На правах рукописи

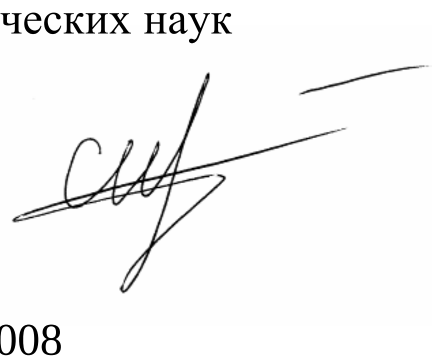
СИЛЬВЕСТРОВ Илья Юрьевич

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ В ОБРАТНОЙ ДИНАМИЧЕСКОЙ ЗАДАЧЕ ВЕРТИКАЛЬНОГО СЕЙСМИЧЕСКОГО ПРОФИЛИРОВАНИЯ С ВЫНОСНЫМ ИСТОЧНИКОМ

05.13.18 – математическое моделирование,
численные методы и комплексы программ

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук



НОВОСИБИРСК 2008

Работа выполнена в Институте нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука Сибирского отделения Российской академии наук

Научный руководитель:	кандидат физико-математических наук, доцент Чеверда Владимир Альбертович
Официальные оппоненты:	доктор физико-математических наук, профессор Крукиер Лев Абрамович
	кандидат физико-математических наук, доцент Белоносов Андрей Сергеевич
Ведущая организация:	Институт вычислительного моделирования СО РАН (г. Красноярск)

Защита состоится 10 июня 2008 г. в 17 часов на заседании диссертационного совета ДМ 003.046.01 по защите диссертаций на соискание ученой степени доктора наук при Институте вычислительных технологий СО РАН по адресу 630090, Новосибирск, проспект Академика М.А. Лаврентьева, 6 (dsovet@ict.nsc.ru).

С диссертацией можно ознакомиться в специализированном читальном зале вычислительной математики и информатики ГПНТБ СО РАН.

Автореферат разослан 8 мая 2008г.

И.о. ученого секретаря
диссертационного совета
доктор технических наук,
профессор А. Д. Рычков

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность. В настоящее время работы по добыче углеводородов зачастую ведутся в регионах с очень сложным геологическим строением, в которых одной из *актуальных* проблем при бурении на нефть и газ является определение наличия зон аномального давления ниже забоя скважины. Отсутствие достоверной информации о таких зонах влечет аварийные ситуации вплоть до полного выхода скважины из строя.

Выявление этих зон возможно на основе знания упругих параметров среды ниже забоя скважины. При этом важно иметь информацию не только о наличии и ориентации отражающих границ, но и об их контрастности, то есть о величине скачка изменчивости упругих параметров. Считается, что наиболее достоверное определение таких параметров для скважин сложной геометрии возможно с использованием данных, полученных методом вертикального сейсмического профилирования (ВСП) с выносным источником, при котором приемники сейсмических колебаний располагаются в скважине, а источник волн находится на поверхности земли, на некотором удалении от нее. Такие данные регистрируются непосредственно около интересующей зоны и содержат уникальную информацию с минимальным уровнем помех.

Существующие на сегодняшний день методы обработки этих данных, зачастую, не позволяют получать достоверных результатов, так как накладывают ограничения на макроскоростную модель (то есть на гладкую составляющую скорости сейсмических волн в среде), на геометрию скважин, а так же на углы наклонов восстанавливаемых границ. Одним из подходов, потенциально свободным от данных недостатков, является применение оптимизационных методов для решения обратной динамической задачи сейсмики. При этом задача рассматривается как операторное уравнение, в правой части которого стоит зарегистрированное волновое поле, а неизвестными являются сейсмические параметры среды. Оператор задачи, отображающий эти параметры в данные наблюдений, определяется математической моделью, описывающей распространение волн в среде, и неявно задается, как правило, волновым уравнением либо уравнениями линейной теории упругости. Для поиска искомого решения задачи применяются, как правило, локальные итерационные методы, привлекающие производную возникающего нелинейного оператора. Это может быть либо метод Ньютона решения нелинейного операторного уравнения, либо градиентные методы минимизации штрафной функции. Для решения рассматриваемой задачи в рамках двумерных уравнений изотропной теории упругости такой подход был впервые применен совсем недавно в работах M.A. Roberts (2006) и M.A. Roberts и B.E. Hornby (2007), которые к сожалению, имеют исключительно практический характер в силу того, что метод был применен в первом случае для сложных синтетических данных, модель которых автор не приводит, а во втором случае – для реальных данных. Поэтому оценить его эффективность можно только по косвенным признакам.

