

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА 24.1.087.02, СОЗДАННОГО НА
БАЗЕ Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института
нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука Сибирского отделения
Российской академии наук, Министерство науки и высшего образования Российской
Федерации,

ПО ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ ДОКТОРА НАУК
аттестационное дело N _____

решение диссертационного совета от 10.03.2022 N 03/04

О присуждении Плешкевичу Александру Леонардовичу, гражданину
Российской Федерации, ученой степени доктора физико-математических наук.

Диссертация «Методы реконструкции изображения глубинных
неоднородностей земной среды по сейсмическим данным («сейсмическая
миграция»)» по специальности 1.6.9 – Геофизика, принята к защите 21.10.2021
(протокол заседания N 03/14) диссертационным советом 24.1.087.02, созданным на
базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института
нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука Сибирского отделения
Российской академии наук, Министерство науки и высшего образования Российской
Федерации, 630090, г. Новосибирск, пр. Ак. Коптюга, 3, полномочия совета
установлены приказом Минобрнауки России от 03.06.2021 № 561/нк.

Соискатель Плешкевич Александр Леонардович, "26" декабря 1956 года
рождения, в 1979 году соискатель окончил Московский государственный
университет им. М.В. Ломоносова, Геологический факультет по специальности
«Геофизические методы поисков и разведки месторождений полезных ископаемых»,
диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук «Разработка
методики конечно-разностной миграции сейсмических волн для сред со сложной
формой отражающих границ» защитил в 1991 году в диссертационном совете,
созданном на базе Государственной академии нефти и газа им. И.М. Губкина,
работает в Акционерном обществе «Центральная геофизическая экспедиция» (АО
«ЦГЭ»), Российский геологический холдинг «РОСГЕОЛОГИЯ», в должности
руководителя группы.

Диссертация выполнена в Акционерном обществе «Центральная геофизическая
экспедиция» (АО «ЦГЭ»), Российский геологический холдинг «РОСГЕОЛОГИЯ», в
группе разработки технологий сейсмической миграции отдела обработки.

Официальные оппоненты:

Владов Михаил Львович, доктор физико-математических наук, профессор. Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Геологический факультет, заведующий кафедрой сейсмологии и геоакустики;

Ерохин Геннадий Николаевич, доктор физико-математических наук, профессор. Балтийский Федеральный Университет им. И. Канта, директор НИИ прикладной информатики и математической геофизики;

Карчевский Андрей Леонидович, доктор физико-математических наук, профессор РАН, Институт математики им. С.Л. Соболева Сибирского Отделения РАН, главный научный сотрудник лаборатории обратных задач математической физики, - **дали положительные отзывы** на диссертацию.

Ведущая организация Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт вычислительной математики и математической геофизики Сибирского отделения Российской академии наук (ИВМиМГ СО РАН) в своем положительном отзыве, подписанном заведующим лабораторией обратных задач естествознания д.ф.-м.н. М.А. Шишленин и главным специалистом лаборатории обратных задач естествознания д.ф.-м.н., чл.-корр. РАН, профессором С.И. Кабанихиным, указала, что диссертация Плешкевича А.Л. выполнена на актуальную тему, обладаем существенной научной новизной и содержит решение задачи разработки и совершенствования методов компьютерной 3-мерной реконструкции изображения глубинных неоднородностей земной среды по сейсмическим данным на основе использования современных высокопроизводительных программно-аппаратных вычислительных средств и систем, имеющей существенное значение для совершенствования методов поиска и разведки месторождений углеводородного сырья, а ее автор заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.6.9 – Геофизика.

Соискатель имеет свыше 50 опубликованных работ, в том числе по теме диссертации опубликовано 33 работы, из них **в рецензируемых научных изданиях**, рекомендованных для публикации результатов диссертаций, **опубликовано 22 работы, включая приравненные к ним 3** свидетельства о государственной регистрации созданных программ для ЭВМ. Объем публикаций в рекомендованных ВАК РФ изданиях составляет около 170 стр., из них авторский вклад составляет около 120 стр. В опубликованных соискателем работах полностью отражено основное

содержание диссертации. Недостоверные сведения об опубликованных соискателем научных работах отсутствуют. Основные научные результаты диссертации опубликованы автором с соавторами в следующих рекомендованных ВАК РФ рецензируемых журналах:

1. Белоусов, А.В. Актуальные вопросы оптимизации геометрии 3D-сейсмических наблюдений / А.В. Белоусов, Ю.Ш. Закариев, М.З. Мусагалиев, **А.Л. Плешкевич**, Н.Н. Цыпышев // Геофизика. – 2007. – № 4. – С. 74-81.

