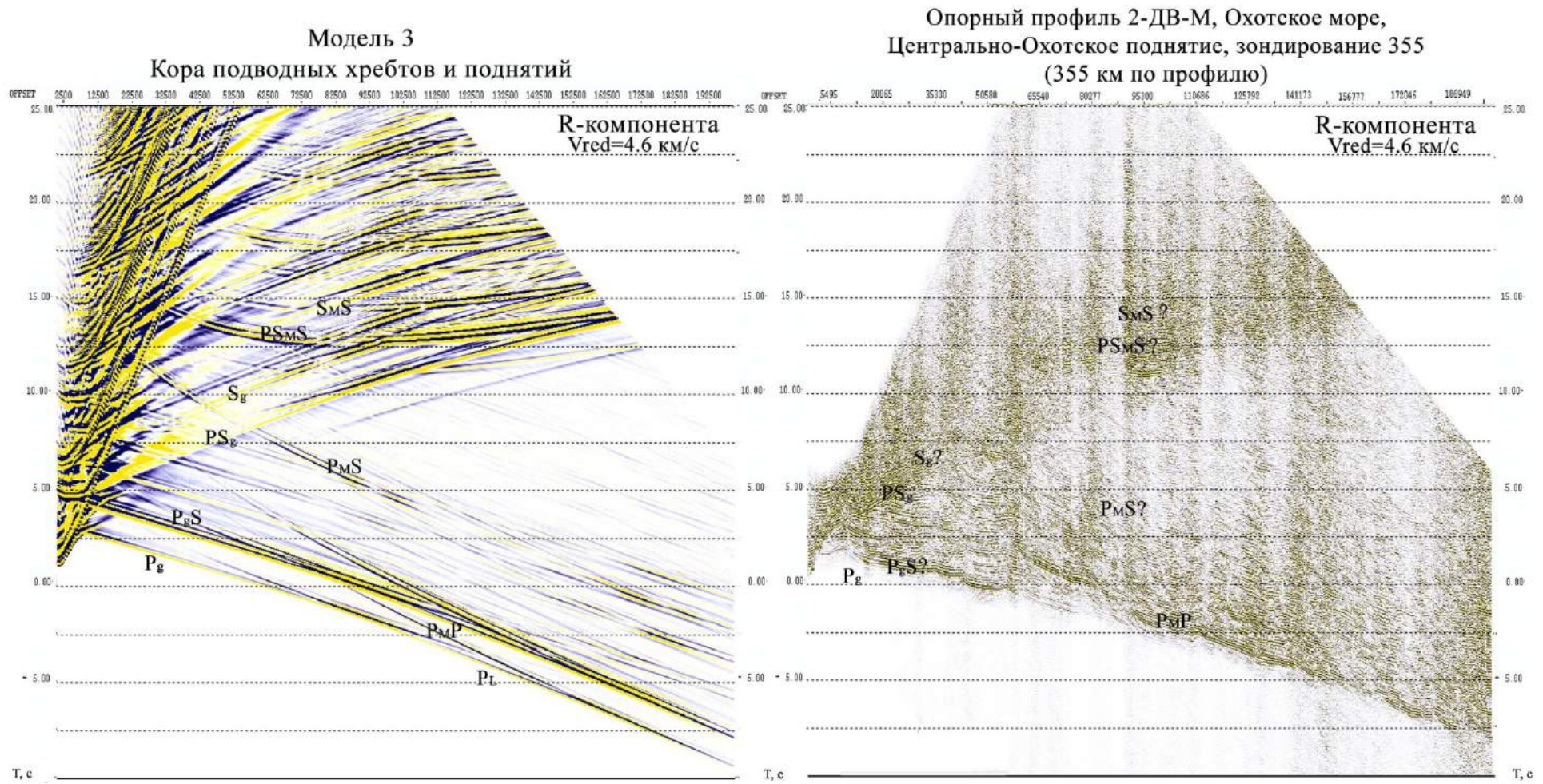


Рисунок 2.28 – Сопоставление волнового поля синтетической сейсмограммы R-компоненты модели 3 (Кора подводных хребтов и поднятий) с волновым полем, зарегистрированным вдоль опорного профиля 2-ДВ-М в Охотском море (зондирование 355, 355 км по профилю) в редуции 4.6 км/с

Строение земной коры этого типа характеризуется наличием следующих слоев: осадочный слой большой мощности порядка 15 км, верхняя часть консолидированной коры мощностью до 10 км, нижняя часть консолидированной коры мощностью до 10 км. Подошва земной коры находится на глубине 35 км.

Расчетная модель при конечно-разностном моделировании содержала следующие слои: мощный осадочный чехол мощностью 15 км, разделенный на две толщи, и консолидированная земная кора. В первом осадочном слое мощностью 4.8 км заданы скорости сейсмических волн $V_p=1.8\div 4.0$ км/с, $V_s=0.78\div 1.74$ км/с ($V_p/V_s=2.3$), во втором осадочном слое мощностью 10 км скорости сейсмических волн имеют значения $V_p=4.5\div 5.8$ км/с, $V_s=2.25\div 2.90$ км/с ($V_p/V_s=2.0$). Ниже осадочного чехла находится 2-й слой расчетной модели – верхняя часть консолидированной коры (граница В) со скоростями сейсмических волн $V_p=6.3\div 6.6$ км/с, $V_s=3.62\div 3.79$ км/с ($V_p/V_s=1.74$) мощностью 10 км; 3-й слой – нижняя кора (граница L) со скоростями сейсмических волн $V_p=6.7\div 6.9$ км/с, $V_s=3.81\div 3.92$ км/с ($V_p/V_s=1.76$) мощностью 10 км. Подошва земной коры (граница М) находится на глубине 35 км, скорости сейсмических волн под границей $V_p=8.0$ км/с, $V_s=4.6$ км/с ($V_p/V_s=1.73$) [Кашубин и др., 2013b].

В волновом поле на сейсмограмме Z-компоненты выделяются следующие интенсивные продольные волны (Рисунок 2.29):

- интенсивная продольная головная волна **P_g** (схема 5), связанная с верхней частью консолидированной коры (границей В), прослеживается на удалениях источник-приемник от 45-50 км до 130 км;
- интенсивная отраженная волна **P_{MP}** (схема 7), связанная с подошвой земной коры (границей М), регистрируется на временах $t_0 = 13-14$ с.

На сейсмограмме R-компоненты (Рисунок 2.30) продольные волны менее интенсивные, чем на сейсмограмме Z-компоненты. Поперечные волны отличаются высокой интенсивностью. Наиболее интенсивными поперечными волнами являются:

- волны от границы в осадочном чехле (схемы 9, 10);
- отраженная волна от границы В (схема 11);
- отраженная волна от границы М (схема 14).

Наиболее выраженными обменными волнами являются волны, претерпевшие один акт обмена типа PS на границах в осадочном чехле, В и М (Рисунок 2.31). Среди них выделяются волны с двумя схемами обмена:

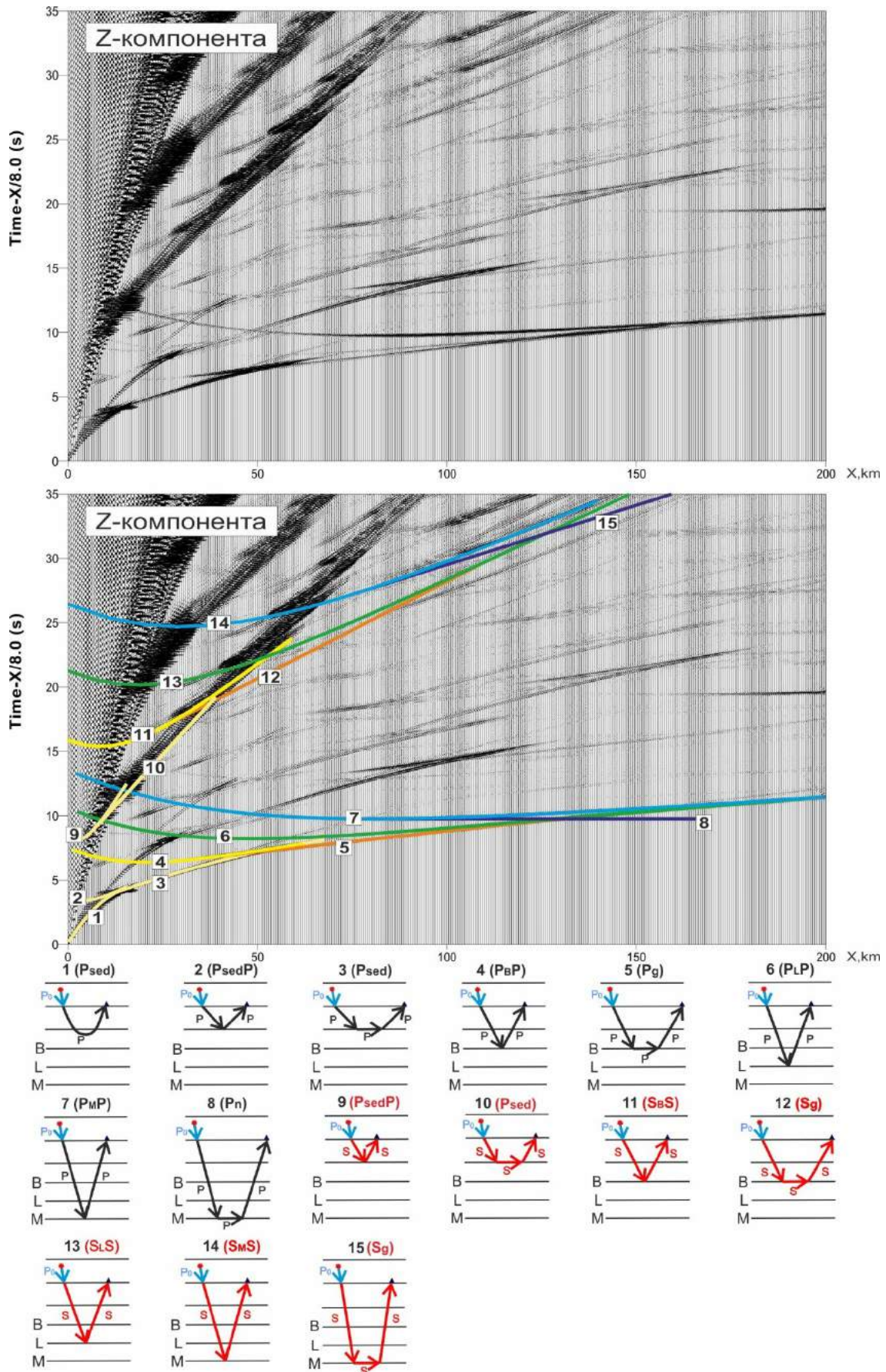


Рисунок 2.29 – Годографы продольных (1-8) и поперечных (9-15) волн на сейсмограмме Z-компоненты для модели 4 (Кора глубоких впадин) и соответствующие им лучевые схемы

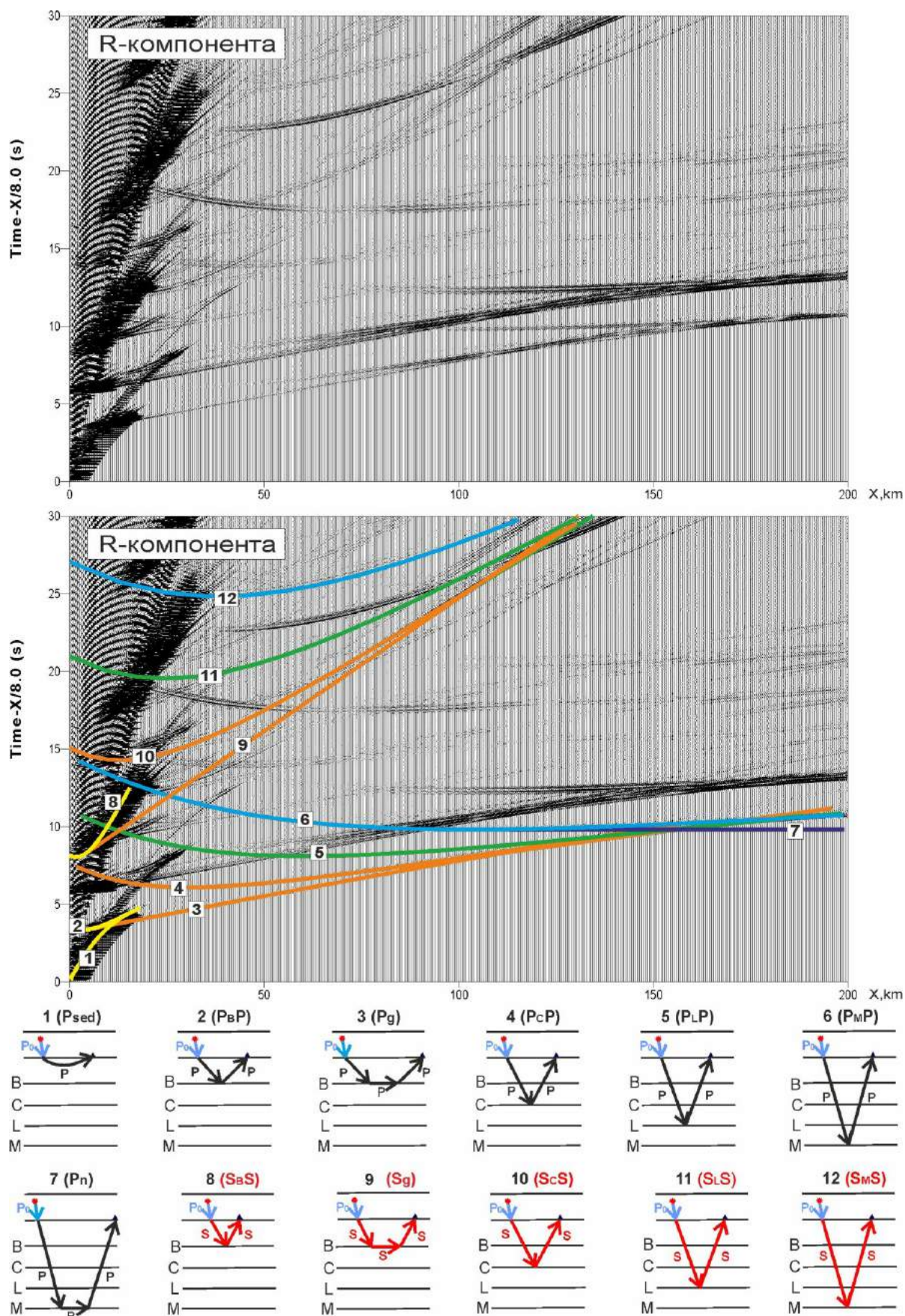


Рисунок 2.30 – Годографы продольных (1-8) и поперечных (9-15) волн на сейсмограмме R-компоненты для модели 4 (Кора глубоких впадин) и соответствующие им лучевые схемы

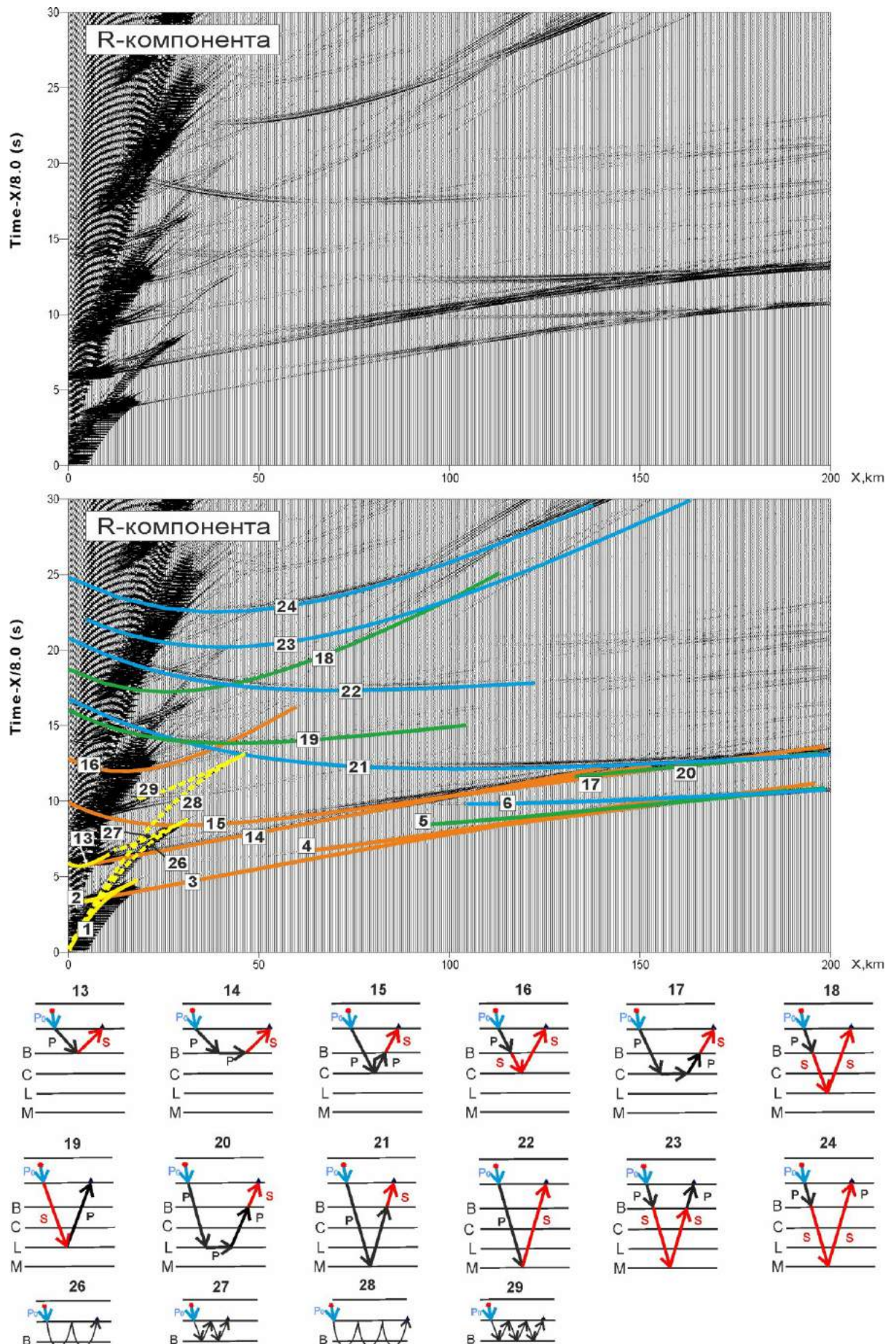


Рисунок 2.31 – Годографы обменных (16-27) волн на сейсмограмме R-компоненты для модели 4 (Кора глубоких впадин) и соответствующие им лучевые схемы

1) Волны, претерпевшие обмен на самой границе образования волны (в осадочном чехле, В и М) при выходе луча из границы:

- обменная отраженная волна (схема 16) и обменная головная волна (схема 17) от границы в осадочном чехле, повторяющая кинематику продольной головной волны (схема 3);
- обменная отраженная волна (схема 18) и обменная головная волна (схема 19) от границы В, повторяющая кинематику продольной головной волны (схема 5);
- обменная отраженная волна от границы М (схема 25).

2) Волны от границы М, претерпевшие акт обмена на границе в осадочном чехле или на границе В на проходящем (восходящем или падающем) луче:

- обменная отраженная волна от границы М (схема 24), претерпевшая обмен на границе В на восходящем луче S-волны;
- обменная отраженная волна от границы М (схема 27), претерпевшая обмен на границе в осадочном чехле на падающем луче S-волны (прослеживается на сейсмограмме как R-, так Z-компоненты).

Обменные волны от поверхности нижней консолидированной коры (границы L) (схемы 20-22) являются менее интенсивными.

На сейсмической записи Z-компоненты кроме однократных продольных волн наблюдаются продольные кратные волны (Рисунок 2.32). Среди них наиболее интенсивными являются двукратные и трехкратные головные и отраженные волны от границы в осадочном чехле (схемы 28-33) и от поверхности консолидированной коры (границы В) (схемы 34-37), от поверхности мантии (границы М) (схема 38).

На рисунках 2.33-2.34 приведено сопоставление волнового поля синтетической сейсмической записи R-компоненты и волнового поля, зарегистрированного вдоль опорного профиля 2-AP в Карском море в районе Южно-Карской синеклизы. Сейсмические записи R-компоненты синтетической сейсмограммы и зондирования 28 (790 км по профилю) представлены в редукции 8.0 км/с и 4.6 км/с.

На сейсмограмме зондирования волновое поле поперечных и обменных волн динамически менее выражено чем, на синтетической сейсмограмме. Это может быть связано с мощным осадочным чехлом, в котором происходит поглощение и затухание сейсмических волн. Поперечные и обменные волны выделяются предположительно в области возможного их существования по аналогии с синтетической сейсмограммой.

Наблюдаются непротяженные оси синфазности поперечных волн, связанных с верхней частью консолидированной коры (Sg?) и подошвой земной коры (S_MS?).

Обменные волны от границ в осадочном чехле (PsedS?) прослеживаются на удалениях источник-приемник 5-50 км, повторяют кинематику продольных волн.

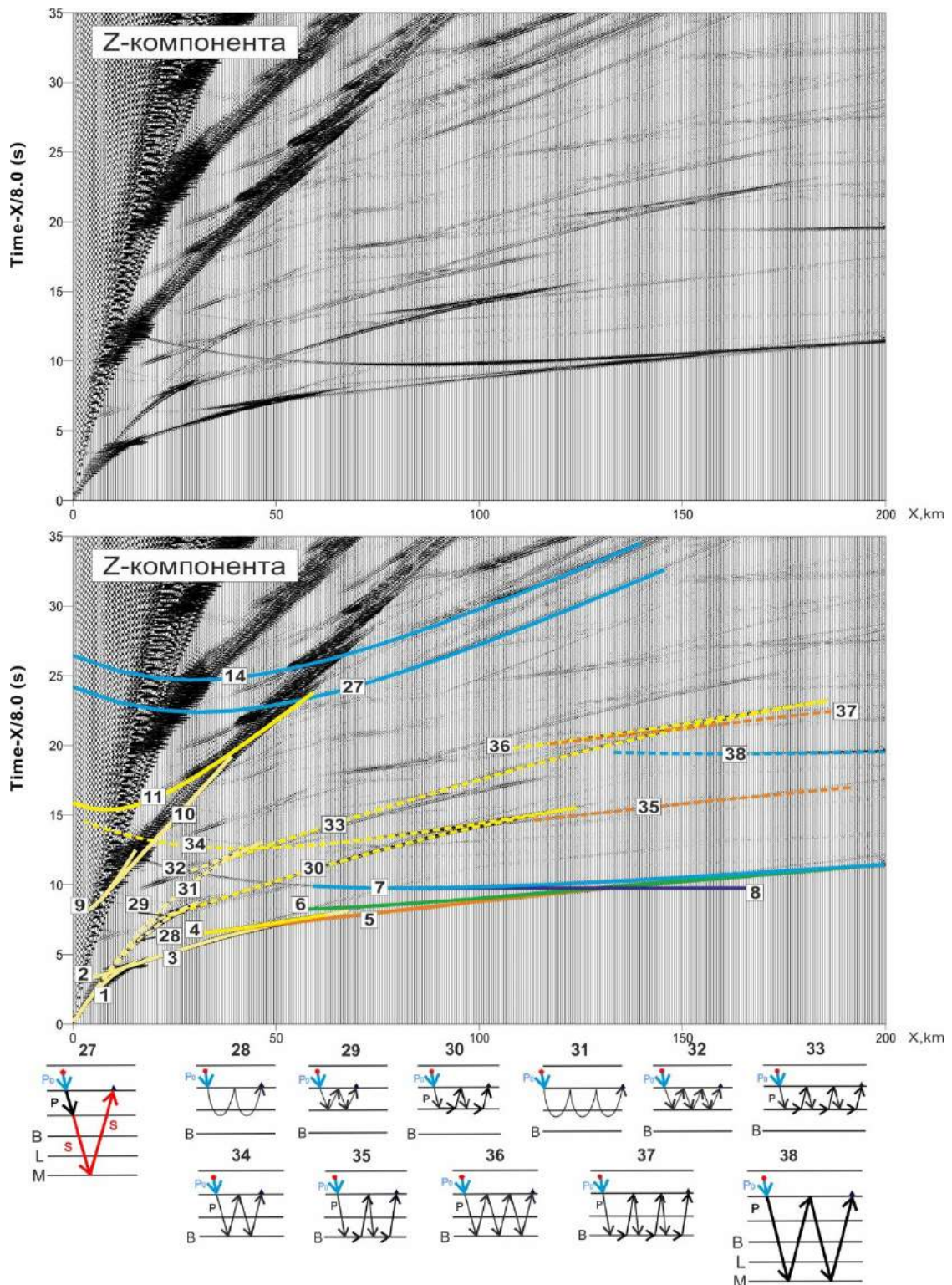
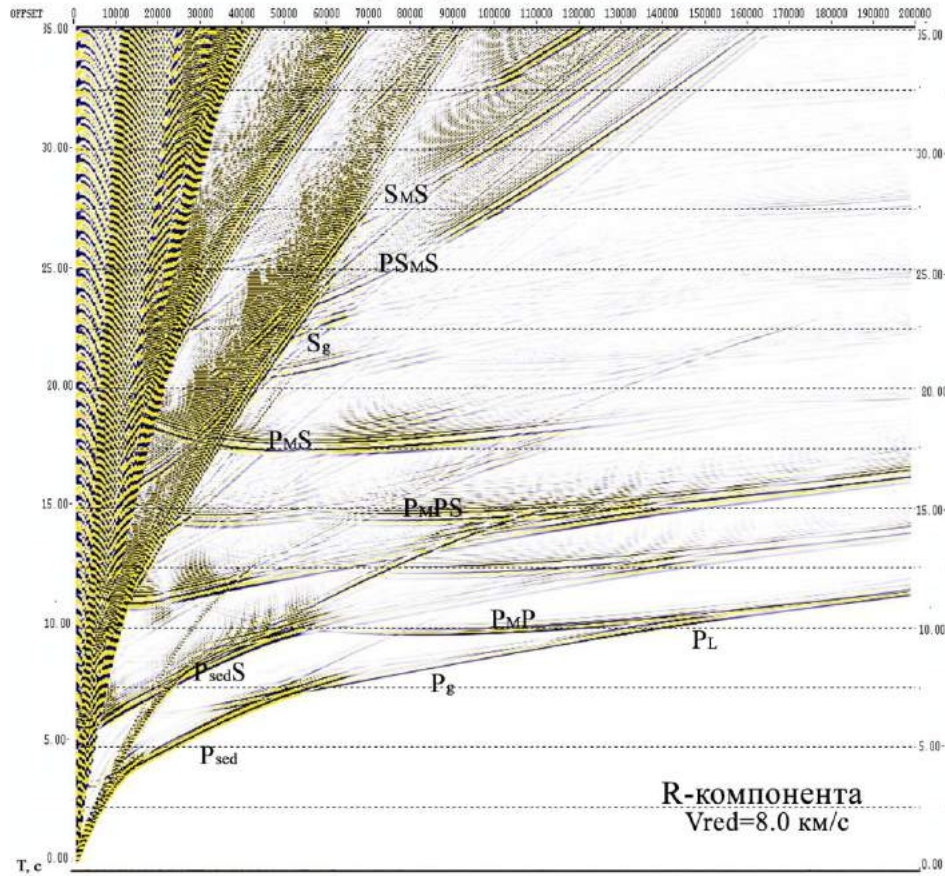


Рисунок 2.32 – Годографы обменных (27) и кратных (28-38) волн на сейсмограмме Z-компоненты для модели 4 (Кора глубоких впадин) и соответствующие им лучевые схемы

Модель 4
Кора глубоких впадин



Опорный профиль 2-AP, Карское море,
Южно-Карская синеклиза, зондирование 28
(790 км по профилю)

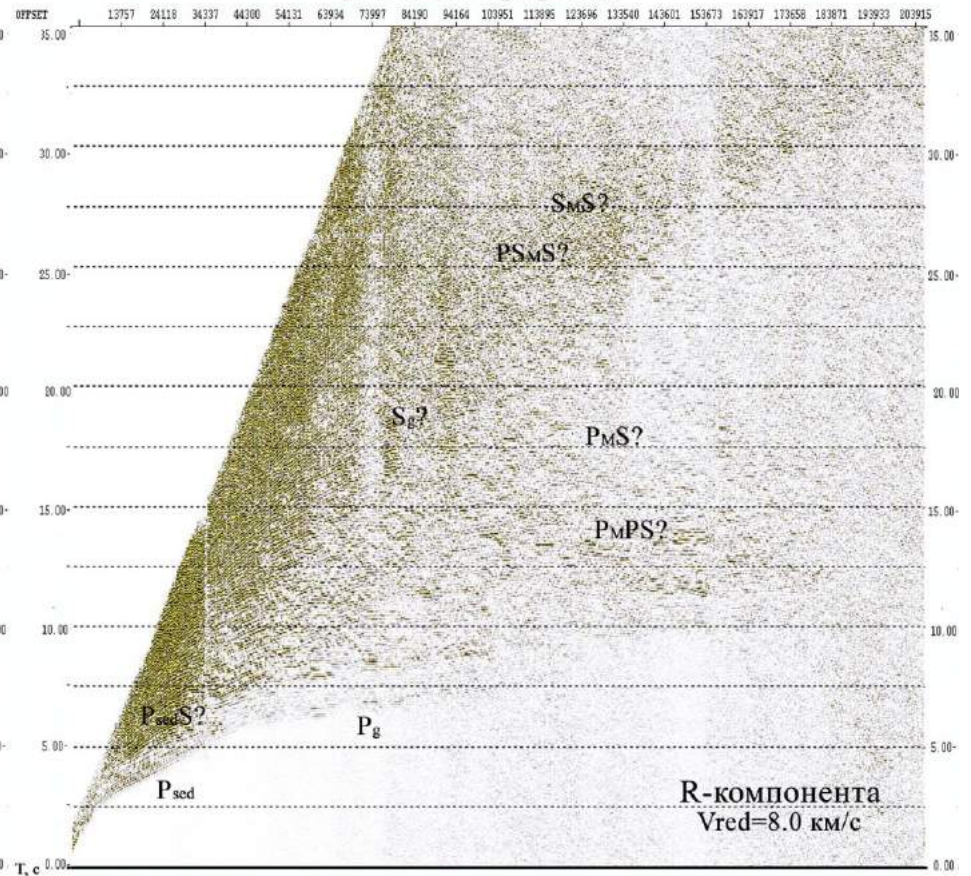


Рисунок 2.33 – Сопоставление волнового поля синтетической сейсмограммы R-компоненты модели 4 (Кора глубоких впадин) с волновым полем, зарегистрированным вдоль опорного профиля 2-AP в Карском море в районе Южно-Карской синеклизы (зондирование 28, 790 км по профилю) в редукции 8.0 км/с

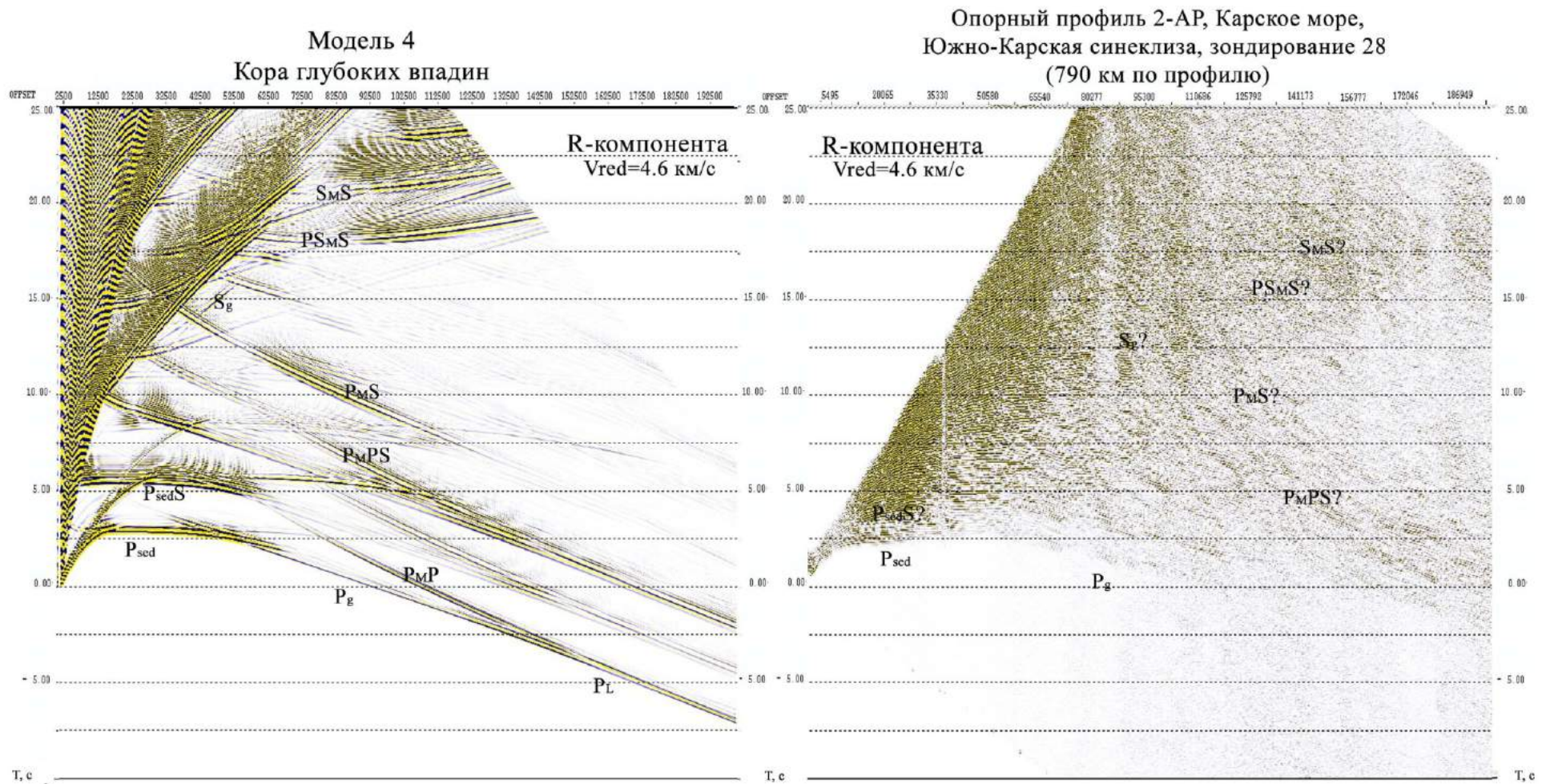


Рисунок 2.34 – Сопоставление волнового поля синтетической сейсмограммы R-компоненты модели 4 (Кора глубоких впадин) с волновым полем, зарегистрированным вдоль опорного профиля 2-AP в Карском море в районе Южно-Карской синеклизы (зондирование 28, 790 км по профилю) в редукции 4.6 км/с

Обменные отраженные волны, связанные с подошвой земной коры, прослеживаются на удалениях источник-приемник 90-160 км:

- отраженная волна ($P_MPS?$), повторяющая кинематику продольной волны;
- отраженная волна ($PS_MS?$), повторяющая кинематику поперечной волны;
- обменная отраженная волна ($P_MS?$).

2.3. Основные типы и классы сейсмических волн, используемые для геологической интерпретации при морских многоволновых исследованиях ГСЗ

При обработке материалов, полученных в результате сейсмических работ на акваториях, необходимо учитывать ряд особенностей волновых полей, обусловленных наличием водного слоя и геологическим строением среды. В условиях жесткого дна образуются многократные отражения от дна моря; также граница осадочный чехол - фундамент является резкой границей изменения скоростных характеристик среды.

Под классом сейсмических волн понимается механизм возврата сейсмической энергии на поверхность наблюдений (отражение или преломление), под типом волн – поляризация (продольные или поперечные).

В таблице 2.1 приведена характеристика основных продольных, поперечных и обменных волн, обычно регистрируемых при многокомпонентных глубинных сейсмических исследованиях на акваториях и представленных достаточно протяженными осями синфазности на сейсмограммах.

Как видно из приведенных выше рисунков и этой таблицы, волновые поля при ГСЗ на акваториях отличаются большим разнообразием регистрируемых волн. Наиболее существенными из них являются: 1. продольные волны, обычно регистрируемые и используемые для интерпретации при ГСЗ – P_g , P_iP , $P_M P$ и P_n ; 2. их поперечные аналоги (регистрируемые преимущественно на горизонтальных компонентах) – S_g , S_iS , $S_M S$; 3. обменные волны (регистрируемые как на вертикальных, так и на горизонтальных компонентах, но имеющие кинематику P -волны при поляризации в точке регистрации, соответствующей S -волне, и наоборот); 4. кратные волны, связанные с отражениями от дна моря и отражениями от резких границ в осадочной толще.

Последние две группы волн, характерные для морских сейсмических исследований, как правило, являются помехами для выделения целевых монотипных волн, традиционно интерпретируемых при ГСЗ [Поперечные и обменные..., 2019].

Таблица 2.1 – Основные волны, регистрируемые при многокомпонентных глубинных сейсмических исследованиях на акваториях [Поперечные и обменные..., 2019]

Обозначение волны	Тип и класс волны	Краткая характеристика, интервал прослеживания	Освещаемый интервал разреза и информация, извлекаемая при интерпретации
1	2	3	4
<i>Волны, связанные с водным слоем</i>			
P_0	Прямая волна в водном слое	Интенсивная; постепенно затухает с удалением; наблюдается как на вертикальной, так и на горизонтальных компонентах в первых и последующих вступлениях; характеризуется постоянной кажущейся скоростью (1.45-1.50 км/с).	Контролирует положение донной станции (позволяет оценить глубину моря в месте ее расположения).
p_0P_i	Кратные волны в водном слое	Интенсивные; регистрируются в последующих вступлениях после P_i -волн, повторяя их кинематику.	Являются существенными помехами при выделении волн в последующих вступлениях.
pp_0P_i	Двукратные волны в водном слое	Меньшей интенсивности по сравнению с однократными волнами; регистрируются на больших временах; повторяют кинематику P_i - и p_0P_i -волн.	Являются помехами при выделении волн в последующих вступлениях.

Продолжение таблицы 2.1

Обозначение волны	Тип и класс волны	Краткая характеристика, интервал прослеживания	Освещаемый интервал разреза и информация, извлекаемая при интерпретации
1	2	3	4
Преломленные продольные волны			
P_1, P_2, P_3, \dots	Рефрагированные продольные волны, распространяющиеся в соответствующем слое	Достаточно интенсивные на удалениях до 50-70 км; последовательно сменяют друг друга в первых вступлениях; регистрируются преимущественно на вертикальной компоненте; как правило, резко затухают при больших градиентах скорости.	Волны, распространяющиеся в осадочном слое (с кажущимися скоростями от 1.9 до 4.8 км/с), и волны, распространяющиеся в верхней части консолидированной коры (P_g с кажущимися скоростями от 5.6 до 6.4 км/с). Позволяют оценить значения скоростей продольных волн в осадочном чехле и верхней части консолидированной коры.
P_n	Преломленные продольные волны от границы Мохоровичича (или рефрагированные в верхах мантии)	Слабовыразительные; следятся в первых вступлениях на вертикальной компоненте; отличаются от коровых волн высокими кажущимися скоростями (8.0 км/с и более).	Позволяют оценить значения скоростей продольных волн в верхах мантии.
Отраженные продольные волны			
P_iP	Отраженные продольные волны от внутрикоровых границ	Слабовыразительные с ограниченным интервалом прослеживания (как правило, не более 10-15 км); регистрируются на вертикальной компоненте в последующих вступлениях.	Позволяют определять положение отражающих границ в земной коре.

Продолжение таблицы 2.1

Обозначение волны	Тип и класс волны	Краткая характеристика, интервал прослеживания	Освещаемый интервал разреза и информация, извлекаемая при интерпретации
1	2	3	4
P_{MP}	Отраженные продольные волны от границы Мохоровичича	Динамически выраженные вблизи критической и в закритической области; интервал прослеживания первые десятки км; регистрируются преимущественно на вертикальной компоненте в последующих вступлениях.	Позволяют определять мощность земной коры; контролируют значения скоростей продольных волн в коре; при значительной протяженности позволяют оценивать максимальные значения скоростей в нижней части земной коры.
P_{MP}	Отраженные продольные волны от внутримантийной границы	Динамически выраженные в закритической области; интервал прослеживания первые десятки км; регистрируются преимущественно на вертикальной компоненте; по кинематике на больших удалениях близки к P_n -волнам, отличаясь от последних большей интенсивностью.	Позволяют оценивать глубину залегания отражающей границы, контролируют максимальные значения скоростей продольных волн в верхах мантии.
<i>Преломленные поперечные волны</i>			
p_0Sg	Рефрагированные поперечные волны, распространяющиеся в верхней части консолидированной коры	Различной динамической выразительности; регистрируются на горизонтальных компонентах в последующих вступлениях	Позволяют оценить значения скоростей поперечных волн в верхней части консолидированной коры.

Продолжение таблицы 2.1

Обозначение волны	Тип и класс волны	Краткая характеристика, интервал прослеживания	Освещаемый интервал разреза и информация, извлекаемая при интерпретации
1	2	3	4
$p_0S_{12}, p_0S_{23}, p_0S_{34}, \dots$	Преломленные (головные) поперечные волны, распространяющиеся вдоль границ соответствующих слоев	Различной динамической выразительности; регистрируются на горизонтальных компонентах в последующих вступлениях; в целом, демонстрируют подобие волновому полю продольных преломленных волн	Позволяют оценить значения скоростей поперечных волн вдоль соответствующих границ
Отраженные поперечные волны			
p_0SiS	Отраженные поперечные волны от внутрикоровых границ	Слабовыразительные с ограниченным интервалом прослеживания; регистрируются на горизонтальных компонентах в последующих вступлениях.	Позволяют определять положение отражающих границ в земной коре.
p_0S_{MS}	Отраженные поперечные волны от границы Мохоровичича	Динамически выраженные в закритической области; регистрируются на горизонтальных компонентах; повторяют особенности отраженных продольных волн P_{MP} .	Позволяют определять мощность земной коры и значения скоростей поперечных волн в коре
Кратные и обменные волны			
$p_1Pi, p_{12}Pi, p_{13}Pi, \dots$	Кратные продольные волны	Различной динамической выразительности; регистрируются на вертикальной компоненте после P_i -волн, повторяя их кинематику.	Позволяют уточнять значения скоростей продольных волн выше границы кратности.

Продолжение таблицы 2.1

Обозначение волны	Тип и класс волны	Краткая характеристика, интервал прослеживания	Освещаемый интервал разреза и информация, извлекаемая при интерпретации
1	2	3	4
p_0SPiS	Обменные SP-волны	Достаточно интенсивные; регистрируются на горизонтальных компонентах в последующих вступлениях после Pi -волн, повторяя их кинематику.	Позволяют оценивать значения отношения скоростей V_p/V_s выше границы обмена
p_0PSiS	Обменные PS-волны	Различной динамической выразительности; регистрируются на горизонтальных компонентах в последующих вступлениях перед Si -волнами, повторяя их кинематику.	Позволяют оценивать значения отношения скоростей V_p/V_s выше границы обмена
$p_0S_{13}Si$	Кратные поперечные волны	Различной динамической выразительности; регистрируются на горизонтальных компонентах после Si -волн, повторяя их кинематику.	Позволяют уточнять значения скоростей поперечных волн выше границы кратности.

Однако в ряде случаев их использование позволяет повысить детальность и точность построения скоростных моделей, что, наряду с использованием поперечных волн, существенно расширяет информативность морских сейсмических исследований [Кашубин и др., 2011; Кашубин и др., 2013а; Kashubin et al., 2017].

2.4. Выводы по главе 2

Обобщение результатов конечно-разностного полноволнового моделирования волновых полей при морских работах ГСЗ для различных типов земной коры позволяет сделать следующие выводы:

1. На сейсмограммах Z -компонент наблюдается в основном поле продольных и кратных волн, интенсивность поперечных волн намного уступает интенсивности

продольных волн. На сейсмограммах R-компонент наблюдается интенсивное поле поперечных и обменных волн, причем наиболее динамически выразительным является поле обменных волн.

2. В поле продольных волн наиболее интенсивными являются отраженные волны **PвР** и головные волны **Pg**, образованные на границе В (подошва осадочного чехла - поверхность фундамента - кровля консолидированной коры), и отраженные волны **PмР**, связанные с подошвой земной коры (границей М).

3. В поле поперечных волн (волн, прошедших весь путь, кроме водного слоя, как волны сдвига) наиболее интенсивными являются преломленные (рефрагированные) волны **Sg** и отраженные волны **SmS**.

4. В поле обменных волн можно отметить следующие особенности:

- первый обмен, как правило, происходит на падающем луче на дне моря;
- обмены могут происходить как на падающих, так и на восходящих лучах (для преломленных волн – на скользящих или рефрагированных лучах), но чаще всего наблюдаются и являются более интенсивными волны с обменом на восходящих лучах;
- наибольшей интенсивностью отличаются обменные волны с количеством актов обмена не более двух, при этом доминируют обменные волны с одним актом обмена (Рисунок 2.35);
- наиболее выраженными обменными волнами являются волны, претерпевшие один обмен типа **P-S** на границах в осадочном чехле, на кровле верхней части консолидированной коры (границе В) или подошве земной коры (границе М). Среди них выделяются волны с двумя схемами обмена:
 - а) волны, претерпевшие обмен на самой границе образования волны (в осадочном чехле, В и М) при выходе луча из границы,
 - б) волны от границы М, претерпевшие обмен на границе в осадочном чехле или на границе В на проходящем (восходящем или падающем) луче;
- из обменных преломленных (рефрагированных) волн, связанных с границей В, чаще всего наблюдаются волны, распространяющиеся вдоль границы со скоростью Р-волны и имеющие кинематику продольной волны.

