

На правах рукописи

ЧЕВЕРДА ВЛАДИМИР АЛЬБЕРТОВИЧ

**ВОССТАНОВЛЕНИЕ СКОРОСТНОГО СТРОЕНИЯ
НЕОДНОРОДНЫХ СРЕД МЕТОДОМ
ПОЛНОГО ОБРАЩЕНИЯ ВОЛНОВЫХ
СЕЙСМИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ**

25.00.10 – геофизика, геофизические методы
поисков полезных ископаемых

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук

НОВОСИБИРСК 2009



Работа выполнена в Лаборатории вычислительных методов геофизики Учреждения Российской академии наук Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А.Трофимука Сибирского отделения РАН.

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук,
академик РАН Михайленко Борис Григорьевич,
доктор физико-математических наук,
профессор Крауклис Павел Владимирович,
доктор физико-математических наук,
профессор Кабанихин Сергей Игоревич

Ведущая организация:

Учреждение Российской академии наук Институт вычислительного моделирования Сибирского отделения РАН
(г. Красноярск)

Защита состоится 12 ноября 2009 г. в 14.30 час. на заседании диссертационного совета Д 003.068.03 при Учреждении Российской академии наук Институте нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А.Трофимука СО РАН, в конференц-зале.

Адрес:, пр-т Ак. Коптюга, 3, Новосибирск, 630090

Факс: (383) 333 25 13

e-mail: YeltsovIN@ipgg.nsc.ru

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИНГГ СО РАН.

Автореферат разослан 11 августа 2009 г.

И.о. учёного секретаря
диссертационного совета
доктор технических наук



И.Н.Ельцов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Объект исследования данной работы – метод полного обращения волновых сейсмических полей на предмет развития его теоретической и программно-алгоритмической составляющих и использования при решении обратной динамической задачи сейсмоки, а именно для определения скоростного строения неоднородной среды и сейсмоакустических характеристик локальных геологических объектов.

Актуальность. Несмотря на то, что решению обратных динамических задач сейсмоки, состоящих в определении физических характеристик среды по полным волновым полям, в последние десятилетия уделяется самое пристальное внимание, ответы на ряд вопросов либо не найдены вообще, либо получены при существенных ограничениях, затрудняющих их практическое применение. Так, вплоть до настоящего времени не разработаны подходы, позволяющие устойчиво находить макроскоростное строение среды (трендовую составляющую) в рамках метода полного обращения волновых полей.

Неверно определенное макроскоростное строение среды (трендовая составляющая) ведет не только к искажениям в изображении формы локальных геологических объектов, но и может внести существенную ошибку в определение их местоположения. Даже когда оно определено корректно, не всегда удается получить надежные оценки распределения физических свойств локальных геологических объектов через вариации зарегистрированных волновых полей, особенно при наличии перекрывающих границ сложной формы, приводящих к образованию нерегулярного поля лучей.

Понятно, что эти вопросы представляют не только теоретический интерес, но и весьма значимы с практической точки зрения, особенно последний, касающийся построения изображений в истинных амплитудах. Построение таких изображений напрямую связано с прогнозированием упругих характеристик геологических объектов, имеющих первостепенное значение для повышения достоверности и информативности результатов обработки и интерпретации сейсмических данных при поисках полезных ископаемых. Существующая технология обработки сейсмических данных опирается на использование миграционных процедур. Они изначально ориентированы только на проведение структурных построений и корректно восстанавливают расположение и конфигурацию отражающих горизонтов и дифрагирующих/рассеивающих

объектов, но не позволяют достоверно судить об изменчивости их физических свойств. Впервые модификация миграционных преобразований, направленная на получение изображений геологических объектов в истинных амплитудах, была выполнена G. Veylkin (1985) для рассеивающих и дифрагирующих объектов и впоследствии расширена для отражающих границ N. Bleistein (1987). Следующие в этом направлении работы основывались на тех же самых, весьма жестких, допущениях, наиболее обременительным из которых является требование регулярности поля лучей. Однако в последнее время при обработке реальных данных, полученных в таких перспективных регионах, как, например, Восточная Сибирь или Мексиканский залив, использовались весьма сложные макроскоростные модели, содержащие массивные локальные геологические объекты с нерегулярными границами: трапповые включения – в Восточной Сибири и соляные тела – в Мексиканском заливе. Таким геологическим объектам свойственно нерегулярное поле лучей, что делает использование традиционных способов построения изображений в истинных амплитудах невозможным. Но именно в этих регионах месторождения углеводородов не обладают четко выраженными структурными признаками и характеризуются в основном изменчивостью физических параметров вдоль границ раздела слоев, что и должно отражаться в вариациях амплитуд на сейсмических разрезах.

Таким образом, **актуальность** проведенного исследования определяется необходимостью развития и применения самых современных математических методов, к которым и относится метод полного обращения волновых полей, для более глубокого изучения и понимания связей между строением геологических объектов, их физическими характеристиками и зарегистрированными сейсмическими данными. Эти отношения являются ключевым моментом для перехода от структурных построений к реконструкции коэффициентов отражения, и значит – к прогнозу упругих параметров целевых объектов, что в первую очередь важно для геологической интерпретации при поисках полезных ископаемых, достоверной оценки их запасов, геологического обоснования оптимального освоения месторождений.

Цель исследования – опираясь на анализ сингулярного спектра оператора обратной динамической задачи сейсмоки и используя асимптотические разложения волновых сейсмических полей, развить теорию метода их полного обращения, разработать на этой основе комплекс алгоритмов и программ и таким образом повысить разрешающую способ-

ность и информативность результатов обработки сейсмических данных в части построения изображения геологических объектов в истинных амплитудах.

Научные задачи

1. Разработать новый подход к реконструкции макроскоростного строения (трендовой составляющей) вертикально-неоднородной среды и его локальных вариаций, в том числе и с неизвестным импульсом в источнике, с использованием метода полного обращения волновых сейсмических полей.

2. На основе численного анализа сингулярного разложения интегральных операторов, описывающих волновые поля, порождаемые локальными латерально-неоднородными объектами, дать оценку устойчивости их характеристик в зависимости от уровня помех во входных данных.

3. Разработать процедуру построения волновых сейсмических изображений в истинных амплитудах для неоднородных сред, используя представление волновых полей в виде суперпозиции Гауссовых пучков. Создать на этой основе комплекс алгоритмов и программ для обработки сейсмических данных многократного перекрытия.

Фактический материал и методы исследования

Для решения поставленной проблемы использовались современные достижения теории распространения волн, позволяющие с высокой точностью описывать особенности сейсмических волновых процессов в реальных геологических средах. В основе используемого при этом математического аппарата лежат методы и приемы, разработанные в ряде смежных областей вычислительной и прикладной математики:

- методы минимизации нелинейных функционалов;
- сингулярное разложение компактных линейных операторов, возникающих при декомпозиции скоростного строения изучаемой среды на макроскоростную модель и ее локальные возмущения, и получение с его помощью оценок точности построенного численного решения в зависимости от уровня помех во входных данных;
- асимптотические методы построения решения волнового уравнения в коротковолновом приближении, в первую очередь с помощью Гауссовых пучков;
- теория псевдодифференциальных операторов;
- численные методы моделирования волновых сейсмических полей в сложнопостроенных средах, в том числе применение конечно-

разностных схем и трассировки Гауссовых пучков в двумерно-неоднородных средах.

Для верификации разработанного подхода для вертикально-неоднородных сред использовались синтетические сейсмограммы, рассчитанные с помощью созданного в Вычислительном центре СО РАН (ныне Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН) программного обеспечения (Алексеев и др., 1991). Опробование методов реконструкции локальных возмущений вертикально-неоднородной среды производилось на синтетических данных, полученных конечно-разностным моделированием, выполненным в Институте геофизики СО РАН (ныне Институт нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН). Построение изображений в истинных амплитудах было апробировано на международно признанном тестовом наборе синтетических сейсмограмм Sigsbee2A, отличительной особенностью которого является наличие в макроскоростной модели массивного соляного тела сложной формы. Для трассировки лучей и построения Гауссовых пучков было использовано как программное обеспечение, разработанное в Институте нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН, так и переданный для проведения научных исследований Московским научным центром фирмы Schlumberger комплекс программ TR3. Использование набора синтетических данных Sigsbee2A в качестве тестового позволило выполнить сравнительный анализ разработанного метода полного обращения с реализациями других авторов (Paffenholtz, 2002; Gray, 2003; Sava and Biondi, 2004a,b) и на этой основе выявить его преимущества и недостатки.

Особое внимание уделялось тестированию разработанного программного обеспечения на синтетических данных с целью изучения устойчивости разработанных подходов по отношению к помехам во входных данных и ошибкам в априорной макроскоростной модели.