2. Гогоненков, Г.Н. Теоретические основы и практическое использование отечественной программы 3D-глубинной сейсмической миграции до суммирования / Г.Н. Гогоненков, Б.П. Мороз, **А.Л. Плешкевич**, В.И. Турчанинов // Геофизика. – 2007. – № 4. – С. 15–24.

3. Гогоненков, Г.Н. Технология азимутального анализа амплитуд данных наземных 3D-сейсмических наблюдений при поисках трещиноватых зон / Г.Н. Гогоненков, **А.Л. Плешкевич** // Геофизика. – 2012. – № S (спец. выпуск). – С. 18–27.

4. Левченко, В.Д. Результаты азимутальной миграции и азимутального анализа амплитуд синтетических данных 3D/3C конечно-разностного моделирования и реальных данных широкоазимутальных сейсмических наблюдений / В.Д. Левченко, Б.П. Мороз, **А.Л. Плешкевич** // Геофизика. – 2017. – № S (спец. выпуск). – С. 102–112.

5. Локтионов, Б.А. Разностный метод решения уравнения эйконала / Б.А. Локтионов, **А.Л. Плешкевич** // Изв. АН СССР. Физика Земли. – 1989. – № 12. – С. 57–64.

6. **Плешкевич, А.Л.** Скалярное волновое уравнение в задаче продолжения волновых полей в сейсморазведке / А.Л. Плешкевич // Изв. АН СССР. Физика Земли. – 1988. – № 6. – С. 27–35.

7. **Плешкевич, А.Л.** Актуальные вопросы группирования источников и приемников при наземных 3D сейсмических наблюдениях / А.Л. Плешкевич // Геофизика. – 2007. – № 4. – С. 93–102.

8. **Плешкевич, А.Л.** Соотношение взаимности, амплитуда и энергия волн от точечных источников в неоднородной изотропной среде / А.Л. Плешкевич // Геофизика. – 2012. – № S (спец. выпуск). – С. 38–48.

9. **Плешкевич, А.Л.** Экономичные квадратурные схемы с осреднением в окне и

их приложение к сейсмической миграции Кирхгофа / А.Л. Плешкевич, В.И. Турчанинов // Геофизика. – 2012. – № S (спец. выпуск). – С. 57–65.

10. **Плешкевич, А.Л.** Многолучевая 3D-глубинная сейсмическая миграция до суммирования с сохранением амплитуд / А.Л. Плешкевич, А.В. Иванов, В.Д. Левченко, С.А. Хилков // Геофизика. – 2017. – № S (спец. выпуск). – С. 76–84.

11. **Плешкевич, А.Л.** Разработка волновой псевдоспектральной 3D-глубинной сейсмической миграции до суммирования с сохранением амплитуд / А.Л. Плешкевич, Д.М. Вишнеvский, В.В. Лисица // Геофизика. – 2017. – № S (спец. выпуск). – С. 94–101.

12. **Pleshkevitch, A.** 3D DMO of cross-gather data / A. Pleshkevitch, B. Plyushchenkov, V. Turchaninov // SEG Technical Program Expanded Abstracts. – 1996. – P. 1118–1121.

13. **Pleshkevich, A.** Asymptotic solution of wavefield continuation problem in the ray parametric coordinates / A. Pleshkevich, A. Ivanov, S. Khilkov // SEG Technical Program Expanded Abstracts. – 2017. – P. 5551–5555.

14. **Pleshkevich, A.** Explicit additive pseudospectral schemes of wavefield continuation with high-order approximation / A. Pleshkevich, D. Vishnevskiy, V. Lisitsa // SEG Technical Program Expanded Abstracts. – 2017. – P. 5546–5550.