Естественно, что свойства производной исходного нелинейного оператора играют ключевую роль в сходимости итерационного процесса. В связи с этим их изучение является необходимым этапом при разработке численных методов решения обратной задачи и их применении. В силу этого, с целью разработки эффективного численного алгоритма для определения упругих параметров среды ниже забоя скважины по данным ВСП с выносным источником, основываясь на двумерных уравнениях динамической теории упругости, представляется *актуальным*, прежде всего, провести детальное исследование свойств численного решения рассматриваемой обратной задачи, получаемого при заданном уровне помех в данных, и только после этого разрабатывать алгоритм численного решения задачи с учетом полученных свойств.

Цель исследования – обоснование, разработка и программная реализация эффективного алгоритма для численного решения обратной динамической задачи определения упругих параметров среды ниже забоя скважины по данным вертикального сейсмического профилирования с выносным источником на основе метода Ньютона.

Научная задача – численно решить обратную динамическую задачу для двумерных уравнений изотропной теории упругости с использованием метода Ньютона при условии, что волновое поле зарегистрировано методом вертикального сейсмического профилирования с выносным источником, а неизвестными являются параметры среды ниже забоя скважины.

Основные этапы исследования.

1. Для однородной среды получить явный вид линеаризованного оператора динамической теории упругости, являющегося формальной производной по Фреше исходного нелинейного оператора, отображающего упругие параметры ниже забоя скважины в данные наблюдений ВСП с выносным источником.

2. Выполнить численный анализ сингулярного разложения полученного линейного оператора и на его основе установить структуру решения обратной задачи определения упругих параметров среды ниже забоя скважины по данным ВСП с выносным источником, получающегося с использованием метода Ньютона при заданном уровне помех в данных.
3. С учетом этих свойств создать и программно реализовать алгоритм численного решения рассматриваемой обратной задачи на основе итерационного метода LSQR решения систем линейных алгебраических уравнений, с использованием для моделирования волнового процесса конечно-разностной схемы Вирьё на сдвинутых сетках и идеально согласованных поглощающих слоев (PML).
4. Провести представительную серию численных экспериментов по решению обратной задачи на основе синтетических данных в средах различной степени сложности.

Фактический материал. Научные методы исследования.

Изучение свойства решения обратной задачи, получаемого методом Ньютона, происходило в рамках теории условно-корректных задач. При этом существенно использовалось обобщение понятия r-решения, возникающее в теории вычислительной линейной алгебры на случай компактных операторов в гильбертовых пространствах, разработанное в работах В.И. Костина и В.А. Чеверды (1995, 1998).

При разработке численного алгоритма решения обратной задачи использовалась теория вычислительной линейной алгебры в части, касающейся итерационных методов решения систем линейных уравнений (метод LSQR). При модификации алгоритма решения прямой задачи использовалась теория конечно-разностных методов моделирования волновых полей в упругих средах (схема Вирьё, идеально согласованные слои (PML)).

Фактическим материалом для тестирования разработанного алгоритма обращения являлись синтетические данные для сред различной степени сложности (с одиночным рассеивателем, с горизонтальным слоем, с наклонным слоем, с несколькими наклонными слоями).

Результаты исследования свойств решений рассматриваемой обратной задачи, получаемые с использованием анализа сингулярного разложения линеаризованного оператора динамической теории упругости, сравнивались с результатами A. Tarantola, основанными на исследовании диаграмм рассеивания от точечных объектов, а также с результатами D. Lebrun и A. Nicolao, полученными для других систем наблюдений.

На защиту выносятся

- установленная структура решения обратной динамической задачи для двумерных уравнений изотропной теории упругости, получаемого методом Ньютона при заданном уровне помех в данных при условии, что волновое поле зарегистрировано методом вертикального сейсмического профилирования с выносным источником, а неизвестными являются параметры среды ниже забоя скважины;
- разработанный, программно реализованный и протестированный алгоритм численного решения обратной динамической задачи для двумерных уравнений изотропной теории упругости на основе метода Ньютона при условии, что волновое поле зарегистрировано методом вертикального сейсмического профилирования, а неизвестными являются параметры среды ниже забоя скважины;
- результаты решения обратной задачи на основе синтетических данных для сред различной степени сложности (с точечным рассеивателем, с горизонтальным слоем, с одним наклонным слоем, с несколькими наклонными слоями).