Заключительный этап верификации разработанного подхода заключался в обработке реальных данных, сопровождаемой геологической экспертизой полученных результатов, выполненной совместно со специалистами ЗАО "Красноярскгеофизика" Поздняковым В.А., Шиликовым В.В., Кабановым Р.В., Ледяевым А.И.

Защищаемые научные результаты

1. Метод реконструкции макроскоростного строения (трендовой составляющей) вертикально-неоднородной среды, в том числе и для не-

известного импульса в источнике, опирающийся на полное обращение волновых сейсмических полей.

2. Математический аппарат для описания устойчивых решений обратной динамической задачи сейсмологии в линейном приближении для двумерно-неоднородных сред. Оценки разрешающей способности метода полного обращения волновых сейсмических полей в зависимости от геометрии системы возбуждения и регистрации, частотного состава зондирующего сигнала и уровня погрешности данных многократного перекрытия.

3. Процедура асимптотического обращения полных волновых сейсмических полей для неоднородных сред, опирающаяся на их представление в виде суперпозиции Гауссовых пучков и реализованная в виде программно-алгоритмического комплекса для построения изображений локальных геологических объектов в истинных амплитудах.

4. Алгоритм построения волновых изображений рассеивающих объектов в истинных амплитудах на основе Гауссовых пучков.

Научная новизна и личный вклад

1. Предложены оригинальные подходы к решению обратной динамической задачи сейсмологии для вертикально-неоднородных сред и на этой основе разработаны новые алгоритмы обработки данных поверхностных и скважинных наблюдений (ВСП):

- с привлечением высоких пространственных частот восстановлено макроскоростное строение среды (трендовая составляющая) в условиях отсутствия информации на низких временных частотах;

- для обработки данных вертикального сейсмического профилирования модифицирован целевой функционал в методе полного обращения волновых сейсмических полей путём включения в искомые параметры не только скоростной модели среды, но и формы зондирующего сигнала и доказана единственность его стационарной точки.

2. Развита метод полного обращения волновых сейсмических полей для двумерно-неоднородных сред, исходя из представления их в виде суперпозиции вертикально-неоднородной составляющей и локальных горизонтальных вариаций скорости:

- с использованием пространственно-временного преобразования Фурье и теории линейных интегральных операторов первого рода доказана единственность решения линеаризованной обратной динамической задачи сейсмологии для двумерно-неоднородных сред;

- создан математический аппарат для проектирования систем возбуждения и регистрации, обеспечивающих заданную разрешающую способность, в основе которого лежит численный анализ сингулярного спектра соответствующих интегральных операторов и полученные оценки устойчивости решения обратной задачи.

3. На основе Гауссовых пучков создан алгоритм построения волновых изображений локальных геологических объектов в истинных амплитудах, не требующий регулярности поля лучей, а также разработана и реализована в виде программно-алгоритмического комплекса его модификация для разделения отражённых и рассеянных/дифрагированных волн. С использованием разработанного макета программного обеспечения выполнено картирование рассеивающих объектов на реальных сейсмических разрезах.

Теоретическая и практическая значимость результатов

В диссертации теоретически обосновано решение обратной динамической задачи сейсмоки методом полного обращения волновых сейсмических полей. Созданные численные методы и разработанное с их помощью программное обеспечение позволяют не только восстанавливать структурные особенности и вещественные параметры локальных неоднородностей среды, но и проводить детальное исследование разрешающей способности и информативности метода в зависимости от выбранной системы возбуждения и регистрации и частотного состава зондирующего импульса.

Метод построения изображений локальных геологических объектов в истинных амплитудах, разработанный на основе использования Гауссовых пучков, оказался весьма перспективным и для построения изображений рассеивающих объектов. Его выгодным отличием от широко применяющегося на практике метода фокусирующих преобразований является возможность обеспечить равномерную селекцию изображений по углу наклона вне зависимости от глубины и получить изображения рассеивающих объектов в истинных амплитудах. Опробование разработанного на этой основе макета программного обеспечения на реальных данных позволило восстановить тонкую структуру целевых геологических объектов.

Таким образом, метод полного обращения волновых сейсмических полей позволяет вскрыть связи между физическими характеристиками геологического объекта и зарегистрированными волновыми полями и с учётом этого получить полную и надёжную информацию о ско-

ростном строении геологической среды. Его использование даёт возможность перейти от структурных построений к реконструкции коэффициентов отражения и, следовательно, к прогнозу физических характеристик слагающих среду слоёв, что имеет первостепенное значение для геологической интерпретации результатов наблюдений при поисках полезных ископаемых и достоверной оценки их запасов.

Реализация результатов

Автором разработан и с 2008 года читается на Механико-математическом факультете (Кафедра математических методов геофизики) Новосибирского госуниверситета специальный курс лекций «Распространение сейсмических волн в сложнопостроенных средах», ряд разделов которого основан на результатах, полученных в ходе выполнения исследования.

Своё дальнейшее развитие метод полного обращения волновых сейсмических полей получил в кандидатских диссертациях, защищённых под научным руководством автора:

- подход к построению изображений в истинных амплитудах на основе Гауссовых пучков – в кандидатской диссертации Протасова М.И. «Построение сейсмических изображений в истинных амплитудах с использованием Гауссовых пучков», защищённой в 2006 году;

- математический аппарат для решения обратной задачи на основе усечения сингулярного разложения компактных операторов – в кандидатской диссертации Сильвестрова И.Ю. «Численное моделирование в обратной динамической задаче вертикального сейсмического профилирования», защищённой в 2008 году.

В настоящее время основным направлением научно-исследовательских работ, выполняемых в ИНГГ СО РАН под руководством автора, является развитие этого подхода применительно к обработке данных многокомпонентных наблюдений для анизотропных упругих сред (готовятся к защите две кандидатские диссертации).

Исследования являются частью планов НИР Института, в 2005 – 2007 гг. поддерживались грантом РФФИ 05-05-64227 «Использование Гауссовых пучков при построении изображений геологических объектов в истинных амплитудах для сложноустроенных вмещающих сред», а на период 2009 – 2011 гг. вошли в интеграционный проект Сибирского отделения РАН №19 «Сейсмический и геомеханический мониторинг изменения состояния продуктивного пласта в процессе извлечения нефти и газа».

Процедура построения изображений рассеивающих объектов в истинных амплитудах реализована в рамках контракта с ЗАО «Красноярскгеофизика» в 2008 году, а в 2009 году – с ООО «РосНефть-КрасноярскНИПИНефть» и иностранными нефтяными и сервисными компаниями.

Апробация работы и публикации

Результаты диссертационной работы известны научной общественности. Они опубликованы в 39 публикациях в центральных реферируемых изданиях в России и за рубежом, в том числе 17 публикаций в ведущих рецензируемых научных журналах из перечня ВАК, а также докладывались на Международных научных конференциях в России и за рубежом:

- 59-й Конференции Европейской Ассоциации Специалистов по Наукам о Земле (EAGE), Швейцария, Женева, 1997, июнь;
- 61-й Конференции EAGE, Финляндия, Хельсинки, 1999, июнь;
- 65-й Конференции EAGE, Норвегия, Ставангер, 2003, июнь;
- 67-й Конференции EAGE, Мадрид, Испания, 2005, июнь;
- Ежегодной Международной Конференции Сообщества Геофизиков-Исследователей (SEG) Новый Орлеан, США, 2006, октябрь;
- Международной Конференции "Науки о Земле - открыть и разработать", Россия, Санкт-Петербург, 2006, октябрь;
- 69-й Конференции EAGE, Великобритания, Лондон, 2007, июнь;
- 8-й Международной конференции "Математические и численные аспекты теории распространения волн", Великобритания, Реддинг, 2007, июль;
- 7-й Европейской конференции по вычислительной математике, Австрия, Грац, 2007, сентябрь;
- Девятой международной научно-практической конференции "Геомодель", Россия, Геленджик, 2007, сентябрь;
- Международной конференции геофизиков и геологов "К эффективности через сотрудничество", Россия, Тюмень, 2007, ноябрь;
- Международной конференции "ГеоСибирь - 2008", Россия, Новосибирск, 2008, апрель;
- 70-й конференции EAGE, Италия, Рим, 2008, июнь;
- Международной конференции "Математическое моделирование в геофизике", Россия, Новосибирск, 2008, октябрь;
- 9-й Международной конференции "Математические и численные аспекты теории распространения волн", Франция, По, 2009, июнь;

- Международной конференции и школе молодых ученых "Теория и численные методы для обратных и условно-корректных задач", Россия, Новосибирск, 2009, август.