15. **Pleshkevich, A.** Parallel GPU-based Implementation of One-Way Wave Equation Migration / A. Pleshkevich, V. Lisitsa, D. Vishnevsky, V. Levchenko, B. Moroz // Supercomputing Frontiers and Innovations. – 2018. – V. 5. – N. 3. – P. 34–37.

16. **Pleshkevich, A.** Sixth-order accurate pseudo-spectral method for solving one-way wave equation / A. Pleshkevich, D. Vishnevskiy, V. Lisitsa // Applied Mathematics and Computation. – 2019. – T. 359. – P. 34–51.

17. **Pleshkevich, A.** Parallel algorithm for one-way wave equation based migration for seismic imaging / A. Pleshkevich, D. Vishnevsky, V. Lisitsa, V. Levchenko // Supercomputing Book Series V. 965, Springer Link, 2019. – P. 125–135.

18. **Pleshkevich, A.L.** Efficient parallel implementation of multi-arrival 3D prestack seismic depth migration / A.L. Pleshkevich, A.V. Ivanov, V.D. Levchenko, S.A. Khilkov, B.P. Moroz // Supercomputing Frontiers and Innovations. – 2019. – V. 6. – N. 1. – P. 4–8.

19. **Pleshkevich, A.** Kirchhoff-Type Implementation of Multi-Arrival 3-D Seismic Depth Migration with Amplitudes Preserved / A. Pleshkevich, A. Ivanov, V. Levchenko, S.

Khilkov // Supercomputing Book Series V. 1331, Springer Link, 2020. – P. 237–248.

20. Гогоненков, Г.Н. Программный комплекс СейсмоСкан (SeismoScan) / Г.Н. Гогоненков, Б.П. Мороз, **А.Л. Плешкевич**, В.И. Турчанинов. – Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2010614208 от 29.06.2010.

21. **Плешкевич, А.Л.** «Миграция.Кирхгофа.ЦГЭ» / А.Л. Плешкевич, Г.Н. Гогоненков, Б.П. Мороз. – Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2017613562. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 22.03.2017.

22. **Плешкевич, А.Л.** «Миграция.Азимутальная.ЦГЭ» / А.Л. Плешкевич, Г.Н. Гогоненков, Б.П. Мороз. – Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2017611958. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 14.02.2017.

На диссертацию и автореферат **поступило 6 отзывов**. Все поступившие отзывы - положительные. В отзывах отмечается высокая актуальность темы проведенных исследований, важность полученных теоретических результатов, разработанных численных алгоритмов и созданных на их основе программ 3-мерной глубинной сейсмической миграции. Отмечается, что научные результаты достоверны, являются новыми и могут быть квалифицированы как решение крупной научной проблемы в разведочной геофизике. Созданные программы, использующие параллельные вычисления и суперкомпьютерные технологии, получили широкое применение при обработке крупнейших отечественных проектов сейморазведки на суше и на морских шельфах страны. Основные положения и выводы обоснованы результатами практических исследований. Автореферат полностью отражает содержание диссертации. В отзыве д.ф.-м.н. В.В. Лисицы содержится критическое замечание, касающееся стиля изложения, при котором не всегда формализованы описание задач и результатов, присутствуют не все значимые формулы, а некоторые подразделы, например, 2.3.12, содержат излишне подробные описания. Во всех поступивших отзывах на автореферат, включая содержащий критические замечания, подтверждается, что работа является законченным оригинальным научным исследованием и полностью удовлетворяет требованиям п. 9 Положения о присуждении ученых степеней, а ее автор достоин присуждения степени доктора физико-математических наук.

Выбор официальных оппонентов, давших согласие на оппонирование, и ведущей организации обосновывается следующим:

