ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию Плешкевича Александра Леонардовича «Методы реконструкции изображения глубинных неоднородностей земной среды по сейсмическим данным («сейсмическая миграция»)», представленную на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности: 1.6.9 – «Геофизика».

Диссертационная работа А.Л. Плешкевича включает в себя результаты выполненных автором исследований и прикладных программно-алгоритмических разработок, выполненных в коллективе соавторов при непосредственном участии автора, в ходе решения одной из важнейших задач сейсмического метода разведки - визуализации пространственных неоднородностей земной среды по результатам сейсмических наблюдений при разведке месторождений нефти и газа. Представленные результаты имеют надежную апробацию в виде прикладных программно-алгоритмических разработок, получивших государственную регистрацию и широкое практическое внедрение при реализации многих десятков крупных производственных проектов 3-мерной сейсморазведки для отечественных и зарубежных нефтяных и газовых компаний, а также в виде ряда публикаций в рекомендованных ВАК рецензируемых изданиях, докладах на международных и отечественных научно-практических конференциях. Полученные с помощью созданных программ результаты сейсмического изображения не уступают лучшим зарубежным аналогам и подтверждены результатами последующего бурения.

Актуальность темы диссертации и решаемых автором задач не вызывает сомнений, поскольку результаты сейсмической миграции в виде куба сейсмического изображения глубинных неоднородностей земной среды являются основой для построения детальных геологических моделей месторождений углеводородов. Методы сейсмической миграции, основанные на решении многомерных волновых задач и связанные с интенсивными суперкомпьютерными вычислениями, активно развиваются во всём мире, являясь остро востребованными в ходе разведки месторождений углеводородов. Выполненные автором исследования и разработки играют важную роль как с точки зрения развития алгоритмов и методов сейсмической миграции, так и практического использования созданных на их основе компьютерных программ и полученных с их помощью практических результатов обработки сейсмических данных.

Научная новизна выполненных автором исследований сформулирована в 8-и положениях. Помимо важных новых решений найденных автором именно в области сейсмического метода разведки, особого внимания заслуживает разработанный им новый метод асимптотического решения задачи волнового продолжения в лучевой параметрической системе координат, а также разработка новых экономичных псевдоспектральных сеточных схем повышенного порядка аппроксимации для решения псевдодифференциального одностороннего волнового уравнения. Результаты этих исследований могут найти свое применение в различных областях, связанных с моделированием волн в неоднородных средах.

Практическая значимость работы подтверждена внедрением и широким практическим использованием разработанных при непосредственном участии автора комплексов программ 3-мерной глубинной сейсмической миграции до суммирования и азимутального анализа амплитуд сейсмических волн, зарегистрированных по методике многократных перекрытий. С помощью созданного прикладного программного обеспечения были успешно завершены многие десятки крупных производственных проектов по заказам отечественных и зарубежных нефтяных и газовых компаний. Практические результаты использования созданного программного обеспечения, не уступающего по качеству и быстродействию лучшим зарубежным аналогам, позволило решить важную народнохозяйственную задачу импортозамещения в стратегически важной сфере использования суперкомпьютерных технологий при разведке месторождений нефти и газа.

Структура работы

Диссертационная работа представлена на 230 стр. и состоит из Введения, 4 глав, Заключения и Списка литературы.

Введение содержит рекомендованные ВАК основные разделы, в числе которых: актуальность темы исследований, степень разработанности темы исследований, цели и задачи исследований, научная новизна выполненных исследований, теоретическая и практическая значимость работы, методология и методы исследования, положения, выносимые на защиту, степень достоверности и апробация результатов.