5. Количество границ обмена и обменных волн существенно меняется в зависимости от мощности земной коры и мощности отдельных слоев модели:

- чем меньше мощность отдельных слоев и мощность земной коры (при равном количестве слоев в модели), тем меньше наблюдается обменных волн;

Модель 1 Океаническая кора	Модель 2 Континентальная кора шельфовых морей	Модель 3 Кора подводных хребтов и поднятий	Модель 4 Кора глубоких впадин
Дно моря 	Дно моря 	Дно моря 	Дно моря
-	-	-	Граница в осадочном чехле
Граница 2L 	Граница B 	Граница B 	Граница B
Граница 3L 	Граница L 	Граница L Обменные волны от границы L не найдены	Граница L
Граница M 	Граница M 	Граница M 	Граница M

Рисунок 2.35 – Частота встречаемости типов обмена для основных границ раздела в моделях 1-4

Примечание – В круге цифрой показано количество идентифицированных на синтетических сейсмограммах обменных волн с типом обмена (**P-S** или **S-P**) для каждой границы модели. На рисунке схематично стрелками показано, на восходящем или нисходящем луче происходит обмен.

- при большой мощности осадочного чехла практически отсутствуют обменные преломленные **PS**-волны от границы В.

6. Наиболее интенсивными обменными волнами, которые присутствуют на сейсмических записях R-компонент для всех моделей, являются (Рисунок 2.36):

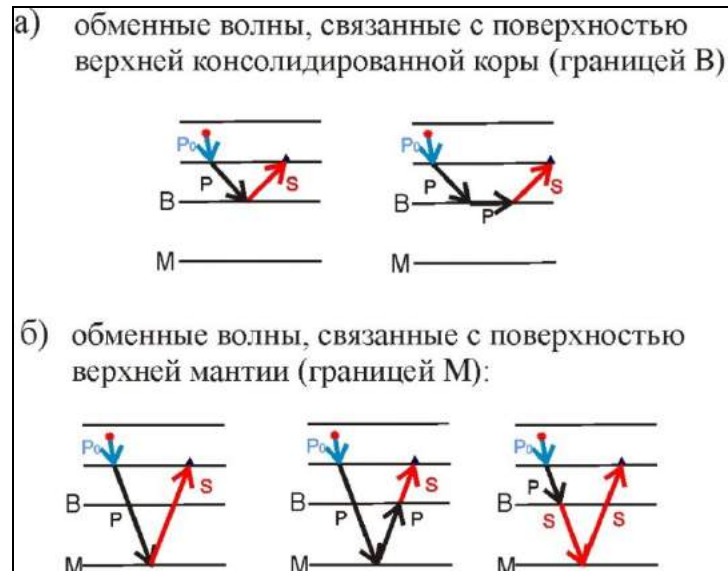


Рисунок 2.36 – Принципиальные схемы образования наиболее интенсивных обменных волн, связанных с поверхностью верхней консолидированной коры (а) и с подошвой земной коры (б), наблюдаемых на сейсмограммах R-компонент всех моделей

- отраженная волна от границы В, претерпевшая обмен с **P**- на **S**-волну при отражении от границы В;
- головная волна от границы В, претерпевшая обмен с **P**- на **S**-волну на восходящем луче;
- отраженная волна от границы М, претерпевшая обмен с **P**- на **S**-волну при отражении от границы М;
- отраженная волна от границы М, претерпевшая обмен на границе В на восходящем луче с **P**- на **S**-волну;
- отраженная волна от границы М, претерпевшая обмен на границе В на падающем луче с **P**- на **S**-волну.

Сопоставление сейсмических записей зондирований с синтетическими сейсмограммами позволяет сделать следующие выводы:

1. Волновые поля синтетических сейсмограмм в целом подобны зарегистрированным волновым полям глубинных сейсмических зондирований. В волновых полях зондирований прослеживаются основные поперечные и обменные волны,

выделяемые на синтетических сейсмограммах: волны, связанные с кровлей консолидированной коры (границей В) и подошвой земной коры (границей М).

2. Выделение и идентификация поперечных и обменных волн на сейсмических записях зондирований не всегда являются однозначными ввиду наличия шумовой составляющей при регистрации волнового поля и влияния рельефа границ на кривизну годографов волн.

3. Для более надежного выделения поперечных и обменных волн из общего волнового поля необходимо выполнять специализированную обработку трехкомпонентных сейсмических записей ГСЗ.

4. Для идентификации типа и класса волн на сейсмических записях необходимо выполнять кинематическое лучевое моделирование для каждого зондирования ГСЗ;

5. Результаты конечно-разностного моделирования для основных типов земной коры рекомендуется использовать для прогнозирования и идентификации продольных, поперечных и обменных волн, зарегистрированных при морских наблюдениях ГСЗ.

Таким образом, в главе 2 раскрыто первое защищаемое положение:

Первое защищаемое положение: 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.

ГЛАВА 3 МЕТОДИКА ОБРАБОТКИ И ИНТЕРПРЕТАЦИИ МАТЕРИАЛОВ МОРСКИХ МНОГОВОЛНОВЫХ СЕЙСМИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ ГСЗ¹⁾

Особенность методики многоволновых морских работ ГСЗ определяет специфические проблемы, связанные с обработкой и интерпретацией сейсмических данных.

При стандартной обработке морских наблюдений в методе отраженных волн (МОВ-ОГТ) источники упругих колебаний располагаются на профиле на расстоянии до 12-25 м, длина приемной косы составляет 8-10 км, обеспечивается абсолютная идентичность приборов всех компонент, используется широкий диапазон частот, а также

¹⁾ При подготовке данной главы диссертации использованы следующие публикации автора, в которых отражены основные результаты, положения и выводы исследования:

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. **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.
3. **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.
4. Сакулина, Т. С. Глубинное строение земной коры и верхней мантии Северо-Чукотского прогиба по профилю ГСЗ 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.
5. **Яварова, Т. М.** Строение консолидированной земной коры Северо-Чукотского прогиба по данным ГСЗ / **Т.М. Яварова**, Н.А. Крупнова, А.В. Разматова, С. Н. Табырца. – 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 (дата обращения 18.04.2022).
6. 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.

привязка к наблюдениям в скважинах или идентифицированным горизонтам на разрезах МОВ-ОГТ. Особенности региональных работ ГСЗ: узкий динамический диапазон регистрируемых волн (3-4÷11-12 Гц), отсутствие идентичности каналов вертикальных и горизонтальных компонент геофонов, недостаток геологической информации на большую глубину исследования, – не дают возможности в полной мере воспользоваться преимуществами многоволновых исследований.

Тем не менее, использование особенностей волновых полей ГСЗ горизонтальных компонент при региональных работах позволяет расширить информацию о геолого-геофизическом разрезе. При этом необходимо усовершенствование методики выделения и обработки поперечных и обменных волн, зарегистрированных на трехкомпонентных сейсмических записях ГСЗ.

Ниже описывается методика обработки поперечных и обменных волн, которая была успешно применена к морским материалам ГСЗ, полученным ОАО «Севморгео» на опорных профилях в Баренцево-Карском и Охотоморском регионах. Обработка трехкомпонентных данных ГСЗ по перечисленным регионам выполнялась автором диссертации совместно с сотрудниками Аналитического геолого-геофизического отдела ОАО «Севморгео» и сотрудниками Центра глубинной геофизики ФГУ НПП «ВСЕГЕИ».

Ввиду затухания и рассеивания энергии поперечных волн в мощном осадочном чехле Северо-Чукотского прогиба и наличия интенсивных обменных волн от верхней части разреза сейсмические записи по профилю Dream-line из изучаемого региона менее выразительны по сравнению с материалами профиля 2-ДВ-М в районе Центрально-Охотского поднятия в Охотском море (Рисунки 3.1-3.2) [Сакулина и др., 2011b]. Мощность осадочного чехла Центрально-Охотского поднятия не превышает 3-4 км, в связи с этим на сейсмических записях наблюдаются достаточно выразительные поперечные волны, связанные с границей «осадочный чехол-фундамент» и границей М. По указанной причине в настоящей главе предложенная методика обработки результатов исследований трехкомпонентных данных ГСЗ иллюстрируются на примерах сейсмических записей профиля 2-ДВ-М.

3.1. Специализированная обработка трехкомпонентных наблюдений ГСЗ с целью выделения поперечных и обменных волн

Сейсмические записи поперечных и обменных волн отличаются от записей продольных по кинематическим, динамическим и поляризационным признакам. Следовательно, требуются особые подходы в обработке и интерпретации поперечных и обменных волн. В интерференционном волновом поле, характеризующимся разнообразием классов и типов волн, поперечные волны значительно уступают продольным и некоторым

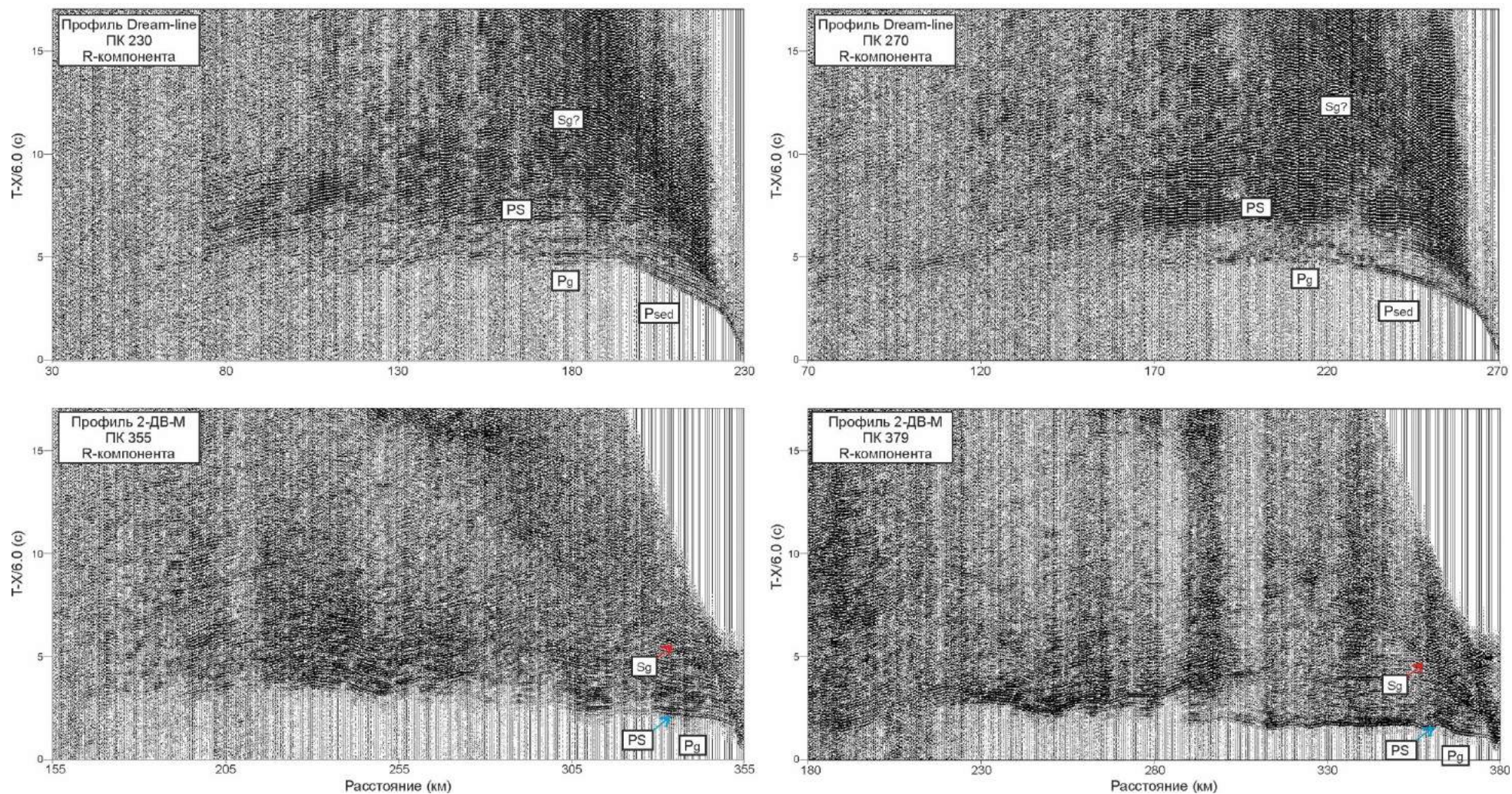


Рисунок 3.1 – Сравнение сейсмических записей горизонтальных R-компонент по профилю Dream-Line (вверху) и опорному профилю 2-ДВ-М (внизу) для волн, связанных с кровлей верхней части консолидированной земной коры

Примечание – Сейсмические записи представлены в редукции 6.0 км/с. Сейсмограммы R-компонент до специализированной обработки.

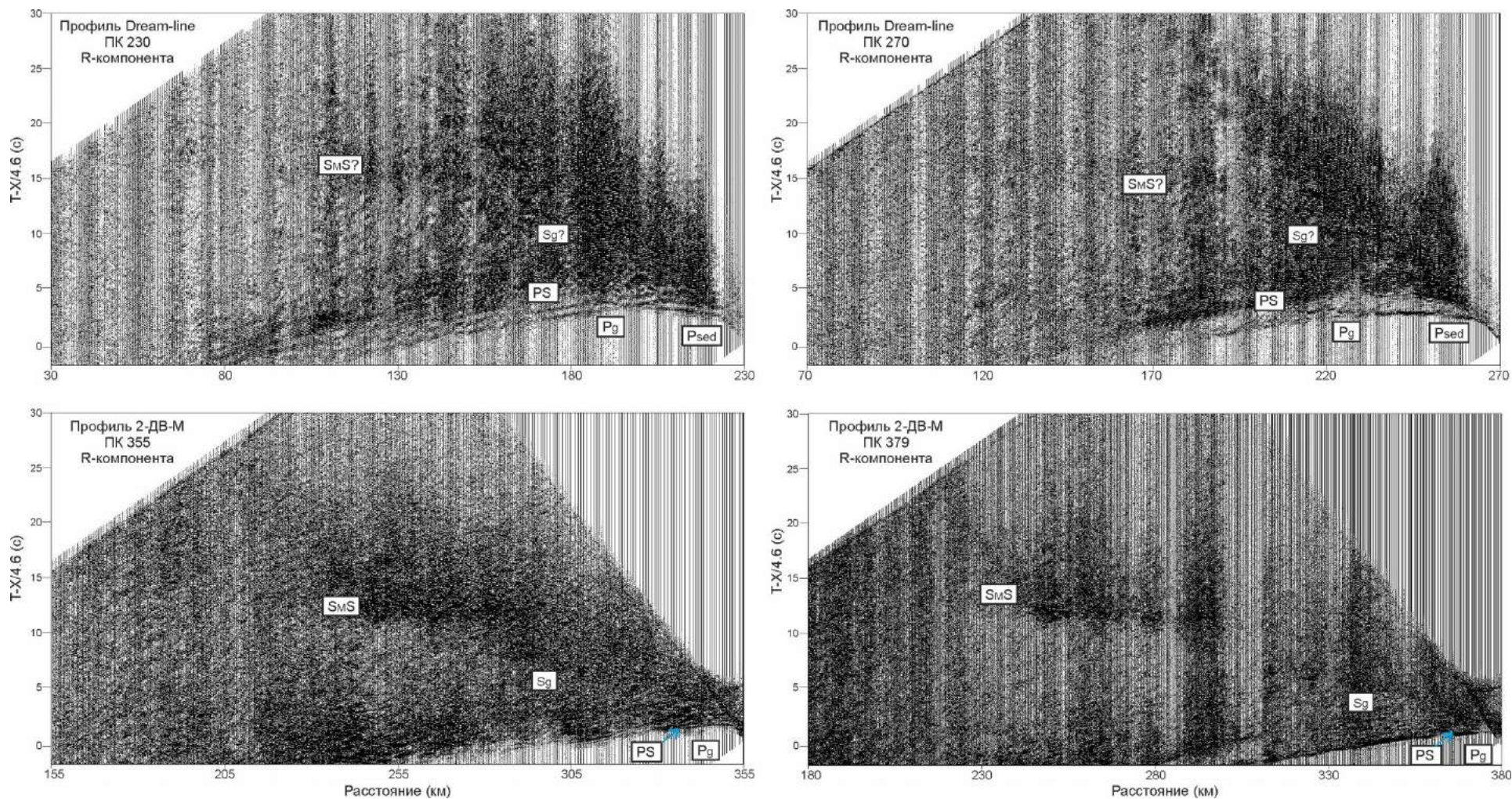


Рисунок 3.2 – Сравнение сейсмических записей горизонтальных R-компонент по профилю Dream-Line (вверху) и опорному профилю 2-ДВ-М (внизу) для волн, связанных с подошвой земной коры

Примечание – Сейсмические записи представлены в редукции 4.6 км/с. Сейсмограммы R-компонент до специализированной обработки.

обменным волнам по динамической выразительности, они всегда прослеживаются в последующих вступлениях и имеют меньшие кажущиеся скорости, нежели их продольные аналоги. Особенностью обменных волн является возможность повторять кинематику либо продольных волн-аналогов, либо поперечных волн-аналогов, динамически они могут не уступать продольным волнам и регистрируются в последующих вступлениях, как и поперечные волны.

Таким образом, в обработке поперечных и обменных волн продольные волны выступают в качестве волн-помех, которые необходимо подавить или ослабить.

Специализированная обработка трехкомпонентных наблюдений ГСЗ направлена на выделение поперечных и обменных волн из общего волнового поля. Применение особых подходов в обработке сейсмических записей горизонтальных компонент позволяет улучшить прослеживаемость поперечных и обменных волн за счет ослабления продольных [Разработать рекомендации..., 2015].

3.1.1. Преобразование записей произвольно ориентированных горизонтальных компонент в записи радиальной и трансверсальной компонент

Поскольку положение горизонтальных приборов внутри АДСС на профиле произвольно, Z-компонента геофона всегда направлена вертикально, а X-, Y-компоненты находятся в горизонтальной плоскости, но не сориентированы по общепринятым в геофизике направлениям. В процессе обработки необходимо производить их ориентацию в плоскости XY. Горизонтальные X- и Y-компоненты пересчитываются в радиальную R-компоненту, направленную вдоль профиля, и трансверсальную T-компоненту, направленную перпендикулярно линии профиля [Кашубин и др., 2011, 2013а]. Каждая из горизонтальных компонент, поворачиваясь в плоскости XY, в общем случае, вносит вклад как в T-, так и R-компоненты (Рисунок 3.3).

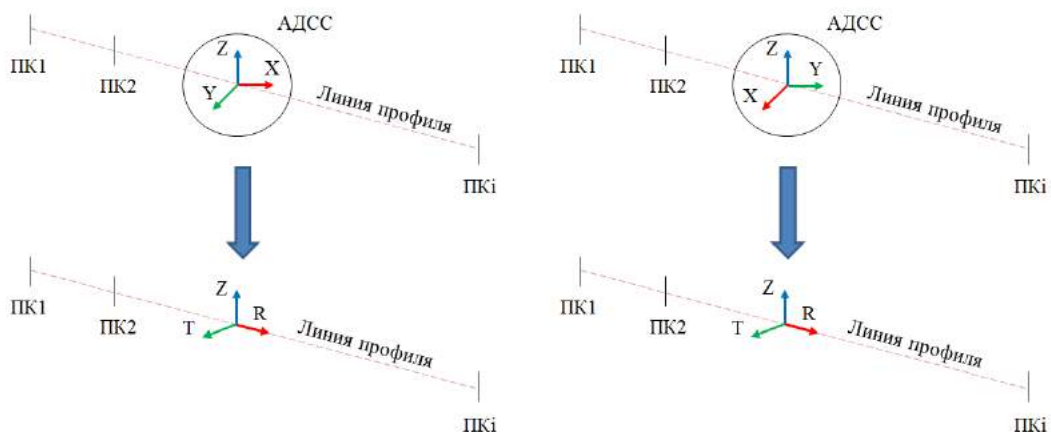


Рисунок 3.3 – Пересчет горизонтальных X- и Y-компонент в R- и T-компоненты производится по часовой стрелке

Алгоритм определения угла поворота горизонтальных компонент основан на использовании матрицы поворота осей декартовых координат. Пересчёт амплитуд горизонтальных X- и Y- компонент в амплитуды R- и T-компонент для каждого пикета возбуждения, зарегистрированного донной станцией, можно представить в виде упрощенных формул (1, 2):

$$A_{Ri} = A_X \cdot \sin \alpha_i + A_Y \cdot \cos \alpha_i, \quad (1)$$

$$A_{Ti} = A_X \cdot \cos \alpha_i - A_Y \cdot \sin \alpha_i, \quad (2)$$

где A_X , A_Y – амплитуды горизонтальных компонент X и Y;

A_{Ri} , A_{Ti} – амплитуды проекции радиальной компоненты на горизонтальную плоскость R и трансверсальной компоненты T сейсмического сигнала на одном и том же дискрете времени для каждой пары i “источник-приёмник”;

α_i – угол поворота 3-компонентного сейсмоприемника вокруг вертикальной оси (в горизонтальной плоскости) по отношению к направлению луча для каждой пары i “источник-приёмник”, который рассчитывается как $\arctg(A_X/A_Y)$, градусы.

Вследствие отсутствия специализированных программных комплексов для обработки трехкомпонентных материалов ГСЗ пересчет горизонтальных компонент волнового поля в радиальную и трансверсальную компоненты выполнялся в системе обработки данных многокомпонентных скважинных сейсмических наблюдений 3С-INTERACT (НПП «ГЕТЭК», Москва). Данная обрабатывающая система позволяет сформировать трехкомпонентную сейсмическую запись для каждого зондирования ГСЗ и осуществить реориентацию горизонтальных компонент в необходимом направлении.

Определение значений амплитуд X-, Y-, Z-компонент для расчета угла поворота выполняется путем корреляции экстремумов опорной волны с известной поляризацией. В качестве такой волны обычно используют прямую водную волну P_0 [Grobys, 2009; Mjelde et al., 2009]. Для надежности определения угла поворота выбирается несколько пар отсчетов трехкомпонентной записи во временном окне 150-200 мс на удалениях в пределах первых километров, где влияние волн-помех на водную волну минимально. Рассчитываются параметры поляризации водной волны (траектории движения частиц), которые служат критерием для ориентации горизонтальных компонент в плоскости XY [Гальперин, 1977]. Водная волна, являющаяся волной продольного типа, характеризуется линейной поляризацией. После ее поворота траектории движения частиц должны находиться в направлении расположения профиля (Рисунок 3.4). Амплитуда прямой водной волны будет полной на сейсмограмме R-компоненты, на сейсмограмме T-компоненты – равна нулю.

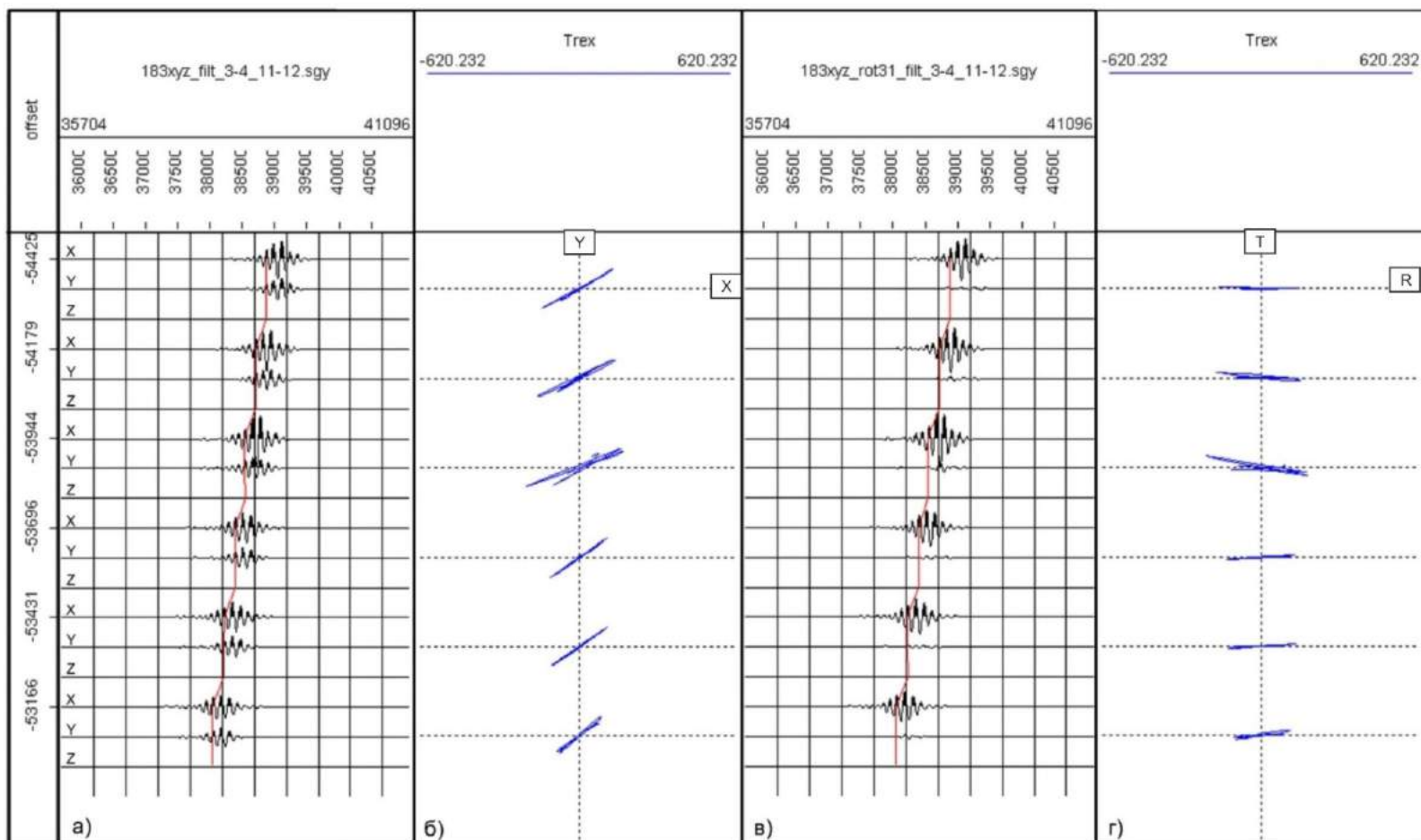


Рисунок 3.4 – Пример пересчета горизонтальных X-, Y-компонент в радиальную и трансверсальную компоненты по профилю 2-ДВ-М

Примечание – Корреляция экстремумов водной волны (а) и определение направления поляризации волны в плоскости XY (б) на исходной трехкомпонентной сейсмограмме; в) - трехкомпонентная сейсмограмма и направление поляризации (г) после пересчета горизонтальных компонент. Охотское море, опорный профиль 2-ДВ-М, Зондирование 183. Угол поворота 31°.

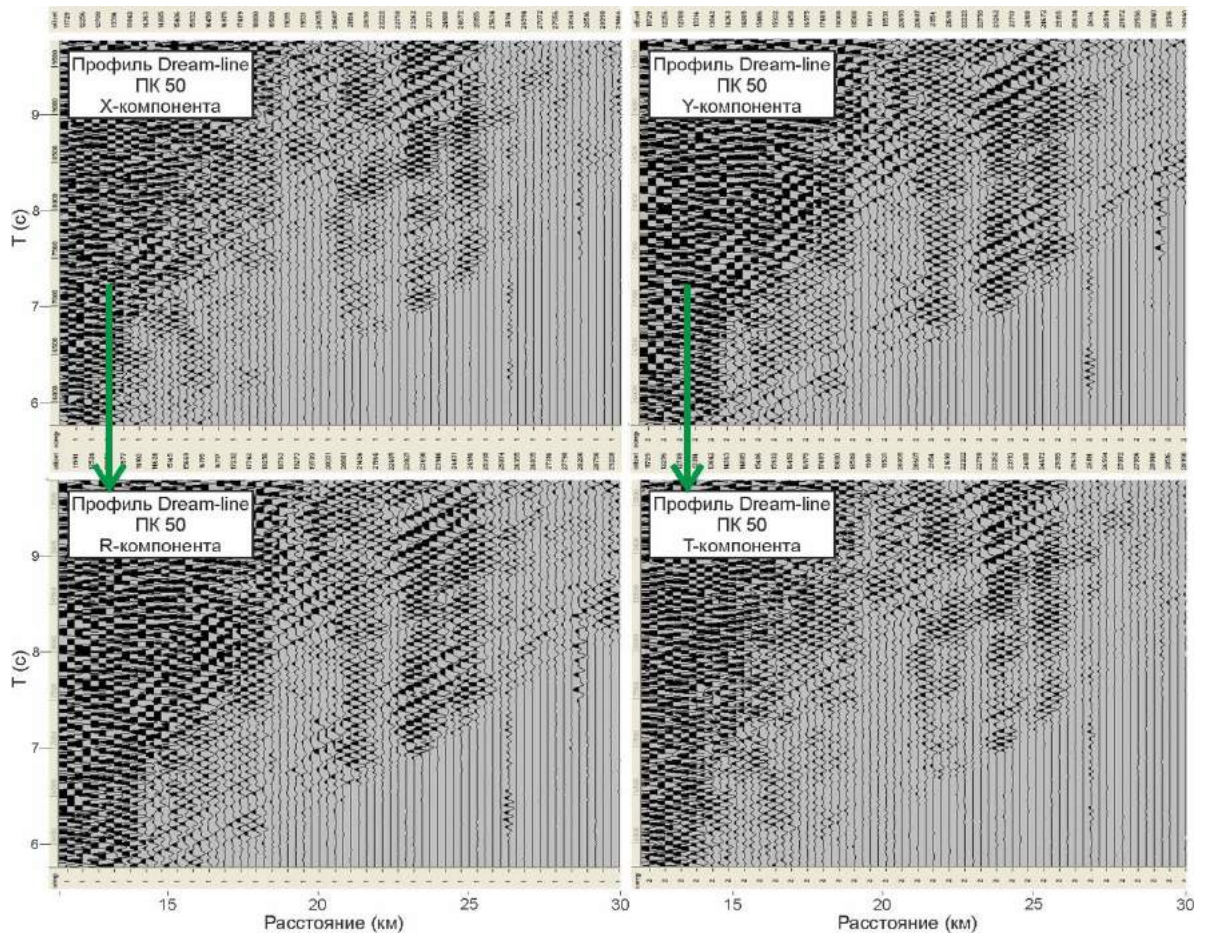


Рисунок 3.5 – Пример пересчета горизонтальных X-, Y-компонент в R- и T-компоненты по профилю Dream-line в программе 3C-INTERACT

Примечание – Восточно-Сибирское море, профиль Dream-line, Зондирование 50. Угол поворота 81° .

В результате поворота горизонтальных компонент происходит перераспределение энергии волн: амплитуды продольных и обменных волн увеличиваются на R-компоненте, амплитуды волн на T-компоненте становятся слабее (Рисунок 3.5) [Кузнецов и др., 2004; Поперечные и обменные..., 2019].

Как известно, поперечные S-волны подразделяются по поляризационному признаку на SV- и SH-волны [Кашубин, 2001; Многоволновая сейсморазведка, 2006]. На сейсмозаписи R-компоненты регистрируются P- и SV-волны, при распространении которых частицы среды колеблются в плоскости распространения луча. На сейсмозаписи T-компоненты регистрируются SH-волны, при распространении которых частицы среды колеблются перпендикулярно плоскости распространения луча. Преобразование неориентированных горизонтальных компонент X-, Y- в ориентированные R- и T-компоненты позволяет отделить записи продольных и поперечных SV-волн от записей поперечных SH-волн, тем самым снизить степень интерференции волнового поля.

В случае амплитудной не идентичности каналов Z, X и Y внутри одной АДСС амплитуды P- и SV-волн на R-компоненте не будут искажены, а на T-компоненте амплитуды SH-волн будут искажаться [Поперечные и обменные..., 2019]. В таком случае выделение целевых волн на сейсмограммы T-компоненты будет не корректным. Поэтому чаще всего для анализа волнового поля используются сейсмограммы только вертикальной Z- и горизонтальной R-компонент.

В таблицах 3.1 и 3.2 приведены углы поворота горизонтальных компонент для профиля Dream-line, определенные в системе 3C-INTERACT по трехкомпонентным сейсмозаписям.

Таблица 3.1 – Углы поворота для пересчета горизонтальных компонент донных станций на направление вдоль профиля Dream-line, Западный участок профиля

ПК	Угол,°	ПК	Угол,°	ПК	Угол,°	ПК	Угол,°
10	45	120	36	230	-30	340	-32
20	60	130	31	240	-49	350	72
30	31	140	66	250	76	360	64
40	56	150	50	260	-72	370	29
50	81	160	25	270	89	380	75
60	73	170	55	280	15	390	85
70	76	180	16	290	-66	395	21
80	-15	190	68	300	5		
90	81	200	-8	310	87		
100	60	210	90	320	45		
110	-32	220	41	330	-44		

Примечание – Положительное значение угла – по часовой стрелке.

Таблица 3.2 – Углы поворота для пересчета горизонтальных компонент донных станций на направление вдоль профиля Dream-line, Восточный участок профиля

ПК	Угол,°	ПК	Угол,°	ПК	Угол,°	ПК	Угол,°	ПК	Угол,°
660	-38	770	-59	880	-59	1030	-30	1140	-19
670	-63	780	-17	890	-40	1040	-74	1150	-44
680	68	790	84	900	26	1050	1	1160	-61
690	9	800	33	920	-71	1060	-12	1170	56
700	-23	810	-17	930	-63	1070	0	1180	3
710	53	820	-49	940	32	1080	-11	1190	-55
720	-54	830	-48	950	14	1090	-17		
730	29	840	-40	960	-43	1100	72		
740	55	850	43	980	-71	1110	79		
750	32	860	43	990	-24	1120	53		
760	82	870	38	1020	-39	1130	-70		

Примечание – Положительное значение угла – по часовой стрелке.

3.1.2. Выделение поперечных и обменных волн за счет ослабления продольных волн

Перед применением процедур специализированной обработки проводится стандартная динамическая обработка вертикальных и горизонтальных компонент сейсмических записей ГСЗ с целью повышения соотношения сигнал/шум.

Стандартная обработка сейсмических записей Z-,R-,T-компонент профиля Dream-line выполнялась по единому графу в обрабатывающей системе FOCUS 5.4 Paradigm Geophysical (Рисунок 3.6). Длина сейсмических записей при обработке обычно составляет 60000 мс, шаг дискретизации $dt = 8$ мс. Анализ частотных спектров показал, что частотный диапазон полезного сигнала находится в пределах 2-12 Гц с преобладающим максимумом на 6-9 Гц.

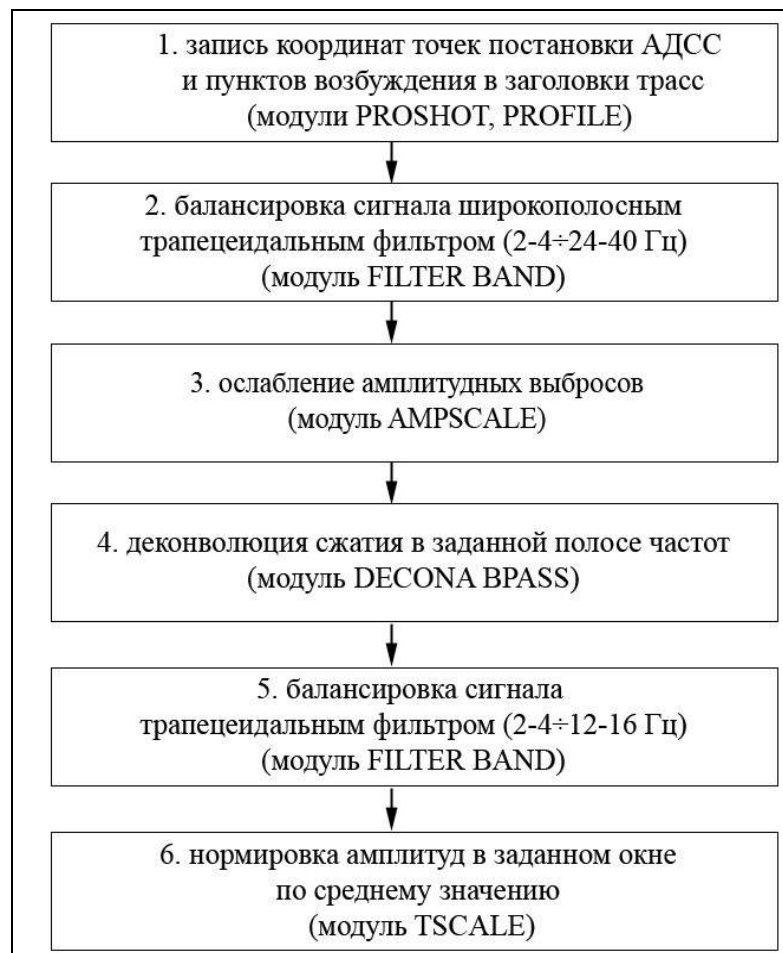


Рисунок 3.6 – Граф стандартной обработки вертикальных и горизонтальных компонент с целью повышения соотношения сигнал/шум

Для повышения соотношения сигнал/шум применялась частотная полосовая фильтрация в полосе частот 2-3 ÷ 14-16 Гц. Выполнялось ослабление anomalously высоких значений амплитуд, резких амплитудных выбросов, возникающих за счет случайных помех; балансировка амплитуд во временных интервалах прослеживания продольных и поперечных волн.

С целью повышения разрешенности сейсмической записи была применена процедура деконволюции с последующей полосовой фильтрацией в полосе частот 2-5÷11-14 Гц для Z-компоненты, 4-5÷11-12 Гц для R- и T-компонент сейсмической записи. Для ослабления высоких амплитуд, обусловленных наличием интенсивной прямой волны на участке сейсмограммы, не затронутой процедурой мьютинга (область ближних удалений), была применена нормировка сейсмической записи. На рисунках 3.7-3.9 представлены сейсмограммы Z-, R-, T-компонент зондирования 355 по профилю 2-ДВ-М в Охотском море до и после обработки.

Специализированная обработка трехкомпонентных сейсмических записей ГСЗ с целью улучшения прослеживания поперечных и обменных волн в интерференционном поле волн различного типа выполнялась так же в системе FOCUS 5.4 Paradigm Geophysical.

Были опробованы два подхода:

1) многоканальная фильтрация в заданном диапазоне кажущихся скоростей продольных и поперечных волн в пространственно-временной частотной области по всей сейсмограмма целиком; 2) подчеркивание 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.

Первый подход. Основная сложность применения многоканальной фильтрации по кажущимся скоростям материалов глубинных сейсмических исследований на море заключается в коротко- и длиннопериодных искривлениях осей синфазности как поперечных, так и продольных волн. Первые вступления продольных волн искажены, в основном, из-за перепада рельефа морского дна. Для корректного применения процедуры многоканальной фильтрации необходимо спрямить оси синфазности продольных волн. Такое спрямление выполняется временно посредством ввода поканальных статических поправок, которые определяются в результате предварительного считывания времен прихода продольных волн в первых вступлениях. Затем применяется процедура фильтрации по скоростям, а в завершении за счёт введения поканальных статпоправок с обратным знаком восстанавливается исходная форма осей синфазности.

Таким образом, для выделения поперечных волн на сейсмограммах ГСЗ со спрямленными осями синфазности продольных волн использовалась процедура двумерной фильтрации в (f-k) области в заданном диапазоне кажущихся скоростей продольных и поперечных волн. Двумерная фильтрация в (f-k) области выполнялась последовательно:

- в качестве режекторного фильтра для ослабления продольных волн в первых вступлениях, а также соответствующих им кратных волн, в полосе частот 6-14 Гц;

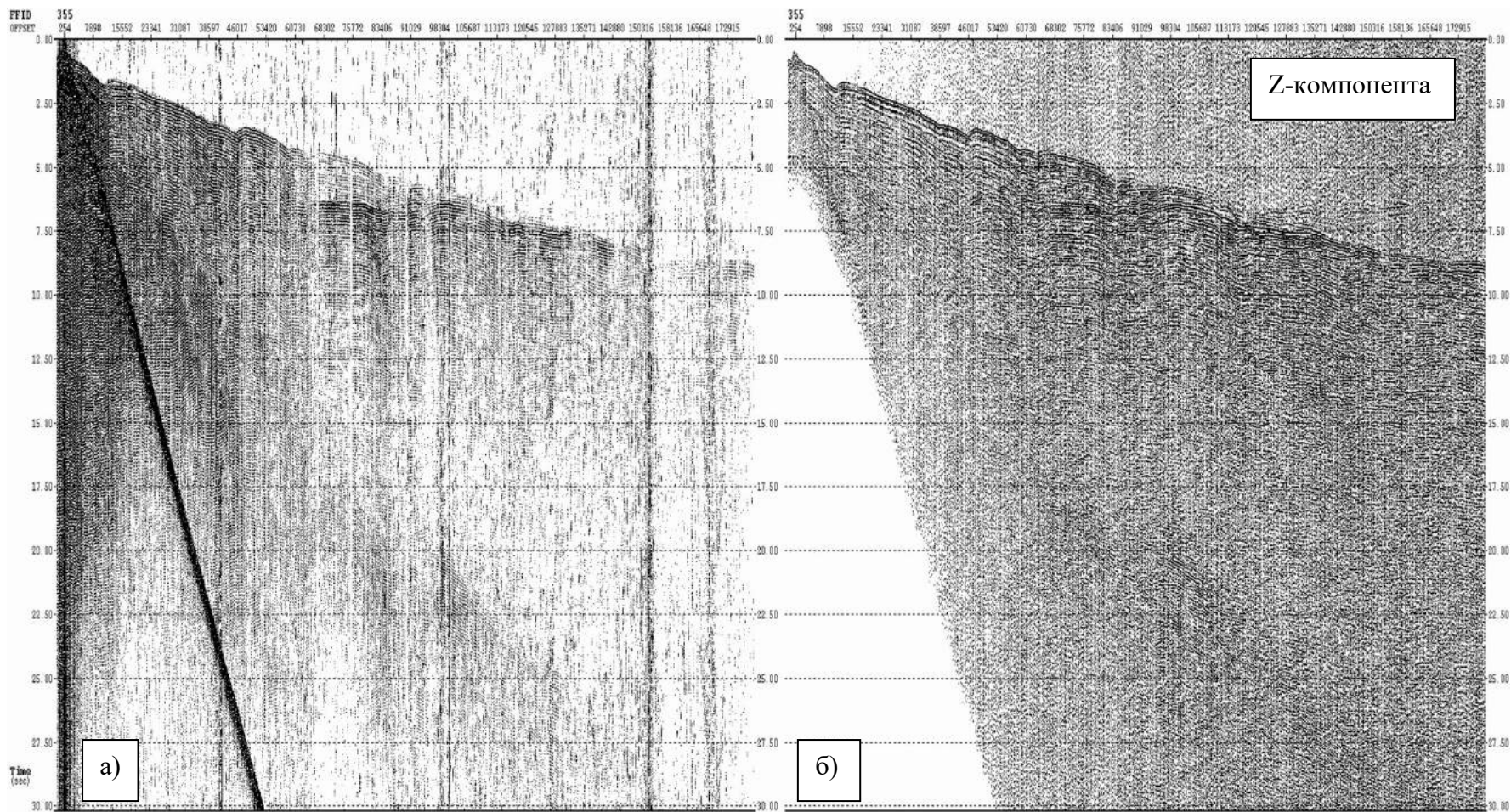


Рисунок 3.7 – Обработка сейсмических записей Z-компоненты с целью повышения вертикальной разрешенности

Примечание – Охотское море, профиль 2-ДВ-М, зондирование 355. Сейсмограмма представлена в редукции 8.0 км/с: а) сейсмограмма до обработки; б) сейсмограмма после обработки.

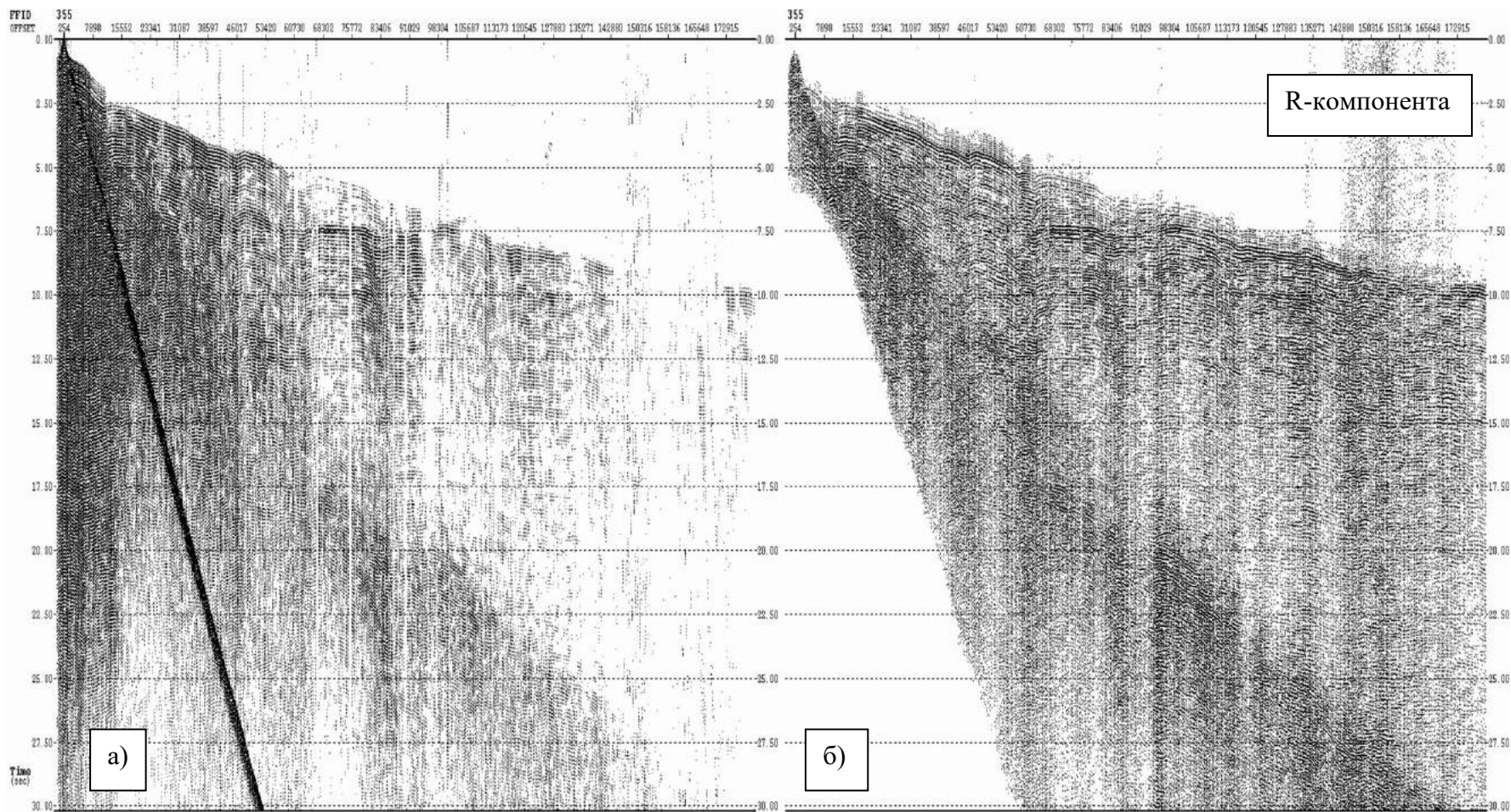


Рисунок 3.8 – Обработка сейсмических записей R-компоненты с целью повышения вертикальной разрешенности

Примечание – Охотское море, профиль 2-ДВ-М, зондирование 355. Сейсмограмма представлена в редукции 8.0 км/с: а) сейсмограмма до обработки; б) сейсмограмма после обработки.