Владов Михаил Львович – зав. кафедрой сейсмометрии и геоакустики геологического ф-та МГУ им. М.В. Ломоносова, доктор физико-математических наук по специальности 25.00.10 -Геофизика, геофизические методы поисков полезных ископаемых, профессор, известный специалист в области сейсмического метода разведки, имеющий публикации, связанные с темой представленной к защите диссертации; Ерохин Геннадий Николаевич - директор НИИ прикладной информатики и математической геофизики Балтийского Федерального Университета им. И. Канта, доктор физико-математических наук по специальности 01.04.12 – Геофизика, профессор, известный специалист в области сейсмического метода разведки, имеющий публикации, связанные с темой представленной к защите диссертации; Карчевский Андрей Леонидович - главный научный сотрудник лаборатории обратных задач математической физики Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт математики имени С.Л. Соболева Сибирского отделения Российской академии наук, доктор физико-математических наук по специальностям 25.00.10 - Геофизика, геофизические методы поисков полезных ископаемых, 05.13.18 - Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ, доцент, профессор РАН, авторитетный специалист в области геофизики, математического моделирования и численных методов, имеющий публикации, связанные с темой представленной к защите диссертации; в состав ведущей организации Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт вычислительной математики и математической геофизики Сибирского отделения Российской Академии Наук входит лаборатория обратных задач естествознания, где проводятся научные исследования, связанные с решением обратных динамических задач сейсмического метода разведки, и где работают известные специалисты д.ф.-м.н., чл.-корр. РАН, профессор С.И. Кабанихин и д.ф.-м.н. М.А. Шишленин, имеющие публикации, связанные с темой представленной к защите диссертации и способные оценить научную и практическую ценность результатов диссертации.

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:

– **разработаны** новые перспективные подходы к решению важной задачи реконструкции 3-мерного сейсмического изображения глубинных неоднородностей

земной среды и прогноза микротрещиноватости горных пород по сейсмическим данным;

– на основе разработанных новых подходов **создан ряд программ** для ЭВМ, широко использующих параллельные высокопроизводительные вычисления и суперкомпьютерные технологии;

– успешно **выполнено производственное внедрение** созданных программ для ЭВМ, позволившее значимо повысить точность результатов сейсмического изображения и достоверность их геологической интерпретации и решить важную народнохозяйственную задачу импортозамещения в важной сфере разведки месторождений нефти и газа.

Теоретическая значимость исследования обоснована тем, что соискателем проведено развитие существующих математических моделей, алгоритмов и численных методов решения задачи 3-мерной глубинной сейсмической миграции и азимутального анализа амплитуд, обеспечивающих получение новых результатов по теме диссертации. В числе новых важных результатов получены следующие:

– автором впервые предложено в качестве самостоятельного объекта для выполнения 3-мерной сейсмической миграции до суммирования и иных процедур многоканальной обработки, основанных на волновой теории, использовать регулярные и плотно дискретизированные крестовые выборки сейсмических данных. Впервые выполнена математическая постановка, программная реализация и получены практические результаты 3-мерной сейсмической миграции крестовых выборок данных;

– для скалярного волнового уравнения дивергентного вида получены оценки величины энергии точечного источника фиксированной силы типа центра расширения, описываемого правой частью волнового уравнения. Установлена связь величины энергии, излучаемой точечным источником фиксированной силы, от локальных свойств среды, окружающей этот источник. В силу этого точечные источники с одинаковой энергией будут обладать различной силой, величина которой существенно зависит от локальных свойств окружающей среды. Поскольку соотношение взаимности справедливо для точечных источников именно равной силы, реальные источники колебаний типа взрыва заряда тротила фиксированной массы, обладающие одинаковой энергией, будут иметь различную силу. Отсюда

следует важный практический вывод о том, что соотношение взаимности, справедливое для точечных источников равной силы, требует известной модификации и иной формулировки для реальных источников колебаний равной энергии;

– на основе использования математической модели сейсмических данных многократных перекрытий, соотношения взаимности и интегральной формулы волнового продолжения граничного условия Дирихле получена интегральная формула обращенного волнового продолжения сейсмических данных многократных перекрытий. На ее основе получен общий вид решения задачи сейсмической миграции данных многократных перекрытий. Установлена связь полученного решения с решением известного псевдо-дифференциального уравнения с двумя операторными квадратными корнями (т.н. уравнение DSR), предназначенного для миграции данных многократных перекрытий;

– разработаны новые квадратурные схемы с осреднением в окне, предназначенные для интегрирования волновых полей в ходе волнового продолжения и сейсмической миграции, препятствующие проявлению шумов аляйсинга пространственных частот;

– разработан новый асимптотический метод решения задачи волнового продолжения 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 глубинной сейсмической миграции до суммирования в лучевой параметрической и декартовой системах координат;

– разработана новая безусловно-устойчивая и экономичная псевдоспектральная сеточная схема повышенного порядка аппроксимации для решения псевдодифференциального одностороннего волнового уравнения;

– разработан гибридный алгоритм псевдоспектральной 3-мерной глубинной сейсмической миграции до суммирования с сохранением амплитуд по выборкам постоянного вектора удалений, сочетающий гибкость алгоритма миграции Кирхгофа с использованием волновых (не асимптотических) функций Грина;

– разработаны и внедрены в практику обработки сейсмических данных крестовых наблюдений новые алгоритм и технология азимутально-сохраняющей 3-

мерной сейсмической миграции до суммирования и устойчивый метод азимутального анализа сейсмических амплитуд с регуляризацией решения обратной задачи.