Благодарности

Успешному проведению исследования способствовала поддержка академиков РАН А.С.Алексеева и С.В. Гольдина, оказавших большое влияние на формирование научных взглядов соискателя.

Автор благодарен своим коллегам В.И.Костину и В.Г.Хайдукову за содержательные и плодотворные обсуждения и помощь при выполнении работы, а также всем сотрудникам Лаборатории вычислительных методов геофизики, особенно В.В.Лисице, И.Ю.Сильвестрову и М.И.Протасову.

Автор выражает свою искреннюю признательность генеральному директору ЗАО «Красноярскгеофизика» доктору технических наук В.А.Позднякову за поддержку работ по выделению рассеивающих объектов, а также специалистам этой организации А.И.Ледяеву, Р.В.Кабанову, В.В.Шиликову и А.А.Тузовскому, без активного участия которых была бы невозможна практическая реализация научных результатов, полученных автором.

Объем и структура работы

Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения и приложения. Содержит 260 страниц и 76 рисунков. Библиографический список использованных источников содержит 131 наименование.

Последовательность изложения материалов в диссертации обусловлена логикой поэтапно выполненного исследования:

- развитие теории метода полного обращения волновых сейсмических полей для вертикально-неоднородных сред, ориентированное на определение трендовой составляющей;
- модификация целевого функционала для определения не только скоростного строения, но и формы зондирующего импульса при решении обратной задачи для вертикально-неоднородных сред;
- доказательство теоремы единственности решения линеаризованной динамической обратной задачи сейсмоки для двумерно-неоднородных сред;
- создание математического аппарата для проектирования систем возбуждения/регистрации и обеспечения заданной разрешающей способности на основе усечения сингулярного разложения соответствующих интегральных операторов;

- разработка процедуры построения волновых изображений локальных геологических объектов в истинных амплитудах, включая рассеивающие объекты субсейсмического масштаба, на основе Гауссовых пучков;

- создание макета программного обеспечения и его применение для картирования распределения трещиноватости в Нижнеканском гранитоиде.

Во введении поставлена цель исследования, обоснована актуальность, поставлены научные задачи и указаны защищаемые научные результаты, а также определены научная новизна, личный вклад и показана теоретическая и практическая значимость результатов.

В первой главе даётся анализ известных подходов к решению проблемы определения скоростного строения среды по сейсмическим данным, а также видение автором её современного состояния.

Вторая глава посвящена развитию автором теории и разработке алгоритмов решения обратной задачи сейсмологии в вертикально-неоднородных средах методом полного обращения волновых сейсмических полей, включая реконструкцию трендовой составляющей и одновременного определения строения среды и формы зондирующего сигнала для вертикального сейсмического профилирования.

В третьей главе рассматривается линейризованная обратная динамическая задача для двумерно-неоднородных сред, которая сведена к распадающейся системе линейных интегральных уравнений первого рода. Доказывается единственность решения полученной системы. Вводится понятие r -псевдообратного для компактного оператора и на этой основе анализируется устойчивость решения обратной задачи в зависимости от уровня помехи в исходных данных.

Четвёртая глава содержит описание процедуры построения изображений локальных геологических объектов в истинных амплитудах на основе Гауссовых пучков. Высокая разрешающая способность и информативность метода подтверждаются результатами обработки международно признанного набора синтетических данных Sigsbee2A, а именно корректным восстановлением динамики разреза, в том числе и под соляным телом. Особое внимание в этой главе уделяется процедуре картирования слабо контрастных рассеивающих объектов. Приводятся результаты обработки реальных данных, полученных на Нижнеканском гранитоидном массиве.

В заключение показаны преимущества метода полного обращения волновых сейсмических полей для восстановления скоростного строения неоднородных сред, отмечены его выгодные отличия от других методов, основанных на асимптотическом представлении функции Грина, требующем регулярность поля лучей. Проанализированы также и недостатки разработанного метода и определены пути их устранения.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Глава 1. Изученность решения проблемы

Задача геофизики в целом состоит в определении физических характеристик геологических объектов с использованием физико-математических методов. Практическое значение решения таких проблем заключается в создании новых и совершенствовании существующих теорий и методов обработки для геологической интерпретации результатов геофизических наблюдений.

Простейший вариант этой постановки – одномерная обратная динамическая задача для скалярного волнового уравнения – находится в сфере внимания специалистов с начала 60-х годов прошлого века. Впервые она была строго поставлена и детально исследована академиком А.С.Алексеевым (1962) с помощью аппарата обратной задачи теории рассеяния, развитого в классических статьях И.М.Гельфанда и Б.М.Левитана (1951) и М.Г.Крейна (1954). Полученные результаты гарантировали единственность нахождения скоростей распространения продольных и поперечных волн и плотности и давали численный алгоритм их отыскания. К сожалению, условия существования решения обратной задачи в этой работе сформулировать не удалось. Они были найдены и доказаны для нормально падающей плоской волны значительно позже А.С.Алексеевым в соавторстве с В.И.Добринским.

Дальнейшее развитие решение одномерной обратной задачи для волнового уравнения получило в работах члена-корреспондента РАН В.Г.Романова (1973, 1983) и его учеников В.Г.Яхно (1982) и С.И.Кабанихина (1988) на основе метода интегральных уравнений Вольтерра. Кабанихиным С.И. подробно рассмотрены основные итерационные методы решения этих систем и изучена их сходимость (1988).

Суть метода полного обращения в его современной постановке (A.Bamberger et al., 1979; Tarantola and Valette, 1982; Tarantola, 1984; Gautier et al., 1986; Snieder et al., 1989 и Tarantola, 2005) – в организации

итерационного процесса отыскания точки минимума целевого функционала, характеризующего среднеквадратичное отклонение зарегистрированного волнового поля от рассчитанного для текущей модели¹. Но первые же попытки применения этого подхода показали его неспособность к построению макроскоростной модели, или трендовой составляющей (Snieder et al., 1989).

Последующие, более глубокие исследования этой проблемы (Чеверда, 1990; Алексеев и др., 1991) показали, что частотный состав зондирующего сигнала является определяющим для разложения скоростной модели на две составляющие: плавно меняющуюся трендовую (макроскоростную) составляющую и быстро меняющийся рефлектор. Если трендовая составляющая известна, уже первый шаг минимизации целевого функционала даёт истинное расположение рефлекторов в пространстве. В то же время, даже её незначительные изменения ведут к существенному фазовому сдвигу регистрируемых колебаний и появлению множества локальных минимумов целевого функционала, что нарушает сходимость итерационных процедур градиентного типа к глобальному минимуму. Для обеспечения их сходимости рядом авторов были предложены различные модификации целевого функционала (см., например, Symes and Carazzone, 1991; Chavent and Jacewitz, 1995; Clement et al., 2001), но решающего улучшения скорости сходимости и качества получаемого решения на этом пути получить не удалось.

Среди систем сбора, обработки и интерпретации скважинных данных важное место занимает метод вертикального сейсмического профилирования (ВСП). Впервые метод полного обращения применительно к данным ВСП был предложен D.Mace и P.Lailly (1986) и развит S.K.L.Chiu и R.R.Stewart (1987), W.Harlan (1988) и C.Esmersoy (1990). Проведённая затем В.А.Чевердой в соавторстве с Т.А.Вороной (1994а, б) модификация целевого функционала для этого метода, существенно ослабила требования к априорной информации о строении среды между источником и первым приёмником. Теоретические исследования и численные эксперименты показали, что согласование формы зондирующего сигнала и строения вышележащих слоёв обеспечивает наилучшее совпадение формы записи в самом первом приёмнике. Этот

¹ Идея применения оптимизационного подхода для решения обратной динамической задачи сейсмологии высказывалась А.С.Алексеевым еще в 1967 году, но не была реализована.

результат степени превосходит последующие работы по развитию сейсмической интерферометрии применительно к данным ВСП.

Дальнейшим развитием метода полного обращения стал переход к рассмотрению вертикально-неоднородных сред со слабыми локальными латеральными возмущениями. Впервые линеаризованная обратная задача для волнового уравнения с вертикально-неоднородной вмещающей средой была поставлена и исследована членом-корреспондентом В.Г.Романовым (1969). Для обращения сейсмических волновых полей впервые, видимо, этот подход был рассмотрен в совместной работе J.K.Cohen и N.Bleistein (1979) для однородной вмещающей среды. Неоднородность вмещающей среды была учтена R.W.Clayton и R.H.Stolt (1981), которые использовали Борновское обращение, базирующееся на асимптотическом (ВКБ) представлении функции Грина. Структура возникающего при этом интегрального оператора была детально исследована J.K.Cohen с соавторами (1986), существенно опирающимися на математический аппарат, развитый G.Beylkin (1985).