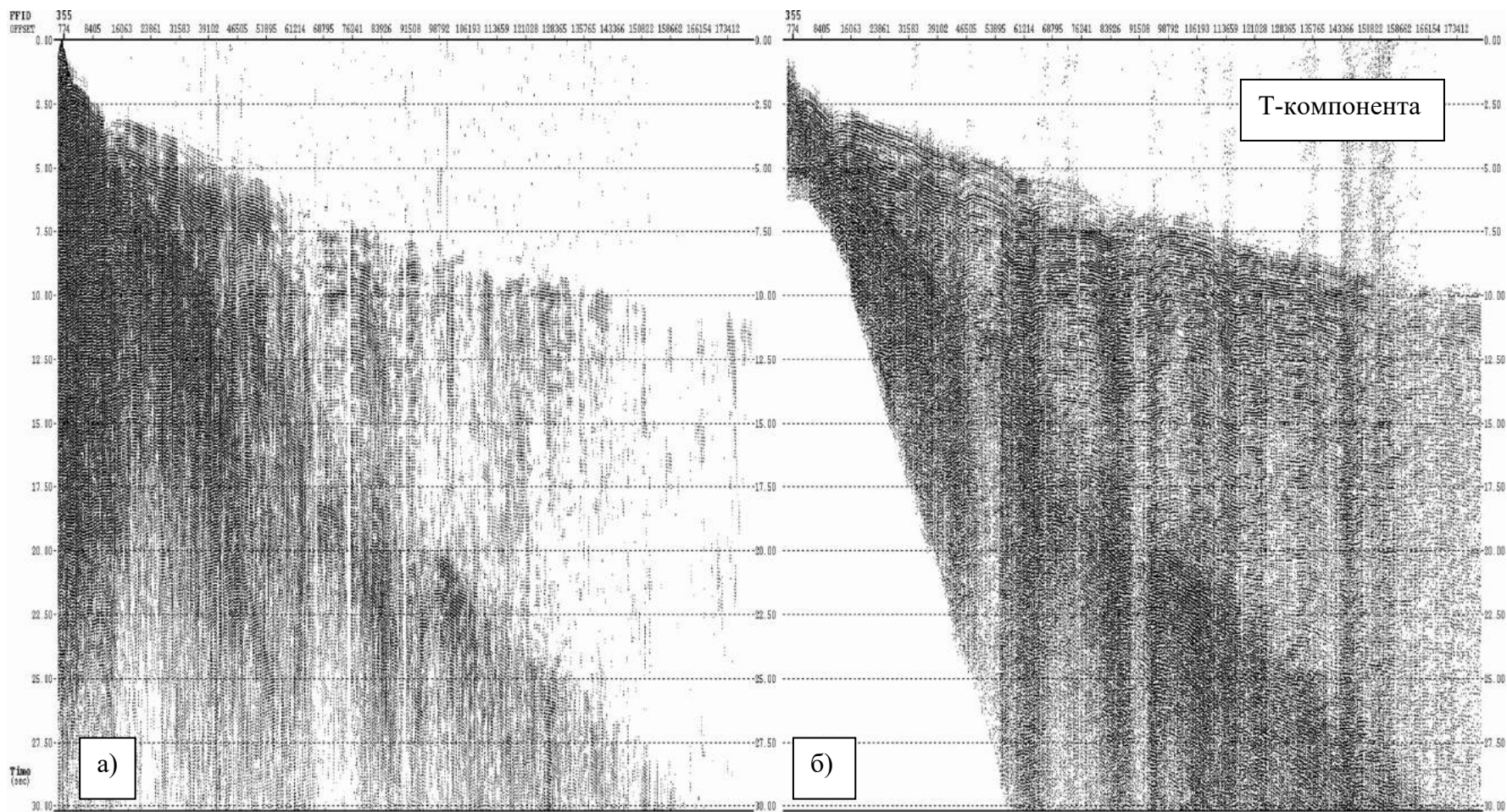


Рисунок 3.9 – Обработка сейсмических записей Т-компоненты с целью повышения вертикальной разрешенности

Примечание – Охотское море, профиль 2-ДВ-М, зондирование 355. Сейсмограмма представлена в редукции 8.0 км/с: а) сейсмограмма до обработки; б) сейсмограмма после обработки.

- в качестве фильтра пропускания для выделения осей синфазности поперечных волн в полосе частот 2-9 Гц.

Для более эффективного разделения поля продольных и поперечных волн правые и левые ветки сейсмических записей обрабатывались отдельно.

Остаточные оси синфазности продольных волн, интерферирующие с полем поперечных волн, подвергались повторной процедуре двумерной фильтрации в (f-k)-области в соответствующем диапазоне кажущихся скоростей продольных волн (Рисунок 3.10). Также для области распространения продольных и обменных волн применялась процедура мьютинга.

Второй подход. Выделение продольных волн и последующее их вычитание из полного волнового поля сейсмической записи.

Подчеркивание продольных волн выполнялось с использованием когерентной фильтрации (многоканальной фильтрации по кажущимся скоростям во временной области) по сейсмическим записям со спрямленными осями синфазности продольных волн. Спрявление осей синфазности осуществлялось путем поканального ввода статических поправок так же, как в первом подходе, описанном выше.

Далее для выделения поперечных волн выполнялось вычитание продольных волн из всего волнового поля путем суммирования исходной сейсмической записи с записью с подчеркнутыми продольными волнами, амплитуды которых взяты с обратным знаком (обратной полярностью). Сейсмические записи после вычитания поля продольных волн возвращались к исходным временам путем ввода поправок за редукцию и статических поправок с обратным знаком (Рисунок 3.11).

Тестирование двух подходов специализированной обработки трехкомпонентных наблюдений показало следующее: после применения процедуры вычитания поля продольных волн из полного волнового поля (второй подход) продольные волны становятся значительно слабее по сравнению с исходным волновым полем, однако оси синфазности поперечных волн искажаются, становятся менее регулярными. Наиболее эффективно работает первый подход, в основе которого лежит процедура двумерной фильтрации в (f-k) области по соответствующему вееру кажущихся скоростей для продольных и поперечных волн. Поле продольных волн становится заметно слабее, прослеживаются более четкие оси синфазности поперечных волн.

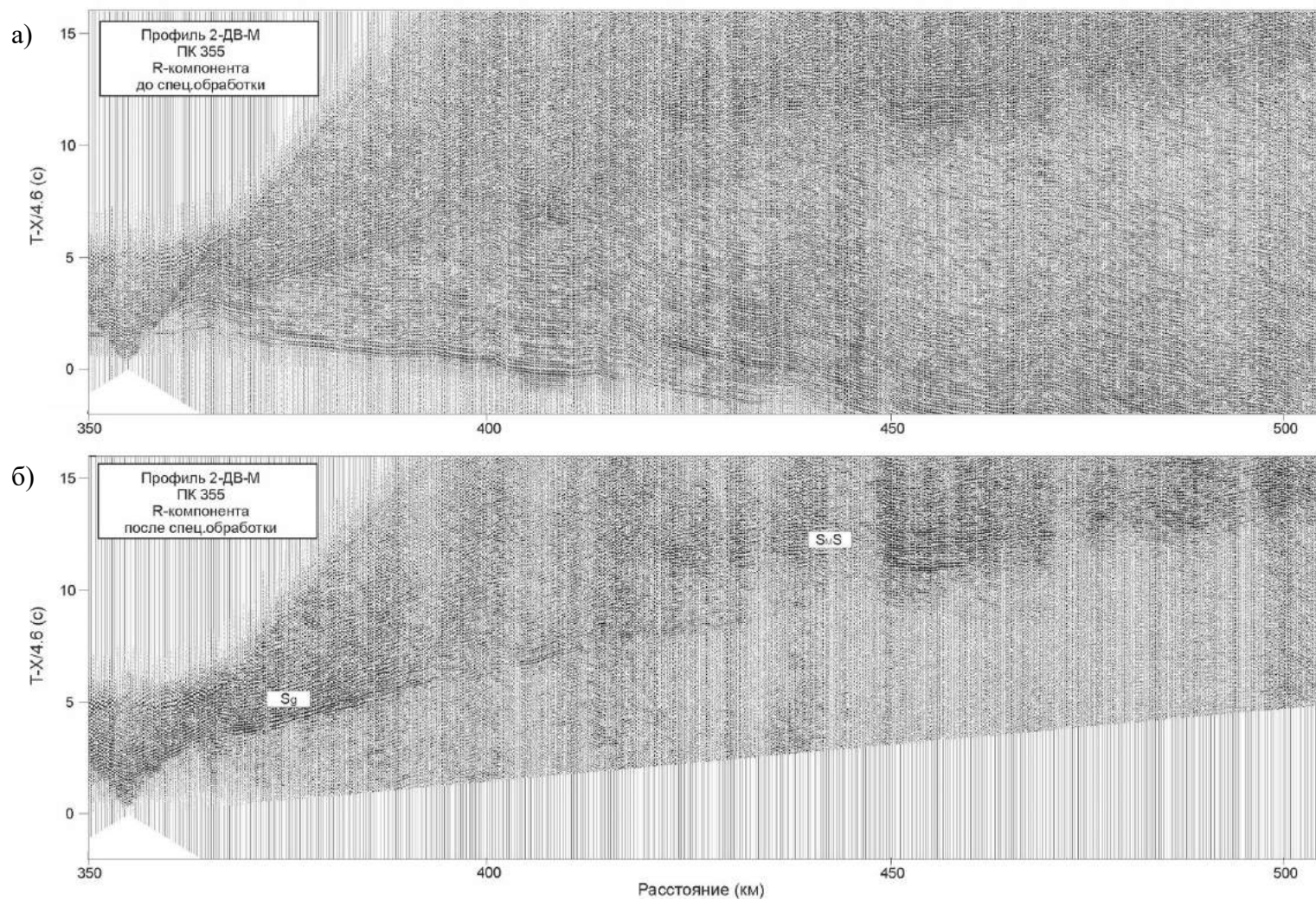
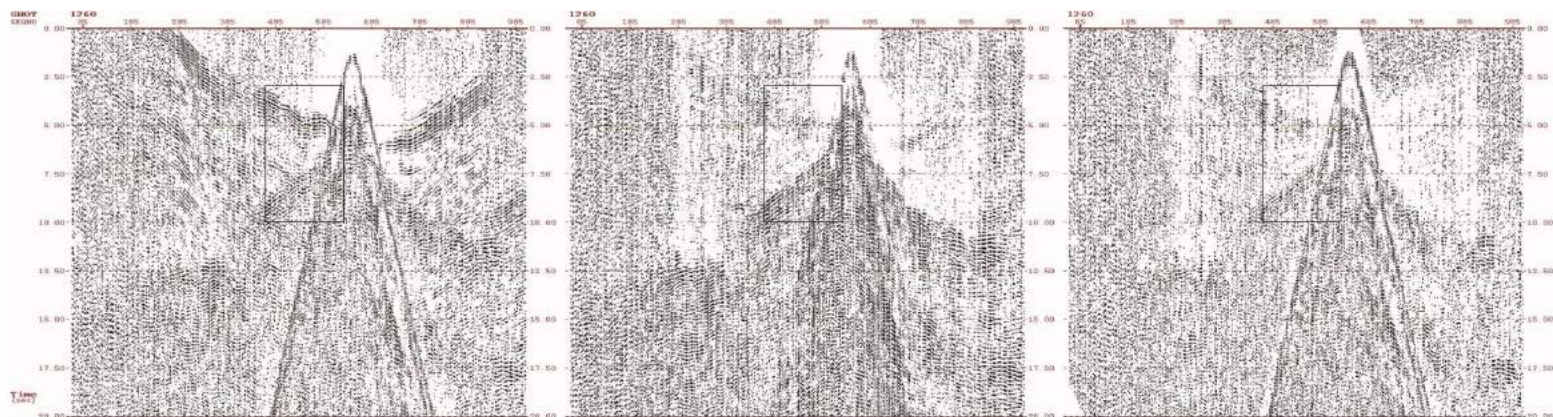


Рисунок 3.10 – Результат специализированной обработки трехкомпонентных наблюдений

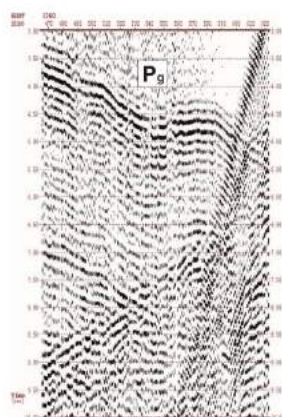
Примечание – Зондирование 355 R-компонента (правая ветвь). а) сейсмограмма до специализированной обработки в редукции 4.6 км/с; б) сейсмограмма после применения процедуры двумерной фильтрации в (f-k) области в редукции 4.6 км/с.



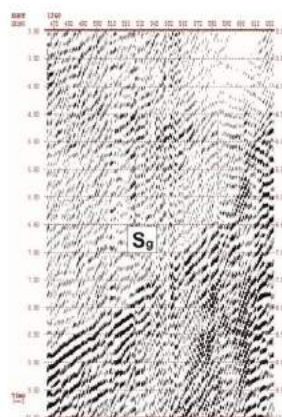
а)

б)

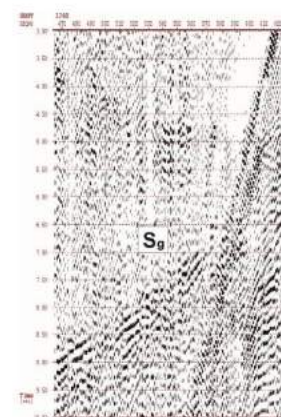
в)



г)



д)



е)

Рисунок 3.11 – Примеры ослабления продольных волн (P_g) и волн, с близкими к ним кажущимися скоростями [Поперечные и обменные..., 2019]

Примечание – а, г - исходная сейсмограмма радиальной компоненты в редукции 4.6 км/с; б, д - сейсмограмма после подчеркивания поперечных волн (S_g) многоканальной направленной фильтрацией; в, е - результат вычитания продольных волн из исходной сейсмограммы. Охотское море, опорный профиль 2-ДВ-М, Зондирование 1260.

3.2. Лучевое и конечно-разностное моделирование волновых полей продольных, поперечных и обменных волн для повышения информативности и достоверности скоростных моделей за счет использования различных типов волн

На заключительном этапе обработки сейсмических трехкомпонентных данных ГСЗ строится глубинный скоростной разрез по продольным, поперечным и обменным волнам методом лучевого моделирования. Самой распространенной программной реализацией лучевого моделирования всех основных типов и классов волн является пакет программ RayInvr, разработанный С. Zelt [Zelt, 1988, 1992, 1999]. Наиболее часто при интерпретации данных ГСЗ применяется адаптированная для современных персональных компьютеров версия RayInvr – SeisWide [Chian, 1994].

Скоростная модель в программе SeisWide задается последовательностью квазигоризонтальных слоев, разделенных границами, состоящими из прямолинейных отрезков. Толщина слоя может быть уменьшена до нуля, чтобы смоделировать выклинивание слоя или отдельных объектов. Каждый слой разбит на наборы блоков в виде трапеций с вертикальными правыми и левыми сторонами, а также верхними и нижними границами с произвольным углом наклона. Значения скорости задаются в углах каждой трапеции так, что скорость изменяется линейно по вертикали и латерали.

Трассирование лучей в скоростной модели осуществляется путем численного решения дифференциальных уравнений первого порядка, описывающих лучи в соответствии с законами геометрической сейсмологии. Суммарное время пробега волны вдоль луча определяется путем численного интегрирования по его траектории. Для заданного слоя модели может выполняться поиск трех типов семейств лучей: 1. лучи, которые поворачивают (рефрагируют) внутри слоя, 2. лучи, которые отражаются от подошвы слоя и 3. лучи, которые создают головные волны вдоль кровли подстилающего слоя. Каждое из трех основных семейств кинематических лучей, полученных в режиме поиска, может быть изменено посредством простых числовых кодов и «переключателей», чтобы включить в себя любое количество или комбинацию многократных отражений, отражений от свободной поверхности, и **P-S** или **S-P** преобразований на границе любого слоя.

Для построения глубинного скоростного разреза параметры модели (геометрия границ и скорости) подбираются таким образом, чтобы расхождения между временами прихода волн, рассчитанными для заданной модели на основе решения прямой задачи, и наблюдаемыми временами были минимальными (рассчитанные годографы сравниваются с волновыми полями зондирования). Подбор скоростной модели осуществляется для всех волн последовательно сверху вниз по геологическому разрезу.

На первом этапе строится скоростная модель по продольным волнам по сейсмограммам Z- или H-компонент (гидрофон). При формировании начальной скоростной модели используются следующие данные:

- глубинные и скоростные разрезы МОВ, прежде всего для осадочного чехла и поверхности фундамента в верхней части разреза;
- результаты корреляции и считывания времен прихода волн: система годографов преломленных и отраженных волн в первых и в последующих вступлениях с разделением волн и их отождествлением на различных зондированиях.

Скоростная модель по обменным и поперечным волнам строится в той же геометрии границ, что и для продольных волн. В качестве начальной скоростной модели берется модель, полученная из скоростной модели для продольных волн с использованием постоянного для всей коры соотношения $V_p/V_s=1.73$. В ходе лучевого моделирования скорости V_s поперечных и обменных волн рассчитываются через коэффициент Пуассона, что позволяет уточнить модель по продольным волнам.

Лучевое моделирование продольных, поперечных и обменных волн представлено на примерах трехкомпонентных сейсмических записей ГСЗ, полученных на профиле Dream-line в Чукотском море и северном фрагменте профиля 2-ДВ-М («Магадан – Южные Курилы») в Охотском море (Рисунки 3.12-3.14).

Стоит отметить, что скорости поперечных волн в осадочном чехле значительно ниже скоростей продольных волн, поэтому времена вступлений поперечных и обменных волн от фундамента более чувствительны к изменениям мощности осадочного чехла, что может быть использовано при уточнении геометрии кровли консолидированной коры для коррекции скоростной модели, построенной только по **P**- волнам.

Анализ поля кратных волн показал, что при определенном соотношении «глубина моря-мощность осадочного слоя» и отношения V_p/V_s кратные и обменные волны могут иметь примерно равные времена прихода волн, что осложняет определение типа волны и требует более тщательного анализа при лучевом моделировании. На рисунках 3.15-3.16 представлен пример расчета кратных и обменных волн для зондирований по профилю 2-ДВ-М в Охотском море. Сейсмограммы Z- и R-компонент представлены в редукции 5.8 км/с. Времена прихода кратных и обменных волн могут практически совпадать. Синей сплошной линией показаны годографы кратных волн, связанных с дном моря. Коричневой пунктирной линией показан годограф обменной волны.

Анализ поля обменных волн показал, что от мощности осадочного чехла может зависеть многообразие и интенсивность поля обменных волн: с увеличением мощности осадочного чехла уменьшается отношение амплитуд **P**- и **S**-волн и увеличивается

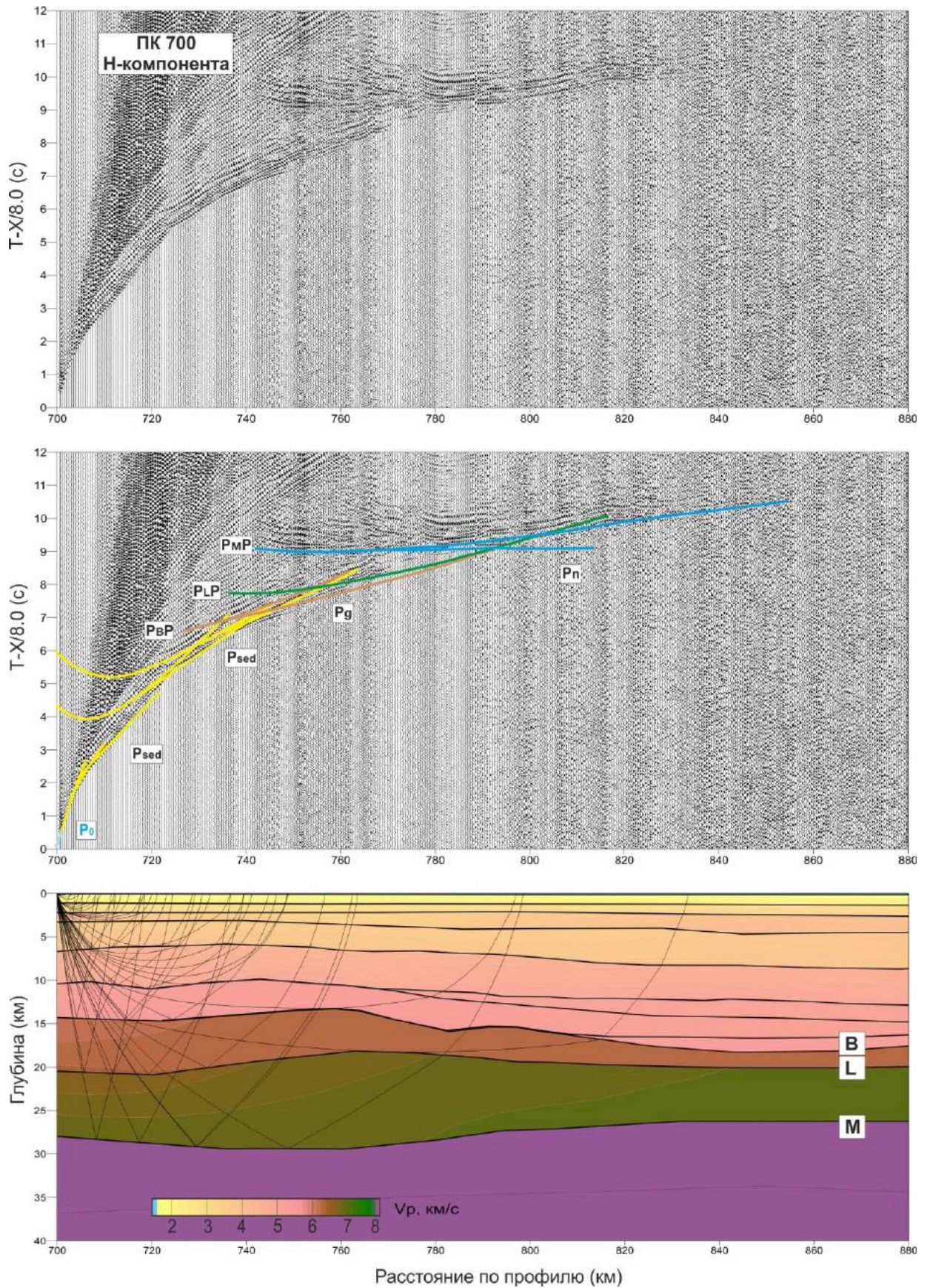


Рисунок 3.12 – Пример лучевого моделирования продольных волн в программе SeisWide

Примечание – Профиль Dream-line, ПК 700 (Зондирование 700). Сейсмограмма Н-компоненты представлена в редукции 8.0 км/с. Обозначения границ: В – поверхность верхней части консолидированной коры; L – поверхность нижней части консолидированной коры; М – подошва земной коры (граница Моховича).

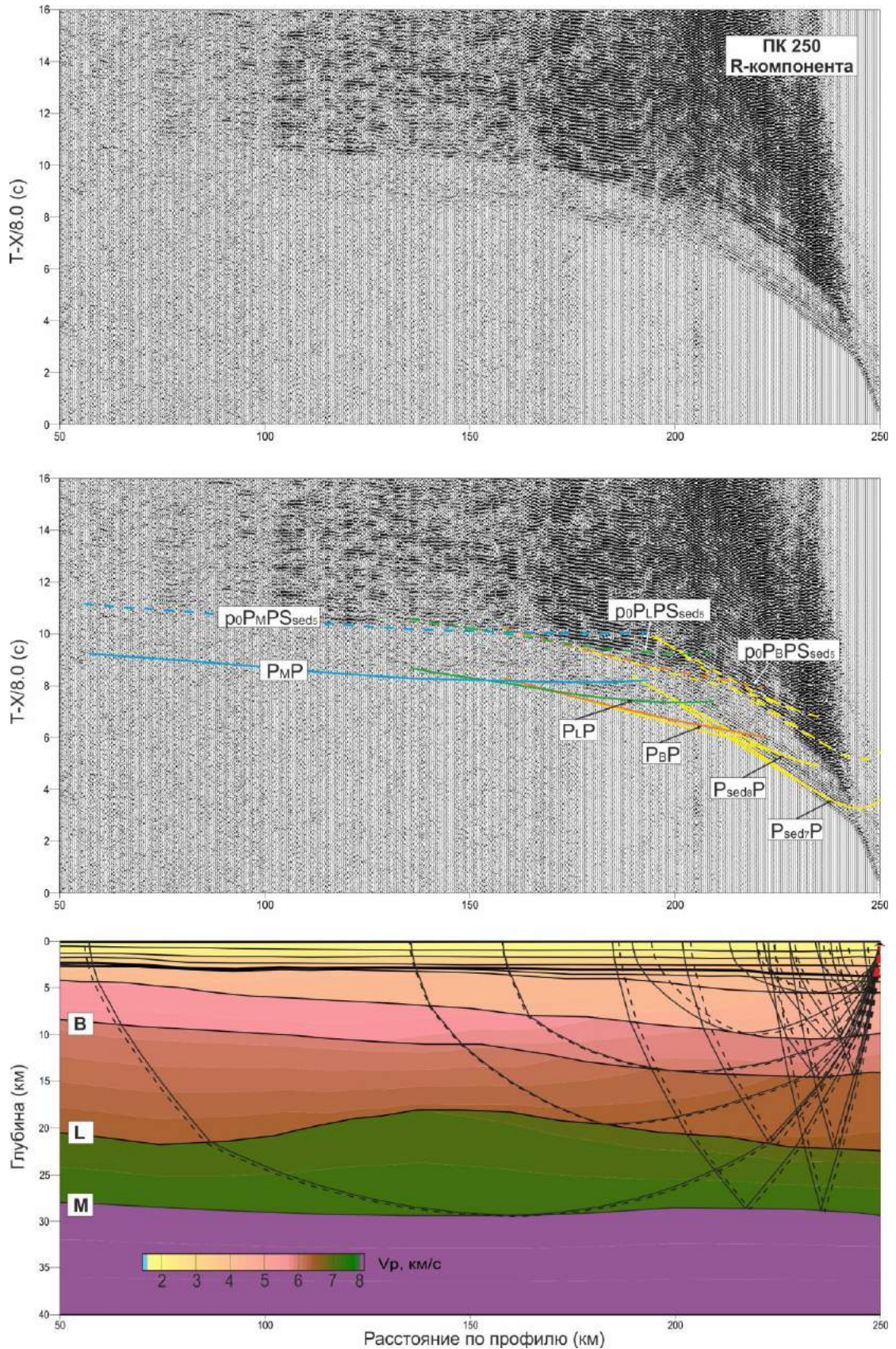


Рисунок 3.13 – Пример лучевого моделирования обменных волн в программе SeisWide

Примечание – Профиль Dream-line, ПК 250 (Зондирование 250). Сейсмограмма R-компоненты представлена в редуции 8.0 км/с. Сплошными линиями показаны годографы и лучи продольных волн, пунктирными линиями – годографы и лучи обменных волн. Граница обмена показана жирной линией черного цвета. Обозначения границ см. на рисунке 3.12.

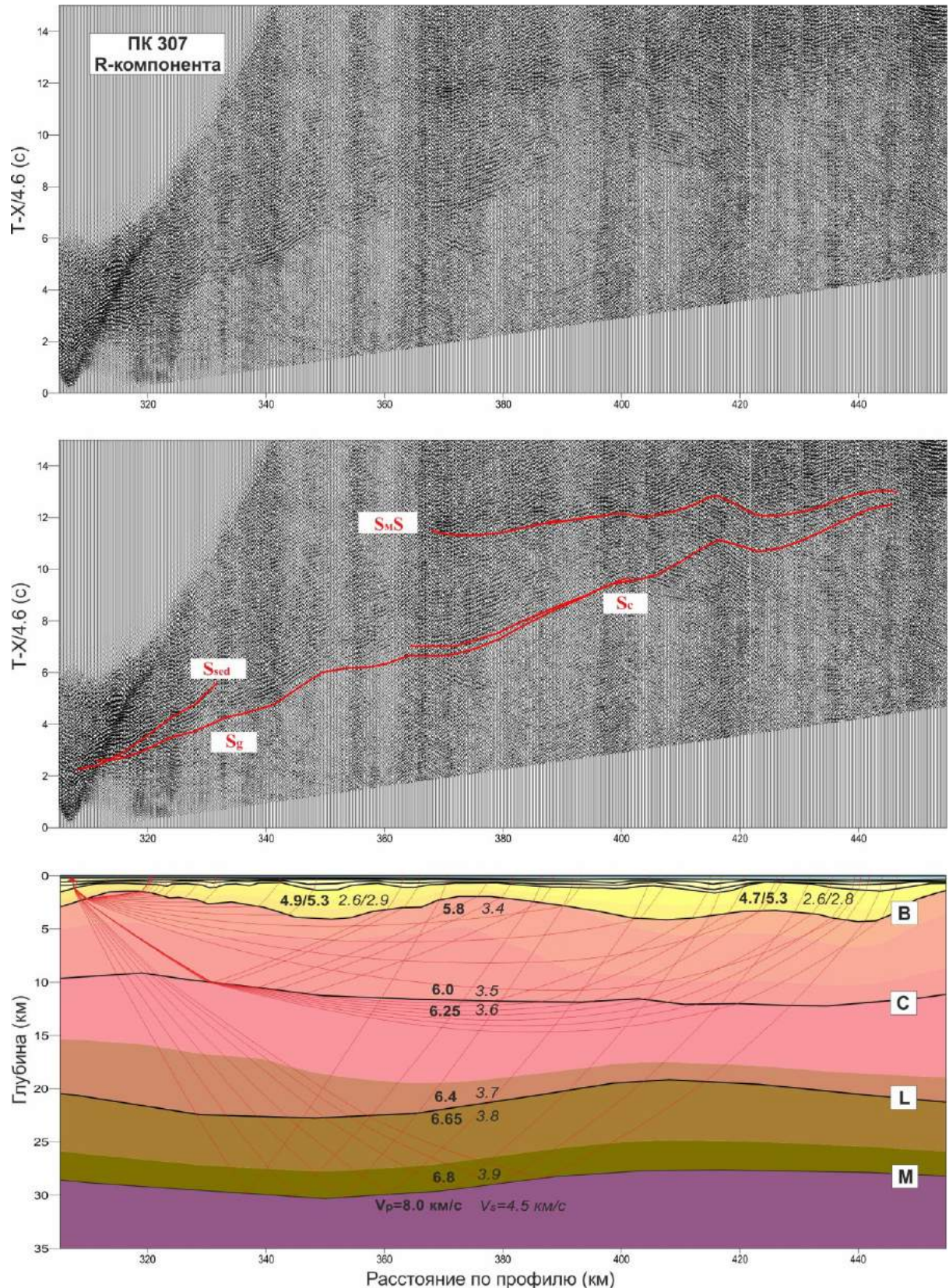


Рисунок 3.14 – Пример лучевого моделирования поперечных волн в программе SeisWide

Примечание – Профиль 2-ДВ-М, ПК 307 (Зондирование 307). Сейсмограмма R-компоненты представлена в редукции 4.6 км/с. Индексы волн: **Ssed** – рефрагированные волны в осадочном чехле, **Sg** – рефрагированные волны от поверхности верхней части консолидированной коры (граница B), **Sc** – рефрагированные волны от границы внутри коры (граница C), **SMs** – отраженные волны от подошвы земной коры (граница M). Префикс P_0 опущен для упрощения.

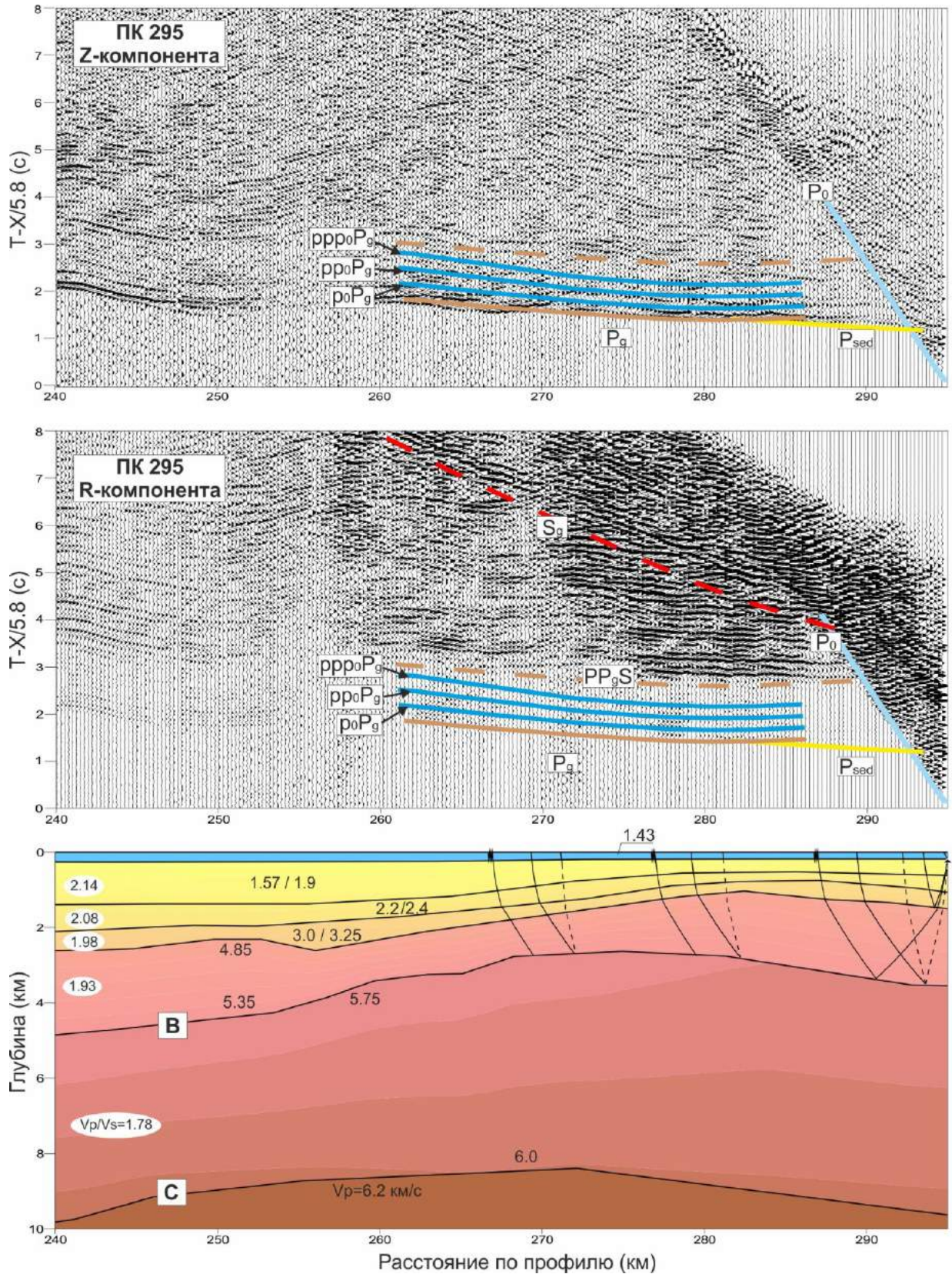


Рисунок 3.15 – Пример расчета кратных и обменных волн при небольшой глубине моря

Примечание – Профиль 2-ДВ-М, ПК 295 (Зондирование 295). Сейсмограммы Z- и R-компонент представлены в редукции 5.8 км/с. Синими сплошными линиями показаны годографы кратных волн, связанных с дном моря. Коричневой пунктирной линией показан годограф обменной волны.

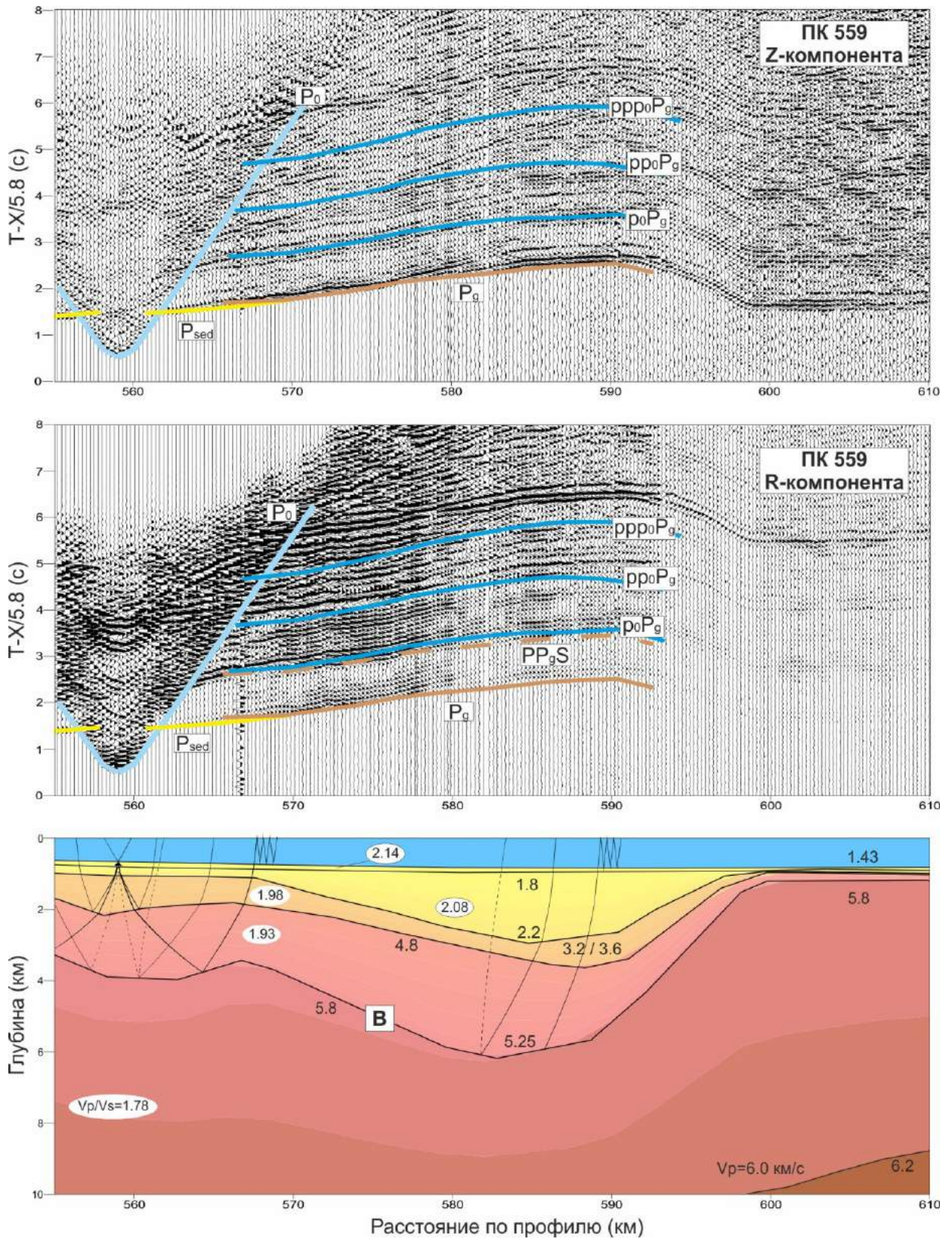


Рисунок 3.16 – Пример расчета кратных и обменных волн при большой глубине моря

Примечание – Профиль 2-ДВ-М, ПК 559 (Зондирование 559). Сейсмограммы Z- и R-компонент представлены в редукции 5.8 км/с. Синими сплошными линиями показаны годографы кратных волн, связанных с дном моря. Коричневой пунктирной линией показан годограф обменной волны.

интенсивность поля обменных волн. В этом случае поперечные волны практически не прослеживаются.

На рисунке 3.17 в качестве примера сопоставлена сейсмическая запись R-компоненты по профилю 2-ДВ-М в Охотском море (Зондирование 307) с синтетической сейсмограммой, полученной в результате конечно-разностного полноволнового моделирования (в редукции 4.6 км/с). Сейсмическая запись R-компоненты по профилю 2-ДВ-М подвергалась процедурам специализированной обработки, направленной на подчеркивание поперечных волн (поле продольных и обменных волн вычтено из общего волнового поля). Глубинная скоростная модель для конечно-разностного моделирования задана в соответствии с глубинным скоростным разрезом, полученным при решении прямой задачи путем лучевого моделирования (в программе SeisWide).

Учитывались латеральные изменения скоростей продольных и поперечных волн в слоях и рельеф границ скоростного разреза. При наложении синтетической сейсмограммы на сейсмическую запись по профилю 2-ДВ-М прослеживаются одни и те же по кинематике поперечные волны от основных границ в земной коре: Sg – рефрагированные волны от поверхности верхней части консолидированной коры, Sc – рефрагированные волны от границы внутри коры, SLS – отраженные волны от поверхности нижней коры, SMS – отраженные волны от границы Мохо. Различия в динамике волн на этих сейсмограммах обусловлены отсутствием шумов и помех на синтетической сейсмограмме, возникающих обычно при полевых работах.

На примерах сейсмических записей по двум профилям (Dream-line и 2-ДВ-М) видно, что на профиле с большой мощностью осадочного чехла (Северо-Чукотский прогиб, профиль Dream-line) поперечные волны практически полностью теряются на общем фоне поля разнообразных обменных волн, и, наоборот, при малой мощности осадочного чехла, как на профиле 2-ДВ-М в районе Центрально-Охотоморского Поднятия, поперечные волны не интерферируют с обменными и продольными волнами, а хорошо выделяются на сейсмических записях. Такая же зависимость наблюдалась при конечно-разностном моделировании для модели 3 (Модель коры подводных хребтов и поднятий) и 4 (Модель коры глубоких впадин).

3.3. Выводы по главе 3

Представленная специализированная методика выделения поперечных и обменных волн, зарегистрированных на трехкомпонентных сейсмических записях ГСЗ, позволяет:

1. Разделить поле **P**- и **SV**- волн от **SH**-волн по поляризационному признаку на этапе преобразования горизонтальных X- и Y- компонент в R- и T- компоненты.

