

ОТЗЫВ

официального оппонента, доктора геолого-минералогических наук Сальникова Александра Сергеевича на диссертацию Яваровой Татьяны Михайловны на тему: «Глубинное строение Северо-Чукотского прогиба по данным морских многоволновых сейсмических исследований», представленную на соискание ученой степени кандидата геолого-минералогических наук по специальности 1.6.9 – Геофизика

Актуальность избранной темы

Актуальность диссертационной работы Яваровой Т.М. обусловлена тремя обстоятельствами.

Во-первых. Необходимостью повышения информативности и достоверности геолого-геофизических исследований за счет расширения типов и классов упругих волн, применяемых при сейсмических исследованиях

Принципиальная особенность совместного использования продольных и поперечных волн в случае изотропных глубинных объектов заключается в том, что в результате получается не один, как обычно, а два сейсмических образа изучаемой среды, найденных по соответствующим волнам разной поляризации. Эти исходные образы могут быть трансформированы в ряд вторичных образов на основе известных функциональных и корреляционных связей скоростей P- и S-волн с искомыми параметрами среды [Алейников А.Л., Немзоров Н.И., Кашубин С.Н. Способ определения типа горных пород по сейсмическим данным, 1991; С.В. Крылов и др., Детальные сейсмические исследования на P- и S-волнах, 1993]. Необходимо отметить, что при использовании только P-волн функциональные параметры не могут быть найдены даже для изотропной модели, а корреляционные связи скорости V_p с другими параметрами среды, как правило, менее тесные, чем для пары значений V_p и V_s . Регистрация и изучение поперечных волн (разделение их на SV- и SH-волны) открывает возможность изучения анизотропии упругих свойств, которая содержат в том или ином виде информацию о вызывающих её причинах, что открывают принципиально новые возможности для геологической интерпретации и решения задачи прогнозирования вещественного состава, в том числе верхней мантии.

Во-вторых. Необходимостью изучения шельфа восточно-арктических морей и раскрытия перспектив его нефтегазоносности, в том числе в Восточно-Сибирском и Чукотском морях. Систематические геофизические исследования в этом регионе стали проводиться с середины XX века, начиная с Международного Геофизического Года (1957г.). Однако до сих пор недра этих морей остаются наименее изученными в российском секторе Арктики. Хатангско-Ленский регион в последние годы стал ареной интенсивного геолого-геофизического изучения как на суше (Анабаро-Лаптевский объект), так и на море (региональные сейсмические проекты в море Лаптевых) а также, поисковые проекты

нефтегазовых компаний «Роснефть» и «Газпром» на акваториях Восточно-Сибирского и Чукотского морей.

В-третьих. Геологическое обоснование юридического закрепления внешней границы континентального шельфа Российской Федерации в Северном Ледовитом океане. Для этого необходимо определение природы геологических (геоморфологических) структур в классификационных терминах Конвенции ООН по морскому праву, на основе получения современных геолого-геофизических данных об их глубинном строении и характере сочленения с прилегающим шельфом, уточнения положения границы расширенного континентального шельфа за пределами 200-мильной зоны в прилегающих морских бассейнах по геофизическим данным.

Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации

Суть *первого защищаемого положения* состоит в том, что Яварова Т.М. по результатам лучевого и полноволнового конечно-разностного моделирования волновых полей при сейсмических исследованиях на акваториях установила, 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. Моделирование выполнялось для типовых моделей земной коры: 1) океаническая кора; 2) континентальная кора шельфовых морей; 3) кора подводных хребтов и поднятий; 4) кора глубоких впадин. Параметры типовых моделей были заданы с учетом разрезов и моделей земной коры и верхов мантии, полученных в ходе геолого-геофизических работ на профилях в Арктическом регионе и Охотском море разных лет. В результате математического моделирования волновых полей для указанных моделей получены сейсмограммы вертикальных (*Z*-компонента) и горизонтальных (радиальная *R*-компонента) компонент. Выполнен детальный анализ волновых полей продольных, поперечных и обменных волн, выделены особенности волновых полей для каждой модели, а также выведены общие закономерности распространения поперечных и обменных волн.

