В диссертационный совет
Д 003.068.03
На базе Федерального государственного
бюджетного учреждения науки
Института нефтегазовой геологии и
геофизики им. А.А. Трофимука
Сибирского отделения Российской
академии наук (ИНГГ СО РАН)

ОТЗЫВ

Официального оппонента доктора физико-математических наук, профессора Ерохина Геннадия Николаевича на диссертацию Плешкевича Александра Леонардовича не тему: «Методы реконструкции изображения глубинных неоднородностей земной среды по сейсмическим данным» («Сейсмическая миграция»), представленной на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.6.9 - Геофизика

Диссертационная работа Плешкевича А.Л. посвящена развитию и совершенствованию математических методов и алгоритмов 3-мерной глубинной сейсмической миграции и адаптации их к задачам обработки сейсмических данных в условиях неоднородной сложно-построенной земной среды. Глубинная сейсмическая миграция до суммирования является первым и крайне важным шагом современной интерпретации геофизических данных. Этот шаг дает возможность геологам получить сейсмическое изображение изучаемой глубинной структуры Земли. От его точности и надежности во многом зависят результаты последующей геологической интерпретации. Поэтому развитию методов сейсмической миграции и их адаптации к решению реальных геологических задач уделяется огромное внимание во всем мире на уровне университетских проектов и исследовательских центров нефтегазовых компаний. Отсюда следует актуальность и значимость выполненных автором диссертации исследований.

Значительное разнообразие математических методов сейсмической миграции связано с разнообразием форм изучаемых геологических объектов и существенной неоднородностью земной среды, а также со значительной вычислительной сложностью задачи 3-мерной сейсмической миграции. По этой причине методы 3-мерной сейсмической миграции постоянно развиваются и дополняют друг друга. При этом, среди существующих методов сейсмической миграции до настоящего времени нельзя выделить один полностью универсальный, который был бы оптимальным во всех практических приложениях. Несмотря на достигнутый прогресс в построении сейсмических изображений, на уровне практических задач не удается обеспечить точное с количественной точки зрения описание свойств горных пород, включая их флюидонасыщенность.

Существующие и развиваемые методы сейсмической миграции наиболее эффективны в тех случаях, когда известны точные значения скоростей распространения изучаемых волн в среде. К сожалению, высокая точность значений скоростей не всегда может быть обеспечена, особенно в областях со сложным геологическим строснием. По этой причине миграция позволяет получать только некоторое приближение исследуемой структуры земной среды.

Достоинством представленной работы является широкий охват исследуемых и развиваемых методов миграции, что определяется желанием и необходимостью создания современного программного обеспечения, направленного на решение задач разведочной геофизики. При рассмотрении различных методов миграции автором были получены значимые научные результаты теоретического и практического плана. К ним относятся: вывод о необходимости определения принципа взаимности по отношению к энергетическим характеристикам источников колебаний; получение интегральной формулы обращенного волнового продолжения сейсмических данных; разработка квадратурных схем с осреднением, препятствующих появлению помех, аналогичных аляйсинг-эффекту для пространственных частот; создание гибридного алгоритма псевдоспектральной 3-мерной миграции, обеспечивающего гибкость его применения и меньшее искажение амплитуд, что расширяет возможности решения обратных локальных задач, в частности, при азимутальном AVO-анализе.

Все основные результаты, выносимые на защиту, являются новыми. Они получены лично автором либо при его непосредственном участии. Наибольшее внимание в работе уделяется практически важным аспектам решаемых задач, что направлено на получение эффективных программных реализаций с использованием различных аппроксимаций и учитывающих влияние структуры системы сейсмических наблюдений.

Хорошая теоретическая основа и значительная алгоритмическая проработка обеспечивают достоверность полученных результатов. Это подтверждается обработкой модельных и реальных данных. Сравнение результатов, полученных на известном международном комплекте синтетических данных SEG Salt, рассчитанных для тестовой 3-мерной модели сложно-построенной неоднородной среды, позволило в полной мере оценить точность и достоверность построенных структурных элементов. Результаты тестовых экспериментов подтверждаются обработкой реальных 3D-сейсморазведочных данных, относящихся к районам со сложным геологическим строением в условиях развитой соляной тектоники. Следует отметить, что в работе приводится значительное число примеров обработки реальных данных, полученных в районах с различными

сейсмогеологическими условиями и с достаточно сложным геологическим строением.

Использование классических и современных методов вычислительной математики, а также теории распространения упругих колебаний в акустическом приближении, определяет обоснованность результатов, которые выносятся на защиту. Представленная работа обладает ясной структурой. Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения, списка литературы, содержащего 199 наименований, и снабжена 73 иллюстрациями. Общий объём диссертации составляет 230 страниц. Структура работы чётко выверена и отвечает поставленным в работе задачам.

Во введении сформулирована цель и показана актуальность работы. Перечислены основные решаемые задачи и защищаемые положения, а также уделено внимание обоснованию научной новизны и практической значимости полученных результатов. Большое внимание уделено обзору исследований других авторов.