Новизна работы.

1. Впервые установлена структура решения обратной динамической задачи для двумерных уравнений изотропной теории упругости, получаемых методом Ньютона при заданном уровне помех в данных при условии, что волновое поле зарегистрировано методом вертикального сейсмического профилирования, а неизвестными являются параметры среды ниже забоя скважины:
    - опираясь на анализ поведения r-решения, в зависимости от используемой параметризации среды обосновано, что наименее связанными параметрами при численном решении обратной задачи с использованием метода Ньютона являются упругие импедансы;
    - основываясь на анализе углов между тригонометрическим базисом в пространстве моделей и устойчивым подпространством, образованным правыми сингулярными векторами, соответствующими большим сингулярным числам, обосновано, что:
        - при заданном уровне помех в данных наиболее точно определяются высокочастотные компоненты упругих импедансов;

- гладкая составляющая решения при этом не может быть восстановлена, а следовательно, целесообразно выполнение только первого шага процесса Ньютона, то есть линейного обращения в поставленной задаче;
- плотность оказывается "почти" ортогональной весьма большому числу старших векторов и поэтому не может быть определена при достигаемых на практике точностях.

2. Исходя из установленной структуры численного решения обратной задачи разработан, программно реализован и протестирован оригинальный алгоритм определения местоположений и амплитуд разрывов (в линейном приближении) упругих импедансов среды на основе итерационного метода LSQR с использованием при моделировании волновых процессов конечно-разностной схемы Вирьё на сдвинутых сетках с ограничением расчетной области при помощи идеально согласованных слоев (PML).

Личный вклад.

Все опубликованные научные результаты, изложенные в диссертации, получены лично соискателем.

Теоретическая и практическая значимость результатов.

Результаты исследования свойств сингулярного спектра линеаризованного оператора динамической теории упругости имеют теоретическую значимость для обоснования свойств численных решений обратной динамической задачи теории упругости, получаемых методом Ньютона для рассматриваемой системы наблюдений. Более того, использованный в работе подход может быть адаптирован для любой системы наблюдений, используемой в сейсморазведке, что несомненно, играет важную роль в развитии теории численных методов решения обратных задач сейсмики, так как позволяет выявлять в каждом конкретном случае наиболее подходящие для обращения параметры и качественно предсказывать поведение решения еще на предварительном этапе разработки численного метода решения обратной задачи.

Практическая значимость проведенного исследования заключается в разработанном, реализованном и протестированном оригинальном алгоритме определения местоположений и амплитуд разрывов (в линейном приближении) упругих импедансов в средах достаточно сложного строения. При этом не накладываются ограничения ни на гладкую макроскоростную модель, ни на углы наклонов отражающих границ, так как моделирование волновых полей происходит конечно-разностным методом. Использование в алгоритме уравнений теории упругости позволяет не проводить необходимого для скалярных процедур разложения зарегистрированного волнового поля на продольные и поперечные волны, что зачастую является невыполнимой задачей. Созданное программное обеспечение целесообразно использовать при разработке промышленных обрабатывающих систем для определения упругих параметров среды ниже забоя скважины по данным ВСП с выносным источником.

Научные результаты диссертации докладывались на Международной конференции, посвященной 75-летию академика М.М.Лаврентьева "Обратные и некорректные задачи математической физики" (Новосибирск, 2007); VII Международной конференции "Гальперинские чтения-2007", (Москва, 2007); 69-ой Международной конференции европейской ассоциации геофизиков и инженеров "69th EAGE Conference & Exhibition" (Лондон, Великобритания, 2007); III Всероссийской конференции "Актуальные проблемы прикладной математики и механика" (Абрау-Дюрсо, 2006); Международной конференции, организованной ассоциациями геофизиков ОЕАГО, EAGE, SEG "Geosciences - To Discover and Develop" (Санкт - Петербург, 2006); V Международной научно-практической геолого-геофизической конференции-конкурсе молодых ученых и специалистов Геофизика-2005 (Санкт - Петербург, 2005); XI Всероссийской школе-семинаре: "Современные проблемы математического моделирования" (Абрау-Дюрсо, 2005); семинарах в Институте вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, Институте математики СО РАН, Институте вычислительных технологий СО РАН, Институте вычислительного моделирования СО РАН.