Суть *второго защищаемого положения* состоит в том, что 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. Ранее по данным МОВ-ОГТ в скоростной модели Северо-Чукотского осадочного бассейна не было установлено инверсии скорости, несмотря на достаточно плотные системы наблюдений и значительные базы прослеживания отраженных волн. В тоже время на сейсмограммах ГСЗ наблюдаются разрывы годографов волн в первых вступлениях со смещением по времени до одной секунды

с образованием «зоны тени». Поскольку разрыв годографов наблюдается при прямых и встречных наблюдениях на одних и тех же удалениях от источника на сейсмограммах пересекающихся профилей, то эта особенность не связана с латеральной неоднородностью, а свидетельствует об инверсии скорости - волноводе

Суть *третьего защищаемого положения* состоит в том, что по результатам многоволновых сейсмических исследований с привлечением конечно-разностного и лучевого моделирования соискателем установлено, что 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 (3C-INTERACT (НПП «ГЕТЭК», Москва), Focus5.4 Paradigm Geophysical) и интерпретационных моделей. Скоростные модели ($V_p, V_p/V_s$) земной коры и верхов мантии проверены решением прямой задачи методом кинематического лучевого трассирования по алгоритму К. Зельта [Zelt,1992], реализованным в программе Д. Чиана SeisWide [Chian,1994] 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.

Научная новизна диссертационной работы состоит в следующем

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

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 диссертационной работы состоит в том, что:

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 на 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 кайнозой – поднятие Врангеля-Геральда и северо-восток Евразийского континента.

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

5. Использование результатов диссертационной работы позволило повысить информативность и достоверность геолого-геофизических исследований за счет расширения типов и классов упругих волн, применяемых при сейсмических исследованиях. Основные положения диссертационной работы использованы при выполнении работ по созданию Государственной сети опорных геолого-геофизических профилей на акваториях. Результаты работы вошли в итоговые отчеты по Государственным заданиям ФГБУ «ВСЕГЕИ» на 2014-2021 гг., а также использованы в ходе деятельности ООО «Центр комплексных морских исследований СПбГУ» при проведении морских сейсмических работ с автономными многокомпонентными сейсмическими донными станциями.

Содержание работы, ее завершенность

Диссертационная работа Яваровой Т.М. состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы, включающего 138 наименований. Диссертация изложена на 184 страницах машинописного текста, содержит 97 рисунков и 8 таблиц.

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

В первой главе рассмотрены современные представления о строении Северо-Чукотского прогиба по геологическим и геофизическим данным.

Во второй главе рассмотрены теоретические предпосылки и опыт регистрации поперечных и обменных волн в морской сейсморазведке, основные типы и классы сейсмических волн, используемые для геологической интерпретации при морских многоволновых исследованиях ГСЗ. Автором работы выполнено конечно-разностное моделирование волновых полей акваторий для ряда моделей земной коры, среди которых выделены типовые: 1) океаническая кора; 2) континентальная кора шельфовых морей; 3) кора подводных хребтов и поднятий; 4) кора глубоких впадин. Параметры типовых моделей заданы с учетом разрезов и моделей земной коры и верхов мантии, полученных в ходе геолого-геофизических работ на профилях в Арктическом регионе и Охотском море разных лет. В результате математического моделирования волновых полей для указанных моделей получены сейсмограммы вертикальных и горизонтальных компонент. Выполнен детальный анализ волновых полей продольных, поперечных и обменных волн, выделены особенности волновых полей для каждой модели, а также выведены общие закономерности распространения поперечных и обменных волн.

В третьей главе представлена методика обработки результатов трехкомпонентных сейсмических наблюдений ГСЗ с донными станциями на акваториях, позволяющая выделять и использовать для последующей геологической интерпретации поперечные и обменные волны.

На первом этапе обработки выполнено преобразование записей произвольно ориентированных горизонтальных Х- и Y- компонент геофонов донной станции в записи горизонтальных фиксированных заданной ориентации: радиальную R-компоненту, находящуюся в плоскости распространения лучей (по профилю), и трансверсальную T-компоненту, расположенную перпендикулярно плоскости распространения лучей (перпендикулярно профилю). В результате пересчета происходит перераспределение энергии волн: амплитуды поперечных и обменных волн становятся интенсивнее на R-компоненте.

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

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

На третьем этапе обработки выполнено построение глубинной скоростной модели (V_p , V_p/V_s) земной коры и верхов мантии Северо-Чукотского прогиба с использованием выделенных в результате специализированной обработки поперечных и обменных волн.