Глава 1 содержит сведения и результаты из теории волн, необходимые для разработки новых методов и алгоритмов волнового продолжения и сейсмической миграции, которые представлены во 2-й главе. В 1-й главе основное внимание автор уделяет 3–мерному скалярному волновому уравнению дивергентного вида с двумя независимыми параметрами, примером которого является уравнение линейной акустики для среды с переменной плотностью и скоростью. Сейсмическая миграция связана с решением множества прямых задач на распространение волн от точечных источников для опорной модели неоднородной земной среды. Спецификой задачи является то, что опорная модель среды описывается при сейсмической миграции единственным параметром локальной скорости волн. Это обстоятельство позволяет рассматривать семейство решений волнового уравнения дивергентного вида, содержащего два независимых параметра, один из которых связан с локальной скоростью волн, а другой параметр в уравнении остается свободным и может варьироваться в широких пределах. Традиционная форма записи скалярного волнового уравнения с помощью оператора Лапласа представляет собой частный случай более общей дивергентной формы его записи. Фиксация скоростной модели среды полностью определяет траектории лучей и положение фронтов волн, но не их амплитуды. На простых примерах показано, что фиксация скоростной модели среды и варьирование имеющегося свободного параметра может привести к изменению знака коэффициентов отражения, а также значимо повлиять на амплитуды волн, проходящих вглубь модели неоднородной земной среды. Автором сделан вывод, что для целей миграции предпочтительно использовать дивергентное волновое уравнение специального вида, которому отвечает модель среды с заданной переменной скоростью при условии постоянной акустической жесткости. Для волнового уравнения дивергентного вида с двумя независимыми параметрами приведена формулировка соотношения взаимности, которое выполняется для точечных источников равной силы. Для волнового уравнения дивергентного вида получены формулы лучевых амплитуд волн в нулевом асимптотическом приближении, обобщающие известные формулы лучевых амплитуд, соответствующие традиционной форме записи волнового уравнения с единственным свободным параметром локальной скорости волн. Получена асимптотическая оценка величины меры энергии волн для точечного источника фиксированной силы, которая зависит от локальных свойств среды, окружающей источник. Выполнена оценка полной механической энергии волн от точечного источника вне рамок асимптотического приближения, которая имеет аналогичный вид зависимости от локальных свойств среды. Рассмотрены методы численного решения уравнения эйконала: метод характеристик, связанный с трассировкой пучков лучей, и прямые сеточные методы, связанные с конечно-разностной аппроксимацией уравнения эйконала либо аппроксимацией уравнения движения фронта волны. Рассмотрены их сравнительные достоинства и недостатки. Полученные автором результаты используются во 2-й главе при выводе основной интегральной формулы сейсмической миграции.

В **Главе 2** представлена 5-мерная модель сейсмических данных многократных перекрытий в пространстве координат источников, приемников и времени наблюдения, отсчитываемого от момента возбуждения колебаний в каждом точечном источнике. Рассмотрены два альтернативных метода визуализации глубинных неоднородностей земной среды по сейсмическим данным: на основе решения линеаризованной обратной задачи рассеяния волн и, альтернативно, на основе обращенного волнового продолжения, имеющего основное практическое значение. На основе использования соотношения взаимности и интегральной формулы волнового продолжения граничного условия Дирихле автором получена интегральная формула обращенного волнового продолжения 5-мерных сейсмических данных многократных перекрытий вглубь неоднородной среды. На основе этой формулы и условия формирования изображения глубинных неоднородностей получена общая интегральная формула миграции 5-мерных сейсмических данных многократных перекрытий, содержащая наблюденные сейсмические данные и нормальные производные функций Грина. Важным достоинством примененного автором подхода является то, что на основе представленной интегральной формулы можно с единых позиций рассмотреть многообразие сущест-

вующих методов и алгоритмов сейсмической миграции, основанных на обращенном волновом продолжении. Для численной реализации сейсмической миграции автор использует два альтернативных метода расчета функций Грина. Первый из них основан на разработанном автором новом асимптотическом методе волнового продолжения, позволяющем корректно учесть многолучевое распространение и каустики волн. Второй метод основан на сеточном решении одностороннего псевдодифференциального волнового уравнения, для которого автором разработана новая экономичная псевдоспектральная схема повышенного порядка аппроксимации. Автором представлены результаты численных экспериментов по расчету функций Грина для тестовой модели среды, содержащей низкоскоростное включение, которое действует как фокусирующая линза. Выполнено сравнение полученных решений, содержащих каустики, с результатами моделирования волн от точечного источника с помощью конечно-разностного решения 3-мерного скалярного волнового уравнения, которое рассматривалось в качестве эталонного решения. Сделан вывод о близком качественном и количественном соответствии найденных решений, что подтверждает продуктивность нового асимптотического метода решения.

Глава 3 посвящена численным реализациям и практическим результатам 3-мерной сейсмической миграции с сохранением амплитуд на основе интегральной формулы сейсмической миграции и численных методов расчета функций Грина, включающих асимптотический лучевой и сеточный псевдоспектральный. Значительное внимание уделено разработке новых квадратурных схем, используемых при численном интегрировании волновых полей в ходе лучевых миграций, препятствующих проявлению аляйсинга пространственных частот. Приведено большое число содержательных иллюстративных материалов, подтверждающих продуктивность разработанных автором новых методов и сеточных схем волнового продолжения и основанных на них результатов сейсмической миграции комплектов синтетических и реальных сейсмических данных.