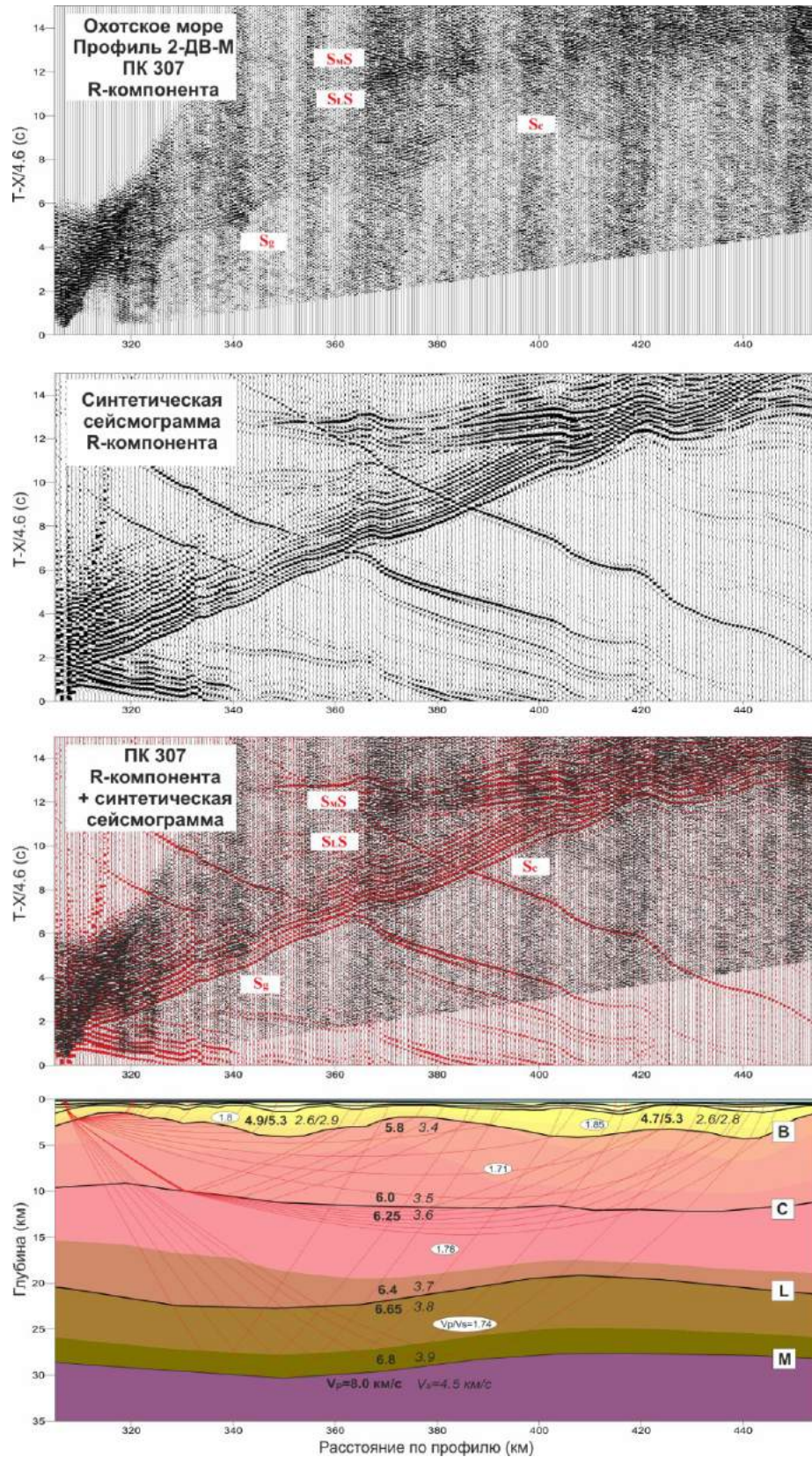


Рисунок 3.17 – Сопоставление поля поперечных волн, зарегистрированных в Охотском море на профиле 2-ДВ-М (ПК 307, Зондирование 307), с волновым полем синтетической сейсмограммы, рассчитанной конечно-разностным методом

Примечание – Индексы волн: S_g – рефрагированные волны от поверхности верхней части консолидированной коры, S_c – рефрагированные волны от границы внутри коры, $S_L S$ – отраженные волны от поверхности нижней коры, $S_M S$ – отраженные волны от границы М (префикс P_0 опущен).

2. Выделить и подчеркнуть поперечные волны, связанные с поверхностью верхней части консолидированной коры, а также подошвой земной коры в результате применения процедур вычитания поля продольных волн из полного волнового поля и двумерной фильтрации в($f-k$) области по соответствующему вееру кажущихся скоростей.

3. Построить глубинную скоростную модель земной коры с привлечением не только продольных, но и поперечных и обменных, кратных и частично-кратных волн.

4. Установить границы обмена для обменных волн в осадочном чехле, консолидированной коре, а также от подошвы земной коры.

5. Установить зависимость поля обменных волн от мощности осадочного чехла: с увеличением мощности осадочного чехла уменьшается отношение амплитуд **P**- и **S**-волн и увеличивается интенсивность поля обменных волн.

6. Оценить отношение V_p/V_s в осадочном чехле и консолидированной коре, позволяющее повысить информативность и точность построения скоростных моделей за счет использования волн разных типов и классов.

7. Повысить информативность и достоверность построенных скоростных моделей за счет использования конечно-разностного полноволнового моделирования при анализе волновых полей ГСЗ.

**ГЛАВА 4 ГЛУБИННОЕ СТРОЕНИЕ СЕВЕРО-ЧУКОТСКОГО ПРОГИБА ПО
ДАНЫМ МОРСКИХ МНГОВОЛНОВЫХ СЕЙСМИЧЕСКИХ
ИССЛЕДОВАНИЙ¹⁾**

Региональные сейсмические исследования ГСЗ и МОВ-ОГТ в Восточно-Сибирском и Чукотском морях проводились ФГУ НПП «Севморгео» в 2008-2009 гг. В 2009 г. по заказу компании British Petroleum в результате международного российско-британского

¹⁾ При подготовке данной главы диссертации использованы следующие публикации автора, в которых отражены основные результаты, положения и выводы исследования:

1. **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.
2. Сакулина, Т.С. Глубинное строение земной коры и верхней мантии Северо-Чукотского прогиба по профилю ГСЗ 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. **Яварова, Т.М.** Строение консолидированной земной коры Северо-Чукотского прогиба по данным ГСЗ / **Т.М. Яварова**, Н.А. Крупнова, А.В. Разматова, С. Н. Табырца. – 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 (дата обращения 18.04.2022).
5. 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.
6. Kashubin S.N., Milshtein E.D., Sakulina T.S. et al. Crustal structure (wide-angle seismics). Tectonostratigraphic atlas of the Arctic. (Eastern Russia and adjacent areas). Editors-in-Chief: O.V. Petrov, M. Smelror. Saint-Petersburg, VSEGEI Press, 2019. P. 64-72. ISBN 978-5-93761-268-7.
7. Строение земной коры (широкоугольное сейсмическое зондирование) / С.Н. Кашубин, ..., **Т.М. Яварова** [и др.]. – Текст : непосредственный // Тектоностратиграфический атлас Восточной Арктики : монография / Отв. ред.: О.В. Петров, М. Смелрор. – Санкт-Петербург : ВСЕГЕИ, 2020. – С. 65-71. – ISBN 978-5-93761-296-0.
8. **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. – Т. 4. – С. 121-126. URL : <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=46279439&selid=47142181> (дата обращения 18.04.2022).
9. Kashubin S.N., Petrov O.V., Milshtein E.D. et al. Deep Structure Model. Tectonics of Asia (Northern, Central and Eastern Asia). Editors-in-Chief: O.V. Petrov and S. Dong. Springer Geology. 2021. P. 33-61. URL: <https://doi.org/10.1007/978-3-030-62001-1> (дата обращения 18.04.2022).

сотрудничества был отработан профиль ГСЗ Dream-line, расположенный в Восточно-Сибирском и Чукотском морях. Профиль проходит с северо-запада на юго-восток вдоль депоцентров мощных осадочных бассейнов Восточно-Сибирского и Северо-Чукотского прогибов (Рисунок 4.1) [Сакулина и др., 2016а].

В 2008-2009 гг. в рамках государственной программы по обоснованию внешней границы континентального шельфа отрабатывался профиль 5-AP, который включал целый комплекс геолого-геофизических работ. Профиль 5-AP протянулся от мыса Биллингса на берегу пролива Лонга до южного окончания профиля «Арктика-2005» [Поселов, 2011], пересекая Северо-Чукотский прогиб в субмеридиональном направлении. Профиль ГСЗ Dream-line имеет одну точку пересечения с профилем 5-AP: 800 км по профилю Dream-line и 490 км по профилю 5-AP.

4.1. Сейсмические работы ГСЗ и МОВ-ОГТ на профилях Dream-line и 5-AP

4.1.1. Исследования ГСЗ на профилях Dream-line и 5-AP

На профиле Dream-line наблюдения ГСЗ были выполнены на двух участках общей протяженностью 925 км (см. Рисунок 4.1): западном (10-395 км по профилю) и восточном (650-1190 км по профилю). Разрыв линии наблюдений связан со сложной ледовой обстановкой во время проведения полевых работ [Сакулина и др., 2016а].

Для записи сейсмических сигналов использовались АДСС с четырехкомпонентной регистрацией: три компоненты вектора смещения X, Y, Z (геофоны) и одна компонента всестороннего сжатия Н (гидрофон). Шаг между станциями по профилю – 10 км. Сейсмическая информация получена в 92 точках постановки донных станций: на 40 станциях – в западной части профиля и 52 станциях – в восточной части.

Для возбуждения сейсмических сигналов применялся пневмоисточник СИН-6 (СИН-6М) объемом 80 л и 120 л, буксируемый в воде на глубине 20-37 м. Временной интервал между возбуждениями составлял 2 мин, что в плане соответствует 250 м при скорости судна 5-6 узлов, регистрация сейсмических колебаний от каждого возбуждения осуществлялась в течение 60 с с шагом дискретизации 8 мс. Полезные волны зарегистрированы на удалениях от источника в основном до 200-250 км.

На профиле 5-AP работы ГСЗ проводились по аналогичной методике. Протяженность профиля составляет 550 км, сейсмические записи получены на 55 донных станциях. Полезные волны зарегистрированы на удалениях от источника в среднем до 200 км; на некоторых зондированиях максимальные удаления достигают 300–400 км; в северной части профиля удаления, на которых прослежены полезные волны, уменьшаются до 100–180 км [Сакулина и др., 2011а].

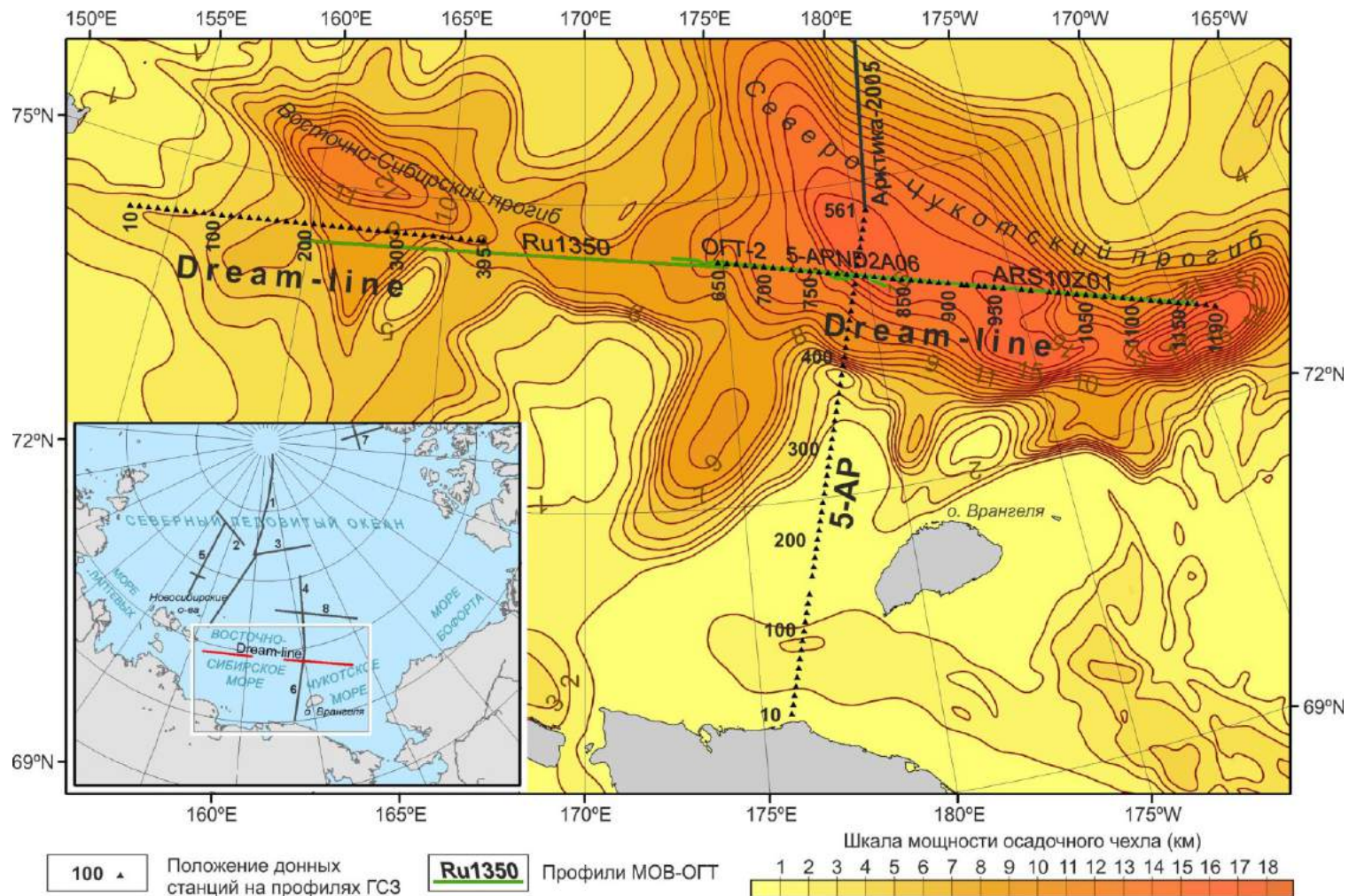


Рисунок 4.1 – Схема расположения профилей ГСЗ 5-AP и Dream-line и профилей МОВ-ОГТ, близко расположенных к линии профиля Dream-line, на карте мощности осадочного чехла Северо-Чукотского бассейна [Petrov, 2016]

Примечание – 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].

Обработка сейсмических материалов ГСЗ. Предварительная обработка полевых материалов ГСЗ включала преобразование записей донных регистраторов в сейсмограммы общей точки приема, ввод необходимых технологических поправок и формирование таблиц геометрии наблюдений [Сакулина и др., 2016а].

Для сейсмических записей горизонтальных X-, Y-компонент осуществлялся пересчет волнового поля в радиальную R-компоненту (в плоскости распространения лучей) и трансверсальную T-компоненту (перпендикулярно плоскости распространения лучей) соответственно [Кашубин, 2011]. Пересчет горизонтальных компонент волнового поля в радиальную и трансверсальную описан в Главе 3 настоящей работы. Угол поворота для каждого зондирования определялся по водной (прямой) волне P_0 или, при малой глубине моря, по головной волне, распространяющейся вдоль дна. Для расчета угла поворота использовались значения амплитуд X-, Y-, Z-компонент во временном окне 0.15 с на удалениях источник-приемник до 5-6 км.

Последующая динамическая обработка сейсмических записей ГСЗ была направлена на повышение соотношения сигнал/шум и временной разрешенности сейсмозаписей с целью выделения в первых и последующих вступлениях преломленных (рефрагированных, головных) и отраженных (докритических, закритических) волн от границ в земной коре и верхов мантии. Обработка выполнялась в системе Focus 5.4 Paradigm Geophysical и включала следующие процедуры: частотная широкополосная фильтрация (2-4÷24-40 Гц); ослабление аномальных амплитудных выбросов; деконволюция сжатия с последующей полосовой фильтрацией в более узкой полосе частот (2-4÷12-16 Гц); нормировка амплитуд в заданном окне по среднему значению.

Подготовленные таким образом сейсмограммы зондирований использовались для лучевого моделирования при построении глубинного скоростного разреза земной коры на всю ее мощность.

4.1.2. Исследования МОВ-ОГТ на профилях Dream-line и 5-AP

Исследования МОВ-ОГТ непосредственно *по профилю Dream-line* не проводились. Однако позднее, в 2010-2012 г.г., разные организации выполняли работы МОВ-ОГТ в этом регионе. При построении глубинного скоростного разреза земной коры и верхов мантии по профилю Dream-line использовались сейсмические материалы МОВ-ОГТ по профилям, которые совпадают или близки по своему положению с профилем ГСЗ Dream-line (см. Рисунок 4.1): профиль ARS10Z01 (2010 г., исполнитель - ОАО «Дальморнефтегеофизика» по договору с СВКНИИ ДВО РАН), профиль RU2-1350 (2012 г., исполнитель - ОАО «Севморнефтегеофизика» по договору с ОАО «ГНИНГИ»), профиль ОГТ-2 (2012 г., исполнитель - компания WGP Exploration Limited по договору с ОАО «Севморгео»).

На профиле 5-AP при комплексных геофизических исследованиях ФГУ НПП «Севморгео» были выполнены работы МОБ-ОГТ в объеме 550 км. Кроме того, в 2008 г. были проведены дополнительные работы МОБ-ОГТ на его субширотной расщелке 5-ARND2A06, которая частично перекрывает профили ОГТ-2 и ARS10Z01.

Краткие сведения о методике полевых работ на всех перечисленных профилях приведены в таблице 4.1.

Таблица 4.1 – Краткие сведения о методике полевых работ МОБ-ОГТ на профилях, близко расположенных к линии наблюдений профиля ГСЗ Dream-line

	RU2-1350	ОГТ-2	ARS10Z01	5-AP, 5-ARND2A06
Приемное устройство				
Тип сейсмической косы	SEAL Sentinel Fluid, 24 bit	Sercel SEAL Streamer	Sercel SEAL	SEAL Sentinel Solid, 24 bit
Количество каналов	408	48	636	648
Шаг между центрами групп, м	25	12.5	12.5	12.5
Минимальное удаление, м	125	100	100	130
Максимальное удаление, м	10300	688	8038	8217.5
Активная длина косы, м	10200	600	7950	8100
Источник колебаний				
Тип источника	G-Gun	BOLT APG 8500 SERIES	Tuned Bolt array	Input/Output Sleeve guns
Суммарный объем пушек, куб. дюймов	4820	2050	5000	4010
Рабочее давление, psi	2000	2000	2000	2000
Интервал возбуждения, м	50	50	37.5	50
Кратность ОГТ	102	6	106	81
Параметры регистрации				
Длина записи, с	18	15	12	15
Шаг дискретизации, мс	2	2	2	2
Формат записи	SEG-D 8058	SEG-D 8058 IEEE	SEG-D 8058 IEEE	SEG-D 8058

Обработка сейсмических материалов МОБ-ОГТ. Сейсмические материалы МОБ-ОГТ по выше рассмотренным профилям были переобработаны в 2015 г. специалистами ОАО «Севморгео» в системе Focus 5.4 Paradigm Geophysical. Переобработка данных МОБ-ОГТ была направлена, прежде всего, на построение сводного сейсмического разреза МОБ-ОГТ по указанным профилям, на повышение информативности сейсмического разреза осадочного чехла с целью уточнения строения

верхней части разреза земной коры по профилю ГСЗ Dream-line. Переобработка сейсмических данных по всем профилям выполнялась по единому графу (за исключением профиля ОГТ-2, отработанного с короткой косою 600 м). Стандартный граф обработки был расширен включением таких процедур, как преобразование Радона в режиме моделирования и вычитания энергии кратных волн из входных сейсмических записей, миграция Кирхгофа до суммирования, деконволюция по разрезу в F-X-области [Сакулина и др., 2016а].

При обработке фондовых материалов МОВ-ОГТ использовались два подхода: 1) обработка каждого из профилей МОВ-ОГТ отдельно с последующей их сшивкой для формирования сводного разреза; 2) обработка объединенного профиля, составленного путем сборки профилей в единый профиль на уровне исходных сейсмограмм с созданием единой геометрии. Такая сборка предполагала исключение краевых эффектов при выполнении скоростного анализа и при выполнении миграции до суммирования. Единый профиль был собран без исключения перекрытий отдельных интервалов. Однако из-за различий в системах наблюдений, технологии работ, технических средств объединение всех сейсмограмм в единый профиль привело к неравномерному шагу между точками CDP (6.25 м и 12.5 м) и к значительным колебаниям кратности наблюдений (от 6 до 193) на разных участках объединенного профиля, а также к понижению разрешенности сейсмического разреза и к менее четкому выделению и прослеживанию сейсмических границ в областях стыковки профилей. Поэтому в качестве окончательного был выбран сводный разрез, полученный путем объединения разрезов по отдельным профилям (Рисунок 4.2) [Сакулина и др., 2016а].

4.2. Глубинный скоростной разрез (V_p , V_p/V_s) земной коры и верхов мантии по материалам ГСЗ вдоль профиля Dream-line

Для корректного построения глубинного скоростного разреза (V_p , V_p/V_s) земной коры и верхов мантии при морских сейсмических исследованиях целесообразно придерживаться ряда методических приемов, зарекомендовавших себя в работах над опорными профилями в арктическом регионе: 1) детальный анализ зарегистрированных донными станциями волновых полей, 2) идентификация и отождествление волн от зондирования к зондированию; 3) задание начальной глубинной скоростной модели, учитывающей опубликованные данные о геологическом строении региона; 4) комплексное использование материалов ГСЗ и МОВ-ОГТ для более устойчивого решения прямой задачи для верхней сложно построенной части разреза, включающей осадочный чехол и расчлененную поверхность фундамента - кровлю консолидированной коры, 5) совместное использование волн разных типов и классов при построении глубинного скоростного разреза. Автор работы совместно с коллегами придерживалась именно этих принципов при построении глубинного скоростного разреза земной коры и верхов мантии Северо-Чукотского прогиба.

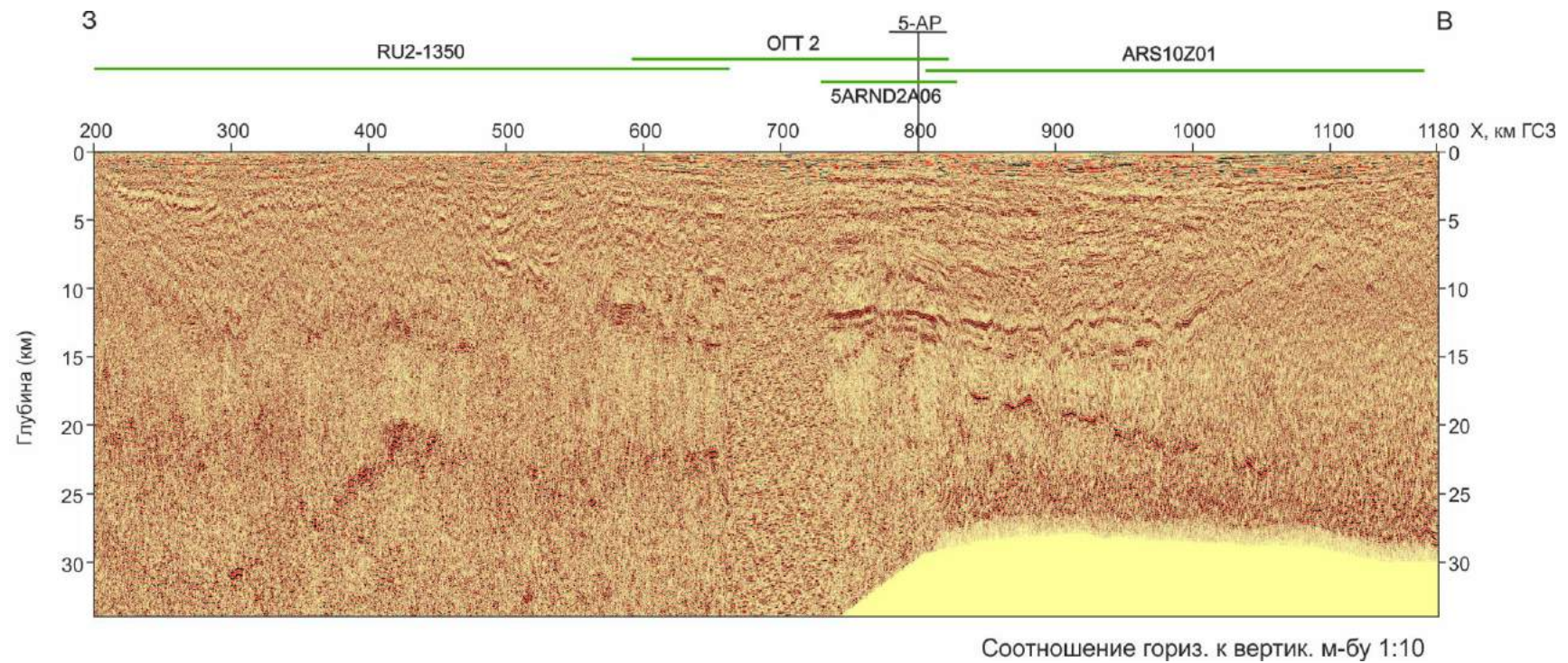


Рисунок 4.2 – Сводный глубинный сейсмический разрез МОВ-ОГТ по профилю ГСЗ Dream-line [Сакулина и др., 2016а].
 Примечание – Над разрезом указаны номера профилей ОГТ и место пересечения с профилем ГСЗ 5-АР (на 800 км).

4.2.1. Характеристика волновых полей ГСЗ (*P*-, *PS*- и *S*-волн) по профилю *Dream-line*

В результате анализа сейсмограмм ГСЗ были выделены волны разных типов (**P**-, **PS**- и **S**-волны) от границ в осадочном чехле, от кровли консолидированной коры (граница В), нижней части консолидированной коры (граница L) и подошвы земной коры (граница М) [Сакулина и др., 2016а].

Поле продольных волн описано по сейсмограммам Z-компонент, поле поперечных и обменных волн – в основном по сейсмограммам R-компонент. Пример волновых полей, зарегистрированных на профиле *Dream-line*, представлен на рисунке 4.3. В таблице 4.2 приведена характеристика основных продольных, поперечных и обменных волн, которые удалось выделить на сейсмических записях профиля *Dream-line*. Префикс P_0 , обозначающий распространение P-волны от источника в водном слое опущен для простоты.

Продольные волны. В первых вступлениях на удалениях от источника до 40-60 км прослеживаются рефрагированные/преломленные волны с кажущимися скоростями от 1.7 км/с до 5.5-5.8 км/с слоев в осадочном чехле (**P_{sed}**). Далее в первые вступления выходят волны с кажущимися скоростями 5.8-6.4 км/с, связанные с верхней частью консолидированной коры (**P_g**), за которыми редко в первых, а чаще в последующих вступлениях прослеживаются волны с кажущимися скоростями 6.7-7.2 км/с; эти волны связаны с нижней частью консолидированной коры (**P_L**). На удалениях около 100-120 км в первые вступления выходит волна со скоростью около 8.0 км/с, преломленная в верхах мантии (**P_n**), но наблюдается не на всех зондированиях.

Доминирующими волнами в последующих вступлениях являются отраженные волны от границы М (**P_MP**). Их отличительной особенностью является большая амплитуда и многофазный характер записи. Годографы волны отличаются хорошо выраженной криволинейностью и уменьшением кажущихся скоростей при увеличении расстояния источник-приемник; на больших удалениях они не превышают 6.8-7.2 км/с, что свидетельствует о значениях скоростей в нижней консолидированной коре, типичных для континентального типа коры.

Волны, связанные с нижней частью консолидированной коры, прослеживаются практически повсеместно, но часто они динамически очень слабо выражены. В последующих вступлениях с расстояний от источника 50-80 км наблюдается волна, имеющая характерную для годографов отраженных волн криволинейную форму (**P_LP**). Преломленная/рефрагированная волна **P_L** часто выпадает из годографов первых волн; тогда в последующих вступлениях волна **P_LP** с разрывом по времени и становится первой вследствие затухания предыдущих волн.

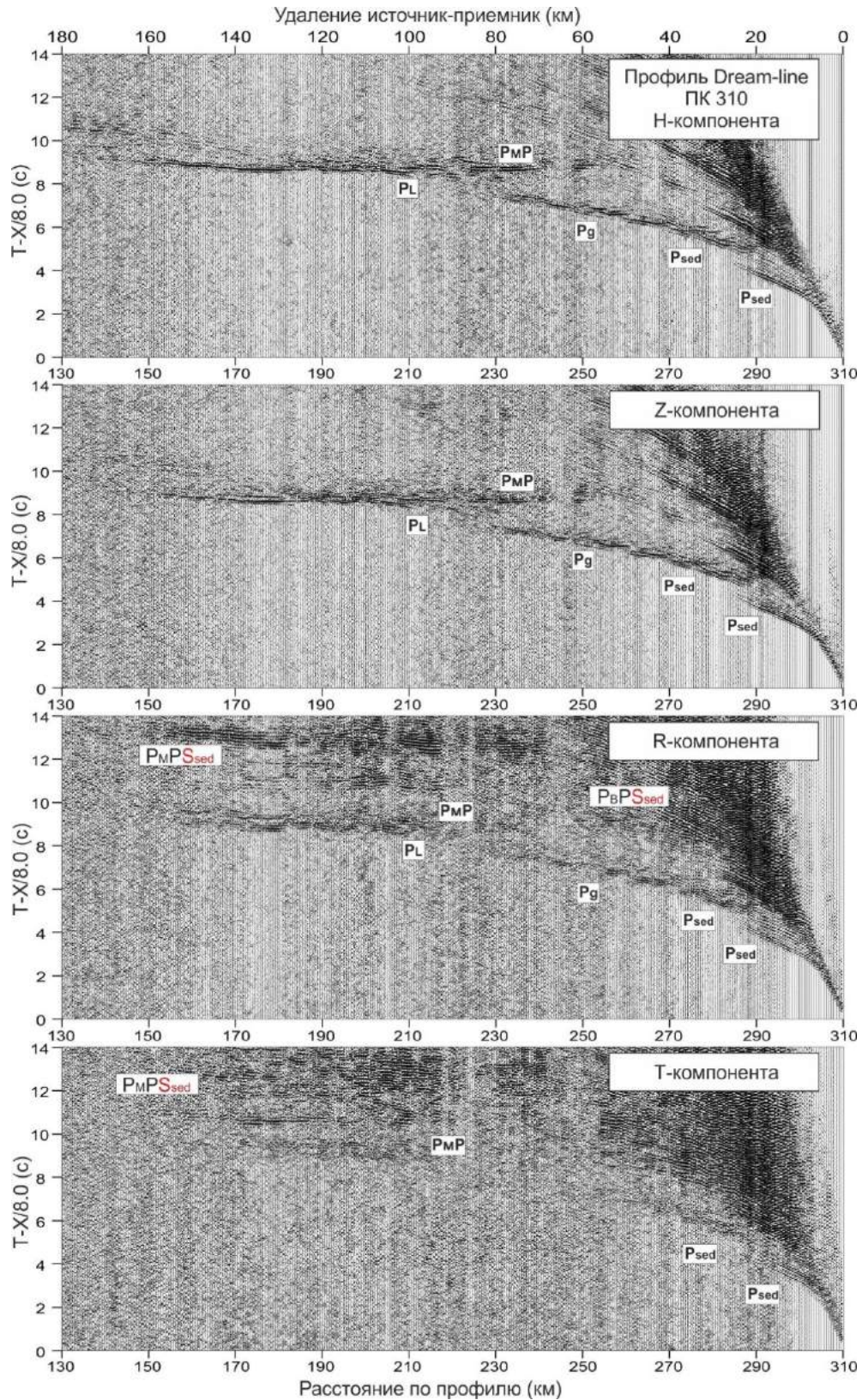


Рисунок 4.3 – Пример волновых полей ГСЗ, зарегистрированных на профиле Dream-line

Примечание – Обозначения волн: **Psed** – продольные головные (рефрагированные) волны в осадочном чехле; **Pg** – продольные головные волны по поверхности кристаллической коры; **PL** – продольные рефрагированные волны в нижней части кристаллической коры; **PMP** – продольные отраженные волны от границы М; **PBPsed**, **PMPsed** – обменные отраженные волны от верхней части кристаллической коры и от границы М.

Таблица 4.2 – Основные волны, выделяемые на сейсмических записях профиля Dream-line

	Обозначение волны	Характеристика волны
Волны от границ в осадочном чехле	Psed_i	продольные рефрагированные волны в <i>i</i> -ом слое осадочного чехла
	Psed_iP	продольные отраженные волны от <i>i</i> -ой границы в осадочном чехле
	Ssed_iS	поперечные отраженные волны от <i>i</i> -ой границы в осадочном чехле
	Ssed_i	поперечные рефрагированные волны в <i>i</i> -ом слое осадочного чехла
Волны от кровли консолидированной коры (граница В)	P_BP	продольная отраженная волна от кровли консолидированной коры
	S_BS	поперечная отраженная волна от кровли консолидированной коры
	P_BPSsed_i	обменная отраженная волна с одним обменом с Р- типа на S- на восходящем луче на <i>i</i> -ой границе; волна повторяет кинематику волны P _B P
	P_BS	обменная отраженная волна с одним обменом с Р- типа на S- на восходящем луче на границе В
	Psed_iS_BSPsed_i	обменная отраженная волна с двумя обходами с Р- типа на S- на падающем луче на <i>i</i> -ой границе и с S- типа на Р- на восходящем луче на <i>i</i> -ой границе; волна повторяет кинематику волны P _B P
Волны от нижней части консолидированной коры (граница L)	P_LP	продольная отраженная волна от нижней части консолидированной коры
	P_LPSsed_i	обменная отраженная волна с одним обменом с Р- типа на S- на восходящем луче на <i>i</i> -ой границе, повторяет кинематику продольной волны P _L P
Волны от подошвы земной коры (граница М)	P_MP	продольная отраженная волна от подошвы земной коры
	S_MS	поперечная отраженная волна от подошвы земной коры
	P_MPSsed_i	обменная отраженная волна с одним обменом с Р- типа на S- на восходящем луче на <i>i</i> -ой границе; волна повторяет кинематику волны P _M P
	Psed_iS_MS	обменная отраженная волна с одним обменом с Р- типа на S- на падающем луче на <i>i</i> -ой границе; волна повторяет кинематику волны S _M S

Волновое поле в восточной части профиля по сравнению с западной имеет более сложный характер. К основным особенностям, которые обуславливают неоднозначность волнового поля, можно отнести следующие:

1) На интервале профиля ПК 820-900 км рефрагированные и отраженные волны от кровли консолидированной коры (фундамента) и от границы в нижней части коры приходят с близкими временами, что затрудняет разделение этих волн; на отдельных зондированиях отмечается выпадение рефрагированной волны от фундамента из первых вступлений. Это свидетельствует об утонении верхней консолидированной коры.

2) На интервале профиля ПК 1020-1190 км волновое поле носит нерегулярный характер: криволинейная форма годографов, наличие дифрагированных волн, петли на годографах затрудняют корреляцию и разделение волн, а также отождествление волн, относящихся к одним и тем же границам.

Такое неоднозначное волновое поле на сейсмограммах ГСЗ связано, прежде всего, со сложным геологическим строением осадочного чехла, что с очевидностью проявляется и на разрезе МОВ-ОГТ. Кроме того, в этой части профиля наблюдается уменьшение в целом кажущихся скоростей волн, приуроченных к нижней части осадочного чехла.

Следует отметить одну особенность, проявляющуюся в волновых полях ГСЗ как в западной, так и в восточной части профиля: на сейсмических записях ОПП (общего пункта приема) на удалениях 15-30 км от центра зондирований наблюдается разрыв годографов в первых вступлениях. В западной части профиля разрыв годографов начинается с ПК 280 км, величина разрыва по времени увеличивается к ПК 340-350 км, а потом уменьшается к концу этой части профиля. К сожалению, отсутствие наблюдений ГСЗ на интервале профиля ПК 395-650 км не позволяет проследить, где кончается разрыв. В восточной части профиля разрыв годографов начинается с ПК 760-780 км, также сначала увеличиваясь, а потом уменьшаясь к концу профиля.

Разрыв годографов можно объяснить повышением скорости в верхней части разреза осадочного чехла на этих участках профиля, что находит отражение в кажущихся скоростях годографов волн в первых вступлениях: максимальные значения кажущихся скоростей на удалениях до 30 км от центра зондирования увеличиваются с 3.4-3.6 км/с до 3.9-4.1 км/с. Возникает, вероятно, эффект экранирования по отношению к нижележащему слою, имеющему кажущиеся скорости 3.5-3.8 км/с.

Поперечные волны. Поперечные волны (будем рассматривать волны, распространяющиеся от источника в водном слое как продольные **P**- и меняющие на дне моря тип волны с продольных на поперечные **S**-) прослеживаются лишь на некоторых сейсмических записях зондирований в западной части профиля. Поперечные волны

динамически слабо выражены и представлены в основном волновыми пакетами, по которым трудно выполнить фазовую корреляцию.

Наиболее четко на сейсмических записях прослеживаются поперечные волны, связанные с осадочным чехлом. Они наблюдаются лишь на АДСС 310-370 на удалениях источник-приемник до 20 км. Поперечные волны от кровли консолидированной коры наблюдаются на отдельных сейсмических записях АДСС 40-110 в интервале удалений 40-70 км.

Поперечные волны от подошвы земной коры (граница М) однозначно не выделяются из-за многофазности волнового пакета и отсутствия протяженных осей синфазности. Эти волны удается проследить лишь на участке профиля ПК 150-280 км на удалениях источник-приемник от 80-90 км до 110-130 км на временах 15-16 с.

Обменные волны. Практически на всех сейсмических записях радиальной R-компоненты в последующих вступлениях наблюдаются достаточно интенсивные обменные волны, связанные с границами в осадочном чехле, в консолидированной коре, включая ее подошву (границу М). Обменные волны чаще всего имеют кажущиеся скорости соответствующих продольных волн, но регистрируются с временной задержкой относительно времен прихода продольных волн. Более подробная характеристика обменных волн будет дана ниже в п.4.2.2., посвященном лучевому моделированию для продольных, поперечных и обменных волн, зарегистрированных на профиле Dream-line.

4.2.2. Лучевое моделирование продольных, поперечных и обменных волн, зарегистрированных на профиле Dream-line

Для построения модели использовалась методика итерационного подбора её параметров (геометрии границ, значений скоростей) с последующей проверкой решением прямой задачи методом лучевого трассирования [Zelt, 1992]. Решение прямой задачи выполнялось в программе кинематического моделирования SeisWide.

Многообразие зарегистрированных волн на сейсмических записях, а также их интерференция в купе с шумовой составляющей и сложным геологическим строением региона, несомненно, создают сложную волновую картину, которая требует более тщательного анализа волнового поля в целом, более точного задания параметров модели и выбора схем обмена для обменных волн от границ модели при построении глубинного скоростного разреза земной коры и верхов мантии.

Моделирование продольных волн. Для моделирования продольных волн использовались сейсмические записи геофона (Z-компонента) и гидрофона

(Н-компонента). Скорость в водном слое была принята постоянной 1.43 км/с, слои в осадочном чехле и земной коре заданы с градиентным распределением скоростей.

При моделировании рассчитывались времена прихода продольных преломленных/рефрагированных и отраженных волн: в осадочном чехле использовались в основном преломленные/рефрагированные волны, в консолидированной коре – рефрагированные и отраженные волны. Пример моделирования продольных волн представлен на рисунке 4.4.

Также помимо моделирования целевых продольных волн был выполнен расчет теоретических годографов кратных продольных волн, зарегистрированных в большом количестве на сейсмических записях вертикальных и горизонтальных компонент, которые обычно игнорируются при построении глубинного скоростного разреза. Кратные волны часто затрудняют идентификацию и отождествление «полезных» волн от той или иной границы. В результате лучевого моделирования выявлены частично-кратные продольные рефрагированные волны, не связанные с дном моря (обычно при морских сейсмических исследованиях кратные волны связываются именно с дном моря – явление реверберации), а связанных с границами в осадочном чехле (Рисунок 4.5). Волны напоминают «ступени», зарегистрированные с временным сдвигом относительно друг друга примерно в 2 с и со сдвигом в удалениях источник-приемник около 5 км относительно удалений соответствующей продольной волны, распространяются с кажущейся скоростью 4.1 км/с. Кратнообразующими границами являются кровля и подошва осадочного слоя 2 (границы модели 2 и 3 с контрастом скоростей продольных волн 0.91 км/с и 0.86 км/с, соответственно). Выявление и расчет теоретических годографов таких волн, в том числе, можно рассматривать в качестве проверки моделирования однократных продольных волн, что также повысило достоверность модели осадочного чехла в целом.

От зондирования к зондированию как на западном, так и на восточном участках профиля Dream-line расчетные годографы продольных волн достаточно хорошо совпадают с зарегистрированным волновым полем продольных волн.

Моделирование поперечных и обменных волн. Для моделирования поперечных и обменных волн использовались сейсмические записи R-компонент. В качестве исходной модели для расчета теоретических годографов поперечных и обменных волн использовалась модель, построенная вдоль профиля Dream-line по продольным волнам.

Геометрия границ и скорости продольных волн были зафиксированы. Подбор скоростей поперечных волн выполнялся сверху вниз по разрезу путем задания

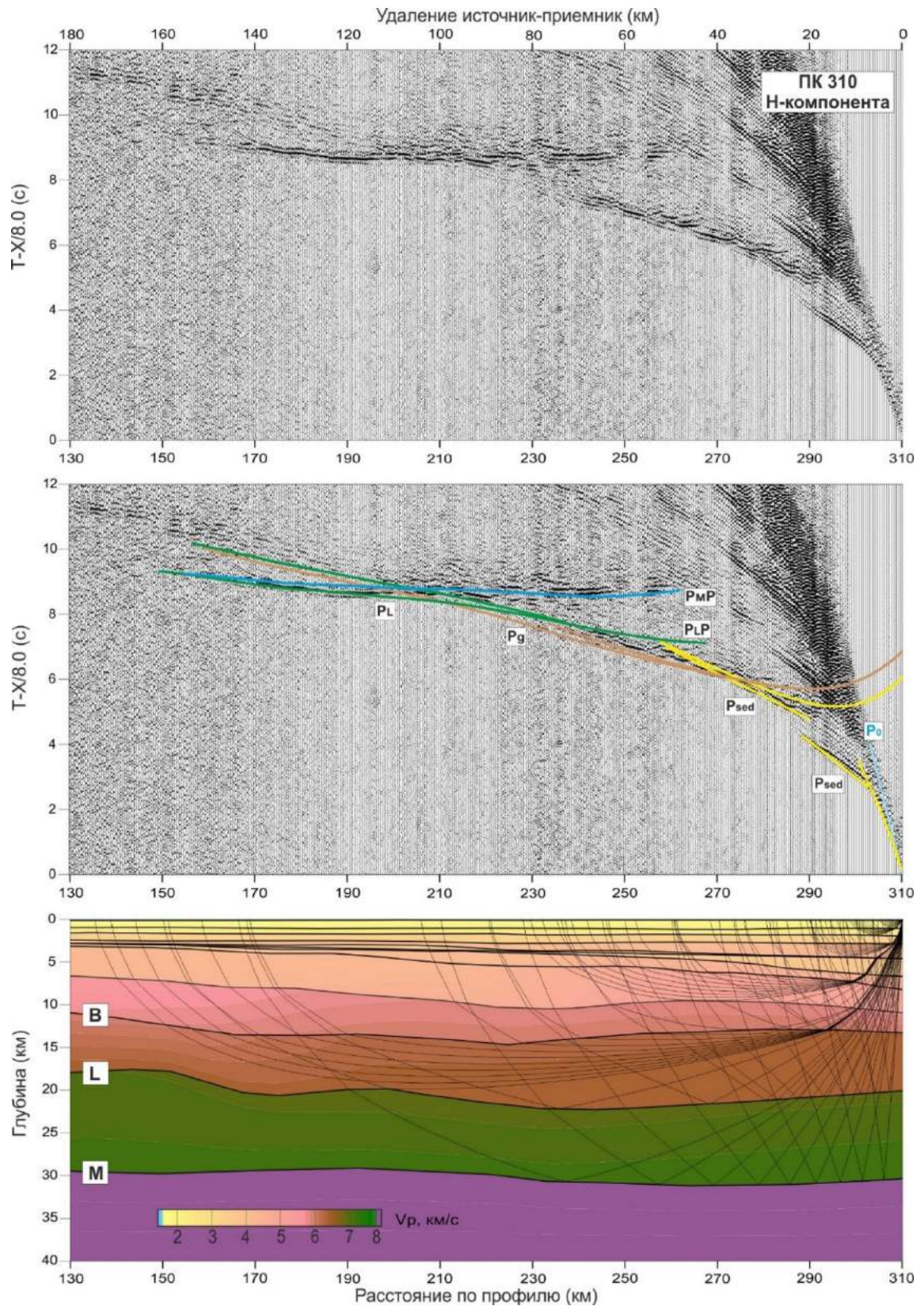


Рисунок 4.4 – Пример лучевого моделирования рефрагированных и отраженных Р-волн в земной коре и верхов мантии (профиль Dream-line, ПК 310, Н-компонента)

Примечание – Сейсмограмма представлена в редукции 8.0 км/с. Обозначения волн: P_0 – прямая волна в водном слое; остальные обозначения на рисунке 4.3. Обозначения границ: В – кровля верхней коры; L – кровля нижней коры; М – подошва земной коры. Лучевая схема показана для обращенной системы наблюдения.