Следует отметить, что эти авторы основное внимание уделяли математическим соотношениям, ведущим к алгоритму определения слабых возмущений заданной вмещающей среды. Ими практически не изучалась зависимость устойчивости предлагаемого подхода от входных параметров – размеров апертуры, уровня помех во входных данных, точности задания вмещающей среды и других.

Впервые, видимо, с этой точки зрения Борновское обращение было проанализировано для ВКБ-представления функции Грина N.Bleistein с соавторами (1985), а для ее точного представления – R.Wu и M.N.Toksoz (1987). Они исследовали связь между пространственно-временным спектром входных данных и пространственным спектром локальной неоднородности и определили влияние размеров апертуры и расположения объекта на качество получаемого решения.

Изложенный в третьей главе настоящей работы подход к обращению волновых полей использует в качестве регуляризации усечение сингулярного разложения компактного оператора, позволяющее детально изучить устойчивость, информативность и разрешающую способность линеаризованного (Борновского) обращения волнового поля. Выполненный в ней анализ сингулярного разложения показывает, что достоверно определяются только резкие возмущения заданной макроскоростной составляющей, на изображение которых ориентированы методы миграционных преобразований. Эти преобразования дают досто-

верную информацию о структуре (определяется расположение и геометрия границ), однако не позволяют судить о количественной изменчивости параметров среды. Направление, связанное с получением волновых изображений среды, интенсивность которых свободна от влияния свойств перекрывающих их толщ и геометрии системы возбуждения и регистрации, берет свое начало от работ G.Beylkin (1985), D.Miller et al. (1987) и N.Bleistein (1987). В них устанавливается связь между приближенным решением линеаризованной обратной задачи и миграционными процедурами и, на основе асимптотических представлений для функции Грина, строятся весовые коэффициенты, использование которых и даёт изображение в истинных амплитудах.

Принципиальным ограничением этих подходов является применение асимптотического представления функции Грина, основанного на предположении о регулярности поля лучей. Однако когда имеется многозначность времен пробега волн, возникают существенные трудности в проведении таких построений. Зачастую учесть все вступления весьма затруднительно, и даже когда это удастся сделать, корректное описание амплитуды в областях многозначности фазовой функции (каустики и фокальные точки) остаётся сложной задачей. Одним из способов преодоления этих трудностей является миграция на Гауссовых пучках, предложенная R.Hill (2001). Глобальная регулярность пучков позволяет вычислить функцию Грина независимо от наличия сингулярностей в соответствующем поле лучей и тем самым обеспечить ее равномерное приближение. Но здесь возникают существенные трудности при реализации миграции в истинных амплитудах (Albertin et al., 2004).

Глава 2. Определение скоростного строения вертикально-неоднородных сред методом полного обращения волновых полей

Начало главы посвящено восстановлению трендовой составляющей вертикально-неоднородной среды при условии отсутствия низких временных частот в спектре зондирующего сигнала. Теоретическую основу предлагаемого подхода составляет теорема единственности точки минимума целевого функционала для вертикально-неоднородных сред, доказанная автором (Чеверда, 1990), и анализ спектральных свойств оператора обратной задачи.

Далее рассматривается волновой процесс, вызванный в полупространстве $z \geq 0$ воздействием точечного источника, расположенного на

свободной поверхности $z = 0$, который описывается начально-краевой задачей:

$$\frac{1}{c^2(z)} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = \Delta u;$$

$$U|_{t=0} = U_t|_{t=0} = 0; \frac{\partial U}{\partial z}|_{z=0} = f(t)\delta(x, y).$$

Обратная задача состоит в определении неизвестной функции $c(z)$ по заданной на свободной поверхности дополнительной информации:

$$u|_{z=0} = u_0(x, y, t); \quad t \geq 0, (x, y) \in R^2 \quad (1)$$

Здесь метод полного обращения используется для отыскания не скорости, а функции $n^2(z) = c^{-2}(z)$. С учётом осесимметричности рассматриваемой постановки и с использованием равенства Парсевала минимизируем целевой функционал:

$$\Phi[n^2(z)] = \int_{\omega_1}^{\omega_2} d\omega \int_{k_1}^{k_2} |U_0(k, \omega) - B[n^2(z)](k, \omega)|^2 k dk = \int_{k_1}^{k_2} \Phi_k[n^2(z)] k dk$$

где $U_0(k, \omega)$ есть преобразование Фурье-Бесселя по пространству и Фурье по времени от дополнительной информации (1), а $B[n^2(z)]$ - нелинейный оператор, переводящий функцию $n^2(z)$ в значение при $z = 0$ решения краевой задачи:

$$\frac{d^2 U}{dz^2} - (k^2 - (\omega - i\varepsilon)^2 n^2(z)) U = 0;$$

$$\frac{dU}{dz}|_{z=0} = F(\omega); U(k, \omega, z) \rightarrow 0, \quad z \rightarrow \infty.$$

Теорема. Целевой функционал $\Phi_k[n^2(z)]$ для любого значения параметра k может иметь не более одной стационарной точки - точки глобального минимума, совпадающей с решением обратной задачи.

В силу единственности стационарной точки целевого функционала, итерационный процесс его минимизации может сходиться только к решению обратной задачи. Однако все попытки формального применения метода полного обращения (P.Kolb et al., 1986; F.Santosa and W.Symes, 1989 и др.) не увенчались успехом именно из-за отсутствия сходимости в условиях неизвестной трендовой составляющей.

Чтобы установить причины этого, рассмотрим целевой функционал в окрестности точки минимума, в качестве которой возьмём постоянную скорость распространения волн $c_0(z) \equiv 1$, и определим чувствительность элементарного целевого функционала $\Phi_k[n^2(z)]$ для $k < \omega_1$ к её малому возмущению. Вычисления показывают, что со вторым порядком точности значение функционала даётся равенством

$$\Phi_k[1 + \delta n^2(\xi)] = \int_{\omega_1}^{\omega_2} \frac{\omega^4}{(\omega^2 - k^2)^2} |\Delta N^2(2\sqrt{\omega^2 - k^2})|^2 d\omega,$$

где $\Delta N^2(\omega)$ есть преобразование Фурье от возмущения среды. Из этого соотношения видно, что функционал нечувствителен к возмущениям, чей пространственный спектр не попадает в промежуток $\left(2\sqrt{\omega_1^2 - k^2}, 2\sqrt{\omega_2^2 - k^2} \right)$. Это приводит к образованию оврага и существенно замедлению скорости сходимости вдоль него.

Итак, причиной затруднений в определении трендовой составляющей является овражная структура элементарных целевых функционалов. Более того, для любой заранее заданной пространственной частоты можно указать элементарный функционал, который будет обладать максимальной чувствительностью к её вариациям. В результате, двигаясь в области пространственных частот от максимально возможных значений $k = \omega_2$ до нормально падающей плоской волны ($k = 0$), можно восстановить как трендовую составляющую скоростного разреза, так и его быстро осциллирующую компоненту.

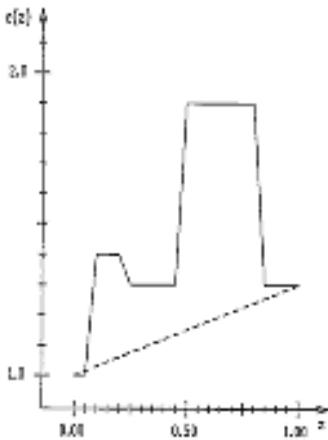


Рис. 1. Истинная скорость (сплошная линия) и начальное приближение (пунктир).

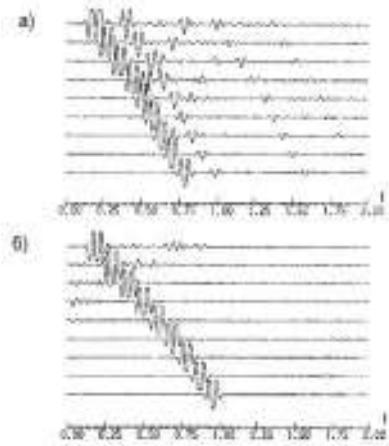


Рис. 2. Синтетические сейсмограммы для истинной модели (а) и начального приближения (б).

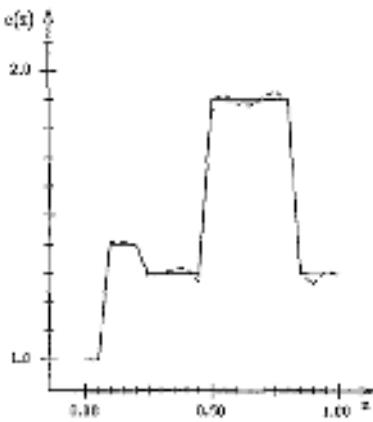


Рис. 3. Истинная скорость (сплошная линия) и результат полного обращения (пунктир).