В первой главе работы на основе рассмотрения свойств решений скалярного волнового уравнения, описывающего распространение колебаний в акустических средах с переменной плотностью и скоростью, показываются особенности, которые могут возникать при применении процедур миграции к соответствующим волновым полям. Здесь же вводятся основные понятия, используемые в дальнейшем при построении различных методов миграции. В частности, рассмотрено уравнение эйконала с анализом различных методов его решения. Приведено тестовое решение уравнения эйконала для модели среды с разрывами свойств на основе использования разностных схем. Решение указывает на некоторые преимущества разностных схем для моделирования фронтов дифрагированных волн в случаях, когда трассировки лучей оказываются неэффективными.

Во второй главе представлены два основных семейства методов сейсмической миграции, один из которых основан на решении линеаризованной обратной задачи рассеяния волн, а другой – на обращенном волновом продолжении. Рассмотрены связанные с этими двумя семействами математические постановки задачи и способы сейсмической миграции. Большое внимание уделяется тестированию рассматриваемых методов и сравнению их возможностей при реализации процедур сейсмической миграции. Исследуется влияние структуры системы сейсмических наблюдений на результаты расчета волновых полей. Выполненные тестовые эксперименты направлены на демонстрацию различных аспектов миграционных схем, что позволяет автору разработать и обеспечить их эффективную численную реализацию. Принципиальным является активное использование различных аппроксимаций. Так, при реализации

псевдоспектральной схемы анизотропного волнового продолжения был предложен составной оператор с определенным типом аппроксимации, что позволило обеспечить условие его непрерывности. Перспективным и важным с практической точки зрения представляется разработанный автором и представленный в разделе 2.3.3 новый асимптотический метод волнового продолжения, учитывающий многолучевое распространение и каустики, а также реализация каустического сдвига фаз, представленная в разделе 2.3.5.

Третья глава работы посвящена вопросам создания технологического цикла сейсмической миграции и его встройки в общий процесс обработки данных. При этом автор активно использует результаты теоретических исследований, дополняя их нетривиальными переходами от наборов трасс общего источника и приемника к наборам трасс «общих точек изображения» в случае миграционных преобразований. Такие наборы трасс обладают преимуществами, которые подробно описаны в работе. В частности, на их основе удается существенно повысить помехоустойчивость получаемых результатов за счет регуляризации исходных данных. При сглаживании изображения удается также устранить эффекты, аналогичные проявлениям аляйсинга частот для пространственных переменных. Направленность создаваемых методов на обработку реальных данных потребовала анализа существующих методов построения и уточнения опорной скоростной модели неоднородной земной среды. Этому посвящен отдельный раздел 3.3, где дан подробный обзор существующих методов получения и уточнения скоростной модели среды. Но остается открытым вопрос: насколько значимыми являются неточности в скоростных параметрах среды для каждого из рассматриваемых методов. Несмотря на ряд нерешенных проблем, которые осознаются автором, ему удалось создать технологию 3D-глубинной сейсмической миграции, что продемонстрировали результаты обработки синтетических и реальных данных.

В четвертой главе демонстрируются перспективы технологии азимутальной миграции и азимутального анализа амплитуд. Основу технологии составляют алгоритмы, реализующие миграционные преобразования с получением сейсмограмм «общих точек изображения». Их тестирование на синтетических и реальных данных при реализации решения обратной задачи азимутального AVO-анализа с применением аппроксимации Рюгера продемонстрировало перспективность предлагаемого подхода. Практически значимым аспектом этих исследований и тестовых экспериментов явилось формулирование требований к системе сейсмических наблюдений, качеству исходных данных и составу процедур предварительной обработки. Приведены практические примеры результатов азимутального AVO-анализа в различных регионах проведения

сейсморазведочных работ, подтверждающие перспективность разработанных алгоритмов и технологий.

Замечания по тексту диссертации.

1. При изучении соотношения взаимности автор не указывает работу Бабича В.М. (1962), в которой проведено доказательство выполнения принципа взаимности для векторных уравнений теории упругости в случае широкого класса сред, включая анизотропные среды и с упругим последействием. Там же рассмотрено выполнение принципа взаимности и для лучевого метода вычисления интенсивности фронтов.
2. При анализе рассматриваемых методов миграции отсутствуют примеры, характеризующие влияние неточности значений параметра скорости. Поэтому отсутствует возможность сопоставить различные методы миграции по данной особенности реальных задач.
3. При анализе азимутальной анизотропии среды применяется аппроксимация Рюгера, обладающая значительными ограничениями не только по углу падения, но и по контрастности отражающих горизонтов. В работе не указываются соответствующие ограничения.

Имеются также отдельные замечания технического характера. В частности, в целях сокращения числа обозначений в математических выражениях и формулах автор использует в главе 3 в разделах 2.3.3 (стр. 84) и 2.3.6 (стр. 99) сходные обозначения для Фурье-образов и прообразов функций, что несколько затрудняет восприятие. Аналогичное замечание относится также к 4-й главе, где в разделе 4.3 автор использовал одинаковые обозначения для угла падения на глубинную границу (стр. 186) и для одного из коэффициентов в выражении для эллипса анизотропии (стр. 187).