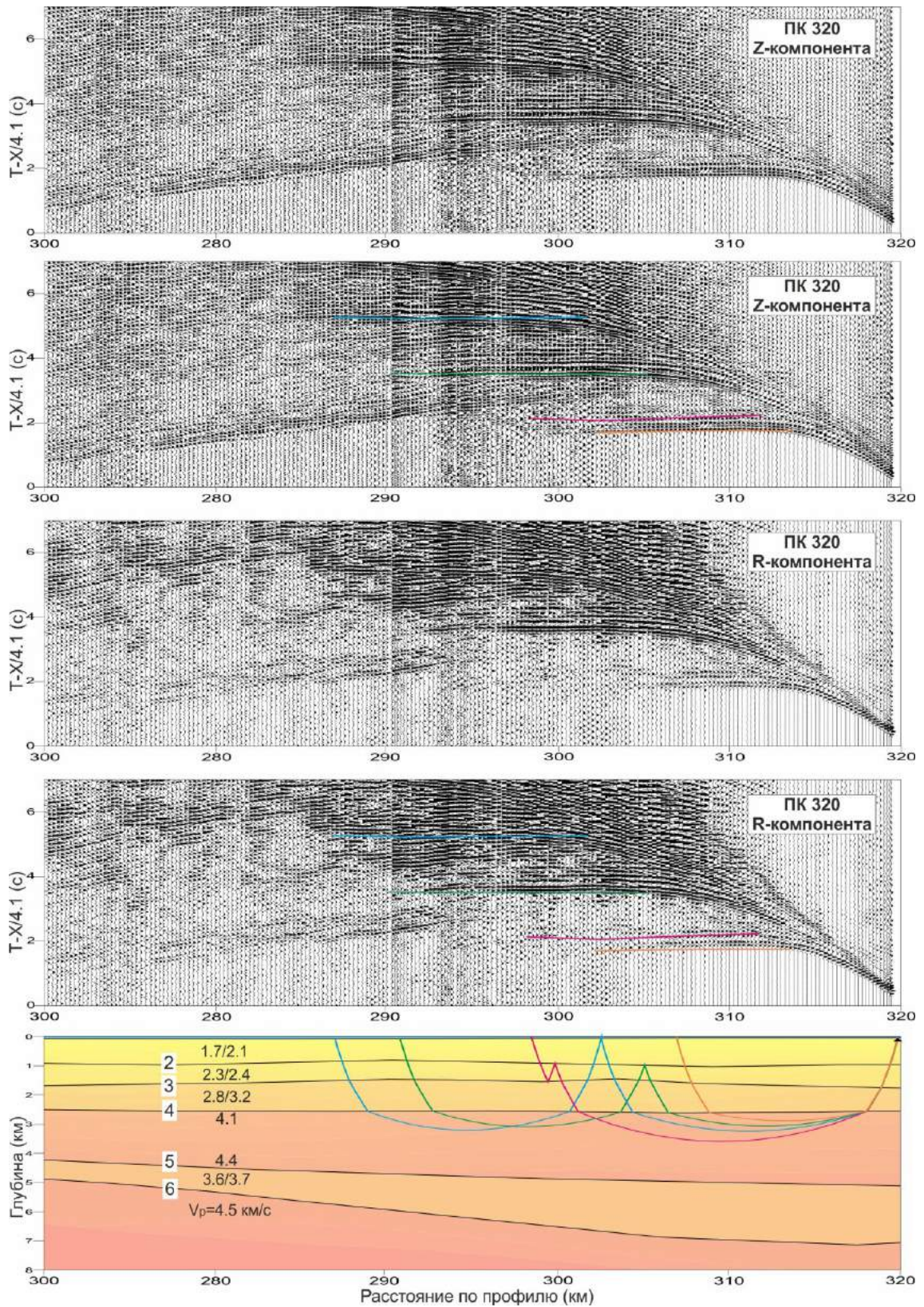


Рисунок 4.5 – Пример лучевого моделирования частично-кратных рефрагированных Р-волн от границы 4, связанных с границами в осадочном чехле (профиль Dream-line, ПК 320, Z- и R-компоненты)

Примечание – Сейсмограммы представлены в редукции 4.1 км/с. Цвет лучей соответствует цвету годографов на сейсмограммах: оранжевым цветом – однократная волна, розовым, зеленым, синим – частично-кратные волны.

коэффициента Пуассона в каждом слое модели. В первом приближении значения V_p/V_s в слоях задавались близкими к значениям V_p/V_s , полученным на профиле 5-AP, и корректировались в зависимости от особенностей волновой картины зондирований.

Анализ волновых полей показал, что поперечные волны динамически слабее по сравнению с обменными и наблюдаются лишь на некоторых сейсмограммах зондирований.

За счет невысокого соотношения сигнал/шум на сейсмограммах R-компонент и интерференции разных типов и классов волн поперечные волны моделировались совместно с обменными, т.е. в рамках одного зондирования рассматривался сразу весь набор возможных лучевых схем распространения волн, в том числе и обменных.

Наиболее интенсивные поперечные волны, которые удалось выделить, прослеживаются преимущественно на участке профиля ПК 310-370, тогда как обменные волны, особенно имеющие кинематику продольных волн, прослеживаются практически повсеместно.

Поперечные волны *от границ в осадочном чехле* наблюдаются на удалениях источник-приемник до 20 км. На рисунке 4.6 представлены примеры моделирования поперечной рефрагированной волны **Ssed₄** от кровли высокоскоростного слоя (границы 4) на фрагментах сейсмограмм и соответствующих им интервалах разреза. Эта волна характеризуется слабой интенсивностью по сравнению с продольным аналогом от той же границы. Кажущаяся скорость рефрагированной продольной волны **Psed₄** вдоль границы 4.1 км/с, кажущаяся скорость рефрагированной поперечной волны **Ssed₄** 2.0 км/с.

На ПК 650-800 на удалениях источник-приемник 20-50 км наблюдается обменная рефрагированная волна **Ssed₄Psed₅** в слое ниже границы 5 в осадочном чехле с обменом с **P-** на **S-** на восходящем луче на границе 4 – подошве высокоскоростного экрана (Рисунок 4.7).

На ПК 910-1010 на удалениях источник-приемник 20-40 км наблюдаются интенсивные обменные отраженные волны от границы 5 (с контрастом скоростей продольных волн 0.78-0.84 км/с) в осадочном чехле, повторяющих кинематику продольной волны **Psed₅P** (Рисунок 4.8): волна **Ssed₃Psed₅P** (на рисунке показана зеленым цветом) с обменом с **P-** на **S-** на восходящем луче на 3-ей границе в осадочном чехле – кровле высокоскоростного экрана; волна **Ssed₅P** (на рисунке показана фиолетовым цветом) с обменом с **P-** на **S-** на восходящем луче при отражении от 5-ой границы в осадочном чехле.

Поперечные волны *от кровли консолидированной коры* выделяются на единичных сейсмических записях на ПК 40-110, где мощность осадочного чехла наименьшая, и

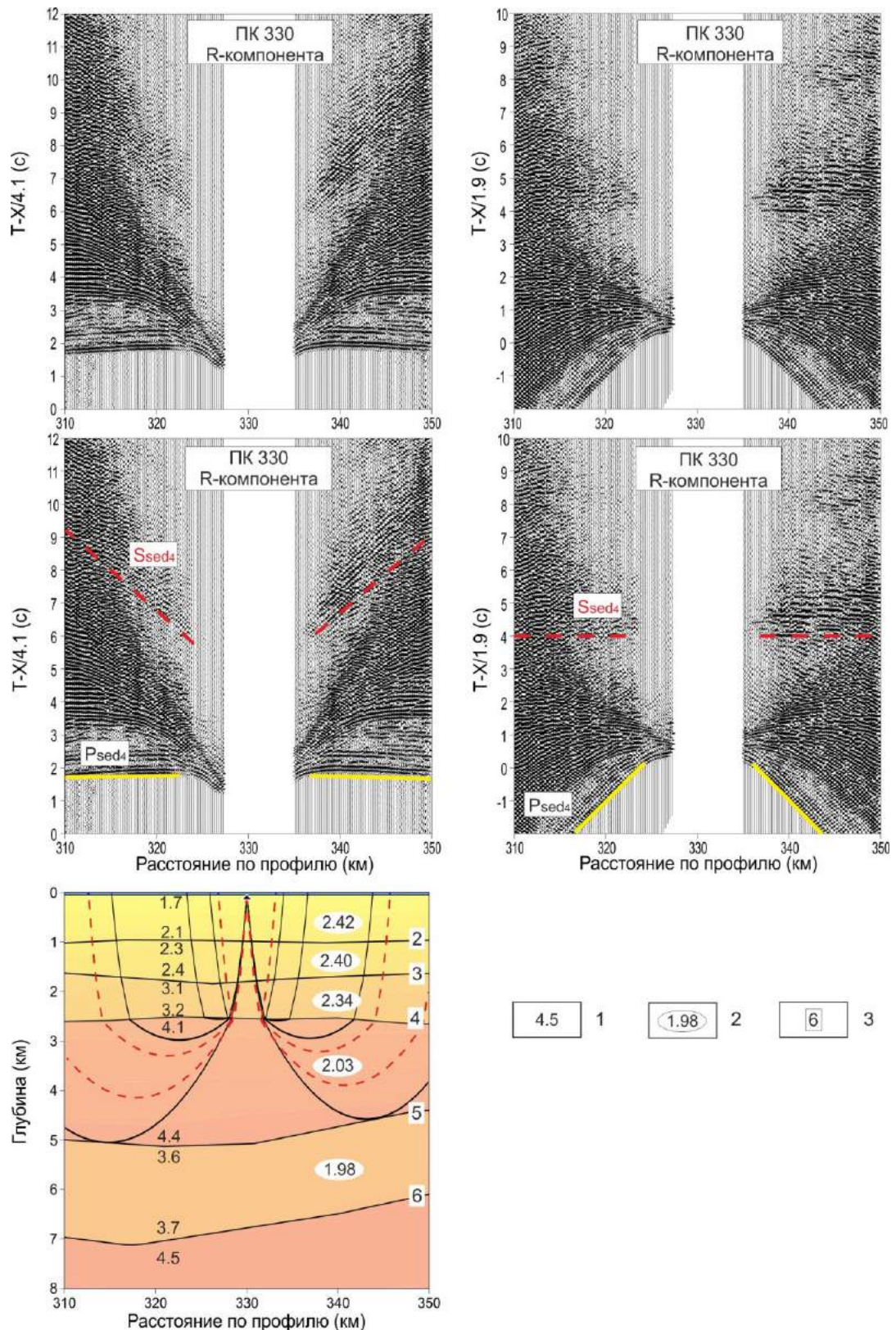


Рисунок 4.6 – Пример лучевого моделирования рефрагированных S-волн в осадочном чехле (профиль Dream-line, ПК 330, R-компонента)

Примечание – Сейсмограммы представлены в редукции 4.1 км/с и 1.9 км/с. На лучевой схеме черные лучи соответствуют продольным рефрагированным волнам P_{sed4} , красные пунктирные лучи - поперечным рефрагированным волнам S_{sed4} . Условные обозначения: 1 – значения скоростей V_p в км/с; 2 – значения отношения скоростей V_p/V_s ; 3 – номера границ в модели.

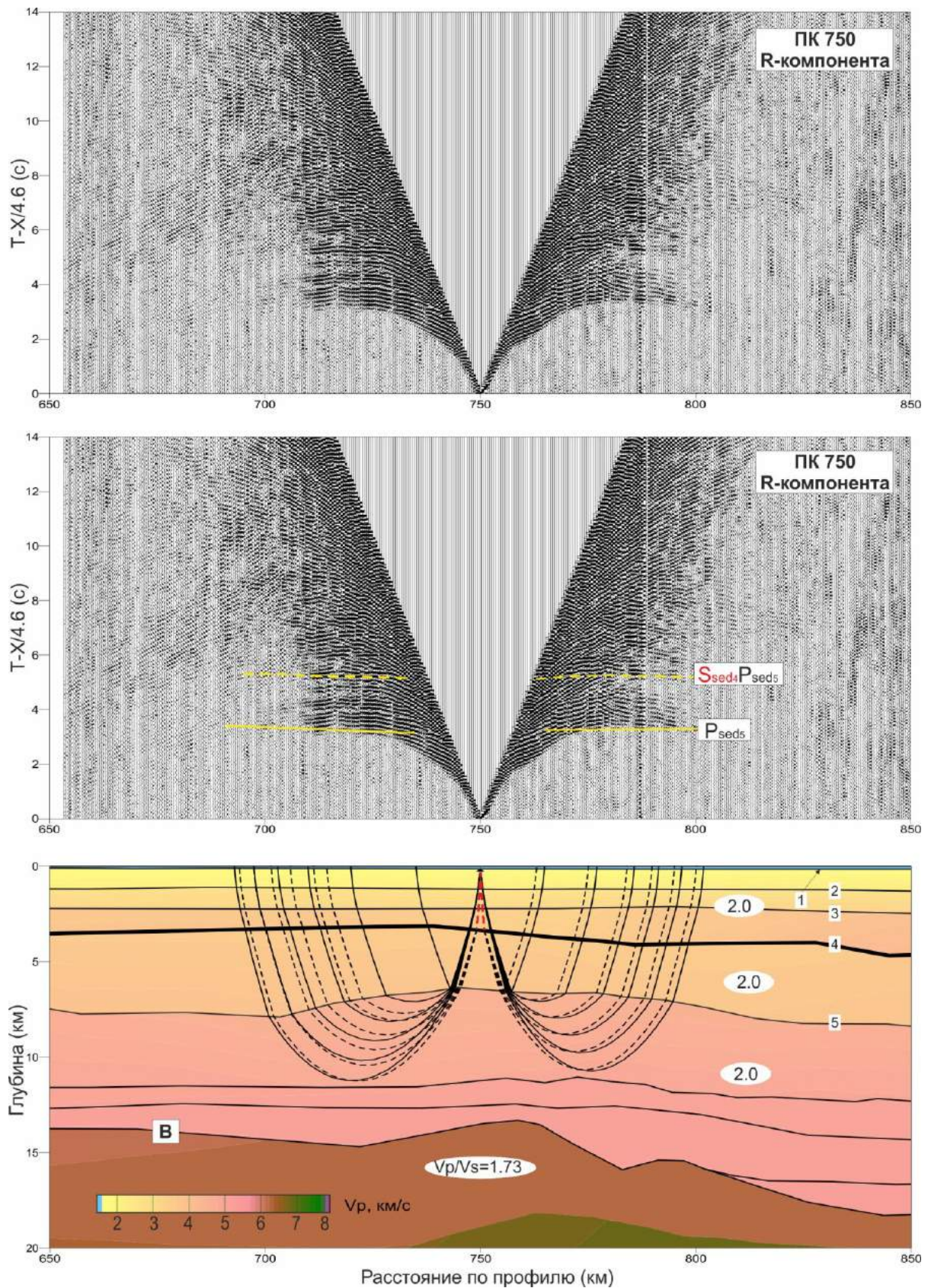


Рисунок 4.7 – Пример лучевого моделирования рефрагированных **P**- и **PS**- волн в осадочном чехле ниже границы 4 (профиль Dream-line, ПК 750, R-компонента)

Примечание – Сейсмограмма представлена в редукции 4.6 км/с. Годографы **P**-волн показаны желтыми сплошными линиями, годографы **PS**-волн – желтыми пунктирными линиями. Показана лучевая схема для обращенной системы наблюдения: лучи **P**-волн показаны черными сплошными линиями, лучи **S**-волн – красными пунктирными линиями.

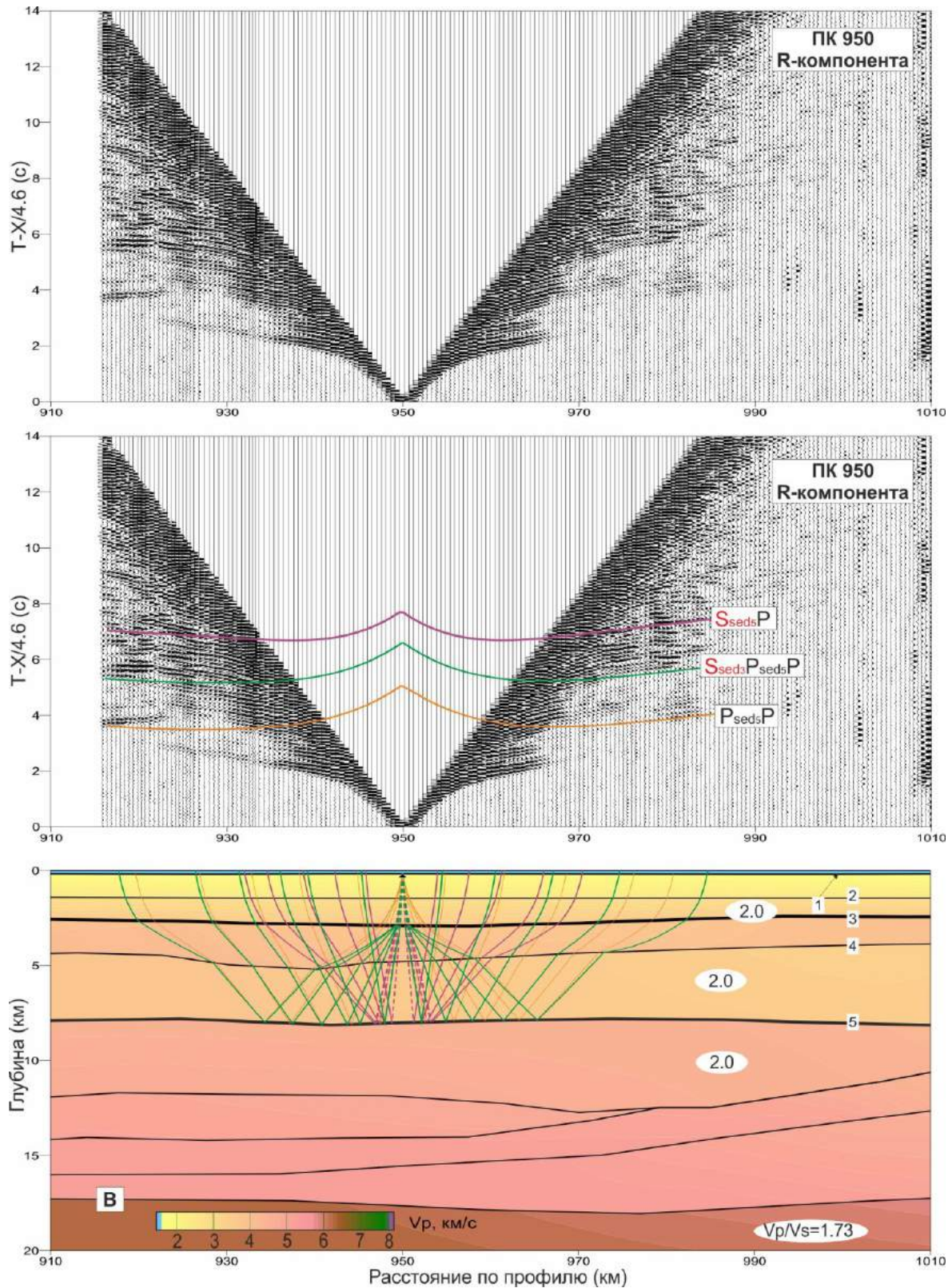


Рисунок 4.8 – Пример лучевого моделирования отраженных **P**- и **PS**- волн от границы 5 в осадочном чехле (профиль Dream-line, ПК 950, R-компонента)

Примечание – Сейсмограмма представлена в редукции 4.6 км/с. Годограф отраженной **P**-волны показан сплошной оранжевой линией, годографы **PS**-волн – сплошными зеленой и фиолетовой линиями. Показана лучевая схема для обращенной системы наблюдения: сплошной линией – **P**- волны, пунктирной линией – **S**-волны, цвет лучей соответствует цвету годографов на сейсмограмме; границы обмена показаны жирной черной линией.

граница В (кровля консолидированной коры) находится на глубине 7-9 км. Не удается выделить четких осей синфазности поперечных отраженных и рефрагированных волн от этой границы. Однако на удалениях источник-приемник от 40 до 70 км наблюдаются неоднозначные оси синфазности, которые можно ассоциировать с годографами поперечной ($S_B S$) или обменной отраженных волн от кровли консолидированной коры.

Для этого были рассчитаны следующие теоретические годографы отраженных обменных волн от границы В (Рисунки 4.9-4.10):

1) волна $P_B P S s e d_5$ (показана зеленым цветом) с обменом с P - типа на S - на восходящем луче на 5 границе (подошва высокоскоростного экрана, который на данных ПК почти выклинивается или имеет очень незначительную мощность), волна повторяет кинематику продольной отраженной волны $P_B P$ (показана оранжевым цветом);

2) волна $P_B S$ (показана розовым цветом) с одним обменом с P - на S - при отражении волны от границы В;

3) волна $P s e d_3 S_B S P s e d_3$ (показана фиолетовым цветом) с двойным обменом на 3 границе, сначала с P - типа на S - на падающем луче, отражается от границы В как S -, далее происходит обмен с S - типа на P - на восходящем луче на той же границе 3 с контрастом скоростей продольных волн 0.79-0.82 км/с; волна повторяет кинематику поперечной отраженной волны $S_B S$.

На сейсмических записях расчетные годографы лишь «зеленой» ($P_B P S s e d_5$) и «фиолетовой» ($P s e d_3 S_B S P s e d_3$) обменных волн накладываются на непротяженные оси синфазности, которые можно интерпретировать как обменные отраженные волны от границы В.

В восточной части профиля на ПК 1100-1190 удалось идентифицировать обменные отраженные волны от поверхности консолидированной коры ($S s e d_3 P_B P$ и $S s e d_5 P_B P$), повторяющие кинематику соответствующей продольной волны, с обменом с P - на S - на восходящем луче также на границах 3 и 5 в осадочном чехле (Рисунок 4.11).

Поперечные волны от нижней части консолидированной коры (граница L) выделить не удалось, несмотря на большой контраст скоростей продольных волн на границе 0.91-0.92 км/с. Прослеживается лишь обменная отраженная волна $P_L P S s e d_5$, повторяющая кинематику продольной отраженной волны $P_L P$ (Рисунок 4.12). Волна $P_L P S s e d_5$ регистрируется на удалениях источник-приемник 50-75 км с задержкой по времени примерно 2 с относительно времени прихода продольной отраженной волны $P_L P$. Обмен волны с P - на S - происходит, вероятнее всего, на восходящем луче на подошве высокоскоростного слоя - на границе 5.

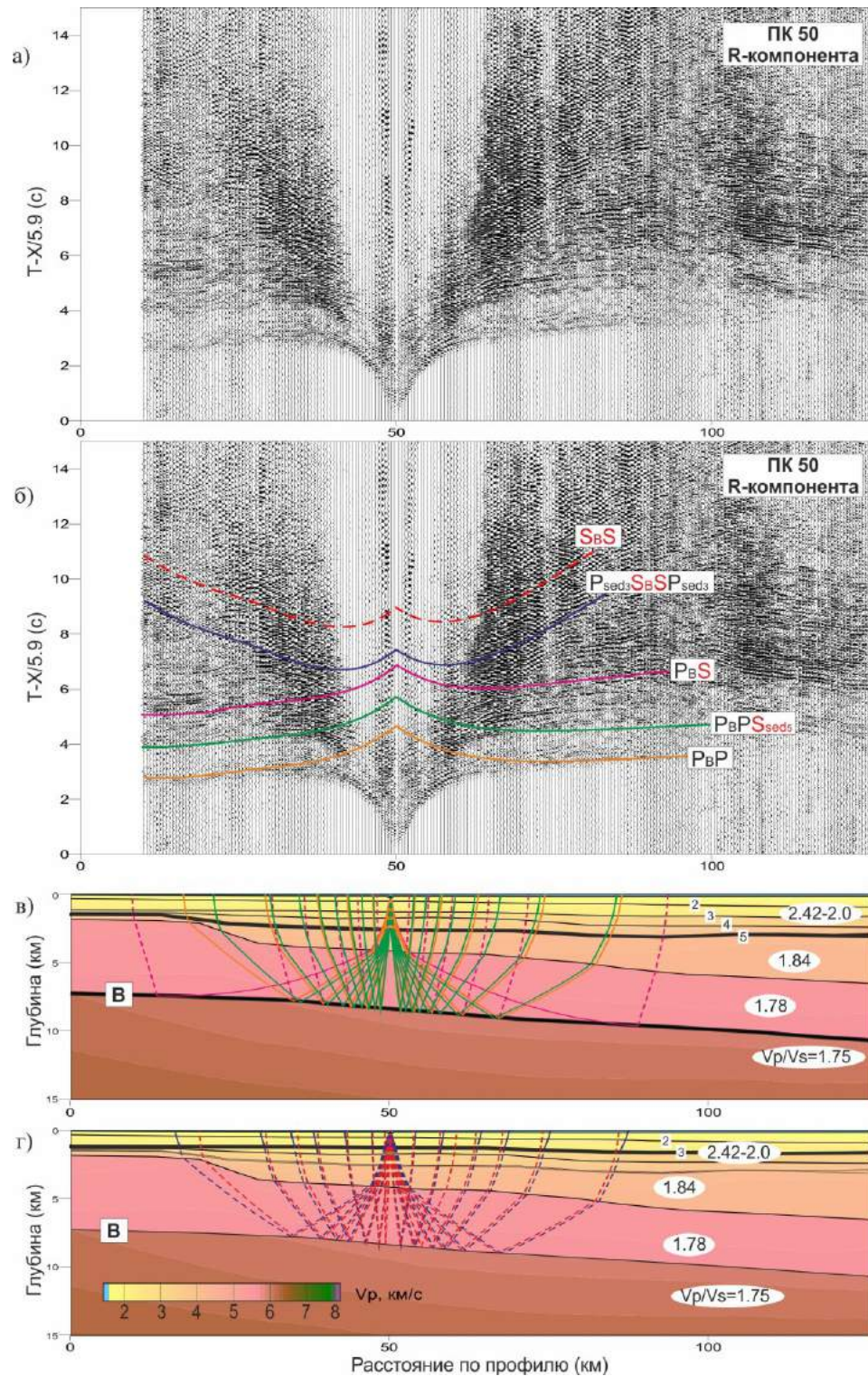


Рисунок 4.9 – Пример лучевого моделирования отраженных P-, S- и PS-волн от границы В (профиль Dream-line, ПК 50, R-компонента)

Примечание – Сейсмограмма представлена в редукции 5.9 км/с (а). Годограф отраженной P-волны показан сплошной оранжевой линией, годограф отраженной S-волны - пунктирной красной линией, годографы PS-волн – сплошными зеленой, розовой, фиолетовой линиями (б). Показаны лучевые схемы для обращенной системы наблюдения: для волн, повторяющих кинематику продольной волны (в) и волн, повторяющих кинематику поперечной волны (г). Сплошной линией – P- волны, пунктирной линией – S-волны, цвет лучей соответствует цвету годографов на сейсмограмме; границы обмена показаны жирной черной линией.

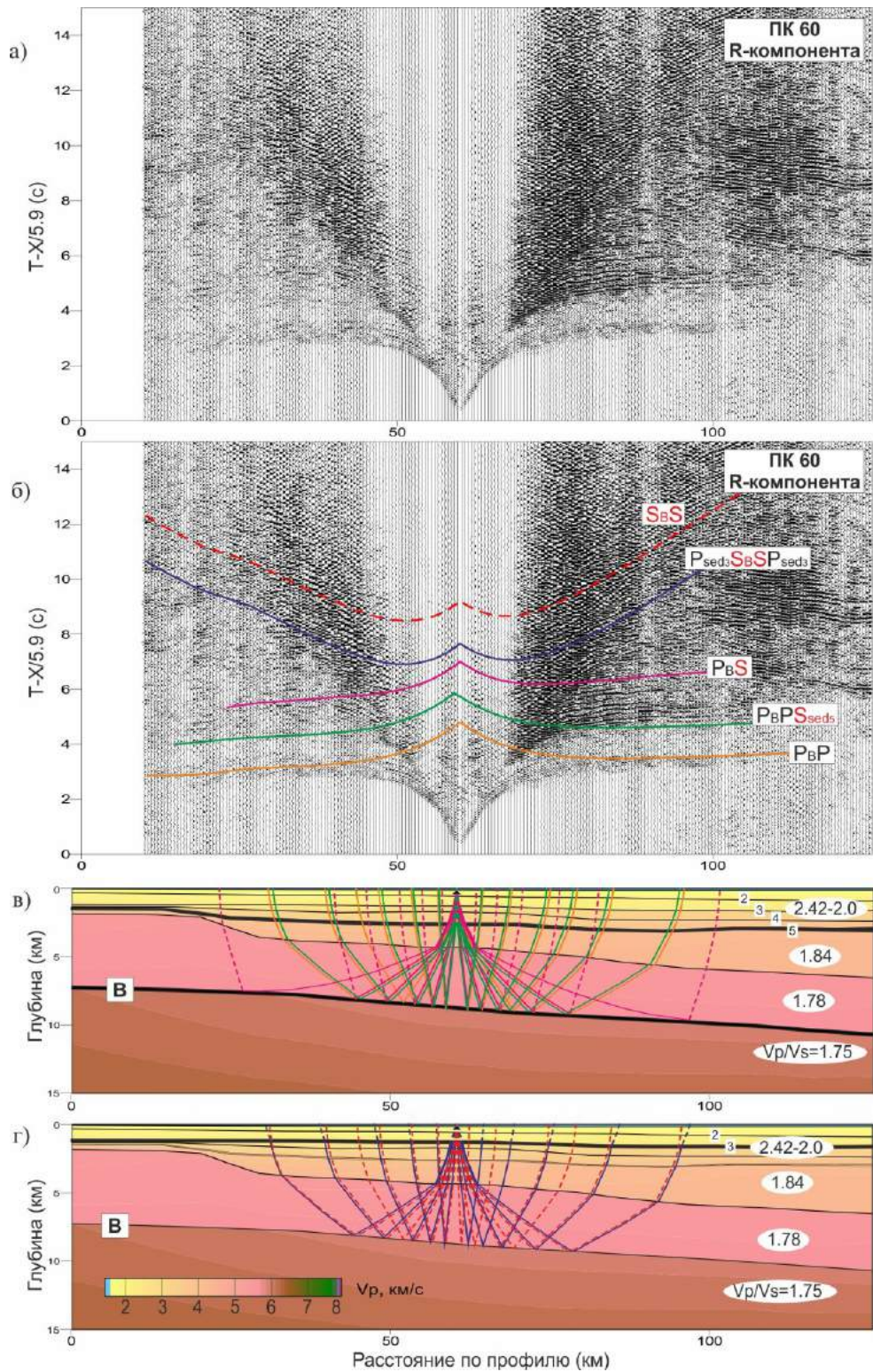


Рисунок 4.10 – Пример лучевого моделирования отраженных **P**-, **S**- и **PS**-волн от границы **B** (профиль Dream-line, ПК 60, R-компонента)

Примечание – Сейсмограмма представлена в редукции 5.9 км/с (а). Годограф отраженной **P**-волны показан сплошной оранжевой линией, годограф отраженной **S**-волны - пунктирной красной линией, годографы **PS**-волн – сплошными зеленой, розовой, фиолетовой линиями (б). Показаны лучевые схемы для обращенной системы наблюдения: для волн, повторяющих кинематику продольной волны (в) и волн, повторяющих кинематику поперечной волны (г). Сплошной линией – **P**- волны, пунктирной линией – **S**-волны, цвет лучей соответствует цвету годографов на сейсмограмме; границы обмена показаны жирной черной линией.

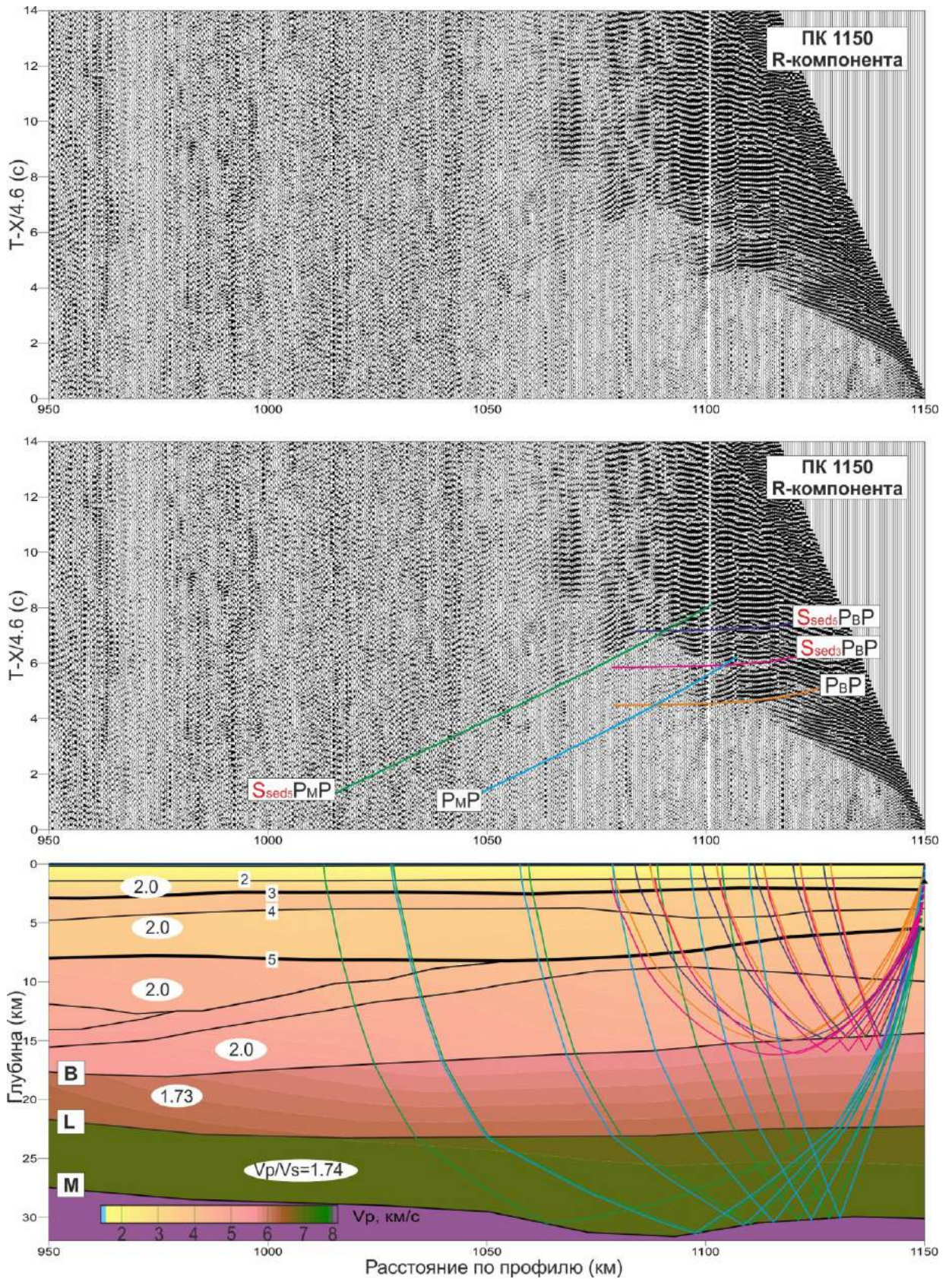


Рисунок 4.11 – Пример лучевого моделирования отраженных P-и PS-волн от границ В и М (профиль Dream-line, ПК 1150, R-компонента)

Примечание – Сейсмограмма представлена в редукции 4.6 км/с. Показана лучевая схема для обращенной системы наблюдения: сплошной линией – P- волны, пунктиром – S-волны, цвет лучей соответствует цвету годографов на сейсмограмме, границы обмена показаны жирными черными линиями.

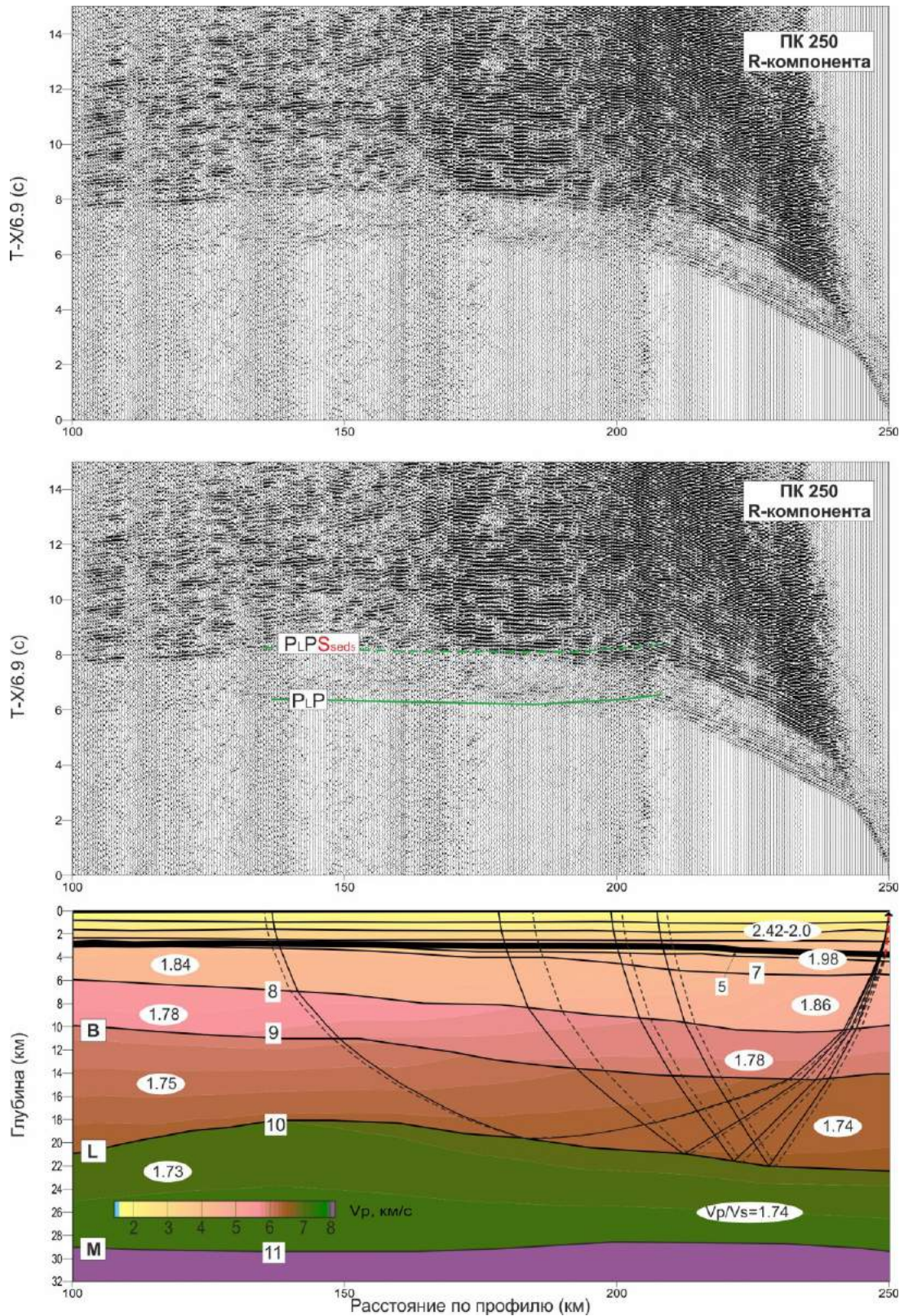


Рисунок 4.12 – Пример лучевого моделирования отраженной **PS**-волны от границы L, повторяющей кинематику продольной волны (профиль Dream-line, ПК 250, R-компонента)

Примечание – Сейсмограмма представлена в редукции 6.9 км/с. Показана лучевая схема для обращенной системы наблюдения: сплошной линией – **P**-волны, пунктирной линией – **S**-волны. Обмен типа волны (с **P**- на **S**-) произошел на восходящем луче на подошве высокоскоростного экрана – показан жирной черной линией (граница 5).

Выделение поперечных волн *от подошвы земной коры* (граница М) по фазовой корреляции затруднено из-за многофазности и «разорванности» осей синфазности волн. На некоторых сейсмических записях, зачастую при визуализации в более мелком вертикальном масштабе, наблюдаются непротяженные динамически слабо выраженные оси синфазности волнового пакета, предположительно, соответствующего поперечной ($S_M S$) или обменной отраженным волнам от границы М.

На участке профиля ПК 10-140, где мощность осадочного чехла до 3 км, лишь на единичных сейсмограммах наблюдаются динамически слабо выраженные оси синфазности отраженной поперечной/обменной отраженных волн от границы М. На участке профиля ПК 150-280, где мощность осадочного чехла постепенно увеличивается с 3 км до 7 км, удается проследить область непротяженных осей синфазности поперечной/обменной отраженных волн от границы М на удалениях источник-приемник от 80-90 км до 110-130 км на временах 15-16 с. На участке профиля ПК 290-395, где мощность осадочного чехла достигает 10-12 км, поперечные/обменные отраженные волны от границы М практически не прослеживаются.

Обменные волны от границы М регистрируются на меньших временах, чем поперечные волны, и по интенсивности обычно их превосходят (Рисунок 4.13). Теоретический годограф поперечной волны ($S_M S$) от границы М накладывается на динамически не выраженные оси синфазности. На более интенсивные фазы в области прослеживания предполагаемой поперечной отраженной волны от границы М накладывается теоретический годограф обменной отраженной волны $P_{sed_5} S_M S$ с обменом с **P**- на **S**- на падающем луче на подошве высокоскоростного экрана (граница 5), волна повторяет кинематику поперечной волны.

Интенсивная обменная отраженная волна $P_M P S_{sed_5}$, повторяющая кинематику продольной отраженной волны $P_M P$, прослеживается на удалениях источник-приемник 50-100 км. Волна претерпевает обмен с **P**- на **S**- на восходящем луче на границе 5 в осадочном чехле.

При расчете теоретических годографов обменных волн были рассмотрены схемы обмена волн на разных границах с разными типами обмена: один обмен (с **P**- на **S**- на восходящем луче на 2-ой или 3-й границах осадочного чехла); несколько обменов волны (сначала с **P**- на **S**- на дне моря, далее на падающем луче обмен с **S**- на **P**- на 5 границе, и обмен с **P**- на **S**- на восходящем луче на 5 границе).

Таким образом, наиболее интенсивные обменные волны, регистрируемые на горизонтальной компоненте с временной задержкой в 2 с относительно продольных волн

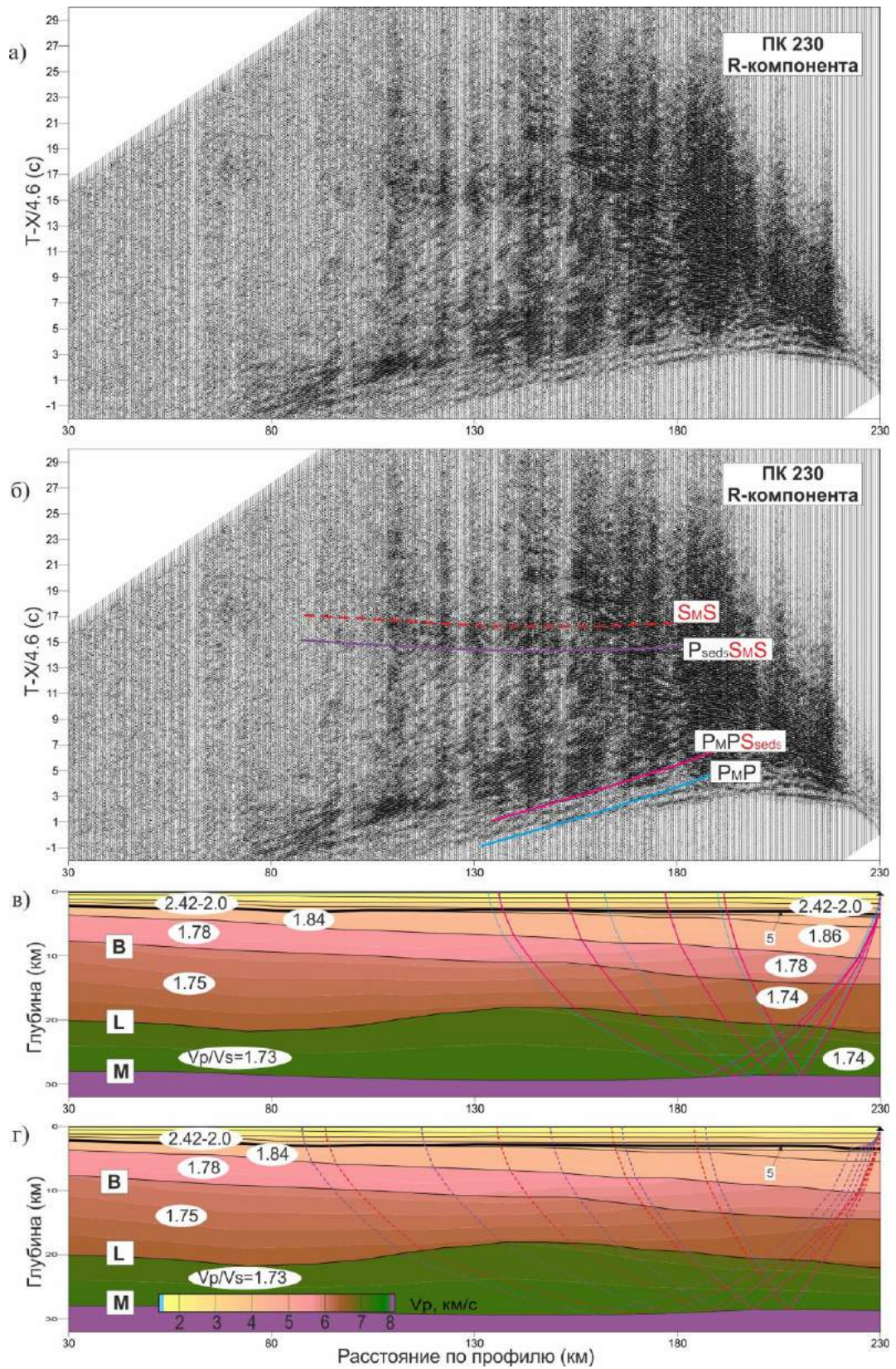


Рисунок 4.13 – Пример лучевого моделирования поперечной и обменных волн от границы М (профиль Dream-line ПК 230, R-компонента)

Примечание – На сейсмограмму R-компоненты ПК 230 (а) наложены теоретические годографы отраженных волн от границы М (б) с соответствующими лучевыми схемами для волн, повторяющих кинематику продольной волны (в) и волн, повторяющих кинематику поперечной волны (г).

и повторяющие кинематику последних, соответствуют схеме обмена с **P**-волны на **S**- волну на восходящем луче на границе в осадочном чехле, где контраст скоростей максимален. В нашем случае такой границей является граница в осадочном чехле, на которой скачек скоростей продольных волн составляет 1.2 км/с. Для обменных отраженных волн от подошвы земной коры основной границей обмена является подошва высокоскоростного экрана – граница 5 (Рисунок 4.14).

Для проверки того, что наблюдаются именно обменные **PS**-, а не кратные **P**-волны, связанные, например, с дном моря, выполнено сравнение сейсмических записей **R**-компоненты с записями **Z**-компонент, на которых зарегистрированы те же обменные волны, но менее динамически выраженные, чем на сейсмозаписи **R**-компоненты. На рисунках 4.15-4.16 представлено несколько примеров расчета теоретических годографов обменных волн, повторяющих кинематику соответствующих продольных волн, в сравнении с волновым полем сейсмических записей **Z**-компонент. Теоретические годографы одно-, дву-, трехкратных волн, связанных с дном моря, не совпали с наблюдаемыми интенсивными осями синфазности волн.