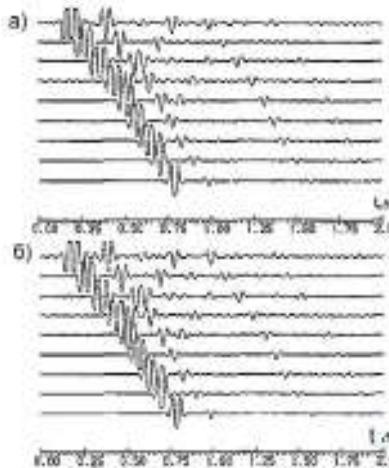


Рис. 4. Синтетические сейсмограммы для истинной (а) и найденной модели (б).

Для апробации предложенной стратегии поиска точки минимума были проведены численные эксперименты по восстановлению среды, скорость распространения волн в которой представлена на рис. 1 сплошной линией, при выборе в качестве начального приближения к ней скорости, обозначенной пунктиром. В качестве зондирующего сигнала использовался импульс Рикера с доминирующей частотой 20 Гц, а доступный интервал временных частот брался от 15 до 40 Гц. Синтетические сейсмограммы для истинной модели и начального приближения приведены на рис. 2.

Для построения решения обратной задачи производилась минимизация методом сопряжённых градиентов целевых функционалов

$$\Phi[n^2(z)] = \int_{k_1}^{k_2} k dk \int_{\omega_1}^{\omega_2} |U_0(k, \omega) - B[n^2(z)](k, \omega)|^2 d\omega \quad (2)$$

для различных диапазонов пространственных частот (k_1, k_2) . Были использованы такие их значения: (88, 95), (57,63), (13,19) и (0,10). Окончательный результат, полученный после минимизации целевого функционала для самых низких пространственных частот $k \leq 10$, приведён на рис.3. Синтетические сейсмограммы для истинной и восстановленной модели сравниваются на рис. 4. Как видно из рисунков, остались лишь незначительные различия в форме отдельных вступлений.

Глава 3. Метод полного обращения волновых сейсмических полей для двумерно-неоднородных сред

Здесь метод полного обращения используется для двумерно-неоднородных сред при условии, что они представляются в виде суперпозиции известной вертикально-неоднородной вмещающей среды (см. гл. 2) и реконструкции подлежат содержащиеся в ней локальные латеральные неоднородности:

$$n^2(x, z) = n_0^2(z) + n_1(x, z).$$

В начале главы поставлена задача: по данным многократного перекрытия

$$u(x_r, z; x_s, t) \Big|_{z=z_r} = u^{(0)}(x_r, x_s, t), \quad (3)$$

известным на апертуре приёмников и источников

$$X_{0r} \leq x_r \leq X_{1r}, \quad X_{0s} \leq x_s \leq X_{1s},$$

на временном интервале $(0, T)$, определить двумерно-неоднородную составляющую $n_1(x, z)$ при условии, что скорость распространения волн $c_0(z) = n_0^{-1}(z)$ во вмещающей вертикально-неоднородной среде известна, а двумерная функция $n_1(x, z)$ отличается от нуля только в полосе $0 \leq x \leq 2a$, где она представляется в виде конечного ряда Фурье по горизонтальной переменной:

$$n_1(x, z) = \frac{1}{2a} \sum_{l=-L}^L f_l(z) \exp\left(i \frac{\pi l}{a} x\right).$$

В линейном приближении эта обратная задача сводится к отысканию решения распадающейся системы одномерных линейных интегральных уравнений первого рода с непрерывными самосопряжёнными ядрами относительно неизвестных функций $f_l(\zeta)$:

$$A_l \langle f_l \rangle(z) \equiv \int_h^H K_l(z, \zeta) f_l(\zeta) d\zeta = u_l^{(0)}(z), \quad l = 1, \dots, L \quad (4)$$

где $u_l^{(0)}(z)$, $l = 1, \dots, L$ суть трансформанты данных многократного перекрытия (3). Теоретический результат представлен теоремой:

Теорема. При любом фиксированном l уравнение (4) не может иметь более одного решения.

Третий параграф посвящён разработке численных методов решения системы интегральных уравнений (4) и анализу их информативности и устойчивости к помехам во входных данных в зависимости от геометрии системы возбуждения и регистрации, а также спектрального состава зондирующего сигнала. Вычисление и анализ сингулярного спектра интегральных операторов A_l опирается на разработанные автором (совместно с В.И.Костиным и В.Г.Хайдуковым) понятия r -решения и r -псевдообратного для линейных компактных операторов.

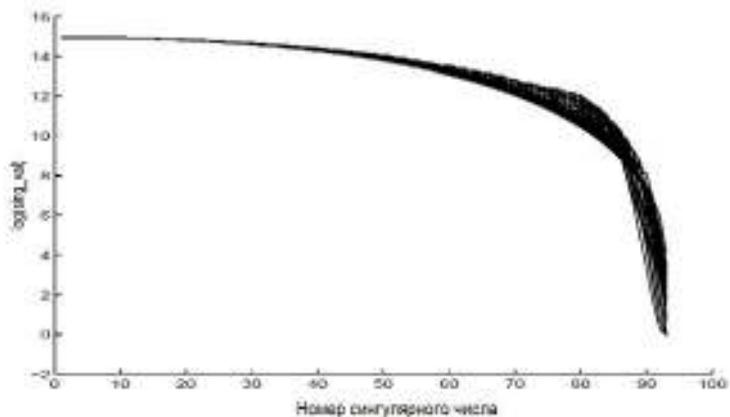


Рис. 5. Сингулярные числа для операторов $A_l, l = 0, \pm 1, \dots, \pm 16$.

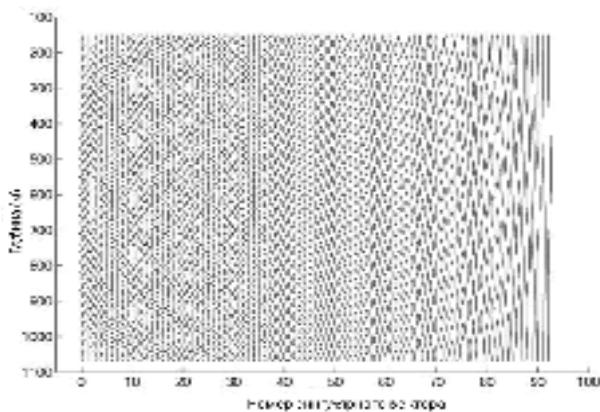


Рис. 6. Сингулярные векторы для операторов $A_l, l = 0, \pm 1, \dots, \pm 16$.

Как пример рассматривается модельная задача определения двумерной локальной неоднородности эллиптической формы, расположенной в однородном слое, лежащем на однородной полуплоскости. Сингулярные числа для этого случая представлены на рис. 5. Как из него видно, приемлемое число обусловленности (порядка 100) соответствует

пространству, являющемуся линейной оболочкой первых 60 сингулярных векторов. Сингулярные векторы изображены на рис. 6. Интересно, что и для двумерного случая трендовая компонента (плавно меняющиеся сингулярные векторы) соответствует самым маленьким сингулярным числам и, следовательно, не может быть достоверно найдена.

Высокая информативность результата, получаемого при полном обращении волнового поля, убедительно прослеживается на рис. 7, где видны не только контуры объекта, но и изменения скорости распространения волн в нём по сравнению с вмещающей средой. Кроме того, восстановились боковые границы эллипса, а артефакт, обусловленный наличием кратных волн, практически не виден.

Глава 4. Построение изображений неоднородных сред с использованием представления волновых полей в виде суперпозиции Гауссовых пучков

Пусть полуплоскость $z > 0$ представляет собой неоднородную среду, скорость распространения волн в которой есть суперпозиция известной плавной составляющей $c_0(x, z)$ и неизвестной быстро меняющейся компоненты $c_1(x, z)$. В соответствии с принятой терминологией будем называть $c_0(x, z)$ макроскоростной составляющей, а её

нормированное возмущение $\frac{c_1(x, z)}{c_0(x, z)}$ – отражательной способностью

среды. На сегодня общепринято считать, что отыскание этих двух функций – суть две разные задачи, для решения которых применяют разные подходы (Mora, 1989; Snieder et al., 1989; Cao et al., 1990; Chavent and Clement, 1993; Jervis et al., 1996). Это отличие было показано в предыдущей главе при SVD-анализе линеаризованной постановки обратной задачи для вертикально-неоднородной макроскоростной модели. Как оказалось, макроскоростная составляющая принадлежит линейной оболочке самых младших сингулярных векторов и, следовательно, требует для своего достоверного определения нереалистично низкой погрешности во входных данных. Отсюда следует, что с использованием метода полного обращения волнового поля устойчиво определяется только резко меняющаяся составляющая скоростного строения, или отражательная способность среды.