Значение полученных соискателем результатов исследования для практики подтверждается тем, что:

– на основе разработанных соискателем новых подходов создан ряд программ 3-мерной глубинной сейсмической миграции, широко использующих высокопроизводительные параллельные вычисления, результаты которых не уступают лучшим зарубежным аналогам;

– успешно выполнено производственное внедрение созданных программ 3-мерной глубинной сейсмической миграции, позволившее значимо повысить точность и достоверность результатов геологической интерпретации, подтвержденных последующим бурением скважин;

– производственное внедрение и практическое использование разработанных программ 3-мерной глубинной сейсмической миграции начиная с 2003 г. позволило решить важную народнохозяйственную задачу импортозамещения в стратегически важной сфере разведки месторождений нефти и газа во многих десятках крупных производственных проектов для отечественных и зарубежных нефтяных и газовых компаний.

Оценка достоверности результатов исследования выявила следующее.

– представленные в диссертационной работе теоретические результаты имеют прочную математическую основу, включающую использование необходимых элементов теории уравнений математической физики в приложении к задачам на распространение волн, приложений преобразования Фурье, асимптотического приближения, численных методов решения дифференциальных уравнений в частных производных, псевдодифференциальных уравнений и систем обыкновенных дифференциальных уравнений, методов аппроксимации сеточных функций, а также иных разделов прикладной математики. Использованное автором акустическое приближение для описания распространения сейсмических волн в неоднородной земной среде соответствует современным технологиям регистрации сейсмических волн при проведении сейсморазведочных работ на суше и на море, а также принятым в мире в сообществе геофизиков-разведчиков базовым моделям и методам обработки сейсмических данных;

– представленные в диссертационной работе результаты по разработке новых алгоритмов сейсмической миграции не противоречат существующим концепциям, методам и алгоритмам, а являются их важным логическим продолжением и дополнением, лежащими в русле основных направлений научного развития в рассматриваемой прикладной области науки;

– важным свидетельством достоверности представленных в диссертационной работе теоретических результатов и алгоритмов являются результаты тестирования созданных на их основе программ сейсмической миграции на комплекте международных синтетических данных SEG Salt и на иных комплектах, смоделированных сейсмических данных, позволяющие убедиться в соответствии получаемых сейсмических изображений глубинных неоднородностей их заданным моделям.

– важным свидетельством достоверности представленных результатов являются многочисленные детальные сопоставления и сравнения результатов расчетов, полученных с помощью разработанных программ сейсмической миграции, с известными сертифицированными мировыми аналогами от ведущих производителей прикладного сейсмического программного обеспечения в лице фирм Schlumberger, CGG, Paradigm, Halliburton; многочисленные сопоставления результатов применения собственных разработок программного обеспечения и сертифицированного импортного свидетельствуют о близком соответствии и сходном качестве получаемых результатов, а в ряде случаев – о более высоком качестве результатов использования собственного программного обеспечения в сравнении с зарубежными аналогами;

– важным свидетельством достоверности представленных в диссертационной работе теоретических результатов и алгоритмов являются полученные на их основе практические результаты сейсмического изображения глубинных неоднородностей земной среды с помощью созданных компьютерных программ, использованные в ходе геологической интерпретации и создания цифровых геологических моделей месторождений при проведении геологоразведочных работ, подтвержденные результатами последующего бурения.