Удалось найти довольно «экзотические» лучевые схемы частично кратных волн, где кратообразующими являются границы в осадочном чехле, годографы волн от которых почти совпали с временами прихода зарегистрированных волн. Однако в интерпретации природы рассматриваемых волн (интенсивные волны, зарегистрированные как на **R**-, так и на **Z**-компонентах) было отдано предпочтение обменным **PS**-волнами с обменом на подошве высокоскоростного экрана, а не кратным **P**-волнам со сложной схемой образования кратности.

В результате лучевого моделирования **P**-, **S**-, **PS**-волн, зарегистрированных на сейсмических записях профиля Dream-line, необходимо отметить следующее:

- выполнено лучевое моделирование продольных волн для всех зондирований профиля Dream-line, рассчитаны теоретические годографы от всех основных границ раздела земной коры, включая подошву земной коры;
- дополнительно выполнено моделирование кратных и частично-кратных продольных волн, связанных с границами в осадочном чехле;
- выполнено лучевое моделирование для поперечных и обменных волн от основных границ раздела земной коры;
- протестировано большое количество схем обмена для обменных волн;
- поперечные и обменные волны, распространяющиеся в осадочном чехле, позволили оценить V_p/V_s в верхней части разреза;

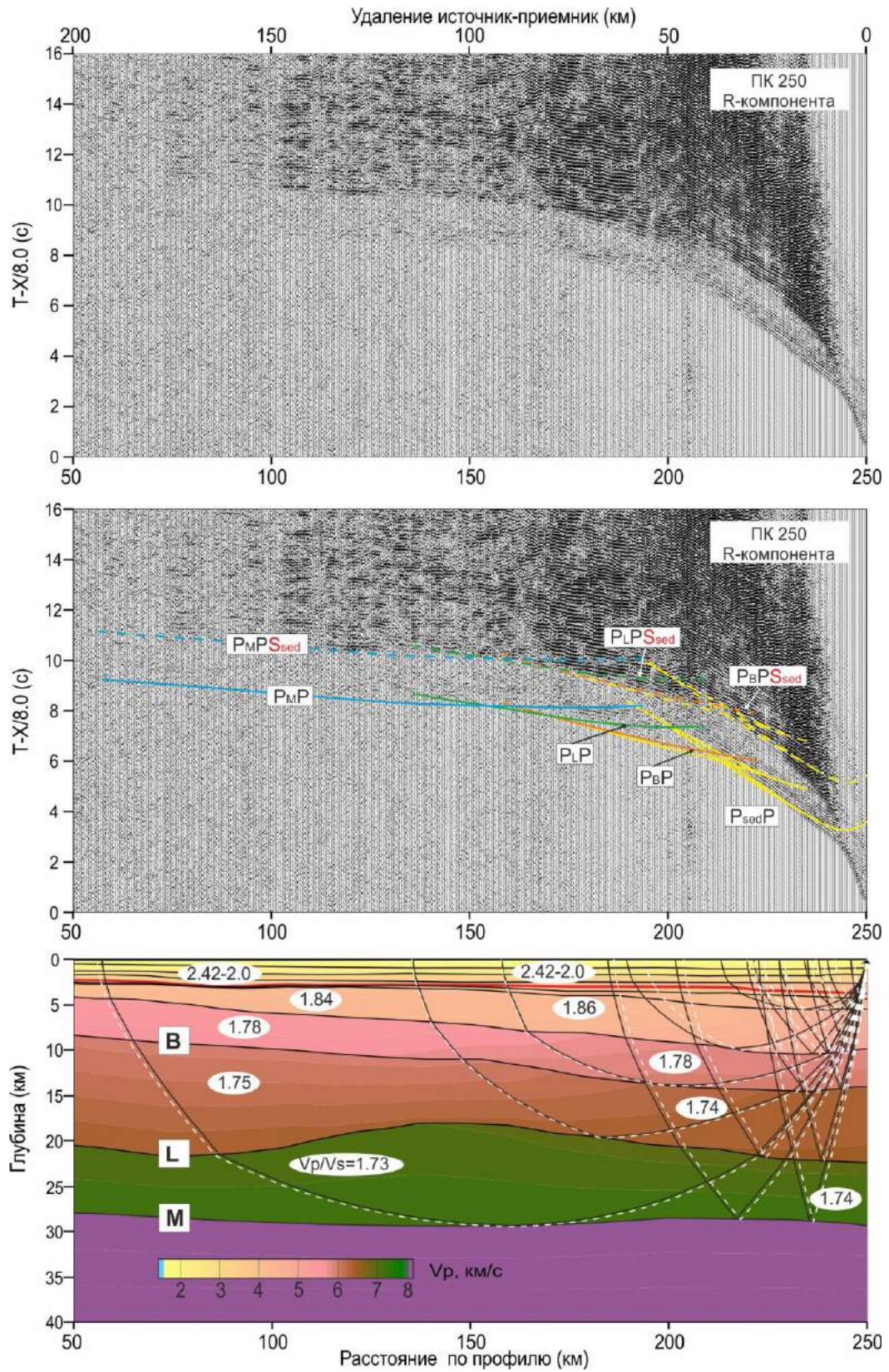


Рисунок 4.14 – Пример лучевого моделирования отраженных P- и PS-волн в земной коре и верхов мантии (профиль ГСЗ Dream-line, ПК 250, R-компонента)

Примечание – Лучевая схема приведена для обращенной системы наблюдения. Сплошные черные лучи соответствуют продольным отраженным волнам; пунктирные светлые лучи соответствуют обменным отраженным волнам. Обмен произошел на восходящем луче на границе в осадочном чехле (сплошная красная линия).

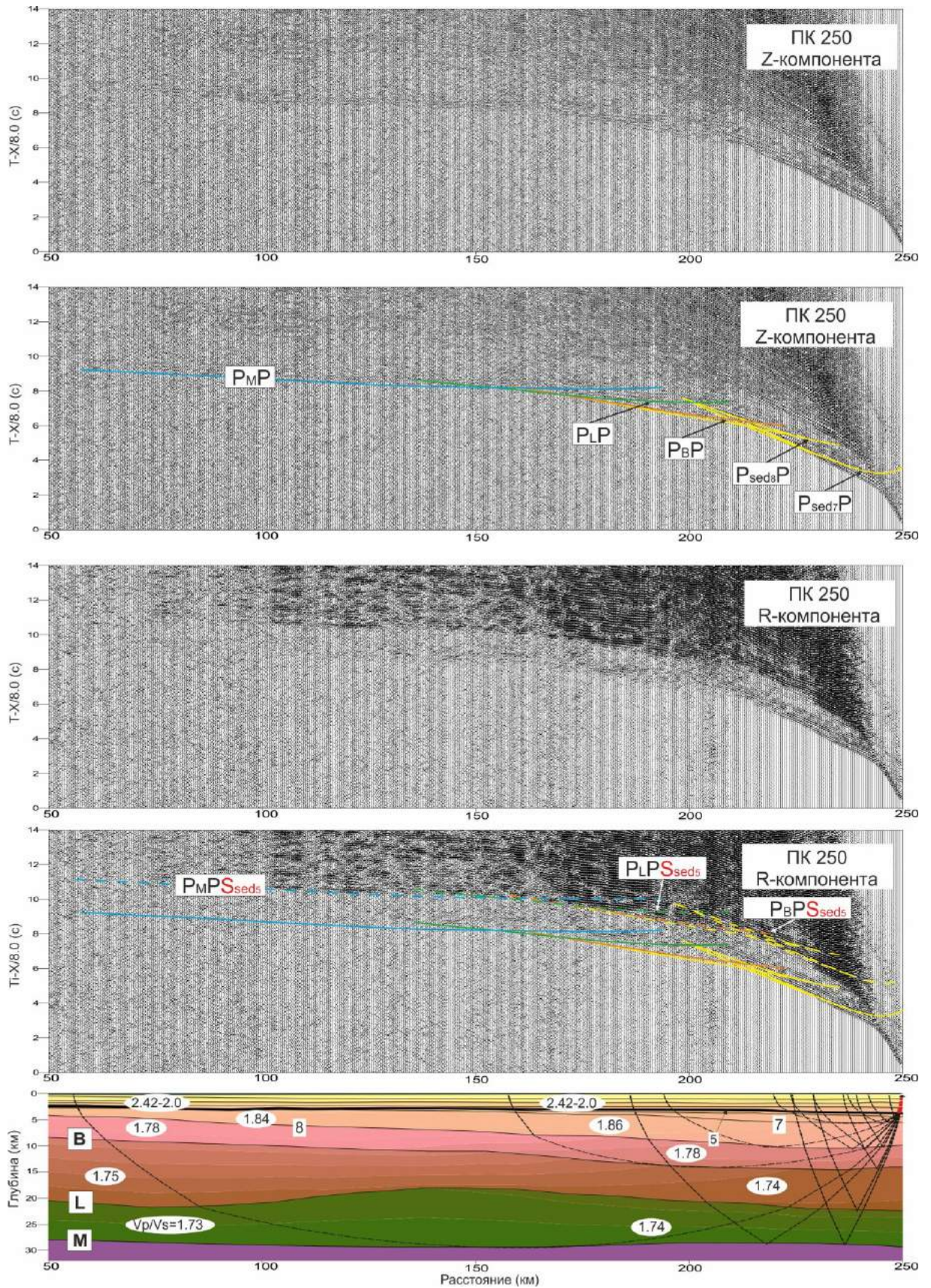


Рисунок 4.15 – Пример моделирования обменных волн, повторяющих кинематику продольных волн (профиль GC3 Dream-line, ПК 250-2, Z-и R-компоненты)

Примечание – Обмен типа волны (с P- на S-) произошел на восходящем луче на подошве высокоскоростного экрана (граница 5).

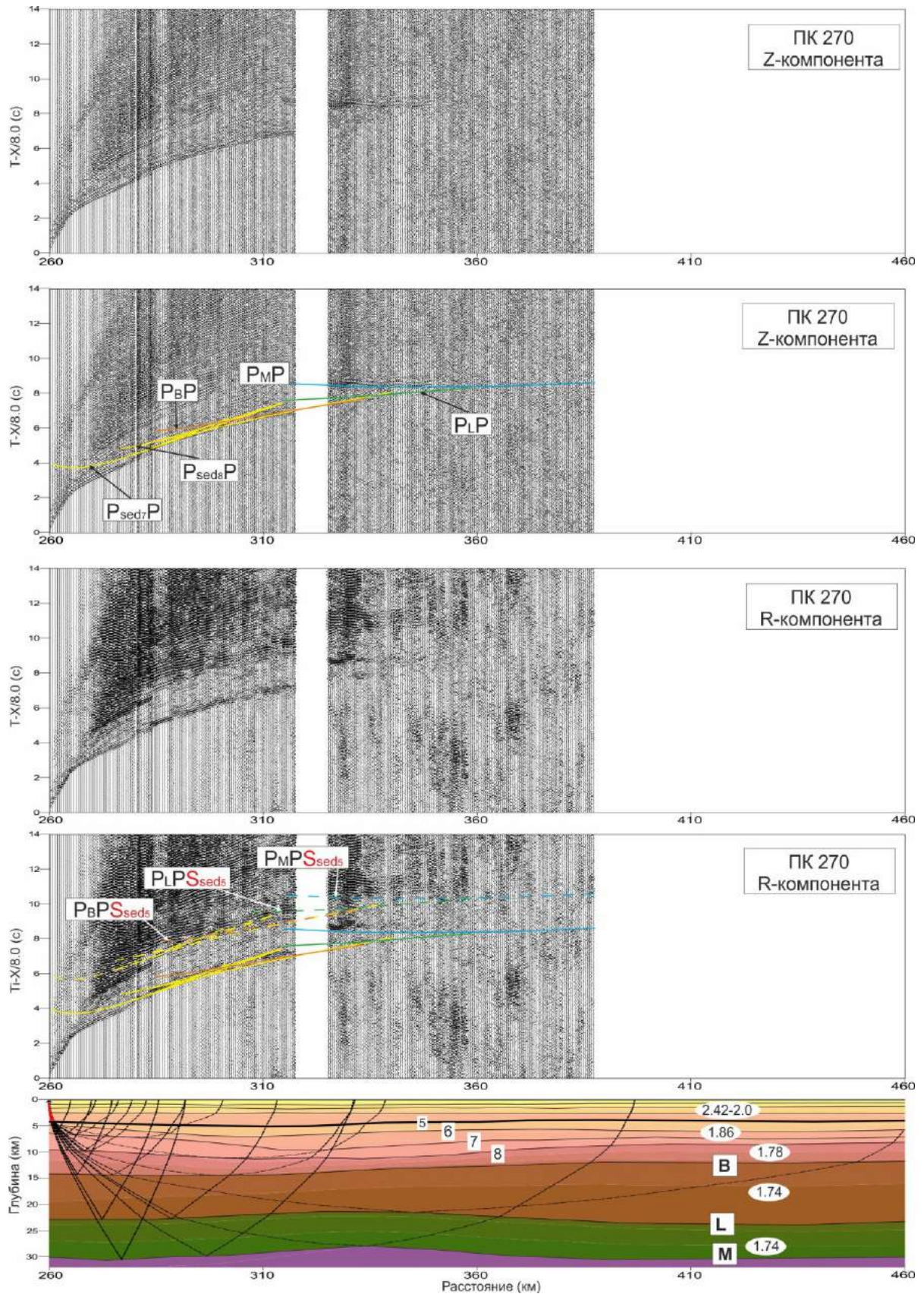


Рисунок 4.16 – Пример моделирования обменных волн, повторяющих кинематику продольных волн (профиль ГСЗ Dream-line, ПК 270-1, Z-и R-компоненты)

Примечание – Обмен типа волны (с P- на S-) произошел на восходящем луче на подошве высокоскоростного экрана (граница 5).

- интенсивные обменные **PS**-волны, повторяющие кинематику продольных волн, наблюдаются практически на всех сейсмических записях R-компонент;
- наиболее интенсивные обменные волны претерпевают один обмен, который происходит на восходящем луче с **P**- типа на **S**-;
- основной границей обмена для интенсивных обменных волн является подошва высокоскоростного экрана с контрастом скоростей продольных волн на границе 1.2 км/с.

4.2.3 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

Глубинный скоростной разрез земной коры и верхов мантии, построенный по продольным, поперечным и обменным волнам вдоль профиля Dream-line с учетом глубинного разреза МОВ-ОГТ, проверенный решением прямой задачи по методике лучевого моделирования, представлен на рисунке 4.17 [Сакулина и др., 2016а].

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. Мощность земной коры, подстилающей Северо-Чукотский прогиб, составляет 29-30 км.

Отношение V_p/V_s в слоях модели слабо изменяется, латерально уменьшаясь с запада на восток. Анализ поперечных волн, распространяющихся в осадочном чехле вдоль западного участка профиля Dream-line, позволил оценить отношение V_p/V_s в верхних осадочных слоях скоростной модели: в первом осадочном слое – 2.42, во втором – 2.40, в третьем – 2.34, в четвертом – 2.03. В осадочных слоях ниже высокоскоростного экрана были заданы значения V_p/V_s 1.98, 1.94, 1.84-1.86. На восточном участке профиля на ПК 650-1190 км значения коэффициента Пуассона задавались близкими к значениям вдоль западного участка. В результате анализа обменных волн были взяты средние значения $V_p/V_s=2$ для осадочного чехла. В промежуточном комплексе значение V_p/V_s составило 1.78.

Следует отметить, что значения V_p/V_s для средней и нижней частей разреза вдоль всего профиля Dream-line, вследствие недостаточно уверенного прослеживания поперечных волн от границ L и M, задавались с учетом результатов исследований по профилю 5-AP. В верхней части консолидированной коры значение V_p/V_s оценено как 1.74-1.75 вдоль западного участка профиля и 1.73 вдоль восточного. В нижней части консолидированной коры значение V_p/V_s варьирует от 1.73 в западной части профиля и 1.74 в восточной.

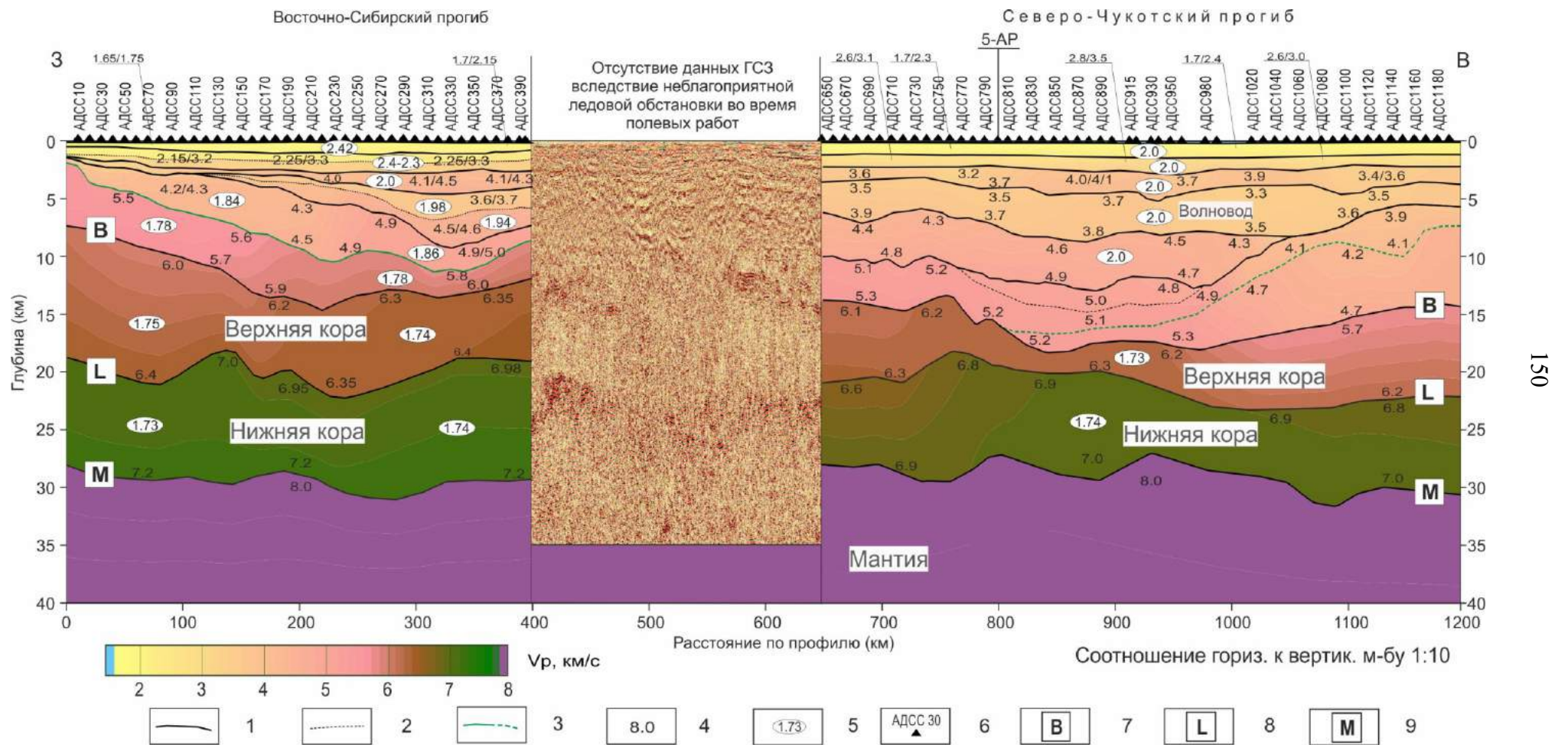


Рисунок 4.17 – Скоростная модель земной коры и верхов мантии по профилю ГСЗ Dream-line

Примечание – 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).

Осадочный чехол. Мощность осадочного чехла меняется от 7-8 км в западной части профиля до 15-16 км в восточной части профиля в осевой зоне Северо-Чукотского прогиба. 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 1.86 до 2.4.

Промежуточный комплекс в западной части профиля мощностью 3-4.5 км со скоростями продольных волн 5.5 – 6.0 км/с и V_p/V_s 1.78 отличается от вышележающих осадочных толщ по характеру сейсмической записи на разрезе МОВ-ОГТ (см. Рисунок 4.2). Кровля промежуточного комплекса уверенно прослеживается на сейсмических записях западного участка профиля (на рисунке 4.17 показана сплошной зеленой линией). На восточном участке профиля в нижней части осадочного чехла в скоростную модель введены границы (на рисунке 4.17 они показаны пунктирными линиями), которые прослеживаются на разрезах ОГТ, но не всегда выделяются в волновых полях ГСЗ. Мощность промежуточного комплекса увеличивается к востоку от 2 км до 7 км, скорости продольных волн в кровле варьируются от 4.2-4.7 км/с до 5.3 км/с в подошве слоя.

Кровля кристаллической коры моделировалась по рефрагированным/ преломленным волнам с кажущимися скоростями от 5.7-6.3 км/с, которые уверенно прослеживаются в первых вступлениях (P_g). 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. Скорость продольных волн в верхах мантии составляет 8.0 км/с.

В целом наблюдается постепенная «континентализация» характера земной коры в западном направлении, которая проявляется в следующих региональных особенностях: 1) сокращение в западном направлении мощности осадочного чехла от 15-19 км на восточном конце профиля до 12-15 км в его центральной части и 7-8 км на самом западном конце; 2) увеличение в западном направлении мощности консолидированной коры от 10-15 км на востоке до 20 км на западе. При этом на участке профиля 800-1000 км верхняя часть консолидированной коры утоняется до 2-3 км.

4.3. Взаимовязанная сейсмическая модель по профилю Dream-line и опорному профилю 5-AP

4.3.1. Особенности строения осадочного чехла по данным МОВ-ОГТ и ГСЗ в районе пересечения профилей Dream-line и 5-AP

В точке пересечения профилей Dream-line и 5-AP наблюдается полное подобие волновых полей ГСЗ для верхней части разреза, в том числе и разрыв годографов волн в первых вступлениях. Как уже упоминалось выше (п. 4.2.1), разрыв годографов может быть связан с эффектом экранирования (волноводом), при котором кажущиеся скорости нижележащего слоя оказываются меньше кажущихся скоростей вышележащего слоя (Рисунок 4.18).

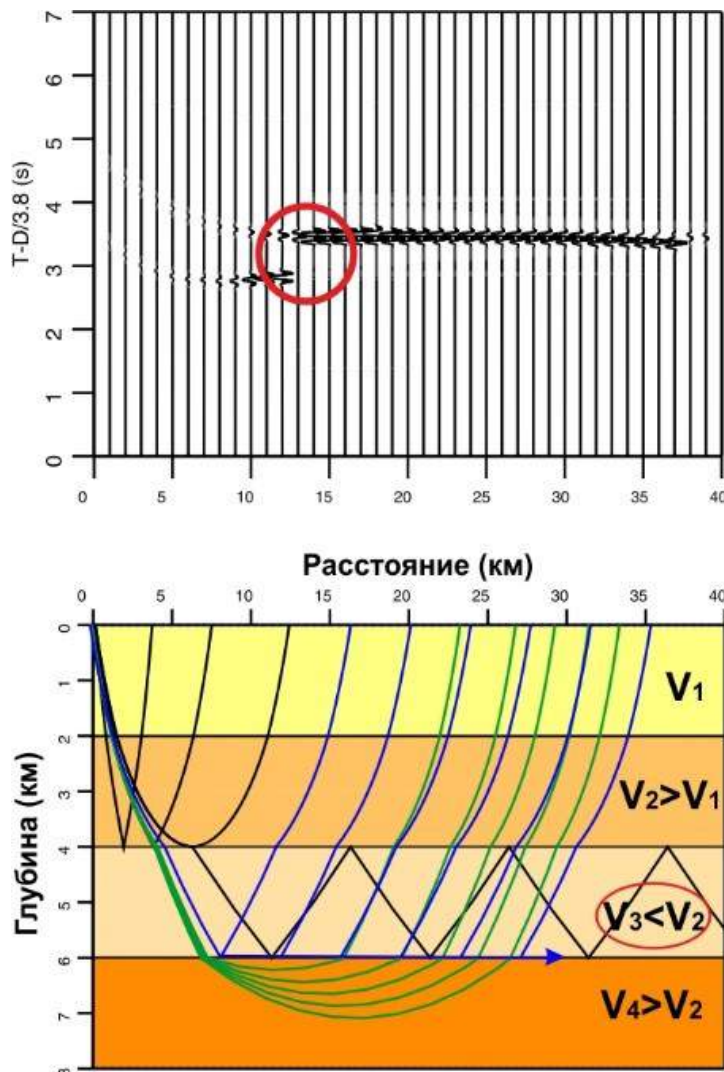


Рисунок 4.18 – Волновод в осадочном чехле

Примечание – Синтетическая сейсмограмма получена в результате математического лучевого моделирования. Слой с волноводом со скоростью сейсмических волн $V_3 < V_2$. Красным кругом выделена область сейсмограммы, где наблюдается разрыв годографов волн в первых вступлениях. Сейсмограмма представлена в редукции 3.8 км/с.

Волноводом называют зону пониженной скорости распространения сейсмических волн. На кровле волновода головная волна не образуется, а отраженная волна от подошвы волновода многократно отражается от кровли и подошвы волновода. Таким образом, возникает эффект экранирования. Наличие волновода в разрезе фиксируется на сейсмической записи в виде разрыва годографов волн в первых вступлениях.

Разрыв годографов можно объяснить не только наличием инверсии скорости (волновода) в слоях модели, а также и неоднородностью по латерали в слое. На рисунке 4.19 представлено математическое моделирование для двух моделей среды: сверху рисунка – модель с волноводом, внизу – модель с латеральной неоднородностью. В обоих случаях на сейсмограммах имеется разрыв годографов первых волн при прямых и встречных годографах, но наблюдается он для модели с волноводом на одних и тех же удалениях от источника, а для модели с латеральной неоднородностью фиксируется со смещением при изменении удалений от источника.

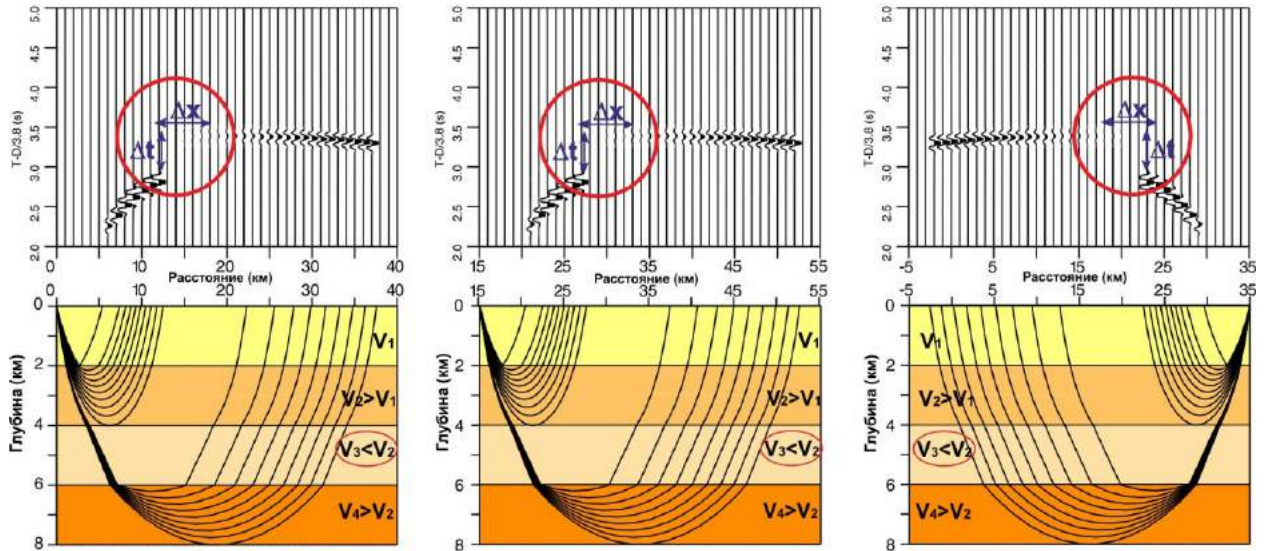
На рисунке 4.20 приведены примеры сейсмических записей Z-компонент для осадочного чехла в месте пересечения профилей Dream-line и 5-AP. Как видно из приведенных сейсмограмм на ПК 770, 780, 800, 850 профиля Dream-line и ПК 450, 460, 490, 540 профиля 5-AP, на одних и тех же удалениях до 20-30 км от центра зондирования наблюдается разрыв годографов волн в первых вступлениях с образованием «зоны тени» по времени до одной секунды [Кашубин и др., 2017].

Поскольку такая волновая картина наблюдается при прямых и встречных наблюдениях на одних и тех же удалениях от источника, то эта особенность не связана с латеральной неоднородностью, а свидетельствует именно о зоне пониженных скоростей – волноводе. Инверсия скорости зафиксирована на границе между 3-м и 4-м слоями: над границей значения кажущихся скоростей увеличиваются с 3.4-3.6 км/с до 3.9-4.1 км/с, тогда как под границей кажущиеся скорости достигают значений лишь 3.5-3.8 км/с.

На западном участке профиля Dream-line волновод прослеживается, начиная с 280 км до восточного конца расстановки, на восточном участке – с 760-770 км до конца профиля (Рисунок 4.17). На профиле 5-AP разрыв годографов в первых вступлениях наблюдается с 450 км до северного окончания профиля.

На рисунке 4.21 приведены: сейсмограмма зондирования 800 по профилю Dream-line с наложенными на нее рассчитанными теоретическими годографами волн; синтетическая сейсмограмма, полученная в результате математического конечно-разностного полноволнового моделирования; и фрагмент скоростной модели с

“Зона тени” в модели с волноводом



“Разрыв годографа” в модели с латеральной неоднородностью

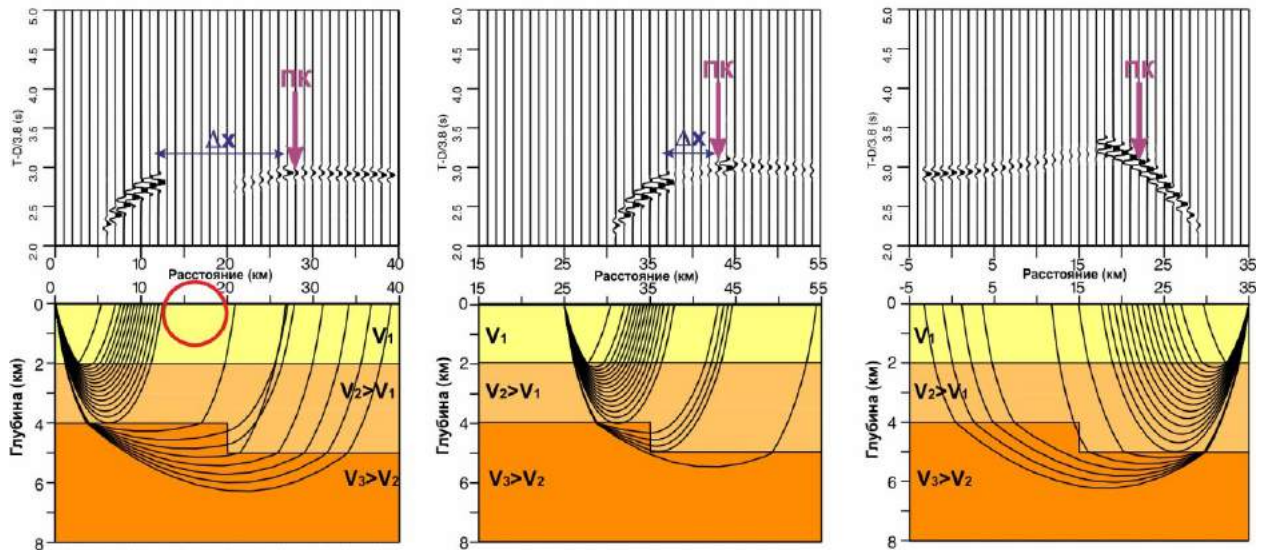


Рисунок 4.19 – Возможные причины разрыва годографов волн в первых вступлениях на сейсмических записях

Примечание – В модели с волноводом разрыв годографов волн наблюдается на одних и тех же удалениях от источника (Δx и Δt одинаковы на разных ПК). В модели с латеральной неоднородностью разрыв годографов волн фиксируется со смещением при изменении удалений от источника (Δx не равны на разных ПК).

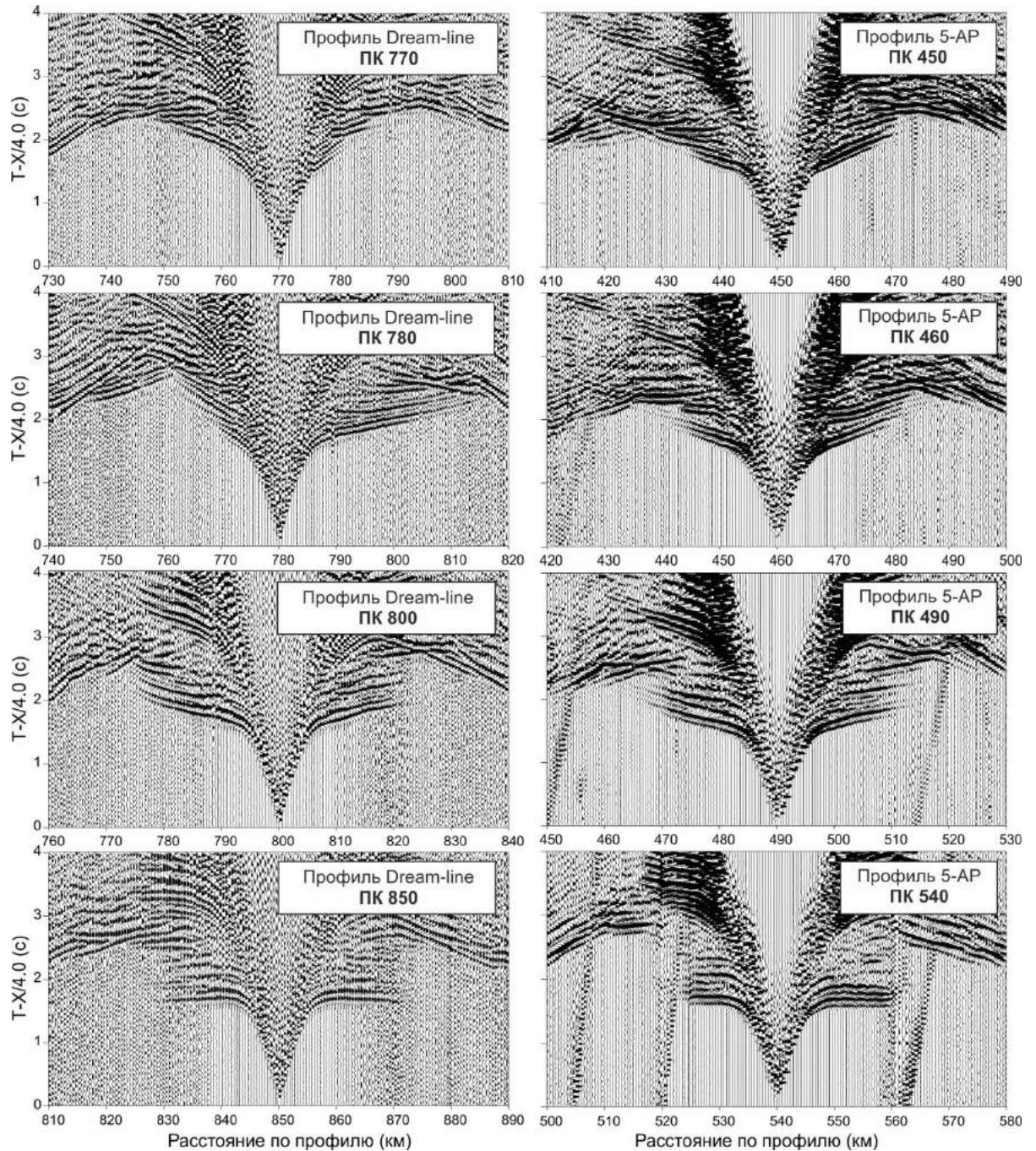


Рисунок 4.20 – Примеры сейсмических записей Z-компонент на пересечении профилей ГСЗ Dream-line и 5-AP

Примечание – Положение донных станций (ПК) см на рисунке 4.1; на сейсмограммах ПК 770, 780, 800, 850 профиля Dream-line и ПК 450, 460, 490, 540 профиля 5-AP, начиная с удалений около 20 км, в области первых вступлений наблюдается разрыв годографов со смещением по времени и «зона тени». Сейсмограммы представлены в редукции 4.0 км/с.

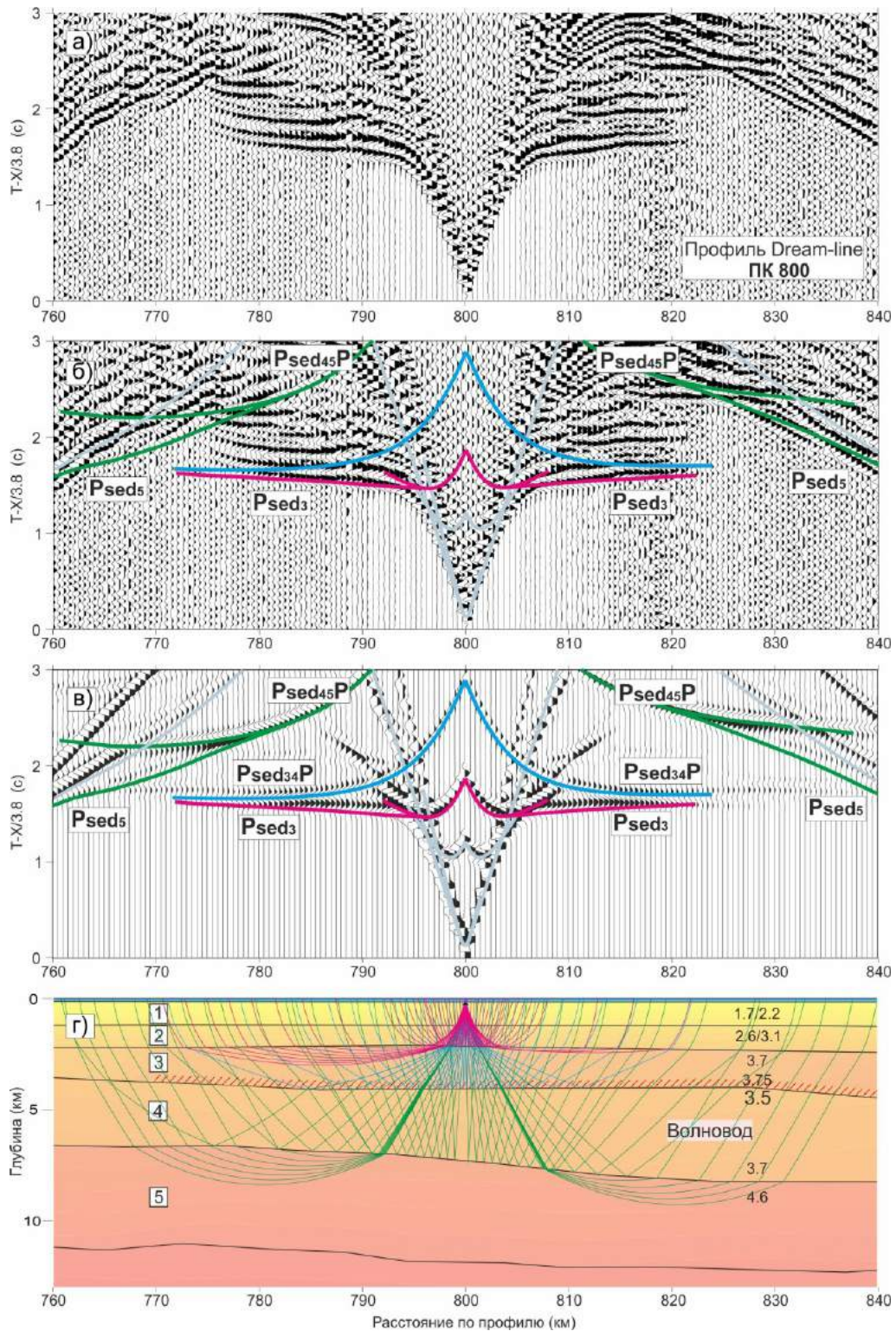


Рисунок 4.21 – Пример сейсмограммы (а) с наложенными на нее теоретическими годографами (б), синтетическая сейсмограмма (в) и фрагмент скоростной модели по профилю Dream-line (г), иллюстрирующие наличие волновода в разрезе осадочного чехла [Кашубин и др., 2017].

Примечание – Обозначения волн: **Psed₃** – рефрагированные волны в слое 3; **Psed_{34P}** – отраженные волны от границы между слоями 3 и 4; **Psed_{45P}** – отраженные волны от границы между слоями 4 и 5; **Psed₅** – рефрагированные волны в слое 5; цифры на разрезе – скорости продольных волн в км/с; цифры в квадратах – номера слоев модели; кровля волновода показана красной штриховкой.

лучевой схемой. Граница, ниже которой наблюдается понижение скорости (слой с волноводом), показана штриховкой красного цвета.

Первые два осадочных слоя моделировались по годографам рефрагированных волн в первых вступлениях; скорости в них возрастают с глубиной от 1.7 до 2.2 км/с и от 2.6 до 3.1 км/с, соответственно.

Кровля третьего слоя моделировалась по отраженной волне **Psed₂₃P** и рефрагированной волне **Psed₃** в первых вступлениях (лучи и годографы показаны розовым цветом). Скорости в третьем слое также нарастают с глубиной от 3.7 км/с до 3.75-3.8 км/с.

На границе между третьим и четвертым слоем вследствие инверсии скорости (выше границы скорость продольных волн 3.8 км/с, ниже границы скорость продольных волн 3.5 км/с) не образуются головные/рефрагированные волны, наблюдается только отраженная волна (на рисунке 4.21 годограф и лучи на лучевой схеме показаны синим цветом). Наблюдается разрыв годографов волн в первых вступлениях на удалениях от источника 25-30 км на времени 1.6-1.7 с (на сейсмограмме в редукции 3.8 км/с).

Подосва четвертого слоя со скоростями 3.5-3.7 км/с определялась по отраженной волне (**Psed₄₅P**), прослеживаемой в последующих вступлениях (соответствующие лучи и годографы выделены зеленым цветом).

Сопоставление полученной скоростной модели с сейсмическим глубинным разрезом, построенным по данным МОВ-ОГТ, приведено на рисунке 4.22. Подошва высокоскоростного слоя (кровля волновода) соответствует четкому отражающему горизонту на времени $t_0 = 3$ с (глубина залегания границы - 4 км), подошва нижележащего слоя (волновода) соответствует отражающему горизонту на времени t_0 около 4.5-4.8 с (глубина около 7.5 км). На сейсмических записях ГСЗ отраженная волна, соответствующая подошве инверсионного слоя, более уверенно наблюдается на профиле Dream-line, тогда как на разрезах МОВ-ОГТ горизонты, соответствующие инверсионному слою, видны более четко на профиле 5-AP [Кашубин и др., 2017].

Стоит отметить, что в скоростной модели Северо-Чукотского осадочного бассейна по данным МОВ-ОГТ на этапе скоростного анализа не было установлено инверсии скорости, несмотря на достаточно плотные системы наблюдений и значительные базы прослеживания отраженных волн. Разрыв годографов в первых вступлениях, свидетельствующий об инверсии скорости, выявлен благодаря именно данным ГСЗ и детальному анализу волнового поля.

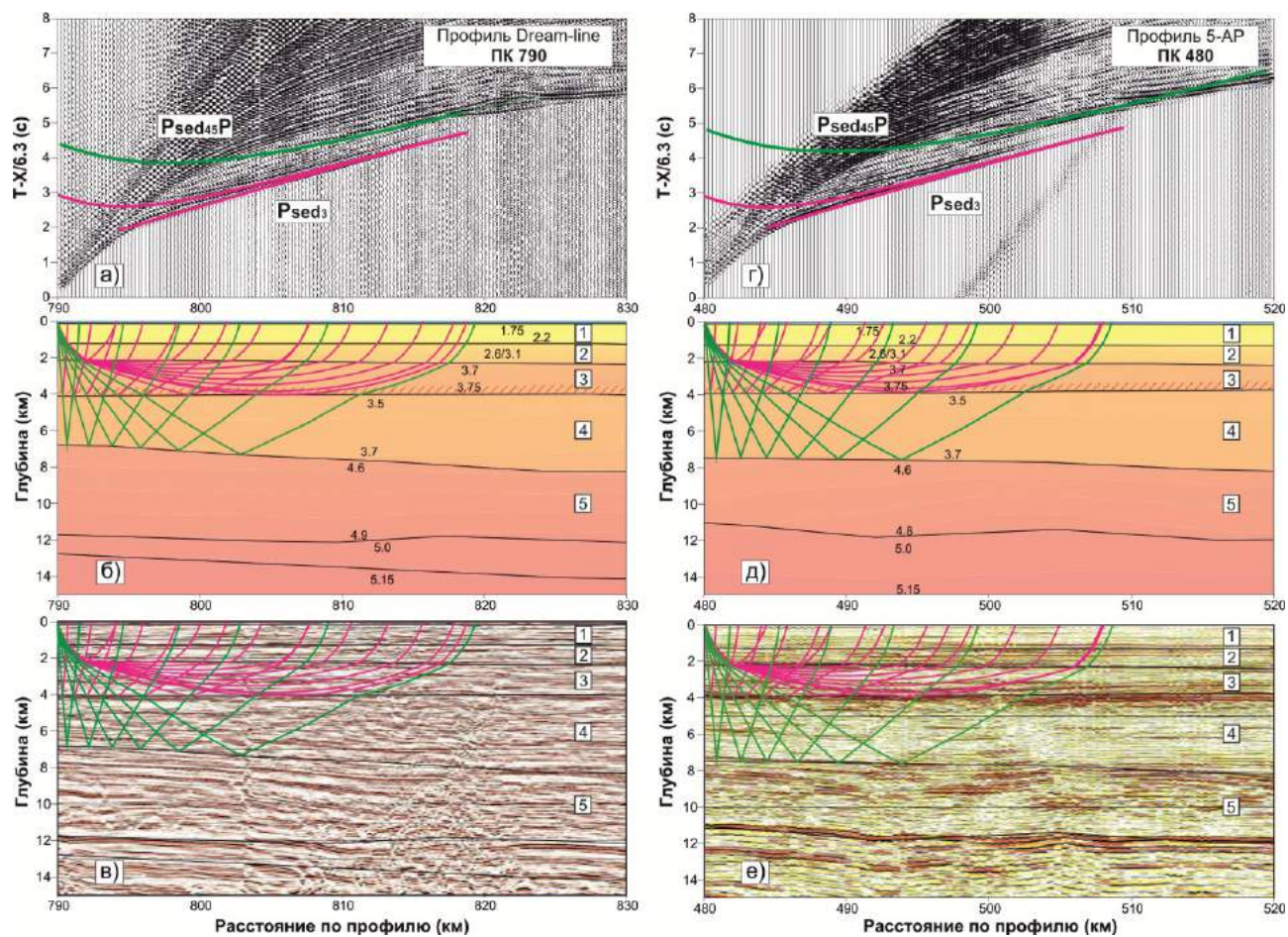


Рисунок 4.22 – Примеры лучевого моделирования и фрагменты разрезов МОВ-ОГТ по профилям Dream-line и 5-AP

Примечание – а, г – сейсмические записи с наложенными на них теоретическими годографами; б, д – скоростные модели с лучевыми схемами (цифры – скорости продольных волн в км/с); в, е – глубинные разрезы МОВ-ОГТ с наложенными на них лучевыми схемами. Красной штриховкой помечена кровля волновода; обозначения волн см. на рисунке 4.17.