Публикации.

Результаты исследования по теме диссертации изложены в 8 опубликованных работах. Из них – 2 статьи в ведущих российских рецензируемых журналах по Перечню ВАК, 1 работа – в трудах российской конференции, 2 работы – в расширенных тезисах докладов международных конференций, 3 работы – в тезисах российских и международных конференций.

Благодарности.

Работа выполнена в Лаборатории вычислительных методов геофизики Института нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН.

Автор выражает благодарность всем сотрудникам Лаборатории за полезные научные дискуссии в ходе выполнения работы. Успешному выполнению работы во многом способствовали ценные и критические

замечания В.И. Костина. Хочется поблагодарить С.Б. Горшкалева и Г.В. Решетову за то, что они взялись за труд ознакомиться с работой и высказать о ней своё мнение.

Необходимо отметить неоценимую помощь, оказанную В.И. Самойловой при работе над рукописью.

Автор выражает искреннюю и глубокую признательность научному руководителю, кандидату физико-математических наук, доценту В.А. Чеверде за всестороннюю поддержку и постоянное внимание в ходе выполнения работы.

Объем и структура работы.

Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения и двух приложений. Общий объем диссертации составляет 90 страниц, включая 28 рисунков. Список используемой литературы содержит 60 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении показана актуальность работы, сформулирована ее цель и научная задача исследования, представлены результаты работы, выносимые на защиту, а также определена научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы.

В первой главе показана изученность решения обратных динамических задач сейсмики с использованием оптимизационного подхода. Дается обзор работ, посвященных исследованию возможностей данного подхода, а так же его реализации для различных систем наблюдений. В конце главы указывается место исследования соискателя в многообразии других работ.

Во второй главе проводится исследование свойств производной, нелинейного оператора, возникающего в рассматриваемой задаче, с использованием анализа его сингулярного разложения.

В разделе 2.1 ставится решаемая задача. Предполагается, что процессы формирования и распространения волн в среде описываются начальной задачей для уравнений теории упругости в неоднородных изотропных двумерных средах с источником типа центра расширения:

$$\rho\frac{\partial^2 u_1}{\partial t^2}-\frac{\partial}{\partial x_1}\left(\lambda div\vec{u}+2\mu\frac{\partial u_1}{\partial x_1}\right)-\frac{\partial}{\partial x_2}\left(\mu(\frac{\partial u_1}{\partial x_2}+\frac{\partial u_2}{\partial x_1})\right)=F(t)\frac{\partial}{\partial x_1}\delta(\vec{x}-\vec{x}_s),$$

$$\rho\frac{\partial^2 u_2}{\partial t^2}-\frac{\partial}{\partial x_1}\left(\mu(\frac{\partial u_1}{\partial x_2}+\frac{\partial u_2}{\partial x_1})\right)-\frac{\partial}{\partial x_2}\left(\lambda div\vec{u}+2\mu\frac{\partial u_2}{\partial x_2}\right)=F(t)\frac{\partial}{\partial x_2}\delta(\vec{x}-\vec{x}_s),$$

$$u_1\big|_{t\le 0}=0,\qquad u_2\big|_{t\le 0}=0;$$

Здесь предполагается, что ось x_1 лежит на поверхности Земли, а ось x_2 перпендикулярна к ней и направлена в глубину. По отношению к данной системе рассматривается следующая обратная задача. По информации:

$$\vec{u}\big|_{x_1=0} = \vec{u}^{\,obs}(x_2, t);\ 0 \le t \le T;\ x_2 \in \{x_{1s}, ..., x_{Ns} \mid x_{1s} \le .. \le x_{Ns}\},$$

о режиме колебаний, записанной в приемниках, расположенных в вертикальной скважине, восстановить параметры среды λ, μ, ρ ниже забоя скважины, то есть ниже линии, на которой располагается последний приемник. Эту задачу можно рассматривать как нелинейное операторное уравнение:

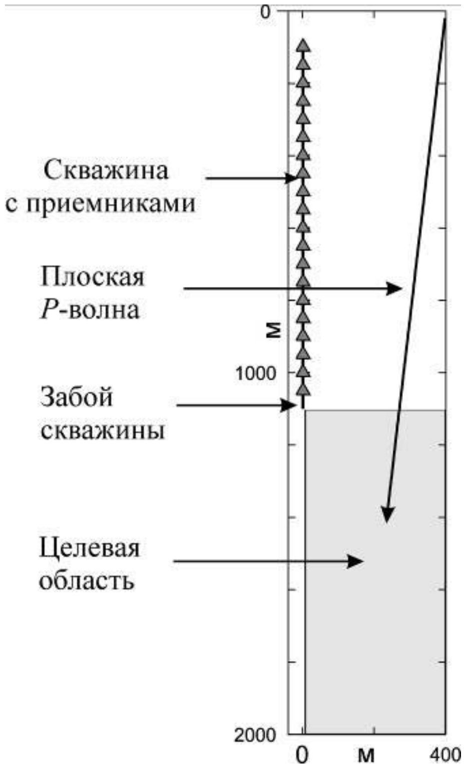
$$B < \vec{m} >= \vec{u}^{\,obs},$$

где $\vec{m} = (\lambda, \mu, \rho)^T$ – параметры среды, $\vec{u}^{\,obs}$ – данные наблюдений (сейсмограммы), B – нелинейный оператор, неявно определяемый уравнениями теории упругости. Для его решения предлагается использовать итерационный метод Ньютона:

$$DB(\vec{m}_k) < \vec{m}_{k+1} - \vec{m}_k >= \vec{u}^{\,obs} - B(\vec{m}_k)\,. \qquad (1)$$

Наиболее важным аспектом, который необходимо учитывать при разработке численных методов решения данного линейного операторного уравнения, является компактность оператора и, следовательно, отсутствие у него ограниченного обратного. При выполнении конечномерной аппроксимации, которая заключается в приближении данного уравнения системой линейных алгебраических уравнений конечной размерности, возникает противоречивая ситуация. С одной стороны, чем больше размерность привлекаемых нами конечномерных пространств, тем точнее аппроксимация самого линейного оператора и правой части. С другой стороны, в силу компактности оператора такое повышение неизбежно приводит к увеличению числа обусловленности получающейся при этом матрицы и, следовательно, ко все более и более жестким требованиям на точность измерения сейсмических полей, то есть на уровень погрешности в правой части получающейся системы линейных алгебраических уравнений. Таким образом, прежде чем приступать к выбору численного метода решения линейного уравнения, необходимо детально исследовать основные свойства оператора с тем, чтобы отчетливо представлять, какая аппроксимация нужна при заданном уровне помех и какого качества решение при этом будет получено.

Рис. 1. Геометрия наблюдений, используемая для анализа сингулярного разложения



Для выяснения ответов на эти вопросы в работе используется подход к анализу и построению численных методов решения линейных операторных уравнений с компактным оператором в гильбертовых пространствах, основанный на применении анализа его сингулярного разложения (в дальнейшем SVD-анализа). Следуя работам В.И. Костина, В.А. Чеверды и др. (2004, 2005 гг.) предлагается анализировать свойства решения с помощью усечения сингулярного разложения. Эта процедура заключается в том, что решение $\vec{x}$ системы линейных алгебраических уравнений $A\vec{x} = \vec{y}$, полученное методом наименьших квадратов, приближается вектором $\vec{x}_{[r]}$ (r- решением), который является проекцией искомого решения на линейную комбинацию r правых сингулярных векторов $\vec{x}_i$, соответствующих бóльшим по величине сингулярным числам (в дальнейшем такие векторы будем называть старшими сингулярными векторами). Число r привлекаемых сингулярных векторов контролирует обусловленность задачи и позволяет построить решение с приемлемой точностью, зная относительную ошибку во входных данных. Понятие r-решения обобщается на случай линейных уравнений с компактным оператором в гильбертовых пространствах. Можно показать, что такая компонента решения устойчива как относительно погрешности во входных данных, так и относительно погрешности, возникающей при дискретизации оператора. В данной работе для анализа сингулярного разложения было решено сосредоточиться на достаточно простой модели среды (см. Рис. 1), которая, однако, позволяет выявить основные свойства решения обратной задачи. А именно предполагается, что вмещающая среда однородна, и что в среде распространяется плоская продольная волна.