Глава 4 посвящена разработке алгоритмов и технологий азимутально-сохраняющей миграции и азимутального анализа сейсмических амплитуд, предназначенных для выявления областей азимутальной анизотропии коэффициентов отражения с целью прогноза связанных с ними областей направленной микротрещиноватости горных пород, представляющих большой разведочный интерес с точки зрения возможного скопления в них углеводородов. Выполнена адаптация интегральной формулы сейсмической миграции, позволяющая выполнять миграцию сейсмических данных по выборкам с фиксированными векторами удалений источники-приемники. Реализован азимутальный анализ результатов такой миграции, выполняемый с помощью метода наименьших квадратов на основе использования 4-параметрической модели Рюгера. Разработанные автором новые алгоритм и технология азимутального анализа сейсмических амплитуд прошли тщательное тестирование на данных полно-волнового упругого моделирования для модели среды с анизотропными блоками и успешно внедрены в производство.

Материал работы хорошо структурирован и логично изложен. Автореферат адекватно отражает содержание работы. Материал, изложенный в диссертационной работе, достаточно полно опубликован в рецензируемых научных отечественных и зарубежных журналах, одобренных ВАК'ом, так же данные результаты были доложены на научных конференциях и семинарах.

К недочетам изложения материала работы я бы отнёс несколько **замечаний**:

1. На страницах 93-97 работы автор много говорит о представлении разрывных функций конечными рядами Фурье. В принципе, всё им сказанное верно и имеет место, однако в данном контексте необходимо было бы упомянуть и об явлении Гиббса, который так же является серьёзной проблемой при численной реализации.
2. Автор пишет: «Попытка использования упругой модели среды для моделирования сейсмических данных, которой в большей мере соответствует реальный эксперимент, значительно увеличивает указанные трудности, поскольку упругая изотропная модель среды описывается уже тремя независимыми параметрами λ, μ и ρ», тем самым он как бы закрывает это направление исследований в этой области. Думаю, со временем в этом направлении могут появиться интересные результаты, возможно, и самого автора.
3. Время от времени на протяжении всего текста диссертационной работы автор упоминает о методе наименьших квадратов и минимизации функционалов невязки, справедливо

указывая на все трудности с ними связанные (некорректность обратной задачи, шум в данных, пологое поведение и овражность и т.д.), однако, на мой взгляд, самое сложное в их реализации это исследование функционала невязки на наличие локальных минимумов и предложение стратегии минимизации, позволяющей достичь глобального минимума.

4. Следует отметить небрежность автора в наборе математических формул, многие формулы трудно читаемы, в том числе из-за мелкого шрифта.

Тем не менее, указанные замечания нисколько не умаляют научной значимости и не снижают **общей оценки работы:**

Считаю, что диссертационная работа Александра Леонардовича Плешкевича на соискание ученой степени доктора физико-математических наук является завершенной научно-квалификационной работой, обладающей научной новизной и внутренним единством, в которой на основании выполненных автором исследований разработаны теоретические положения, численные алгоритмы и компьютерные программы, совокупность которых можно квалифицировать как **научное достижение,** что соответствует требованиям п. 9 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного Постановлением Правительства Российской Федерации № 842 от 24 сентября 2013 года. Автором **решена важная народнохозяйственная задача по импортозамещению** в стратегически важной сфере суперкомпьютерных технологий при разведке месторождений нефти и газа. Автор **заслуживает** присуждения ему ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.6.9 – «Геофизика».

Карчевский Андрей Леонидович
главный научный сотрудник Института математики им. С.Л. Соболева СО РАН
доктор физико-математических наук, доцент, профессор РАН
тел. +7 (383) 329-75-26 (вн. 208)
E-mail: karchevs@math.nsc.ru

Адрес учреждения:
пр-т Ак. Коптюга, 4, 630090, г. Новосибирск, Россия
Приемная: (383) 333-28-92; Канцелярия: (383) 333-27-93
Отдел кадров: (383) 333-25-93
Факс: (383) 333-25-98; e-mail: im@math.nsc.ru

Я, Карчевский Андрей Леонидович, даю согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с работой диссертационного совета, и их дальнейшую обработку.

А.Л. Карчевский

21 февраля 2022 г.