Высказанные замечания не уменьшают значимости представленной диссертационной работы. Работа выполнена на высоком научном уровне, имеет существенное значение и полностью соответствует паспорту специальности 1.6.9 – Геофизика.

Новизна научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации, по своей значимости соответствует уровню докторской диссертации и определяется разработкой и реализацией комплекса теоретических и методологических положений и практических результатов для сейсмической миграции. Наиболее существенные результаты исследования и научная новизна определяется следующими положениями:

1. Автором впервые предложено в качестве самостоятельного объекта для 3-мерной сейсмической миграции до суммирования использовать

регулярные и плотно дискретизированные крестовые выборки сейсмических данных. Впервые выполнена математическая постановка и получены практические результаты 3-мерной сейсмической миграции крестовых выборок данных.

2. На основе использования соотношения взаимности, интегральной формулы волнового продолжения и математической модели сейсмических данных многократных перекрытий в виде поля волн в 5-мерном пространстве координат источников, приемников и времени регистрации, получена интегральная формула обращенного волнового продолжения сейсмических данных. На ее основе получен общий вид решения задачи сейсмической миграции данных многократных перекрытий. Установлена связь полученного решения с псевдо-дифференциальным уравнением с двумя операторными корнями.

3. Разработаны новые квадратурные схемы с осреднением во временном окне для интегрирования волновых полей в ходе асимптотической миграции и волнового продолжения, препятствующие появлению помех типа аляйсинга пространственных частот.

4. Разработан новый асимптотический метод волнового продолжения заданного граничного условия Дирихле в лучевой параметрической системе координат, позволяющий корректно учесть многолучевое распространение и каустики волн. На его основе получены интегральные формулы многолучевой 3-мерной сейсмической миграции до суммирования в лучевой параметрической, а также декартовой системах координат.

5. Разработана новая экономичная псевдоспектральная схема повышенного порядка аппроксимации для решения одностороннего волнового уравнения, учитывающая неоднородные волн . Показана важность учета неоднородных волн для моделей контрастных сред.

6. Разработан гибридный алгоритм псевдоспектральной 3-мерной сейсмической миграции до суммирования с сохранением амплитуд по выборкам квази-равных векторов удаления, сочетающий гибкость миграции Кирхгофа с использованием волновых функций Грина.

7. Разработаны и внедрены в практику обработки сейсмических данных крестовых наблюдений новая технология азимутально-сохраняющей 3-мерной сейсмической миграции до суммирования и устойчивый метод азимутального анализа сейсмических амплитуд.

Полученные в диссертационной работе результаты являются оригинальными и имеют важное значение в областях исследований, указанных в пунктах: п.11 и п. 12 паспорта специальности.

Основные результаты работы полностью опубликованы более чем в 30 работах, из которых 19 опубликованы в ведущих рецензируемых

изданиях, входящих в перечень ВАК. В число публикаций из перечня ВАК входят также полученные автором и соавторами 3 свидетельства о государственной регистрации компьютерных программ 3-мерной глубинной сейсмической миграции до суммирования. Результаты работы представлялись на авторитетных российских и международных конференциях. Все сказанное свидетельствует об их надежной апробации.

Диссертация содержит новое решение важной научной проблемы, имеющей значение в области разработки инновационных алгоритмов и программных продуктов. Производственное внедрение созданных программ миграции и азимутального анализа позволило успешно завершить десятки крупных проектов 3-D сейсморазведки для отечественных и ряда зарубежных газонефтяных компаний. Тем самым решена важная народнохозяйственная задача по импортозамещению дорогостоящих зарубежных аналогов.

Автореферат диссертации соответствует ее содержанию.

Резюмируя вышеизложенное, можно сделать вывод, что диссертационная работа соответствует требованиям пп. 9, 10, 11, 13, 14 Положения о присуждении ученых степеней, утвержденного Постановление Правительства Российской Федерации «О порядке присуждения ученых степеней» от 24.09.2013 г. № 842, а её автор, Плишкевич Александр Леонардович, заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.6.9 – Геофизика.

Подпись Ерохина Г.Н. удостоверяю зам. директора Ю.Н. Свирина 10.02.2022г.

Официальный оппонент: директор научно-исследовательского института прикладной математики и математической геофизики БФУ им. И. Канта, д.ф.-м.н., профессор Ерохин Геннадий Николаевич

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Балтийский федеральный университет имени Иммануила Канта», (ФГБОУ ВО «БФУ им. И. Канта»)
Адрес: 236016, г. Калининград, ул. А. Невского, д.14.
Тел.: 84012535204.
E-mail: GErokhin@kantiana.ru

Я Ерохин Геннадий Николаевич, даю свое согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с работой диссертационного совета, и их дальнейшую обработку.

9 февраля 2022г. Ерохин Г.Н.