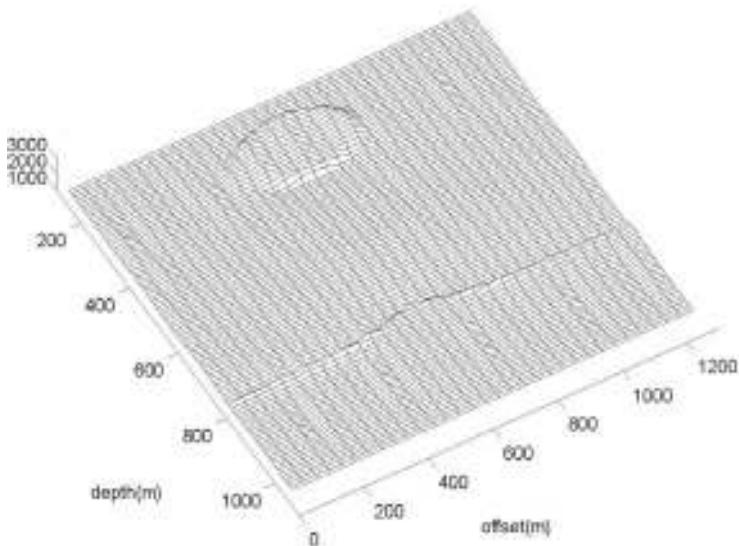


Рис. 7. Решение обратной задачи.

Более того, применение метода полного обращения в его исходной постановке для случая произвольной двумерно-неоднородной макроскоростной модели ведёт к необходимости решения двумерных линейных интегральных уравнений первого рода, уже не распадающихся на независимые семейства одномерных интегральных уравнений, как это было для вертикально-неоднородной вмещающей среды (см. гл.3). Их дискретизация приводит к системам линейных алгебраических уравнений чрезвычайно большой размерности, решение которых может быть получено исключительно с помощью итерационных методов. Интересно, что первый шаг любого итерационного метода сводится к вычислению действия сопряжённого оператора на правую часть, то есть на данные многократного перекрытия. Однако, как было доказано еще P.Lailly (1983) и G.Chavent (1993), действие сопряжённого оператора эквивалентно выполнению миграции до суммирования, которая даёт достоверную геометрию отражающих/рассеивающих объектов, но не позволяет судить об их отражательной способности, так как интенсивность (амплитуда) получаемых изображений искажена рядом факторов, среди которых наиболее существенные – влияние неоднородной макро-

скоростной модели (неравномерная освещённость) и геометрическая расходимость волн. Поэтому основные усилия в этой главе направлены на модификацию метода полного обращения, позволяющую восстанавливать не только геометрию, но и отражательную способность локальных геологических объектов.

Декомпозиция скоростного строения среды на две составляющие влечёт за собой и возможность расщепления волнового поля на падающую и отражённую/рассеянную волны, удовлетворяющие краевым задачам:

для падающей волны

$$\Delta u^{(in)} + \frac{\omega^2}{c_0^2(x, z)} u^{(in)} = 0;$$

$$\left. \frac{\partial u^{(in)}}{\partial z} \right|_{z=0} = F(\omega) \delta(x - x_s);$$

для отражённой волны

$$\Delta u^{(sc)} + \frac{\omega^2}{c_0^2(x, z)} u^{(sc)} = -2 \frac{\omega^2}{c_0^2(x, z)} \frac{c_1(x, z)}{c_0(x, z)} u^{(in)};$$

$$\left. \frac{\partial u^{(sc)}}{\partial z} \right|_{z=0} = 0.$$

Так как распространение падающей волны определяется плавной макроскоростной составляющей, на свободной поверхности регистрируются только отражённые волны¹, которые и являются дополнительной информацией (данные многократного перекрытия):

$$u^{(sc)}(x_r, 0; x_s; \omega) = \varphi(x_r, x_s, \omega).$$

¹ Здесь не рассматриваются ни рефрагированная, ни головная волны.

Положение источников x_s и приёмников x_r , а также частотный диапазон определяются неравенствами:

$$X_{0s} \leq x_s \leq X_{1s}; \quad X_{0r} \leq x_r \leq X_{1r}; \quad \omega_1 \leq \omega \leq \omega_2.$$

При построении изображения в истинных амплитудах в некоторой точке $\bar{X} = (X_i, Z_i)$ из неё выпускается пара лучей по направлению к свободной поверхности (левый и правый), и около каждого из них строится свой Гауссов пучок, обозначаемые в дальнейшем как $u_{gb}^{(l,r)}(x, z; x_i, z_i; \alpha, \beta; \omega)$ (рис.8). Здесь углы наклона α и раствора β однозначно определяют пару Гауссовых пучков, протрассировав которые вплоть до свободной поверхности можно вычислить на ней их нормальные производные:

$$\tau_{gb}^{(l,r)}(x, z; \alpha, \beta; \omega) = \left. \frac{\partial u_{gb}^{(l,r)}(x, z; x_i, z_i; \alpha, \beta; \omega)}{\partial z} \right|_{z=0}.$$

Помня, что Гауссов пучок является решением уравнения Гельмгольца, дважды применяя тождество Грина и привлекая теорему взаимности, приходим к основному интегральному уравнению относительно отражательной способности среды:

$$\begin{aligned} & 2\omega^2 F(\omega) \iint_{R_2^+} K(x_i, z_i; \xi, \eta; \omega) \frac{c_1(\xi, \eta)}{c_0(\xi, \eta)} d\xi d\eta = \\ & = \int_{z=0} \tau_l^{(gb)}(x_s; \alpha, \beta; \omega) dx_s \int_{z=0} \tau_r^{(gb)}(x_r; \alpha, \beta; \omega) \varphi(x_s, x_r, \omega) dx_r \end{aligned} \quad (5)$$

Ядро интегрального оператора в левой части есть произведение левого и правого Гауссова пучков, выпущенных из точки (X_i, Z_i) :

$$K(x_i, z_i; \xi, \eta; \omega) = \frac{u_r^{(gb)}(\xi, \eta; x_i, z_i; \alpha, \beta; \omega) u_l^{(gb)}(\xi, \eta; x_i, z_i; \alpha, \beta; \omega)}{c_0^2(x, z)}$$

В силу сосредоточенности Гауссовых пучков в узкой ($\sim \omega^{-1/2}$) окрестности луча, это ядро существенно отличается от нуля лишь в некоторой малой окрестности точки (x_i, z_i) (рис.8), поэтому интегрирование в левой части основного уравнения достаточно производить лишь по этой окрестности. Привлекая асимптотические разложения для Гауссовых пучков и пренебрегая изменчивостью макроскоростной модели внутри упомянутой окрестности, после ряда интегральных преобразований получим, что главный член асимптотического разложения оператора в левой части уравнения (5) представляется в виде суперпозиции двух интегральных преобразований:

$$M_0 \langle \frac{c_1}{c_0} \rangle (x_i, z_i) \equiv \iint_{X_{par}} dp_x dp_z \iint_{V(x_i, z_i)} \frac{c_1(\xi, \eta)}{c_0(\xi, \eta)} \exp(i(p_x(x_i - \xi) + p_z(z_i - \eta))) d\xi d\eta;$$

$$X_{par} = \left\{ (p_x, p_z) : \alpha_1 \leq \frac{c_0(x_i, z_i) \sqrt{p_x^2 + p_z^2}}{2 \cos \beta} \leq \alpha_2, \quad \alpha_1 \leq \left| \arctg \left(-\frac{p_x}{p_z} \right) \right| \leq \alpha_2 \right\}.$$
(6)

Здесь (ω_1, ω_2) и (α_1, α_2) – интервалы доступных временных частот и углов наклона соответственно.

Действие этого интегрального оператора на неизвестную функцию сводится к последовательному выполнению прямого и обратного двумерного преобразования Фурье, причём обратное преобразование выполняется по круговому сектору X_{par} в фазовом пространстве. Итак, если спектр искомого возмущения макроскоростной модели принадлежит сектору X_{par} , взвешенное суммирование данных многократного перекрытия даст истинное значение отражательной способности среды, свободное от влияния верхней части разреза, освещённости и требования регулярности поля лучей.