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

В Заключении приводятся обобщающие как методические, так и общегеологические выводы и рекомендации, свидетельствующие о *завершенности данного исследования*.

Достоинства и недостатки в содержании и оформлении диссертационной работы

К несомненным достоинствам данной работы следует отнести то, что работа логично построена, написана ясным грамотным языком, достаточно хорошо проиллюстрирована, что позволяет убедиться в достоверности полученных результатов.

К работе имеются следующие замечания:

1. Автор в своей работе использует конечно-разностное моделирование волновых полей в программе Tesseral 2D [Kelly,1976; Костин,2011; Wang,2010] и кинематическое лучевое трассирование по алгоритму К. Зельта [Zelt,1992], реализованным в программе Д.Чиана SeisWide [Chian,1994]. Но ни слова не говорится о точности совпадения рассчитанных годографов с волнами, выделяемыми на теоретических сейсмограммах. Не

очевидно, что они должны в точности совпасть – хотя бы из-за разного способа задания моделей в том и другом случаях (стр. 40 диссертационной работы).

2. На странице 109 диссертационной работы говорится, что «...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.», а на странице 131 «...расчетные годографы продольных волн достаточно хорошо совпадают с зарегистрированным волновым полем продольных волн». Но этого абсолютно недостаточно для оценки достоверности и точности полученных моделей. Необходимо указывать эти расхождения в цифровых выражениях.

3. На странице 110 диссертационной работы говорится, что «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.». В ходе лучевого моделирования, при закрепленных границах, могут меняться только скорости V_s поперечных волн, а значит изменится и коэффициент Пуассона и нет никаких основания менять значение скорости продольных волн. Сам автор показывает, что отношение V_p/V_s в земной коре Северо-Чукотского прогиба меняется в широком диапазоне – от 1.78 до 2.5 (таблица 4.3 на странице 166 диссертационной работы).

4. При рассмотрении скоростной характеристики земной коры (рисунок 4.17 и текст на странице 151 диссертационной работы) ничего не говорится о погрешности определения значений скоростей в осадочном чехле, промежуточном комплексе, кристаллической коре и верхах мантии.

5. На многих рисунках, на которых приведены примеры зарегистрированных волновых полей, из-за мелкого масштаба (автор хотел показать на одной странице волновое поле, рассчитанные теоретические годографы, структурно-скоростную модель) не видно совпадение теоретических годографов и выделяемых целевых волн (рисунки 4.9-4.15 диссертационной работы).

6. Имеются технические ошибки: в диссертационной работе - на стр. 97 «осуществить реориентацию» вместо «осуществить переориентацию», на стр. 131 – «Кратообразующими границами» вместо «Кратнообразующими границами», на стр. 166 – «не превышая значений 1.80-1.181» вместо «не превышая значений 1.80-1.81», на стр. 171 в фразе «мощностью 2-7 км со продольных волн» пропущено слово «скоростью»; в Автореферате на рисунке 1 не правильная ссылка на работу «(Petrov, 2106)» вместо «(Petrov, 2016)».

Сделанные замечания *нисколько не умаляют значимости* полученных в работе результатов.

Результаты диссертационной работы в достаточной степени 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 (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.

Диссертация **«Глубинное строение Северо-Чукотского прогиба по данным морских многоволновых сейсмических исследований»**, представленная на соискание ученой степени кандидата геолого-минералогических наук по специальности **1.6.9 – Геофизика**, соответствует требованиям раздела 2 «Положения о присуждении ученых степеней» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет», утвержденного приказом ректора Горного университета от 20.05.2021 № 953 адм, а ее автор – **Яварова Татьяна Михайловна – заслуживает присуждения ученой степени кандидата геолого-минералогических наук по специальности 1.6.9 – Геофизика.**

Официальный оппонент,
начальник отдела региональной геофизики

АО «СНИИГГиМС»,

доктор геолого-минералогических наук

Тел.:8-913-901-73-36

e-mail:assalnikov@mail.ru

26 августа 2022 г.



Сальников Александр Сергеевич

Подпись Сальникова Александра Сергеевича заверяю.

630091, г. Новосибирск, ул. Потанинская, ба, оф. 407. АО «Сибирский научно-исследовательский институт геологии, геофизики и минерального сырья» (АО «СНИИГГиМС»).

*Начальник отдела АО
С-Тамара П. А. 26.08.2022*