Личный вклад соискателя состоит в следующем:

все представленные в диссертации результаты получены автором

самостоятельно или при его непосредственном участии в коллективе соавторов; цели и задачи работы полностью сформулированы автором. При непосредственном участии автора выполнялась обработка исходных данных и анализ всех полученных результатов этой обработки. Личный вклад автора выразился в математической постановке всех представленных в диссертационной работе задач, разработке методов и численных алгоритмов их решения, планировании численных экспериментов и анализе полученных результатов, а также во внедрении выполненных программных разработок сейсмической миграции и азимутального анализа амплитуд в практику производственной сейсмической обработки, подготовке публикаций по теме диссертации.

В ходе защиты диссертации были заданы вопросы и высказаны следующие критические замечания:

- требуется более подробно объяснить в чем суть и новизна выполненных работ по 1-му и 2-му пунктам защищаемых положений; то же касается 3-го пункта, связанного с подавлением шумов аляйсинга; не до конца понятно, в чем заключается новизна выполненных работ и каковы отличия от известных аналогов;

- требуется пояснить, в чем состоит смысл и особенности использования крестовых выборок сейсмических данных;

- требуется пояснить, какая крупная проблема была решена и чем выполненная работа в этом отношении отличается от кандидатской работы; другой вопрос состоит в том, как представленные разработки соотносятся с разработками известных зарубежных фирм;

- требует пояснения, как были организованы упомянутые в докладе облачные вычисления;

- какой информативный критерий качества результатов используется - экспертный или объективный; следующий вопрос касается разрешенности результатов, которая связана с шириной спектра сигнала, на которую влияет поглощение в земной среде;

- соискателем приведено значительное число иллюстраций работы программ миграции в виде сейсмических изображений в различных регионах проведения геологоразведочных работ; непонятен геологический смысл полученных результатов и какой интерес они представляют для заказчиков, а также каков критерий

достоверности; результаты требуют углубления; отсутствует геологическая интерпретация полученных результатов;

- применимы ли представленные методы обработки к данным региональных профилей при речной 2-D сейморазведке;

- требуется сопоставление по временам счета и качеству результатов, получаемых с помощью представленных автором программных разработок и с помощью известных зарубежных аналогов.

Соискатель Плешкевич А.Л. ответил на задаваемые ему в ходе заседания вопросы и привел собственную аргументацию:

- 1-й пункт защищаемых положений касается вывода интегральной формулы типа Кирхгофа для продолжения в нижнее полупространство полной совокупности сейсмических данных многократных перекрытий, представленных в 5-мерном пространстве координат источников, приемников и времени регистрации либо временной частоты. Эта формула не встречается в доступной литературе. На основе этой формулы была получена базовая интегральная формула сейсмической миграции данных многократных перекрытий, в которую входят нормальные производные функций Грина, что важно. Кроме того, эти интегральные формулы были получены для уравнения Гельмгольца дивергентного вида, содержащего два независимых параметра, что также важно и отличает его от традиционной записи уравнения Гельмгольца с помощью оператора Лапласа, содержащего единственный параметр переменной скорости. Сказанное относится ко 2-му пункту защищаемых положений. В отношении 3-го пункта прошу обратить внимание, что проблема аляйсинга возникает в случае недостаточно частой дискретизации измеряемых величин волнового поля, что не допускает по этой причине их достоверной интерполяции. В отношении проявлений аляйсинга пространственных частот в ходе лучевой миграции проблема заключается не в том, что сейсмические данные дискретизируются недостаточно часто, а в том, что выполняется не вполне корректная их интерполяция, присущая традиционным квадратурным схемам типа прямоугольников, трапеций и т.п. В зарубежных публикациях предлагаются довольно искусственные подходы, связанные с применением специальных антиаляйсинговых фильтров в ходе миграции. Автором разработан альтернативный и более естественный подход к решению этой задачи, основанный на корректной интерполяции сейсмических

данных в ходе миграции и основанных на такой интерполяции квадратурных схемах.

- Крестовая выборка, представленная на схеме, состоит из линии источников и ортогональной ей линии приемников. Сейсмические данные для такой системы наблюдения образуют куб с равномерной и плотной дискретизацией, имеют невырожденный спектр рассеяния и могут с успехом использоваться в качестве исходных данных при миграции. Эта модель впервые была предложена и опубликована автором в 1996 г., который применил ее при миграции до суммирования.