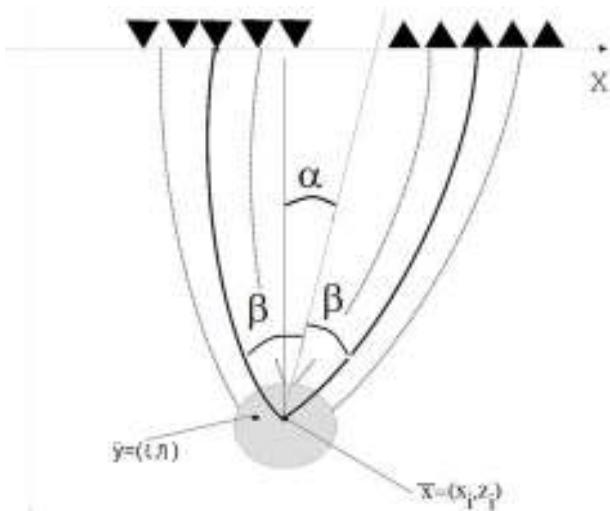


Рис. 8. Геометрия взаимного расположения Гауссовых пучков.

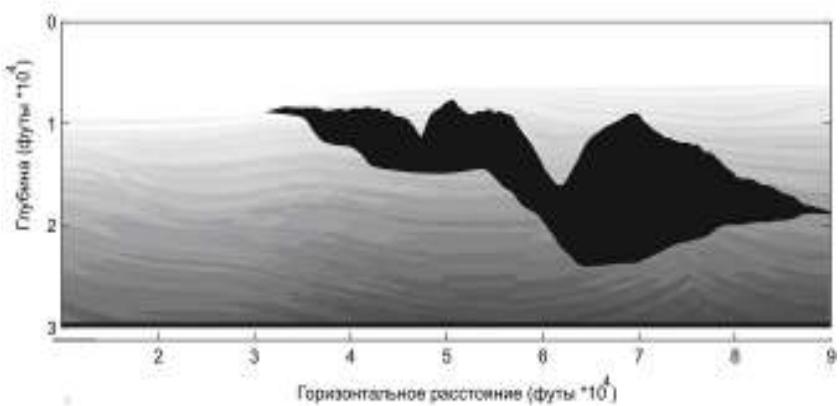


Рис. 9. Скоростное строение модели Sigsbee2A.

Для проведения численных экспериментов использовался набор синтетических данных Sigsbee2A, вот уже в течение ряда лет являющийся пробным камнем для тестирования новых методов построения изображений. Он состоит из полной (стратиграфической) скоростной модели, макроскоростной модели и 500 сейсмограмм. На рис.9 приведена полная скоростная (стратиграфическая) модель.

Результат применения процедуры построения изображений в истинных амплитудах для области под левым флангом соляного включения приведён на рис.10. Рисунок отражает высокую информативность и разрешающую способность метода – на нём присутствуют все тонкие слои, слагающие разрез, а также оба малоамплитудных разлома.

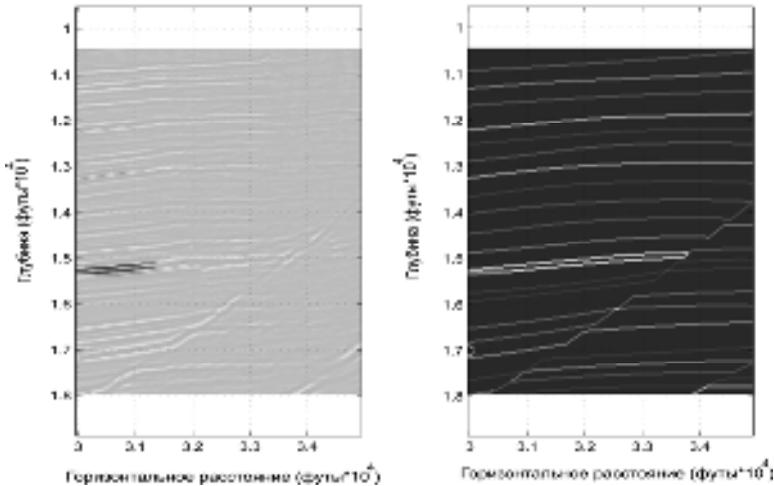


Рис. 10. Изображение среды под левым флангом соляного тела. Справа – истинное стратиграфическое строение, слева – восстановленное.

Выполнение обратного преобразования Фурье в представлении интегрального оператора (6) по круговому сектору, а не по всему фазовому пространству, позволяет строить изображения локальных объектов с заданными характеристиками пространственного спектра. Например, выделять границы с заданным диапазоном углов наклона. В частности, зная геометрию регулярных границ, можно полностью избежать присутствия их на изображении и тем самым подчеркнуть наличие рассеи-

вающих объектов субсейсмического масштаба и на этой основе картировать зоны повышенной трещиноватости (Гольдин и др. 2003; Поздняков и Чеведа, 2005). Эта способность селективных изображений подчёркивать наличие мелкомасштабных рассеивающих объектов была использована для исследования целостности Нижнеканского гранитоидного массива.

В период с 1995 по 1997 год на Нижнеканской площади были проведены профильные и площадные сейсморазведочные работы по методике многократных перекрытий. Эти работы были направлены на изучение внутренней структуры гранитоидного массива и выделения в нём зон с минимальными нарушениями целостности среды, таких как скопления трещин, каверн и других микронеоднородностей. Такие зоны должны характеризоваться отсутствием сколько-нибудь значимых локальных разрастаний амплитуды на всех селективных изображениях.

Исследованиями красноярских геофизиков было установлено, что сейсмогеологическая модель исследуемого района представляет собой четырёхуровневый геологический разрез (Музыченко, Поздняков, 1997, Сибгатуллин и др., 2000): четвертичные отложения, юрские отложения, консолидированная толща гранитоидных образований и, наконец, подстилающий ее метаморфический комплекс архейского возраста.

Для верхней части разреза четвертичных отложений характерны низкоскоростные прямые (рефрагированные) и поверхностные волны. Прямые волны со скоростями 300-600 м/с прослеживаются на расстоянии не более первых десятков метров от источника и либо быстро затухают, либо переходят в преломленно-дифрагированные, связанные с нижележащими геологическими формациями. Поверхностные волны имеют групповые кажущиеся скорости 160-320 м/с. Значительную роль в формировании волнового поля в исследуемом районе играют преломленные и преломленно-рефрагированные волны. С кровлей гранитоидного массива связаны также обменные преломленно-рефрагированные волны различного типа (PS, PSP и т.п.) (рис. 11).

Значительную роль в формировании волнового поля для изучаемого объекта играют дифрагированные и рассеянные волны. Как правило, достоверно выделить их непосредственно на сейсмограммах практически невозможно ввиду низкой интенсивности. Однако с точки зрения возможности изучения внутренней структуры объекта, именно этот класс волн является целевым, и именно на его использовании основывается изучение внутренней целостности гранитоидного массива. Постро-

енные на их основе селективные изображения использовались для изучения внутренней части гранитоидного объекта. Результат приведён на рис. 12. Из него видно, что существует значительный объем внутри гранитоида, который можно считать практически монолитным ввиду весьма низкой интенсивности в нём рассеянных и дифрагированных волн, порождаемых разрушенными зонами, то есть зонами повышенной трещиноватости.

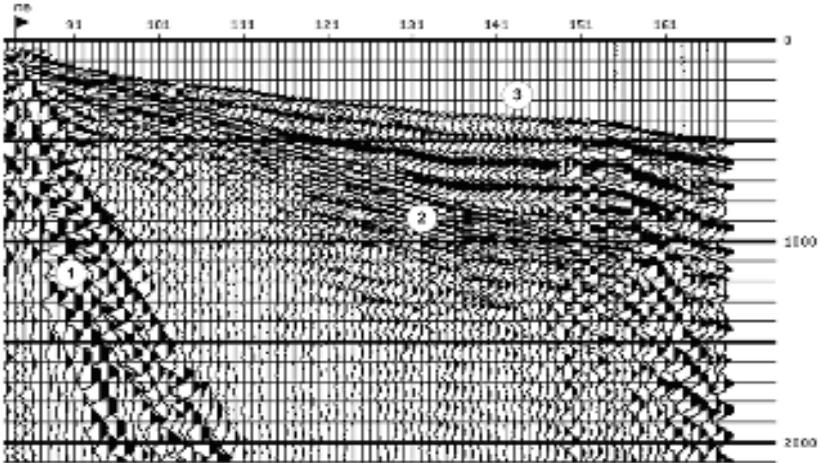


Рис. 11. Типичная сейсмограмма, зарегистрированная на гранитоиде. 1 – поверхностные волны, 2 – преломленные в юрских отложениях, 3 – преломленные волны на кровле гранитоида.