4.3.2. *Взаимоувязанная сейсмическая модель по профилям Dream-line и 5-AP на всю мощность земной коры*

На сейсмических записях Z-компонент в области пересечения профилей Dream-line и 5-AP времена прихода **P**-волн от основных границ раздела земной коры совпадают, включая волны от границы нижней части консолидированной коры (граница L) и поверхности мантии (граница M) (Рисунках 4.23-4.24).

Сопоставление волновых полей R-компонент в месте пересечения профилей Dream-line и 5-AP показало, что волновая картина имеет достаточно неоднозначный характер. За счет разной направленности профилей относительно основных геологических структур (вдоль - Dream-line и вкрест - 5-AP) и вследствие разной динамической обработки сейсмических записей, обменные волны прослеживаются на обоих профилях не в большом количестве. На рисунке 4.25 показаны теоретические годографы предполагаемых обменных рефрагированных волн в осадочных слоях (желтым и оранжевым цветом) и предполагаемых обменных отраженных волн от границ L (зеленым цветом) и M (фиолетовым цветом). Обмен с **P**- на **S**- предполагается на восходящем луче на границах 3, 4, 5 – для обменных волн в осадочном слое, и на границе B – для обменных волн от границ L и M. На сейсмических записях профиля 5-AP обменные волны выделяются более надежно, чем на профиле Dream-line. Значения V_p/V_s вдоль восточной расстановки профиля Dream-line заданы с учетом значений V_p/V_s вдоль профиля 5-AP.

На рисунке 4.26 представлен скоростной разрез, построенный с привлечением как продольных, так и поперечных и обменных волн, в месте увязки южного фрагмента профиля 5-AP с восточным фрагментом профиля Dream-line. Наблюдается хорошее совпадение глубины границ в осадочном чехле, консолидированной коре и поверхности мантии. Отмечается увеличение значений V_p/V_s при движении с юга на север и уменьшение значений V_p/V_s с запада на восток.

Подобие волновых полей, зарегистрированных на сейсмограммах ГСЗ в районе пересечения профилей Dream-line и 5-AP, одинаковый подход к построению скоростной модели (метод лучевого моделирования), совместный анализ сейсмических материалов по двум профилям позволили построить взаимоувязанную скоростную модель по данным ГСЗ, наглядно отражающую строение земной коры шельфа Восточносибирских морей по системе профилей Dream-line и 5-AP.

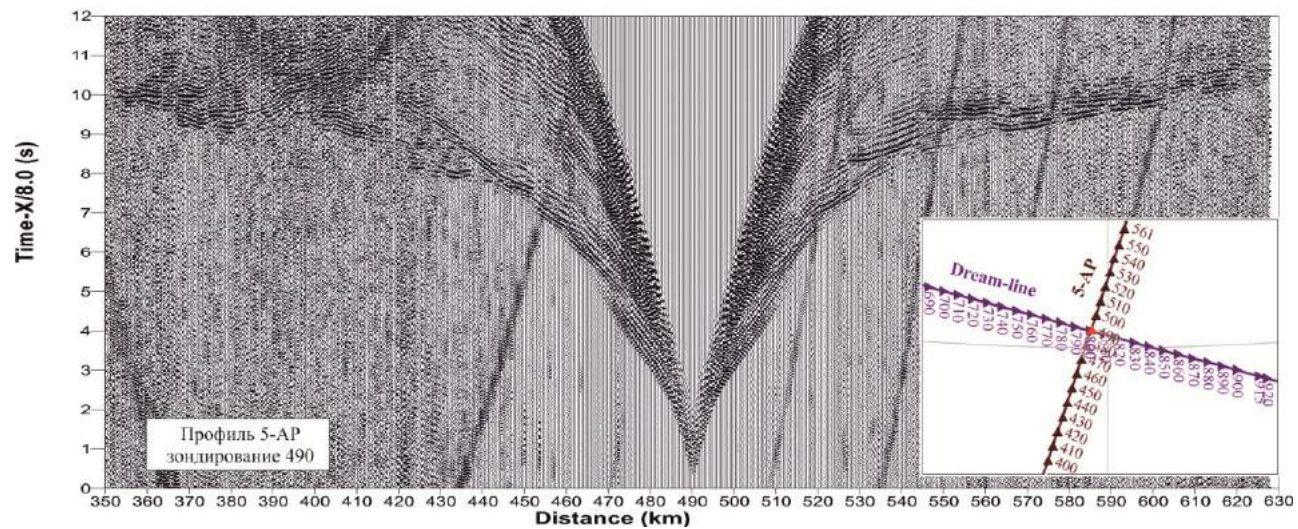
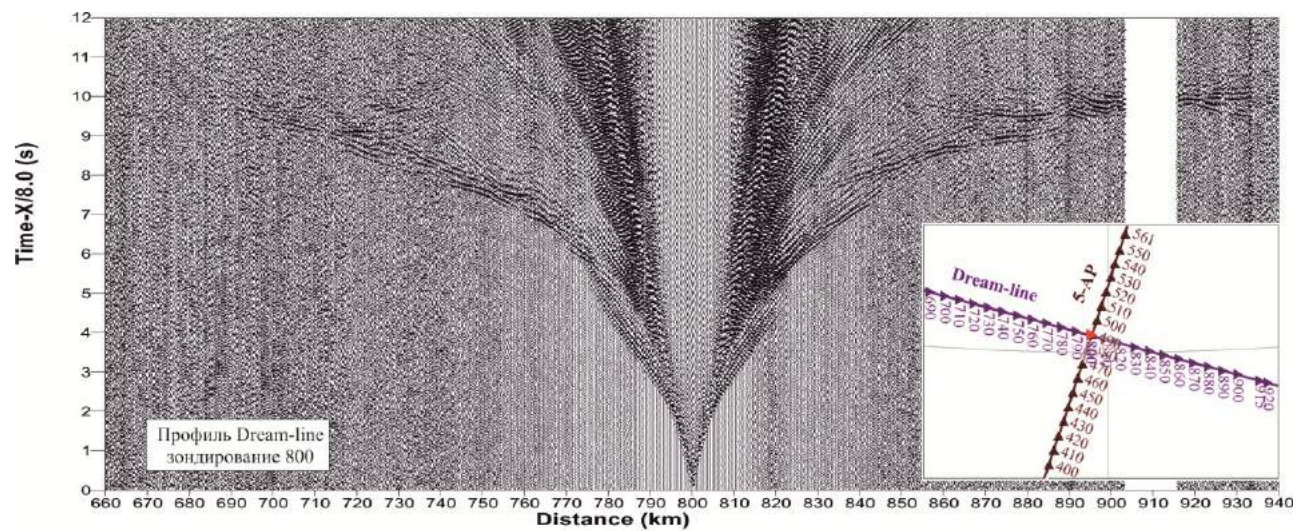


Рисунок 4.23 – Сопоставление записей волновых полей Z-компонент на профилях Dream-line и 5-AP

Примечание – Скорость редукции 8.0 км/с. Зондирования 800 (Dream-line) и 490 (5-AP).

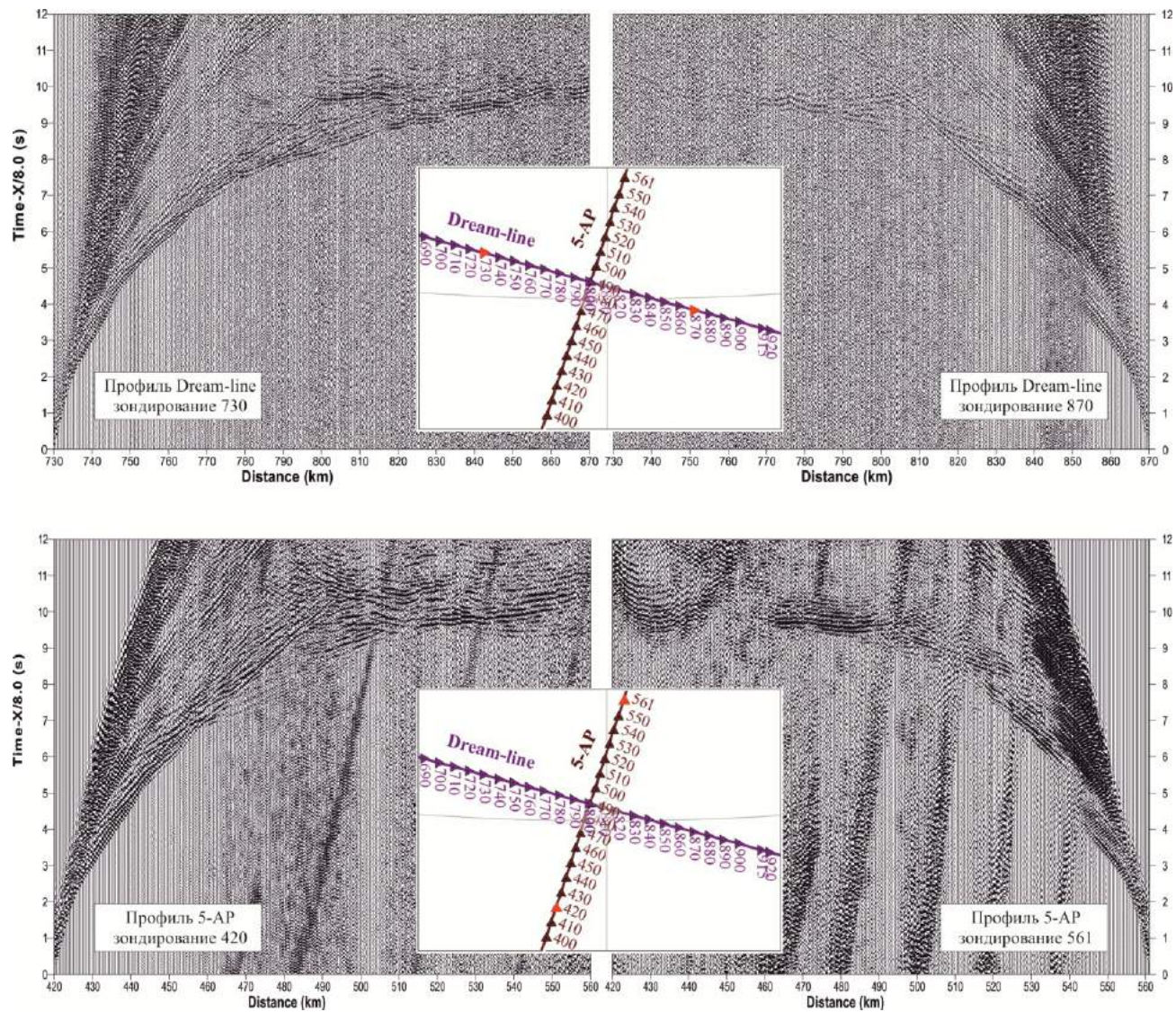


Рисунок 4.24 – Сопоставление записей волновых полей Z-компонент на профилях Dream-line и 5-AP

Примечание – Скорость редукции 8.0 км/с. Зондирования 730, 870 (Dream-line) и 420, 561 (5-AP).

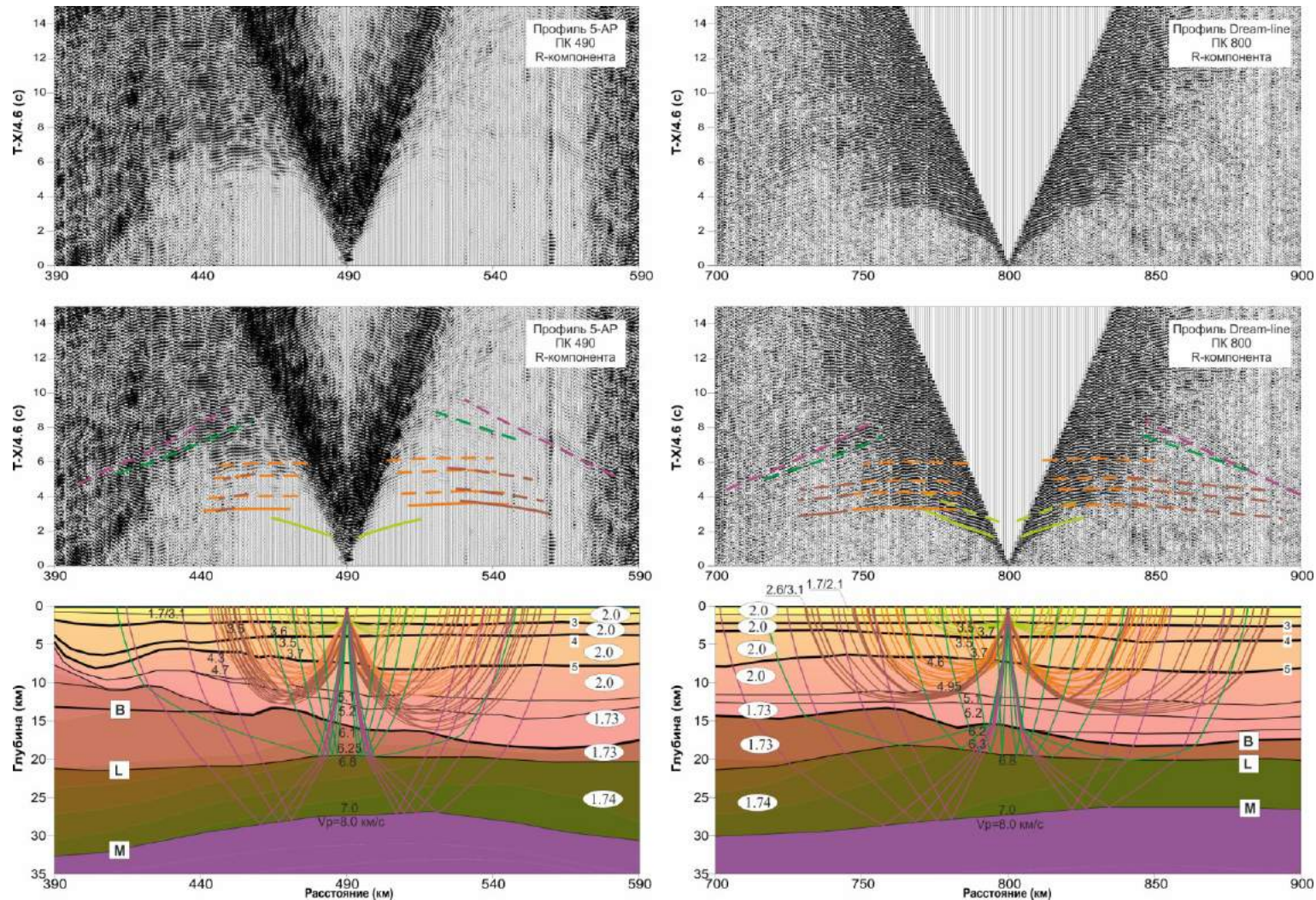


Рисунок 4.25 – Сопоставление волновых полей R-компонент в месте пересечения профилей 5-AP (ПК 490) и Dream-line (ПК 800)

Примечание – Показаны теоретические годографы продольных (сплошной линией) и обменных (пунктирной линией) волн от границ в осадочном чехле, L и M и соответствующие им лучевые схемы. Обмен происходит на восходящем луче на границах 3, 4, 5 – для обменных волн в осадочном слое, или на границе В – для волн от границ L и M. Лучевые схемы показаны для обращенной системы наблюдения, границы обмена показаны жирными черными линиями.

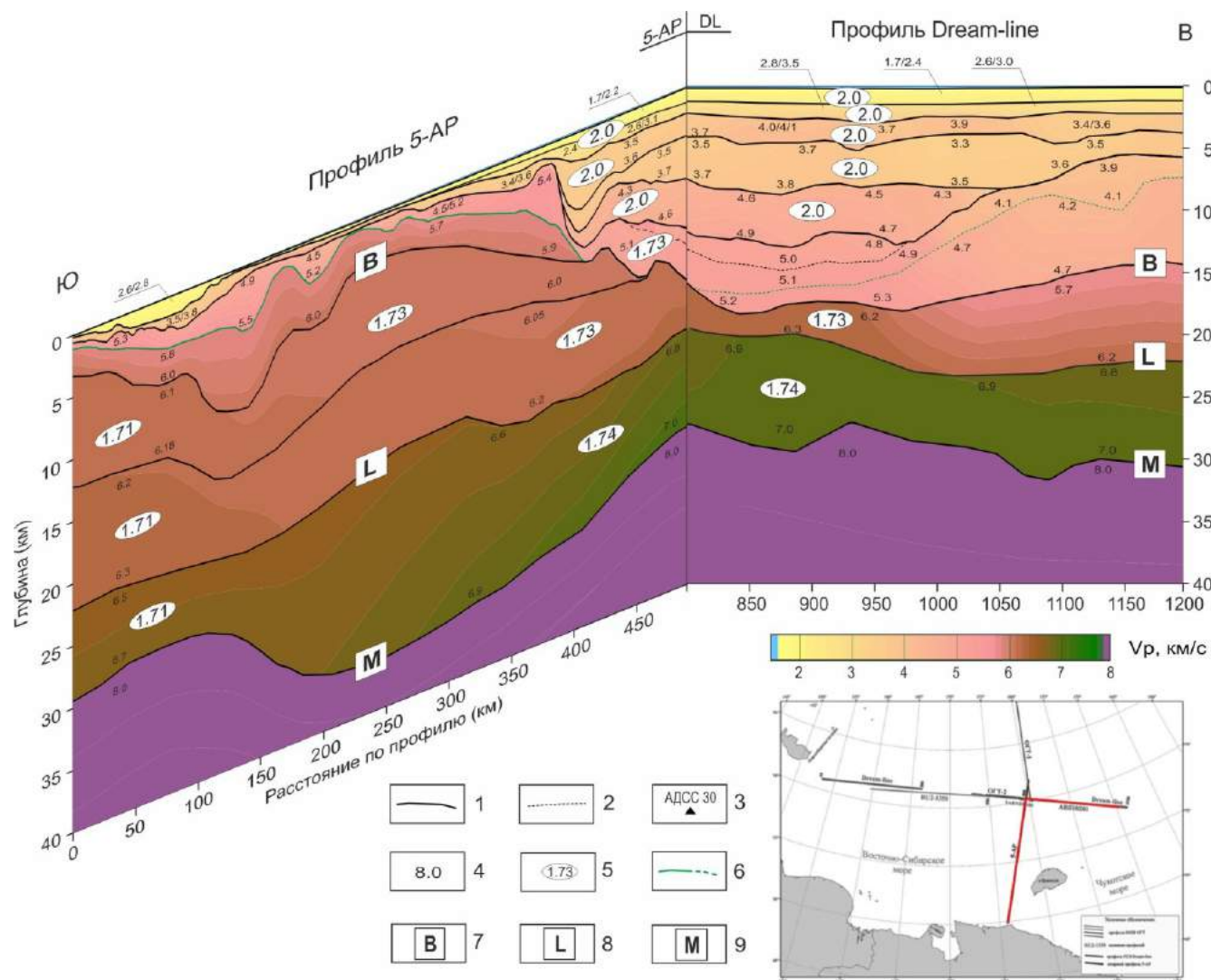


Рисунок 4.26 – Взаимоувязанная модель по профилям ГСЗ Dream-line и 5-AP

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

4.4. Природа земной коры Северо-Чукотского прогиба по данным многоволновых сейсмических исследований

Проблема определения типа земной коры Северо-Чукотского прогиба на данный момент весьма актуальна, в первую очередь, в связи с проведением работ по обоснованию внешней границы континентального шельфа (ВГКШ) Российской Федерации в Северном Ледовитом океане.

Главным отличием типичной океанической коры от континентальной, прежде всего, является общая мощность земной коры. Мощность типичной океанической коры обычно составляет 6-8 км, внутри нее выделяют слой рыхлых осадков мощностью не более одного километра со скоростями продольных волн 2-4 км/с; второй океанический слой мощностью 2-3 км со скоростями V_p от 4 до 6 км/с, представленный вулканитами; третий океанический слой мощностью 4-5 км со скоростями V_p от 6.5 до 7.2 км/с. Однако океаническая кора горячих точек и вулканических провинций может достигать мощности более 20 км, и в ее нижней части выделяется слой со скоростями, промежуточными между корой и мантией (7.2-7.6 км/с) [Funck et al., 2007; McNutt et al., 2007; Fernàndez et al., 2010].

Типичная континентальная кора, как правило, имеет мощность более 30 км и состоит из осадочного слоя и консолидированной части, разделяемой на верхнюю, среднюю и нижнюю кору. Однако под глубокими прогибами может встречаться утоненная до 12-15 км континентальная земная кора с отсутствием в ее консолидированной части отдельных слоев [Lebedeva-Ivanova et al., 2006; Netzeband et al., 2006].

Отношение скоростей продольных и поперечных волн V_p/V_s для слоев океанической и континентальной кор, даже близких по мощностям и скоростям продольных волн, существенно разнятся, что дает основание к их разделению. В работе R.D. Hydman [Hydman, 1979] опубликованы измерения отношения V_p/V_s и коэффициенты Пуассона в образцах океанических и континентальных горных пород. Замечено, что плотные высокоскоростные осадки ($\sigma=0.24-0.30$, $V_p/V_s=1.71-1.87$) и выветрелая, высокопористая, низкоскоростная верхняя океаническая кора ($\sigma=0.32-0.36$, $V_p/V_s=1.94-2.14$) при одинаковых значениях скоростей продольных волн $V_p= 4-5$ км/с имеют различные значения коэффициента Пуассона и отношения V_p/V_s . Слабо выветрелая, низкопористая, высокоскоростная верхняя и средняя океаническая кора ($\sigma=0.28-0.31$, $V_p/V_s=1.81-1.91$) и континентальная кора ($\sigma=0.25-0.28$, $V_p/V_s=1.73-1.81$) при схожих значениях скоростей продольных волн $V_p= 5.5-6.5$ км/с также разделяются по значениям коэффициента Пуассона и отношению V_p/V_s .

На рисунках 4.27 и 4.28 приведены примеры многоволновых исследований структуры земной коры в северной Атлантике [Ljones et al., 2004; Mjelde et al., 2009].

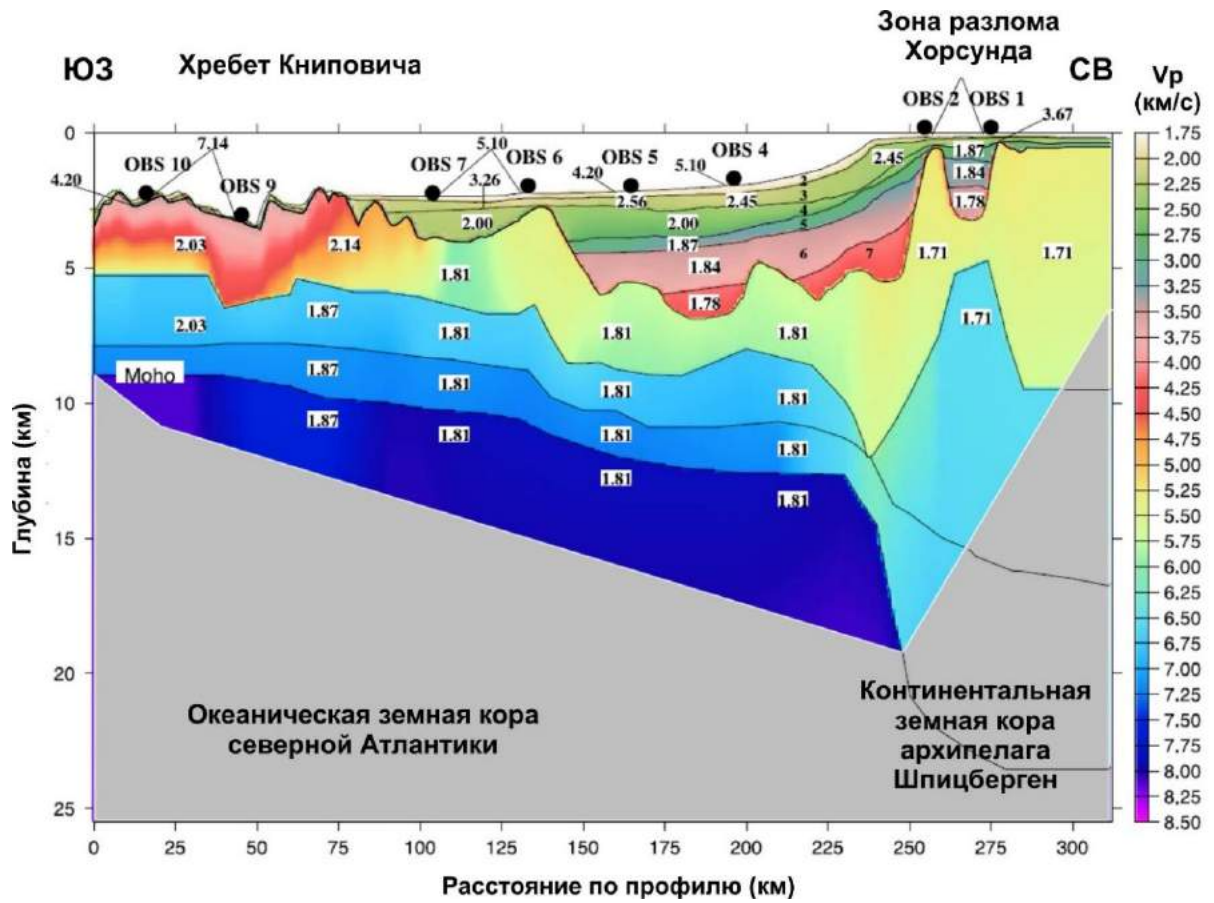


Рисунок 4.27 – Скоростная модель земной коры в области перехода континент-океан в районе хребта Книповича в северной Атлантике [Ljones et al., 2004]

Примечание – Цифры на разрезе соответствуют значениям V_p/V_s .

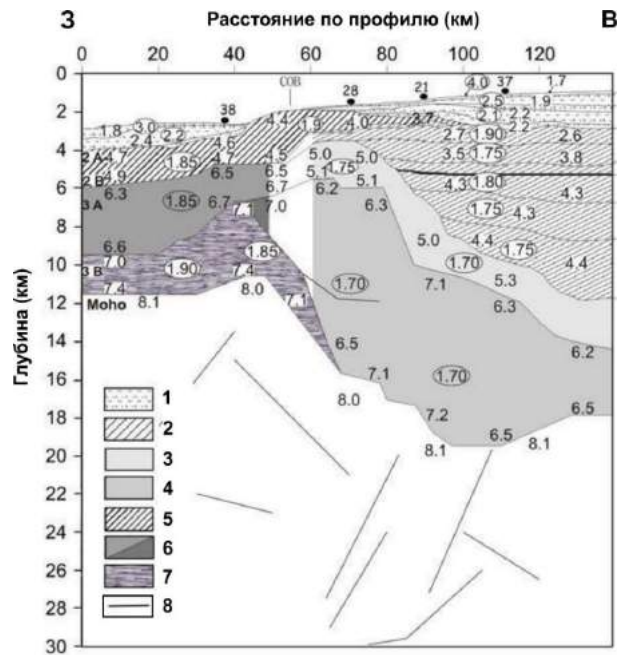














Рисунок 4.28 – Скоростная модель земной коры в области перехода континент-океан в Норвежском море [Mjelde et al., 2009]

Значения отношения V_p/V_s в осадочных комплексах на континентах и в океанах не отличаются и в целом характеризуются повышенными значениями – 2.1-2.5.

Стратиграфические комплексы осадочного чехла резко отличаются по значениям V_p/V_s от пород консолидированной коры. В кристаллической части континентальной коры отношения V_p/V_s обычно составляют 1.70-1.77, не превышая значений 1.80-1.181, в то время как в океанической коре они, как правило, существенно выше – 1.81-1.87, достигая значений 1.90.

В таблице 4.3 приведены современные представления о типовом строении океанической и континентальной земной коры и обобщенные скоростные характеристики основных коровых слоев [Mueller, 1977; Белоусов, 1989; Mooney, 2007; Кашубин и др., 2013b; 2018]. В центральном столбце приведены типичные значения скоростей продольных волн для выделяемых в океанической и континентальной коре слоев. Слева и справа от центрального столбца даны наиболее распространенные названия, обозначения и типичные значения отношения V_p/V_s для слоев, выделяемых в океанической и континентальной земной коре.

Таблица 4.3 – Обобщенные модели строения и скоростные параметры океанической и континентальной земной коры [Кашубин и др., 2013b, 2018]

Океаническая кора			V_p , км/с	Континентальная кора		
Основные слои	V_p/V_s	V_p/V_s		Основные слои		
Вода		-	1.45-1.50	-		Вода
Осадки		2.1-2.5	2.0-4.5	2.1-2.5		Осадки
2-й слой океанической коры		1.8-2.2	4.2-6.0	1.7-2.1		Базальты, переслаивающиеся с осадками или складчато-метаморфический слой
-	-	-	5.8-6.4	1.69-1.73		Верхняя кора
-	-	-	6.3-6.7	1.73-1.75		Средняя кора
3-й слой океанической коры		1.81-1.87	6.6-7.2	1.75-1.77		Нижняя кора
Коромантийный слой		1.78-1.84	7.2-7.6	1.78-1.84		Коромантийный слой

Многоволновые сейсмические исследования структуры земной коры на российском шельфе проводились, например, для Южно-Охотской котловины в Охотском море [Кашубин и др., 2011], для Южно-Баренцевской впадины в Баренцевом море [Сакулина и др., 2016b] и показали достаточно хорошие результаты при обосновании континентального типа земной коры (Рисунки 4.29 и 4.30).

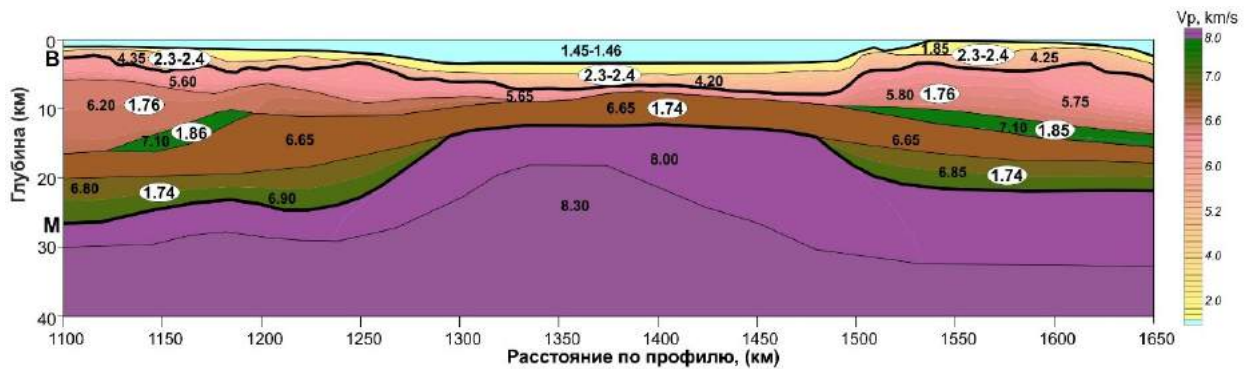


Рисунок 4.29 – Модель глубинного строения земной коры и верхов мантии Южно-Охотской котловины по фрагменту профиля 2-ДВ-М в Охотском море [Кашубин и др., 2011]

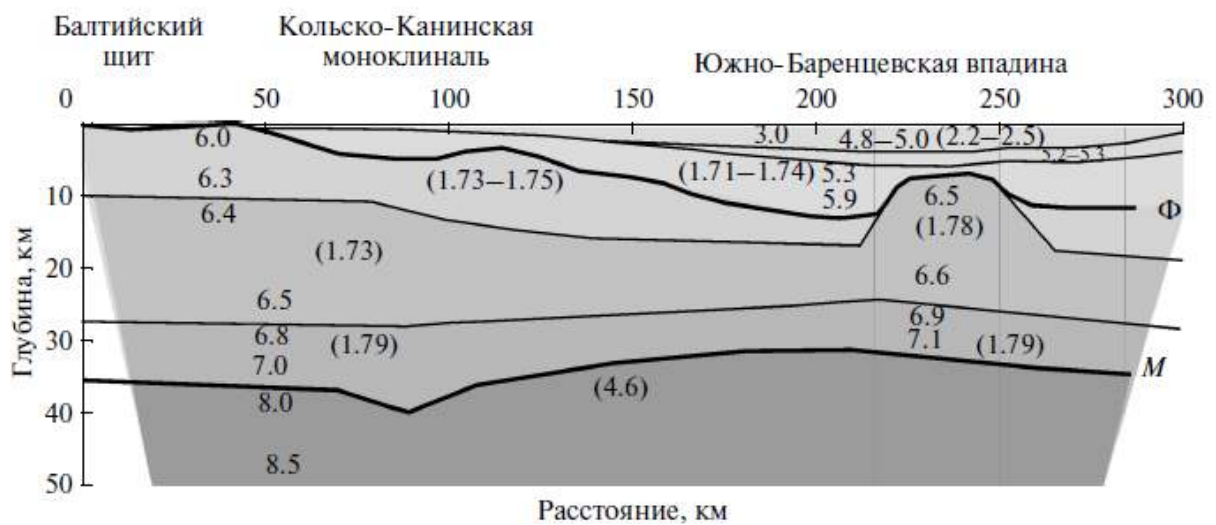


Рисунок 4.30 – Скоростной разрез по продольным и поперечным волнам для южной части профиля 1-АР [Сакулина и др., 2016b]

Примечание – На разрезе даны скорости продольных волн (км/с) и отношения продольных и поперечных волн (в скобках).

В разрезе Северо-Чукотского прогиба, рассматриваемого в настоящей работе, по результатам 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 $V_p/V_s = 1.73-1.74$ (Рисунок 4.31). Отсутствие высоких значений V_p/V_s ($V_p/V_s = 1.8 - 1.90$), характерных для океанической коры [Hudman, 1979; Ljones et al., 2004; Mjelde et al., 2009; Кашубин и др., 2013b; и др.], 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., 2013b; Павленкова, 2016].

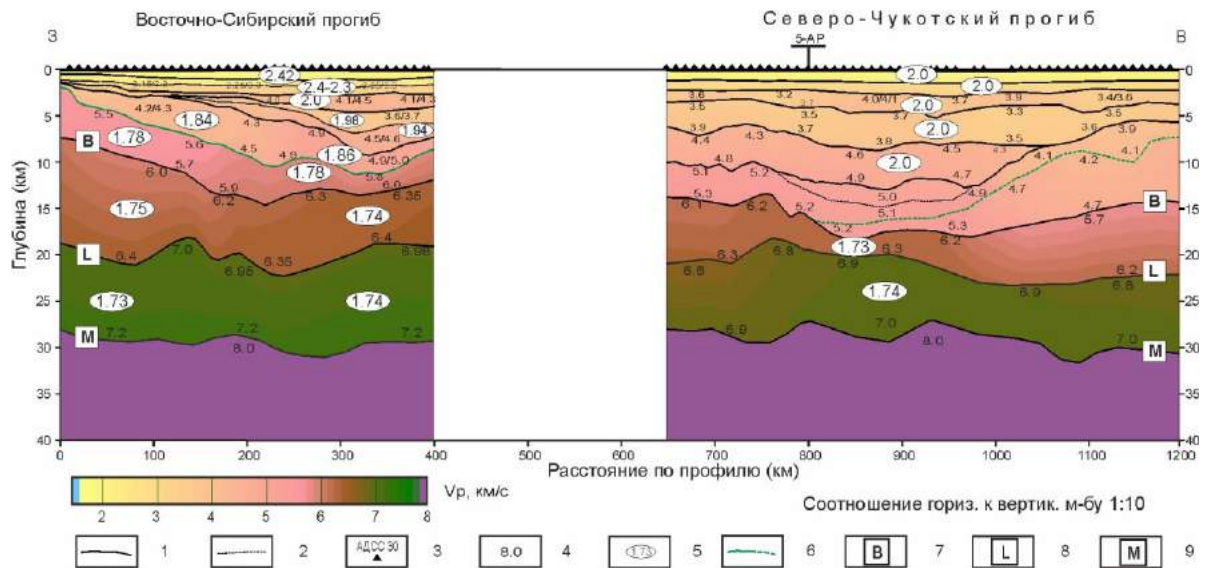


Рисунок 4.31 – Скоростная модель земной коры и верхов мантии по профилю ГСЗ

Dream-line

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

Глубинные скоростные разрезы ГСЗ по двум пересекающимся профилям – Dream-line и 5-AP хорошо увязываются между собой и демонстрируют модель земной коры и верхов мантии, типичную для глубоких впадин с наличием мощного осадочного чехла, утоненной верхней и мощной нижней кристаллической корой.

4.5. Альтернативные скоростные и геологические модели Северо-Чукотского осадочного бассейна по профилям 5-AP и Dream-line

На рисунке 4.32 приведен фрагмент скоростной модели осадочного чехла Северо-Чукотского прогиба по восточной части профиля Dream-line в районе его пересечения с профилем 5-AP (650-1200 км по профилю). Инверсия скорости в разрезе осадочного чехла может интерпретироваться по-разному. Возможны две альтернативные скоростные модели. В одном случае инверсию скорости можно рассматривать как понижение скорости в соответствующем интервале разреза осадочного чехла, в другом – как наличие относительно высокоскоростного пропластка в разрезе с нормальным нарастанием скорости.

С целью сравнения волновых полей для двух альтернативных скоростных моделей был выполнен расчет синтетических сейсмограмм с использованием программ полноволнового математического моделирования [Костин, 2011] для разрезов:

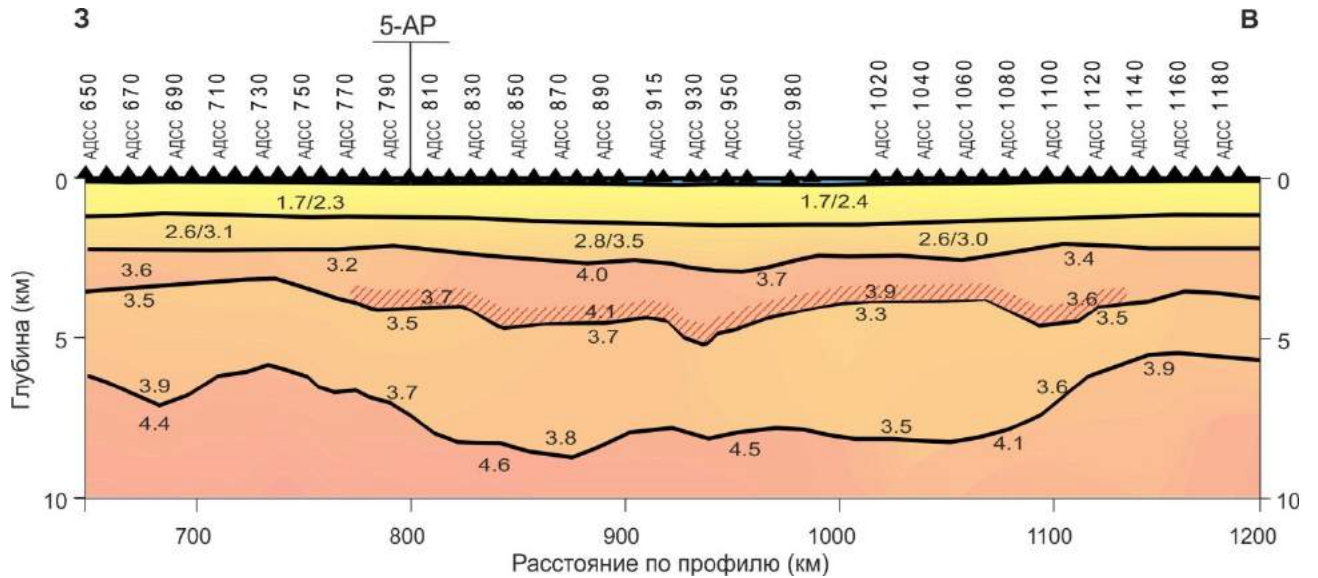


Рисунок 4.32 – Фрагмент скоростной модели осадочного чехла Северо-Чукотского бассейна по профилю ГСЗ Dream-line

Примечание – Треугольниками показано положение донных станций (АДСС); 5-АР – место пересечения с профилем ГСЗ 5-АР; цифры на разрезе – скорости продольных волн в км/с; красной штриховкой помечена кровля волновода.

- с нормальным нарастанием скорости с глубиной (Рисунок 4.33а);
- с низкоскоростным слоем (Рисунок 4.33б);
- с высокоскоростным слоем (Рисунок 4.33в).

Скоростные параметры и мощности слоев в моделях были приближены к значениям, приведенным на рисунке 4.32.

На синтетической сейсмограмме для модели с нарастанием скоростей в осадочном чехле наблюдается типичная в таких случаях волновая картина, когда на каждой границе в модели образуется как отраженная, так и головная/рефрагированная волны. На синтетической сейсмограмме для модели с низкоскоростным слоем наблюдается незначительное затухание амплитуд волн в первых вступлениях, отсутствие головной/рефрагированной волны от кровли низкоскоростного слоя. Вариант модели с высокоскоростным слоем (Рисунок 4.33в) лучше всего соответствует реальным сейсмическим записям.

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») [Кашубин и др., 2017].

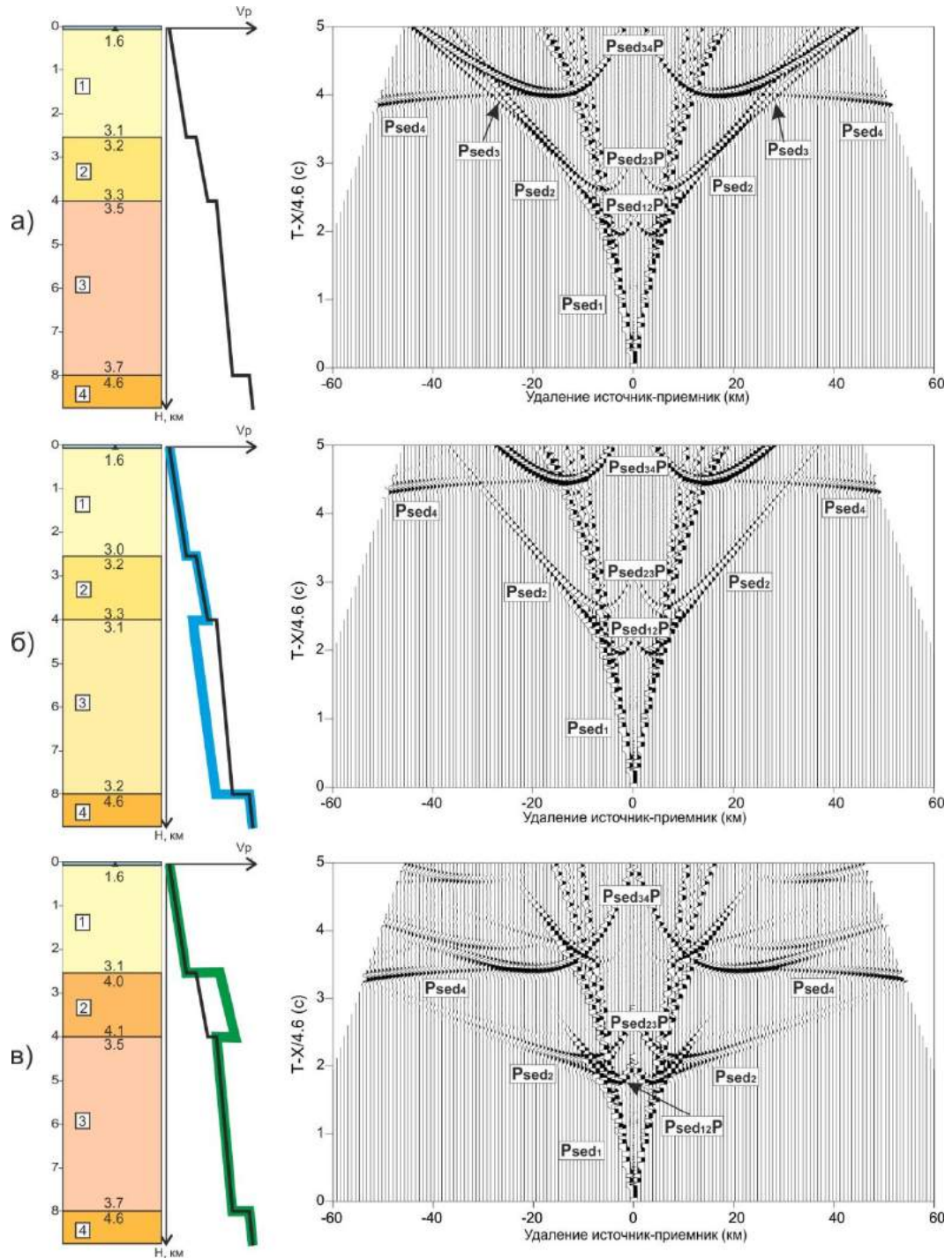


Рисунок 4.33 – Альтернативные скоростные модели осадочного чехла Северо-Чукотского бассейна и соответствующие им синтетические сейсмограммы

Примечание – а – модель с нормальным нарастанием скорости с глубиной; б – модель с низкоскоростным слоем; в – модель с высокоскоростным слоем. Обозначения волн: P_{sed_1} – рефрагированные волны в слое 1; $P_{sed_{12}P}$ – отраженные волны от границы между слоями 1 и 2; P_{sed_2} – рефрагированные волны в слое 2; $P_{sed_{23}P}$ – отраженные волны от границы между слоями 2 и 3; P_{sed_4} – рефрагированные волны в слое 4; $P_{sed_{34}P}$ – отраженные волны от границы между слоями 3 и 4; цифры на колонках – скорости продольных волн в км/с; цифры в квадратах – номера слоев модели.