- Основной целью автора была разработка новых подходов и алгоритмов решения востребованной задачи сейсмической миграции и разработка на их основе отечественного программного обеспечения, не уступающего зарубежному. Это позволило решить важную народнохозяйственную задачу. Важным достижением является разработка нового асимптотического метода волнового продолжения, позволяющего эффективно решить классическую задачу рассеяния волн в условиях неоднородных сред в присутствии многолучевого распространения и каустик волн. Отвечая на следующий вопрос надо сказать, что в настоящее время отсутствует отечественная система обработки, отвечающая мировому уровню требований. Представленные здесь разработки сейсмической миграции закрывают важный, но все же отдельный элемент в общей цепочке процедур обработки.

- В недавнее время были успешно выполнены расчеты миграции Кирхгофа с применением облачных технологий Яндекс. После выполнения тестового проекта следом были выполнены крупные производственные расчеты на так называемых «прерываемых» виртуальных машинах, которые представляют собой не востребовавшие в текущий момент времени свободные вычислительные ресурсы, которые предоставляются в аренду по низким ценам. Расчеты миграции Кирхгофа организованы в виде запуска отдельных независимых параллельных задач, число которых может составлять многие десятки либо сотни. Каждая из задач выполняет расчеты на небольшом числе виртуальных ядер; например, на 24 ядрах. Падение отдельных задач не влияет на работу остальных. Все вместе эти задачи выполняют заранее запланированный полный расчет. Наши опытные программисты успешно реализовали автоматический перезапуск упавших задач с помощью специальных скриптов.

- Используется экспертный критерий качества результатов обработки реальных сейсмических данных. Объективный критерий возможен при тестовой обработке синтетических модельных данных. Повышение разрешенности результатов сейсмической миграции связано с максимально достижимым увеличением ширины спектра сейсмических сигналов на этапе стандартной сигнальной обработки. Здесь может быть выполнена также компенсация поглощения в земной среде. Более продуктивный путь состоит в компенсации эффектов поглощения в ходе выполнения сейсмической миграции. Решением этой задачи в настоящее время занята наша группа.

- Цель диссертационной работы состояла в развитии методов и алгоритмов сейсмической миграции и создании на их основе программ для ЭВМ, позволяющих получить более разрешенные и достоверные сейсмические изображения исследуемых глубинных геологических объектов. В этом отношении сейсмическую миграцию можно уподобить методам компьютерной медицинской томографии, результаты которой интерпретирует опытный врач-специалист, способный на их основе поставить или уточнить диагноз. Аналогично этому, куб сейсмического изображения поступает вместе со скважинными данными специалисту геологу-геофизику с целью комплексной геологической интерпретации, в ходе которой сейсмическое изображение наполняется геологическим содержанием, что позволяет построить детальную цифровую геологическую модель. Геологическая интерпретация сейсмических изображений не входила в число решаемых в диссертации задач.

- Представленные методы 3-мерной сейсмической миграции мало применимы к 2-D данным региональных профилей.

- Время счета с помощью выполненной разработки миграции Кирхгофа крупного проекта с площадью около 3500 кв. км и с объемом данных на входе, а также на выходе миграции примерно по 5 ТБ составило около 4 суток при использовании 5000 процессорных ядер. По нашим оценкам время счета примерно в 1,5-2 раза меньше аналогичного времени счета с помощью программы из пакета фирмы «Парадайм». Качество результатов в целом сопоставимо. Время счета миграции Кирхгофа из пакета «Омега» («Шлюмберже») может быть больше в 3-4 раза; при этом качество результатов может быть несколько ниже.

На заседании 10 марта 2022 г. диссертационный совет принял решение:

за разработку теоретических положений, имеющих фундаментальный характер, совокупность которых можно квалифицировать как научное достижение, и за внедрение результатов выполненных исследований, имеющих важное народнохозяйственное значение, присудить Плешкевичу А.Л. ученую степень доктора физико-математических наук.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 17 человек, из них 4 доктора наук по физико-математическим наукам, участвовавших в заседании, из 24 человек, входящих в состав совета, проголосовали: за - 17, против - нет, недействительных бюллетеней – нет.

Заместитель председателя
диссертационного совета, д.г.-м.н.

В.С. Селезнев

Ученый секретарь
диссертационного совета,
д.г.-м.н., доцент

Н.Н. Неведрова

11.03.2022