Заключение

Выполненные в работе теоретические исследования метода полного обращения волновых сейсмических полей не только дают ключ к пониманию основных трудностей, лежащих на пути его эффективного применения, но и позволяют определить способы их преодоления. Доказанная во второй главе единственность стационарной точки целевого функционала для вертикально-неоднородных сред в совокупности с проведённым там же исследованием зависимости его структуры от диапазона используемых пространственных частот обеспечили успешный выбор его модификации, с использованием которой предложен и реализован поэтапный процесс минимизации.

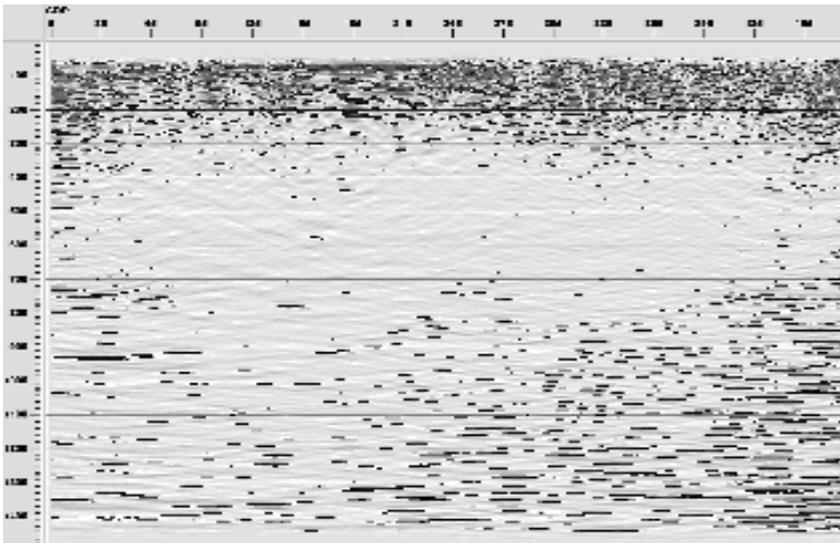


Рис. 12. Селективное изображение гранитоидного массива, ориентированное на выделение рассеивающих объектов.

Анализ сингулярного спектра линейного приближения оператора обратной задачи, выполненный в третьей главе данной работы, открыл путь к полному описанию устойчивых решений. Полученные результаты показали, что затруднения при определении трендовой составляющей, не связаны с нелинейным характером целевого функционала.

Исследования показали, что и в линеаризованной постановке восстановление трендовой составляющей требует расширения пространства решений за счёт привлечения правых сингулярных векторов, соответствующих самым малым сингулярным значениям. Получаемые при этом системы линейных алгебраических уравнений являются плохо обусловленными и для отыскания достоверного решения требуют недостижимый на практике уровень помех во входных данных.

Метод полного обращения волновых сейсмических полей в его полной реализации требует значительных вычислительных ресурсов, особенно для многомернонеоднородных сред. Поэтому при современном уровне развития вычислительной техники эффективное применение

этого метода на практике невозможно без модификаций, призванных, сохранив его основные достоинства, существенно снизить требования к производительности используемых вычислительных средств. Привлечение асимптотических представлений волнового поля в виде суперпозиции Гауссовых пучков позволило разработать метод построения изображений в истинных амплитудах. Выгодное его отличие от используемых в настоящее время подходов на основе суммирования по Кирхгофу заключается в возможности иметь дело с произвольным, не обязательно регулярным, полем лучей.

Приоритетным направлением дальнейшего развития метода полного обращения волнового поля является создание его модификаций, ориентированных на обработку многокомпонентных сейсмических данных как для профильных, так и для площадных систем наблюдений. На этом пути должно произойти существенное повышение информативности и разрешающей способности сейсмических методов. Однако формальный перенос метода со скалярных волновых полей на векторные вряд ли приведёт к успеху. Предварительным шагом здесь должно стать отыскание оптимальной параметризации упругой среды. Такие работы в Институте нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН уже ведутся, и получаемые результаты подтверждают значительное повышение информативности и разрешающей способности метода применительно к многокомпонентным волновым полям. В частности, это наглядно показано в защищённых под руководством автора кандидатских диссертаций (Неклюдов Д.А., 2004 и Сильвестрова И.Ю., 2008).

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Алексеев А.С., **Чеверда В.А.** Об асимптотическом методе решения обратной динамической задачи распространения волн для сред с криволинейными границами раздела // Докл. АН СССР. – 1981. – Т. 258 (3). – С. 565 – 566.
2. **Чеверда В.А.** О стационарных точках функционала, возникающего при обращении геофизических полей // Докл. АН СССР. – 1990. – Т. 315 (2). – С. 348 – 351.
3. Алексеев А.С., Авдеев А.В., Фатьянов А.Г., **Чеверда В.А.** Математическое моделирование процессов распространения волновых полей в вертикально-неоднородных средах (прямые и обратные задачи) // Математическое моделирование. – 1991. – Т.3 (10). – С. 80 – 94.
4. Воронина Т.А., **Чеверда В.А.** Обращение полных волновых полей при обработке данных метода вертикального сейсмического профилирования // Докл. АН СССР. – 1994. – Т. 335 (4). – С. 503 – 506.

5. Воронина Т.А., **Чеверда В.А.** Оптимизационный подход к обработке данных метода вертикального сейсмического профилирования // Геология и геофизика. – 1994. – Т. 35 (5). – С. 127 – 139.
6. Костин В.И., Хайдуков В.Г., **Чеверда В.А.** Обращение волновых полей для данных систем многократного перекрытия (линеаризованная постановка) // Докл. РАН. – 1997. – Т. 352 (5). – С. 683 – 686.
7. Костин В.И., Хайдуков В.Г., **Чеверда В.А.** Г-решения уравнения первого рода с компактным оператором в гильбертовых пространствах: существование и устойчивость // Докл. РАН. – 1997. – Т. 355(3). – С. 308 – 312.
8. Алексеев А.С., Костин В.И., Хайдуков В.Г., **Чеверда В.А.** Восстановление двумерных возмущений скорости вертикально-неоднородной акустической среды по данным многократного перекрытия (линеаризованная постановка) // Геология и геофизика. – 1997. – № 12. – С. 1980 – 1992.
9. Поздняков В.А., Сафонов Д.В., **Чеверда В.А.** Оптимизация параметров фокусирующих преобразований с использованием численного моделирования // Геология и геофизика. – 1998. – № 6. – С. 930 – 938.
10. Гольдин С.В., Костин В.И., Неклюдов Д.А., **Чеверда В.А.** Выделение рассеивающих объектов на фоне интенсивных отражающих границ // Докл. РАН. – 2002. – Т. 382 (2). – С. 246 – 249.
11. Гольдин С.В., Костин В.И., Неклюдов Д.А., **Чеверда В.А.** Отделение рассеяния и дифракции от регулярных отражений в сейсмических данных // Геология и геофизика. – 2003. – № 8. – С. 819 – 827.
12. Поздняков В.А., **Чеверда В.А.** Фокусирующие преобразования сейсмических данных для площадных стационарных систем // Геология и геофизика. – 2005. – № 3. – С. 328 – 338.
13. Протасов М.И., **Чеверда В.А.** Построение сейсмических изображений в истинных амплитудах // Докл. РАН. – 2006. – Т. 407 (4). – С. 528 – 532.
14. Протасов М.И., **Чеверда В.А.** Использование Гауссовых пучков для построения сейсмических изображений в истинных амплитудах. // Технологии сейсморазведки. – 2006. – №4. – С. 3 – 10.
15. Alekseev A.S., Avdeev F.V., Fatianov A.G., **Cheverda V.A.** Wave processes in vertically-inhomogeneous media: a new strategy for a velocity inversion // Inverse Problems. – 1993. – V. 9 (3). – P. 367 – 390.
16. **Tcheverda V.A.**, Voronina T.A. An optimization approach to data processing in vertical seismic profiling // Journal of Inverse and Ill-Posed Problems. – 1994. – V.2 (3). – P. 211 – 226.
17. Clement F., Khaidukov V.G., Kostin V.I., **Tcheverda V.A.** Linearized inversion of multi-offset data for vertically-inhomogeneous background // Journal of Inverse and Ill-Posed Problems. – 1998. – V. 6(5). – P. 455 – 477.

Технический редактор О.М.Вараксина

Подписано в печать 16.07.2009

Формат 60x84/16. Бумага офсет №1. Гарнитура Таймс

Печ. л. 2. Тираж 130. Зак. № 27

ИНГГ СО РАН, ОИТ, пр-т Ак. Коптюга, 3, Новосибирск, 630090