Как уже отмечалось, подошва высокоскоростного слоя соответствует опорному отражающему горизонту, расположенному на глубине около 4 км. Выше этого отражателя фиксируются структуры клиноформ раннего неогена (Рисунок 4.34), которые указывают на то, что снос осадочного материала в кайнозойское время шел с юга, со стороны поднятия Врангеля-Геральда. Наличие высокоскоростного слоя в осадочном чехле, вероятнее всего, обусловлено сменой литологических свойств горных пород, слагающих разрез. Согласно петрофизическим данным [Петрофизика, 1992], он может быть сложен породами палеоген-неогенового возраста терригенного состава, предположительно песчаниками и глинистыми сланцами с долей карбонатного вещества в цементе. Нижезалегающий слой может быть представлен верхнемеловыми терригенными отложениями такими, как песчаники, алевролиты и аргиллиты. При этом по характеру клиноформ раннего мела видно, что снос в меловое время шел с севера – из области Центрально-Арктических поднятий, которые в палеоцене испытали погружение на батинальные глубины.

Такая модель объясняет как наличие стратиграфических перерывов в осадконакоплении, так и значительные мощности осадков в Северо-Чукотском прогибе.

4.6. Выводы по главе 4

По данным современных сейсмических исследований, включающих детальные наблюдения ГСЗ с донными станциями и профилирование МОВ-ОГТ, удалось существенно уточнить скоростную модель Северо-Чукотского прогиба:

1. Мощность осадочного чехла Северо-Чукотского прогиба составила 7-8 км в западной части профиля Dream-line и 15-16 км в восточной части профиля. 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. Значения отношения скоростей V_p/V_s в осадках меняются в широких пределах от 1.9 до 2.4. Выделен промежуточный комплекс мощностью 3-4.5 км со скоростями продольных волн 5.5–6.0 км/с в западной части профиля и V_p/V_s 1.78 и мощностью 2-7 км со продольных волн 4.2–5.3 км/с в восточной части профиля. 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. 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 М залегает на глубинах порядка 27–30 км. Скорость продольных волн в верхах мантии составляет 8.0 км/с.

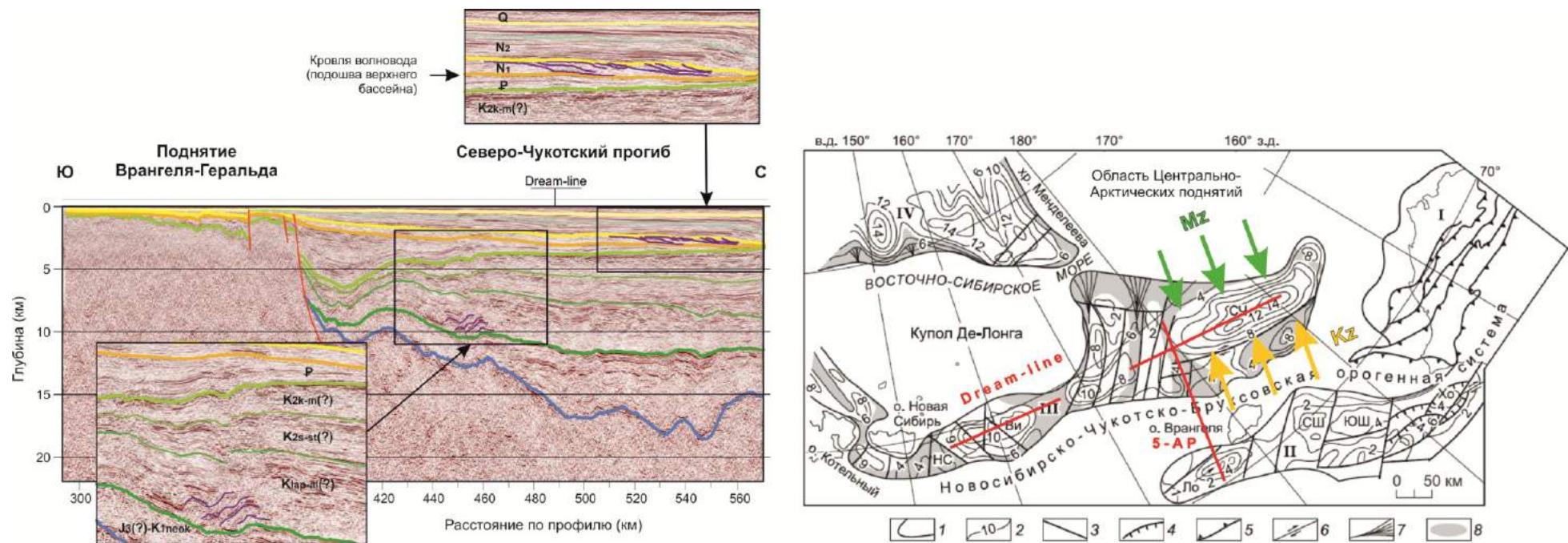


Рисунок 4.34 – Фрагмент сейсмического разреза МОВ-ОГТ по профилю 5-АР (слева) и принципиальная модель формирования «бассейна в бассейне» в пределах Северо-Чукотского прогиба на схеме потенциально нефтегазоносных бассейнов Восточной Арктики [по Хаину, 2009] (справа)

Примечание – На врезках на фрагменте сейсмического разреза по профилю 5-АР показаны структуры клиноформ раннего неогена (вверху) и раннего мела (внизу). На схеме справа красными линиями показано положение профилей 5-АР и Dream-line; стрелками показано направление сноса осадочного материала с указанием возраста денудации. 1 – границы бассейнов; 2 – изопахиты (км); 3-6 – разломы: 3 – недифференцированные, 4 – сбросы, 5 – надвиги, взбросы, 6 – сдвиги; 7 – предполагаемые конусы выноса; 8 – перспективные зоны с неустановленной нефтегазоносностью. Нефтегазоносные бассейны: Северного склона Аляски (I). Потенциально нефтегазоносные бассейны: Южно-Чукотский (II), Новосибирско-Северо-Чукотский (III), Предвосточносибирский (IV); впадины Южно-Чукотского ПНГБ: Лонга (Ло), Северо-Шмидтовская (СШ), Южно-Шмидтовская (ЮШ), Хоуп (Хо); прогибы Новосибирско-Северо-Чукотского ПНГБ: Новосибирский (НС), Вилькицкого (Ви), Северо-Чукотский (СЧ).

2. Выделенный по результатам глубинных сейсмических зондирований в осадочном чехле Северо-Чукотского прогиба волновод при сопоставлении с материалами 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 батиметрические глубины в кайнозое – поднятие Врангеля-Геральда.

3. 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.

Таким образом, в главе 4 раскрыты второе и третье защищаемые положения.

Второе защищаемое положение: 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.

Третье защищаемое положение: 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.

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 батимальные 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 ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аветистов, Т. П., Глубинное строение центральной части Норильского района по данным ГСЗ – МОВЗ / Т. П. Аветистов, В. С. Голубков. – Текст : непосредственный // Геолого-геофизические характеристики литосферы Арктического региона. – Санкт-Петербург : ВНИИОкеангеология, 1996. – вып. I. – ч. 2. – С. 186-197.
2. Аки, К. Количественная сейсмология. Теория и методы : в 2 т. – Пер. с англ. / К. Аки, П. Ричардс. – Москва : Мир, 1983. – т. 1. – 520 с.; т. 2, 360 с. – Текст : непосредственный.
3. Алейников, А. Л. Многоволновая сейсмика при изучении недр рудных районов : монография / А. Л. Алейников, Н. И. Немзоров, Н. И. Халевин. – Москва : Наука, 1986. – 112 с. – Текст : непосредственный.
4. Александрова, Г. Н. Геологическое развитие Чаунской впадины (Северо-Восток России) в палеогене и неогене. Статья 1. Палеоген / Г. Н. Александрова. – Текст : непосредственный // Бюллетень МОИП Отд. Геол. – 2016а. – Т. 91. – № 4-5. – С. 148-164.
5. Александрова, Г. Н. Геологическое развитие Чаунской впадины (Северо-Восток России) в палеогене и неогене. Статья 2. Неоген / Г. Н. Александрова. – Текст : непосредственный // Бюллетень МОИП Отд. Геол. – 2016б. – Т. 782. – С. 11-35.
6. Артюшков, Е. В. Образование сверхглубокого Северо-Чукотского прогиба вследствие эклогитизации нижней части континентальной коры. Перспективы нефтегазоносности / Е. В. Артюшков. – Текст : непосредственный // Геология и геофизика. – 2010. – Т. 51 – № 1. – С. 61-74.
7. Белоусов, В. В. Типы земной коры Европы и Северной Атлантики / В. В. Белоусов, Н. И. Павленкова. – Текст : непосредственный // Геотектоника. – 1989. – № 3. – С. 3-14.
8. Богданов, Н. А. Система кайнозойских рифтов Восточной Арктики и ее возможное значение / Н. А. Богданов, В. Е. Хаин, Э. В. Шипилов. – Текст : непосредственный // Докл. РАН. – 1995. – Т. 345 – № 1. – С. 84-86.
9. Бурлин, Ю. К. Основные черты тектонического развития осадочных бассейнов в западной части шельфа Чукотского моря и перспективы их нефтегазоносности / Ю. К. Бурлин, Ю. В. Шипелькевич. – Текст : непосредственный // Геотектоника. – 2006. – Т. 2. – С. 65-82.
10. Виноградов, В. А. Осадочный чехол Восточно-Арктического шельфа России и условия его формирования в системе материк-океан / В. А. Виноградов, Ю. В. Горячев, Е. А. Гусев, О. И. Супруненко. – Текст : непосредственный // 60 лет в Арктике, Антарктике и Мировом океане / Под. ред. В. Л. Иванова. – Санкт-Петербург : ВНИИОкеангеология, 2008. – С. 63-78.
11. Гальперин, Е. И. Поляризационный метод сейсмических исследований : монография / Е. И. Гальперин. – Москва : Недра. 1977. – 277 с. – Текст : непосредственный.
12. Геология и полезные ископаемые России: 6 т. Т. 5. Арктические и дальневосточные моря. Кн. 1. Арктические моря / ред. И. С. Грамберг, В. Л. Иванов, В. П. Орлов., Ю. Е. Погребницкий. – Санкт-Петербург : ВСЕГЕИ, 2004. – 468 с. – ISBN 5-93761-056-3. – Текст : непосредственный.
13. Дараган-Суцова, Л. А. Геология и тектоника северо-востока Российской Арктики (по сейсмическим данным) / Л. А. Дараган-Суцова, О. В. Петров, Н. Н. Соболев [и др.]. – // Геотектоника. – 2015. – № 6. – С. 3–19.
14. Дараган-Суцова, Л. А. К обоснованию стратиграфической привязки опорных сейсмических горизонтов на восточно-арктическом шельфе и в области центрально-арктических поднятий / Л. А. Дараган-Суцова, Н. Н. Соболев, Е. О. Петров [и др.]. – Текст : непосредственный // Региональная геология и металлогения. – 2014. – № 58. – С. 5-21.
15. Драчев, С. С. Структура и сейсмостратиграфия шельфа Восточно-Сибирского моря вдоль сейсмического профиля «Индигирский залив – остров Жаннетты» / С. С. Драчев.,

- А. В. Елистратов, Л. А. Савостин. – Текст : непосредственный // Доклады РАН. – 2001. – Т.377. – № 4. – С. 521-525.
16. Драчев, С.С. Тектоника рифтовой системы дна моря Лаптевых // Геотектоника. – 2000. – №6. – С. 43-58.
 17. Егоркин, А. В. Глубинные сейсмические исследования с трехкомпонентной регистрацией смещения почвы / А. В. Егоркин. – Текст : непосредственный // Физика Земли. – 1999. – № 7-8. – С. 44-64.
 18. Егоркин, А. В. Многоволновые глубинные сейсмические исследования / А. В. Егоркин. – Текст : непосредственный // Геофизика. – 1996. – № 4. – С. 25-30.
 19. Егоркин, А. В. Результаты исследований структуры литосферы на профилях в Сибири / А. В. Егоркин, С. К. Зюганов, Н. А. Павленкова, Н. М. Чернышев. – Текст: непосредственный // Геология и геофизика. – 1988. – № 5. – С. 120-128.
 20. Заварзина, Г. А. Тектоническое районирование шельфа Восточно-Сибирского и Чукотского морей на основании комплексной интерпретации геолого-геофизических данных / Г. А. Заварзина, Д. С. Шапабаева, Р. Р. Мурзин [и др.]. – Текст : непосредственный // ПРОНЕФТЬ. Профессионально о нефти. – 2017. – Т. 4. – № 2. – С. 53-60.
 21. Исанина, Э. В. Атлас региональных сейсмических профилей Европейского Севера России / Э. В. Исанина, Н. В. Шаров [и др.]. – Текст : непосредственный. – Санкт-Петербург : Росгеофизика, 1995.
 22. Каревская, И. А. Палеогеографические обстановки осадконакопления на шельфе Восточно-Сибирского моря / И. А. Каревская, А. В. Сурков, С. С. Воскресенский [и др.]. – Текст: непосредственный // Палеогеографические обстановки и генезис переуглублений на шельфах и история речных долин : сборник / ред. М. Н. Алексеев, Н. И. Николаев, В. Л. Яхимов. – Москва : МГУ, 1984. – С. 43-50.
 23. Кашубин, С. Н. Азимутальные наблюдения в Тагильско-Магнитогорском прогибе / С. Н. Кашубин. – Текст : непосредственный // «ЭИ ВИЭМС. Разведочная геофизика. Отеч. произв. Опыт». – 1985. – вып. 5. – С. 9-17.
 24. **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.**
 25. Кашубин, С. Н. Методика анализа физических свойств горных пород при региональных сейсмических исследованиях (на примере Тагильско-Магнитогорского прогиба) / С. Н. Кашубин. – Текст : непосредственный // Геофизические методы поисков и разведки рудных и нерудных месторождений. – 1984. – С. 83-91.
 26. Кашубин, С. Н. Особенности волновых полей продольных и поперечных волн при глубинных сейсмических исследованиях на акваториях / С. Н. Кашубин, Т. С. Сакулина, Н. И. Павленкова, Ю. П. Лукашин. – Текст : непосредственный // Технологии сейсморазведки. – 2011. – № 4. – С. 88-102.
 27. Кашубин, С. Н. Сейсмическая анизотропия и эксперименты по ее изучению на Урале и Восточно-Европейской платформе : монография / С. Н. Кашубин. – Екатеринбург : УрО РАН, 2001. – 182 с. – ISBN 5-7691-1173-9. – Текст : непосредственный.
 28. Кашубин, С. Н. Современные методы проведения и интерпретации глубинных сейсмических зондирований в окраинных морях России / С. Н. Кашубин, Т. С. Сакулина, Ю. П. Лукашин, Н. И. Павленкова // Актуальность идей Г.А. Гамбурцева в геофизике XXI века. — Москва : ИФЗ РАН, 2013а. — С. 175-194.
 29. **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.**

30. Кашубин, С. Н. Типы земной коры Циркумполярной Арктики // С. Н. Кашубин, Н. И. Павленкова, О. В. Петров [и др.]. – Текст : непосредственный // Региональная геология и металлогения. – 2013b. – № 55. – С. 5-20.
31. Коган, А. Л. Морские сейсморазведочные работы в Чукотском море / А. Л. Коган [и др.]. – Текст : непосредственный // Морские геофизические исследования в Арктике. – Ленинград : ВНИИОкеангеология, 1981. – С. 38-40.
32. Костин, В. И. Конечно-разностный метод численного моделирования распространения сейсмических волн в трехмерно-неоднородных разномасштабных средах / В. И. Костин, В. В. Лисица, Г. В. Решетов, В. А. Чеверда. – Текст : непосредственный // Вычислительные методы и программирование. – 2011. – Т. 12. – №3. – С. 321-329.
33. Косько, М. К. К тектонике Северного Ледовитого океана и его континентальной окраины / М. К. Косько, В. В. Буценко, В. Л. Иванов [и др.]. – Текст : непосредственный // 60 лет в Арктике, Антарктике и Мировом океане / Под. ред. В.Л. Иванова. – Санкт-Петербург : ВНИИОкеангеология, 2008. – С. 16-43.
34. Косько, М. К. Стратифицированные комплексы / М. К. Косько, В. Г. Ганелин, М. П. Сесил [и др.]. – Текст : непосредственный // Остров Врангеля: геологическое строение, минерализация, геоэкология / Под ред. М. К. Косько, В. И. Ушакова. – Санкт-Петербург : ВНИИОкеангеология, 2003. – С. 21-46.
35. Крылов, С. В. Оценка прочности кристаллических пород по данным глубинного сейсмического зондирования на Р- и S-волнах / С. В. Крылов, Е. Н. Тен. – Текст : непосредственный // Разведка и охрана недр. – 2003. – № 4. – С. 7-11.
36. Кузнецов, В. М. Обработка и интерпретация данных МВС-ВСП в специализированной системе 3С-INTERACT / В. М. Кузнецов, Г. А. Шехтман, В. В. Попов [и др.]. – Текст : непосредственный // Тезисы докладов «Гальперинские чтения». – Москва : ЦГЭ, 2004. – С. 81-85.
37. Кулемин, Р. Ф. Корреляция палеозой-мезозойских отложений Северо-Чукотского осадочного бассейна и Аляски / Р. Ф. Кулемин, О. А. Серебрякова. – Текст : непосредственный // Геология, география и глобальная энергия. – 2011. – Т. 41. – № 2. – С. 119-125.
38. Легенда Лаптево-Сибироморской серии листов Государственной геологической карты Российской Федерации масштаба 1:1000 000 (третье поколение) / Сост. В. А. Виноградов, Е. Е. Мусатов, Ю. В. Горячев. Гл. ред. М. К. Косько. – СПб.: ВНИИОкеангеология, 2000.
39. Логвина, Е.А. Геолого-геофизические исследования в Чукотском и Восточно-Сибирском морях в рамках российско-американского проекта «RUSALCA-2009» / Е.А. Логвина, Т.В. Матвеева, В.А. Гладыш. – Текст : непосредственный // Экспедиционные исследования ВНИИОкеангеология в 2008-2009 годах. – Санкт-Петербург : ВНИИОкеангеология, 2010. – С. 2-16.
40. Лукашин, Ю. П. Применение многоволновой сейсморазведки при морских региональных исследованиях / Ю. П. Лукашин, В. П. Семенов, А. Л. Ронин. – Текст : непосредственный // Разведка и охрана недр. – 2003. – № 4. – С. 7-11.
41. Маловичко, А. А. Применение методов численного моделирования сейсмических волновых полей для изучения разномасштабных проявлений техногенной сейсмичности / А. А. Маловичко, Д. А. Маловичко. – Текст : непосредственный // Современные математические и геологические модели природной среды: Сборник научных трудов. – Москва : ОИФЗ РАН, 2002. – С. 120-138.
42. Малышев, Н. А. Оценка перспектив нефтегазоносности осадочных бассейнов Восточной Арктики / Н. А. Малышев, В. В. Обметко, А. А. Бородулин. – Текст : непосредственный // Науч.-техн. вестник ОАО НК «Роснефть». – 2010. – № 1. – С. 20-28.
43. Многоволновая сейсморазведка : 3 т. Т. 1 : Физические основы : курс лекций / В.А. Куликов, В.М. Куликов, М.Ю. Подбережный. – Новосибирск : Новосибирский гос. ун-т, 2006. – 117 с. - ISBN 5-94356-408-X. – Текст : непосредственный.

44. Многоволновая сейсморазведка : 3 т. Т. 2 : Геологические основы : курс лекций / В.А. Куликов, В.М. Куликов, М.Ю. Подбережный. - Новосибирск : Новосибирский гос. ун-т, 2006. – 99 с. – ISBN 5-94356-434-9. – Текст : непосредственный.
45. Многоволновая сейсморазведка : 3 т. Т. 3 : Методика и приложение к задачам нефтяной геологии : курс лекций / В. А. Куликов, В. М. Куликов, М. Ю. Подбережный. – Новосибирск : Новосибирский гос. ун-т, 2006. – 205 с. – ISBN 978-5-94356-577-9. – Текст : непосредственный.
46. Многоволновая сейсморазведка: краткий библиографический справочник отечественных и зарубежных работ с 1960 по 2008 год / сост. В.М. Кузнецов, Г.А. Шехтман, Д.Т. Хандамиров, И.П. Коротков. – Москва : Спектр, 2010. – 358 с. – ISBN 978-5-903930-05-0. – Текст : непосредственный.
47. Никишин, А. М. Рифтовые системы шельфа Российской Восточной Арктики и арктического глубоководного бассейна: связь геологической истории и геодинамики / А. М. Никишин, Е. И. Петров, Н. А. Малышев, В. П. Ершова. – Текст : непосредственный // Геодинамика и тектонофизика. – 2017. – Т. 8. – № 1. – С. 11-43.
48. Никишин, А. М. Тектонические реконструкции Арктического региона для позднеюрско-кайнозойского времени / А. М. Никишин, Е. И. Петров, К. Гайна [и др.]. – Текст : непосредственный // Материалы LI Тектонического совещания. – Москва : ГЕОС, 2019. – Т. 2. – С. 83-86.
49. Никишин, А. М. Типы современных пассивных континентальных окраин и проблема механизма формирования поднятия Альфа-Менделеева в Арктическом океане / А. М. Никишин, Н. А. Малышев, Е. И. Петров [и др.]. – Текст : непосредственный // Фундаментальные проблемы тектоники и геодинамики : материалы LI Тектонического совещания. – Москва : ГЕОС, 2020. – Т. 2. – С. 116-121.
50. Никишин, А. М. Этапы тектонической эволюции и сейсмостратиграфия осадочных бассейнов Восточно-Сибирского и Чукотского морей и сопряженной части Амеразийского бассейна / А. М. Никишин, К. Ф. Старцева, В. Е. Вержбицкий [и др.]. – Текст : непосредственный // Геотектоника. – 2019. – № 6. – С. 1-24.
51. Остров Врангеля: геологическое строение, минерагения, геоэкология : монография / М.К. Косько, В.В. Авдюничев, В.Г. Ганелин [и др.] ; Под ред. М.К. Косько, В.И. Ушакова – Санкт-Петербург : ВНИИОкеангеология, 2003. – 137 с. – ISBN 5-88994-047-3. – Текст : непосредственный.
52. Павленкова Н. И. Земная кора глубоких платформенных впадин Северной Евразии и природа их формирования. / Н. И. Павленкова, С. Н. Кашубин, Г. А. Павленкова. – Текст : непосредственный // Физика Земли. – 2016. – № 5. – С. 150-164.
53. Петровская, Н. А. Основные черты геологического строения Российского сектора Чукотского моря / Н. А. Петровская, С. В. Тришкина, М. А. Савишкина. – Текст : непосредственный // Геология нефти и газа. – 2008. – №6. – С. 20-28.
54. Петровская, Н. А. Сопоставление сейсмокомплексов и основных несогласий в осадочном чехле шельфа восточной Арктики / Н. А. Петровская, М. А. Савишкина. – Текст : непосредственный // Нефтегазовая геология. Теория и практика. – 2014. – Т. 9. – № 3. – С. 1-26.
55. Петрофизика. Горные породы и полезные ископаемые : 3 т. Т. 1 : справочник / Под ред. Н.Б. Дортман. – Москва : Недра, 1992. – 391 с. – Текст : непосредственный.
56. Пискарев-Васильев, А.Л. Геодинамика и геологическая структура арктической континентальной окраины России. Геофизические характеристики и глубинное строение литосферы. Плотностная расслоенность земной коры / А.Л. Пискарев-Васильев – Текст : непосредственный // Геология и полезные ископаемые России. Арктические моря / Под ред. И.С. Грамберга, В.Л. Иванова, Ю.Е. Погребицкого. – Санкт-Петербург : ВСЕГЕИ, 2004. – С. 88-99.

57. Поперечные и обменные волны в морских исследованиях ГСЗ (результаты математического моделирования) / Т. М. Яварова, С. Н. Кашубин, А. В. Рыбалка, Т. С. Сакулина. – 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.
58. Поперечные и обменные волны при глубинных сейсмических исследованиях на акваториях: монография / С.Н. Кашубин, ..., Т.М. Яварова [и др.]. – Санкт-Петербург : ВСЕГЕИ, 2019. – 155 с. – (Труды ВСЕГЕИ. Новая серия. Т. 360). – ISBN 978-5-93761-278-6. – Текст : непосредственный.
59. Поселов, В. А. Глубинное строение континентальной окраины района поднятия Менделеева (Восточная Арктика) по результатам геолого-геофизических исследований на опорном профиле «АРКТИКА 2005». - Модели земной коры и верхней мантии по результатам глубинного сейсмопрофилирования / В. А. Поселов, В. Д. Каминский, Г. П. Аветисов [и др.]. – Текст : непосредственный // Материалы Международного научно-практического семинара. Роснедра, ВСЕГЕИ. – Санкт-Петербург : ВСЕГЕИ, 2007. – С. 163-167.
60. Поселов, В. А. Сейсмостратиграфия осадочного бассейна котловины Подводников и Северо-Чукотского прогиба / В. А. Поселов, В. В. Буценко, С. М. Жолондз [и др.]. – Текст : непосредственный // Доклады Академии Наук. Серия Геофизика. – 2017. – Т. 474. – № 5. – С.621-624.
61. Поселов, В. А. Хребет Ломоносова как естественное продолжение материковой окраины Евразии в арктический бассейн. / В. А. Поселов, Г. П. Аветисов, В. В. Буценко [и др.]. – Текст : непосредственный // Геология и геофизика. – 2012. – Т. 53. – № 12. – С. 1662-1680.
62. Пузырев, Н.Н. Методы сейсмических исследований : монография / Н.Н. Пузырев. – Новосибирск : Наука, 1992. – 236 с. – Текст : непосредственный.
63. Пузырев, Н.Н. О проблеме многоволновых сейсмических исследований. – Текст: непосредственный // Пузырев, Н.Н. Многоволновые сейсмические исследования : монография / Н.Н. Пузырев. – Новосибирск : Наука, 1987. – С. 3-6.
64. 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.
65. 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.
66. Разработать рекомендации по обработке и интерпретации данных многоволновых сейсмических исследований на опорных профилях на акваториях [Текст непосредственный]: отчет о НИР (заключит.) : 7.4-12/13 / ФГУП «ВСЕГЕИ»; рук. Эринчек Ю. М. – Санкт-Петербург, 2015. – 180 с. – Исполн.: Рыбалка А.В., Кашубин С.Н., Верба М.Л., Яварова Т.М., Сакулина Т.С., Крупнова Н.А., Игнатьев В.И. – № ГР 643-13-388.
67. Российские арктические геотраверсы : монография / Науч. ред. В. А. Посёлов, Г. П. Аветисов, В. Д. Каминский. – Санкт-Петербург : ФГУП «ВНИИОкеангеология им. И.С. Грамберга», 2011. – 172 с. (Труды НИИГА–ВНИИОкеангеология. Т. 220). – ISBN 978-5-88994-100-2. – Текст : непосредственный.

68. 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. – 2011b. – № 10. – С. 11-17.
69. Сакулина, Т. С. Глубинное строение земной коры и верхней мантии Северо-Чукотского прогиба по профилю ГСЗ Dream-line / Т. С. Сакулина, С.Н. Кашубин, О.В. Петров [и др.]. – Текст : непосредственный // Региональная геология и металлогения. – 2016a. – № 68/2016. – С. 52-65.
70. Сакулина, Т. С. Глубинные сейсмические зондирования по профилю 1-АР в Баренцевом море: методика и результаты / Т.С. Сакулина, С.Н. Кашубин, Г. А. Павленкова. – Текст : непосредственный // Физика Земли. – 2016b. – № 4. – С. 107-124.
71. Сакулина, Т. С. Глубинные сейсмические исследования в Баренцевом и Карском морях / Т. С. Сакулина, Ю. В. Рослов, Н. М. Иванова. – Текст : непосредственный // Физика Земли. – 2003. – № 6. – С. 5-20.
72. Сакулина, Т. С. Комплексные геолого-геофизические исследования на опорном профиле 5-АР в Восточно-Сибирском море / Т. С. Сакулина, М. Л. Верба, Т. В. Кашубина [и др.]. – Текст : непосредственный // Разведка и охрана недр. – 2011a. – № 10. – С. 17-23.
73. Сильвиа, М.Т. Обратная фильтрация геофизических временных рядов при разведке на нефть и газ - Пер. с англ. / М.Т. Сильвиа, Э.А. Робинсон.– Москва : Недра, 1983. – 447 с. – Текст : непосредственный.
74. Скарятин, М. В. Соляная тектоника и перспективы нефтегазоносности российского сектора Чукотского моря / М. В. Скарятин, А. А. Баталова, Е. Ю. Воргачева [и др.]. – Текст : непосредственный // Нефтяное хозяйство. – 2020. – № 2. – С. 12-17.
75. Слободин, В. Я. Расчленение разреза Айонской скважины по новым биостратиграфическим данным / В. Я. Слободин, Б. И. Ким, Г. В. Степанова [и др.]. – Текст : непосредственный // Стратиграфия и палеонтология мезо-кайнозоя Советской Арктики. – Санкт-Петербург : Севморгеология, 1990. – Т. 822. – С. 43-58.
76. 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. Смелрор. – Санкт-Петербург : ВСЕГЕИ, 2020. – С. 65-71. – ISBN 978-5-93761-296-0.
77. Тектоностратиграфический атлас Восточной Арктики : монография / Отв. ред.: О.В. Петров, М. Смелрор. - Санкт-Петербург : ВСЕГЕИ, 2020. – 152 с. – ISBN 978-5-93761-296-0. – Текст : непосредственный.
78. Филатова, Н. И. Тектоника Восточной Арктики / Н. И. Филатова, В. Е. Хаин. – Текст : непосредственный // Геотектоника. – 2007. – № 3. – С. 3-29.
79. Хаин, В. Е. Тектоника и нефтегазоносность восточной Арктики / В. Е. Хаин, И. Д. Полякова, Н. И. Филатова. – Текст : непосредственный // Геология и геофизика. – 2009. – Т. 50. – № 4. – С. 443-460.
80. Хаин, В.Е. Тектоника, геодинамика и перспективы нефтегазоносности Восточно-Арктических морей и их континентального обрамления : монография / В.Е. Хаин, Н.И. Филатова, И.Д. Полякова. – Москва : Наука, 2009. – 227 с. – ISBN 978-5-02-036974-0. – Текст : непосредственный.
81. Шипелькевич, Ю. В. Тектоническое соотношение седиментационных бассейнов на Чукотско-Аляскинском шельфе и перспективы их нефтегазоносности / Ю. В. Шипелькевич, Ю. К. Бурлин. – Текст : непосредственный // Доклады Академии Наук. – 2003. – Т. 391. – № 3. – С. 368-372.
82. Шипилов, Э. В. Геодинамика литосферы Американо-Азиатского бассейна в кайнозое / Э. В. Шипилов, Л. И. Лобковский, М. В. Кононов // В сб.: Геодинамика, рудные месторождения

- и глубинное строение литосферы. XV-е Чтения памяти академика А. Н. Заварицкого. – Екатеринбург : Изд-во ИГГ УрО РАН, 2012. – С. 281-283.
83. Шипилов, Э. В. Осадочный чехол и фундамент Чукотского моря по сейсмическим данным / Э. В. Шипилов, Б. В. Сенин, А. Ю. Юнов. – Текст : непосредственный // Геотектоника. – 1989. – № 5. – С. 99-109.
 84. Яварова, Т. М. Возможности использования конечно-разностного полноволнового моделирования в программе Tesserat 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.
 85. 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. – Т. 4. – С. 121-126. URL : <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=46279439&selid=47142181> (дата обращения 18.04.2022).
 86. Яварова, Т. М. Волновые поля ГСЗ на акваториях: натурные наблюдения и математическое моделирование / Т. М. Яварова. – Текст : электронный // Материалы XXV Международный научный симпозиум имени академика М.А. Усова «Проблемы геологии и освоения недр». – Томск : Национальный исследовательский Томский политехнический университет, 2021. – С.320–321. URL: https://vk.com/doc294932640_612209505?hash=49437f4e9b8125872b&dl=d458075ebb7644f7c5 (дата обращения: 18.04.2022).
 87. 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.
 88. Яварова, Т. М. Строение консолидированной земной коры Северо-Чукотского прогиба по данным ГСЗ / Т. М. Яварова, Н. А. Крупнова, А. В. Разматова, С. Н. Табырца. – 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 (дата обращения 18.04.2022).
 89. Dinkelman M.G. Crustal and Petroleum Framework of the US Chukchi Shelf as Interpreted from 9 Km Long-Offset Arcticspan 2-D Seismic Data // 2008. V. 2. № 1. P. 472877.
 90. Backman J. et al. Age model and core-seismic integration for the Cenozoic Arctic Coring Expedition sediments from the Lomonosov Ridge // Paleoceanography. 2008. V. 23. № 1. P. 1-15.
 91. Breivik A.J., Mjelde R., Grogan P., Shimamura H., Murai Y., Nishimura Y., Kuwano A., 2002. A possible Caledonide arm through the Barents Sea imaged by OBS data. Tectonophysics. V. 355. P. 67-97.
 92. Cerveny V., Molotkov I.A., Psencik I., 1977. Ray method in seismology, Univerzita Karlovo, Praha. 214 pp.

93. Chian D., Louden K.E., 1994. The continent-ocean crustal transition across the southwest Greenland margin. *J. Geophys. Res.* 99. 9117-9135.
94. Christensen N.I., 1996. Poissons's ratio and crustal seismology. *J. Geophys. Res.* V. 101. P. 3139-3156.
95. Chung T.W., Hirata N., Sato R. Two-dimensional P- and S-wave velocity structure of the Yamato Basin, the Southern Japan Sea, from refraction data collected by an ocean bottom seismographic array // *J. Phys. Earth.* 1990. V. 38. P. 99-147.
96. Craddock W.H., Houseknecht D.W. Cretaceous-Cenozoic burial and exhumation history of the Chukchi shelf, offshore Arctic Alaska // *Am. Assoc. Pet. Geol. Bull.* 2016. V. 100. № 1. P. 63-100.
97. Drachev S.S. Fold belts and sedimentary basins of the Eurasian Arctic. *Arktos.* 2016. P. 2–21.
98. Duennebieer F.K., Lienert B., Cessaro R., Anderson P., Mallick S., 1987. Controlled-source seismic experiment at hole 581C. *Init. Repts. DSDP, 88: Washington (U.S. Govt. Printing Office).* P. 105-125.
99. Eccles J.D., White R.S., Christie P.A.F. Identification and inversion of converted shear waves: case studies from the European North Atlantic continental margins // *Geophys. J. Int.* 2009. V. 179. P. 381–400. doi: 10.1111/j.1365-246X.2009.04290.x.
100. Fernández M., Afonso J.C., Ranalli G., 2010. The deep lithospheric structure of the Namibian volcanic margin. *Tectonophysics.* V. 481. P. 68-81.
101. Funck, T., Jackson, H.R., Louden, K.E., Klingelhofer, F., 2007: Seismic study of the transform-rifted margin in Davis Strait between Baffin Island (Canada) and Greenland: What happens when a plume meets a transform. *Journal of Geophysical Research.* 112(B4). doi: 10.1029/2006JB004308.
102. Funck, T., Jackson, H.R., Shimeld, J., 2011. The crustal structure of the Alpha Ridge at the transition to the Canadian Polar Margin: Results from a seismic refraction experiment. *J. Geophys. Res. Solid Earth.* V. 116. P. 1-26.
103. Grobys, J.W.G. 2009: Crustal evolution of the submarine plateaux of New Zealand and their tectonic reconstruction based on crustal balancing. *Berichte zur Polar-und Meeresforschung (Reports on Polar and Marine Research).* 132.
104. Hermann, T., Jokat, W. 2013: Crustal structures of the Boreas Basin and the Knipovich Ridge, North Atlantic. *Geophysical Journal International.* V. 193(3). P. 1399-1414. doi: 10.1093/gji/ggt048.
105. Hinz, K., Delisle, G., Cramer, B. et al. Initial report on marine seismic measurements and geoscientific studies on the shelf and slope of the Laptev Sea & East Suberian Sea. Part II - Preliminary scientific results // *Bundesanstalt fuer Geowissenschaften und Rohstoffe.* 1997. P. 51-160.
106. Hyndman R.D., 1979. Poisson's ratio in the oceanic crust – a review. *Tectonophysics.* V. 59. P. 321-333.
107. Ilhan I., Coakley B.J. Meso – Cenozoic evolution of the southwestern Chukchi Borderland , Arctic Ocean // *Mar. Pet. Geol.* 2018. V. 95. № April. P. 100-109.
108. **Kashubin S.N., Milshtein E.D., Sakulina T.S., ..., Yavarova T.M. et al. Crustal structure (wide-angle seismics). Tectonostratigraphic atlas of the Arctic. (Eastern Russia and adjacent areas). Editors-in-Chief: O.V. Petrov, M. Smelror. Saint-Petersburg, VSEGEI Press. 2019. P. 64-72. ISBN 978-5-93761-268-7.**
109. **Kashubin S.N., Petrov O.V., Milshtein E.D., ..., Yavarova T.M. et al. Deep Structure Model. Tectonics of Asia (Northern, Central and Eastern Asia). Editors-in-Chief: O.V. Petrov and S. Dong. Springer Geology. 2021. P. 33-61. URL : <https://doi.org/10.1007/978-3-030-62001-1> (дата обращения 18.04.2022).**
110. Kashubin, S.N., Petrov, O.V., Rybalka, A.V., Milshtein, E.D, Shokalsky, S.P., Verba, M.L, Petrov, E.O. 2017: Earth's crust model of the South-Okhotsk Basin by wide-angle OBS data. *Tectonophysics.* V. 710. P. 37-55.
111. Kelly K.R., Ward R.W., Treitel S., Alford R.M. Synthetic seismograms: A finite-difference approach // *Geophysics.* 1976. V. 41. P. 2-27.
112. Kostyukevich, A.S., Starostenko, V.I., Stephenson, R.A., 2000. The full-wave images of the models of the deep lithosphere structures constructed according to DSS and CDP data interpretation // *Geophysical Journal.* 2000. V. 22. № 4. P. 96-98.

113. Kostyukevych, A., Marmalevskiy, N., Roganov, Y., Tulchinsky, V., 2008. Anisotropic 2.5D - 3C finite-difference modeling, 70th EAGE Conference & Exhibition, Extended Abstracts, #P043.
114. Kostyukevych, A., Roganov, Y., 2010. 2.5D forward modeling: a cost effective solution that runs on small computing systems. ASEG Extended Abstracts. P. 1-4.
115. Lebedeva-Ivanova, N.N., Gee, D.G., Sergeyev, M.B., 2011. Crustal structure of the East Siberian continental margin, Podvodnikov and Makarov basins, based on refraction seismic data (TransArctic 1989–1991). Arctic Petroleum Geology. Chapter 26. Geological Society of London. V. 35. P. 395-411.
116. Lebedeva-Ivanova, N.N., Zamansky, Y.Y., Langinen, A.E., Sorokin, M.Y., 2006. Seismic profiling across the Mendeleev Ridge at 82°N: Evidence of continental crust. Geophys. J. Int. V. 165, P. 527-544.
117. Ljones, F., Kuwano, A., Mjelde, R., Breivik, A., Shimamura, H., Murai, Y., Nishimura, Y. 2004: Crustal transect from the North Atlantic Knipovich Ridge to the Svalbard Margin west of Hornsund. Tectonophysics. V. 378(1—2). P. 17-41.
118. McNutt, M., Caress, D.W. 2007: Crust and Lithospheric Structure — Hot Spots and Hot-Spot Swells. In Romanowicz, B., Dziewonski, A. (eds.): Seismology and Structure of the Earth: Treatise on Geophysics. Elsevier. V. 1. P. 445-478.
119. Mjelde R., Kasahara J., Shimamura H. et al. Lower crustal seismic velocity-anomalies; magmatic underplating or serpentinitized peridotite? Evidence from the Vøring Margin, NE Atlantic // Marine Geophys. Res. 2002. V. 23. P. 169–183.
120. Mjelde, R., Raum, T., Kandilarov, A., Murai, Y., Takanami, T. 2009: Crustal structure and evolution of the outer More Margin, NE Atlantic. Tectonophysics. V. 468(1—4). P. 224-243.
121. Mooney, W.D. 2007: Crust and Lithospheric Structure — Global Crustal Structure. In Dziewonski, B., Romanowicz, A. (eds.): Seismology and Structure of the Earth: Treatise on Geophysics. Elsevier. V. 1. P. 361-417.
122. Mueller, S. 1977: A new model of the continental crust. In Heacock, J.G., Keller, G.V., Jack E. Oliver, J.E., Gene Simmons, G. (eds.): Geophysical Monograph Series. The Earth's Crust. Washington DC American Geophysical Union. V. 20. P. 289-317.
123. Netzeband, G.L., Gohl, K., Hübscher, C.P., Ben-Avraham, Z., Dehghani, G.A., Gajewski, D., Liersch, P. 2006: The Levantine Basin — crustal structure and origin. Tectonophysics. V. 418(3—4). P. 167-188.
124. Petrov O., Morozov A., Shokalsky S. et al., 2016. Crustal structure and tectonic model of the Arctic region. Earth-Science Reviews. V. 154, P. 29-71.
125. Raum T., Mjelde R., Shimamura H., Murai Y., Brastein E., Karpuz R.M., Kravik K., Kolsto H.J., 2006. Crustal structure and evolution of the southern Voring Basin and Voring Transform Margin, NE Atlantic. Tectonophysics. V. 415. P. 167-202.
126. Ritzmann O., Jokat W., Czuba W. et al. A deep seismic transect from Hovgard Ridge to northwestern Svalbard across the continental-ocean transition: A sheared margin study // Geophys. J. Int. 2004.V. 157. P. 683-702.
127. Roslov Yu.V., Sakoulina T.S., Pavlenkova N.I., 2009. Deep seismic investigations in the Barents and Kara Seas. Tectonophysics. V. 472, P. 301-308.
128. Sherwood K.W. Structure of Hanna Trough and Facies of Ellesmerian Sequence, U.S. Chukchi Shelf, Alaska
www.mms.gov/alaska/re/reports/swposter/Abstract_10_May_CSA-AAPG-SPE-Conference-Sherwood.2006.
129. Sherwood K.W. Undiscovered Oil and Gas Resources, Alaska Federal Offshore, As of January 1995. – Anchorage, Alaska: U.S. Department of the Interior Minerals Management Service Alaska OCS Region. – 1998.
130. Sherwood K.W. Revised version (04.2009) of correlation panel (available from kirk.sherwood@mms.gov). 2009.
131. Sobolev S.V., Babeyko A.Yu. Modeling of mineralogical composition, density and elastic wave velocities in anhydrous magmatic rocks // Surveys in Geophysics. 1994. V. 15. P. 515-544.

132. Thurston D.K. Geologic Report for the Chukchi Sea Planning Area, Alaska. Regional Geology, Petroleum Geology, and Environmental Geology / D.K.Thurston, L.A.Theiss. – Anchorage, Alaska: U.S. Department the Interior Minerals Management Service Alaska OCS Region. – 1987.
133. Verzhbitsky V., Frantzen E., Savostina T., Little A., Sokolov S.D., Tuchkova M.I. The Russian Chukchi Sea shelf. // «GEO ExPro». 2008. V. 5, № 3. P. 36-41.
134. Wang Yi, Bale R., Grion S., Holden J. 2010. The ups and downs of ocean-bottom seismic processing: Applications of wavefield separation and up-down deconvolution. The Leading Edge, October 2010. V. 29, P. 1258-1265, doi:10.1190/1.3496916.
135. **Yavarova, T.M., Kashubin, S.N., Rybalka, A.V., Sakulina, T.S. Mathematical modeling of shear and converted waves in marine seismic. 35th International Geological Congress. Cape Town, American geosciences Institute, 2016, Paper number 2771. URL : <https://www.americangeosciences.org/igc/14986> (дата обращения 18.04.2022).**
136. Zelt, C.A. 1999: Modelling strategies and model assessment for wide-angle seismic traveltime data. Geophysical Journal International. 139(1). P. 183-204. doi: 10.1046/j.1365-246X.1999.00934.x.
137. Zelt, C.A., Ellis, R.M. 1988: Practical and efficient ray tracing in two-dimensional media for rapid traveltime and amplitude forward modeling. Canadian journal of exploration geophysics. V. 24(1). P. 16-31.
138. Zelt, C.A., Smith, R.B. 1992: Seismic traveltime inversion for 2-D crustal velocity structure. Geophysical journal international. V. 108(1). P. 16-34.