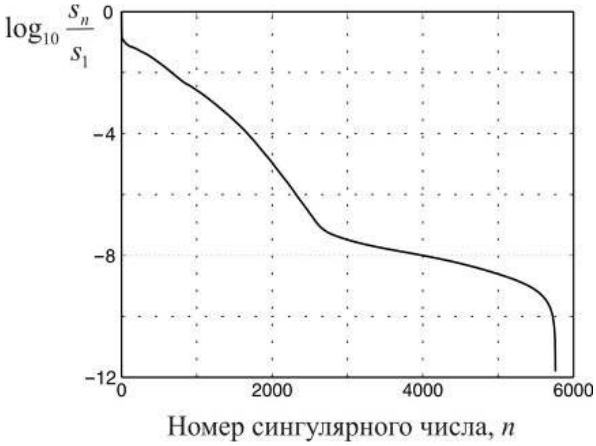


Рис. 2. Сингулярные числа оператора DB в логарифмической

В разделе 2.2 с учетом этих предположений выводится явный вид оператора DB. С этой целью используется приближение однократного рассеяния и явный вид функции Грина рассматриваемой задачи в однородной среде. Оператор DB оказывается матричным интегральным оператором с непрерывным ядром. Построение в работе проводится формально и не касается строгого обоснования того, что полученный оператор есть производная по Фреше исходного нелинейного оператора в гильбертовых пространствах. После ввода конечномерных базисов из элементарных ступенек в пространстве моделей и пространстве данных интегралы в операторе DB аппроксимируются конечными суммами, что и позволяет построить его матричную аппроксимацию.

В разделе 2.3 выполняется анализ сингулярного разложения построенной матрицы для геометрии наблюдений, изображенной на Рис. 1. Получающиеся в данном случае сингулярные числа представлены на Рис. 2. Видно, что они действительно быстро стремятся к нулю, что обуславливается компактностью исходного оператора. Считая допустимым число обусловленности равное 10^4 видно, что только проекция на 1500 старших сингулярных векторов может быть восстановлена с заданной точностью.

Одним из наиболее принципиальных вопросов, возникающих при решении обратной динамической задачи сейсмики, является выбор оптимальной параметризации среды. Наиболее распространенными наборами параметров для описания упругих сред являются, в дополнение к плотности (ρ), параметры Ламе (λ, μ), скорости продольных и поперечных волн (V_P, V_S) и упругие импедансы ($IP = \rho V_P, IS = \rho V_S$). Известно, что эти параметры не эквивалентны при решении обратной задачи.

Для выбора наиболее подходящей параметризации для обращения прежде всего был исследован эффект связанности параметров. Два параметра являются связанными, если при возмущении одного из них решение обратной задачи покажет, что произошло возмущение не только этого, основного параметра, но и другого, формально от него независимого. Надо отметить, что при точном решении полной обратной задачи такой связанности параметров, как правило, не существует. Она возникает только при построении численного, приближенного решения. При анализе поведения проекции неоднородности по каждому из параметров на старшие сингулярные векторы в работе показывается, что наименее связанными параметрами являются упругие импедансы.

Следующим этапом являлось изучение расположения устойчивых подпространств относительно какого-нибудь стандартного базиса в пространстве моделей, используемого для дискретизации оператора. Под устойчивыми подразумеваются подпространства в пространстве моделей, являющиеся линейной оболочкой правых старших сингулярных векторов. Проекции именно на эти подпространства являются определяемыми с заданной точностью составляющими решения исходного линейного операторного уравнения. Ясно, что чем ближе стандартный базис к устойчивому подпространству, тем точнее будет восстанавливаться разложенное по нему решение. Для наглядности мы использовали тригонометрический базис и в качестве характеристики отклонения брали угол между линейной оболочкой различного числа старших сингулярных векторов и каждой из гармоник. На Рис. 3 показаны линии уровней этих углов в градусах для различных параметров среды. Видно, что углы, соответствующие Р-импедансу для фиксированного числа сигулярных векторов, существенно меньше, чем для других параметров. Поэтому можно прогнозировать высокое качество восстановления изменчивости упругих импедансов. Важной особенностью при этом является поведение плотности в этом базисе. Этот параметр оказывается "почти" ортогональным весьма большому числу старших сингулярных векторов и поэтому вряд ли может быть восстановлен при достигаемых на практике точностях. Примечательным является также то, что углы существенно увеличиваются при уменьшении частоты. Это проявление так называемой проблемы определения трендовой составляющей, согласно которой только высокочастотные компоненты решения могут быть восстановлены. Поэтому гладкая компонента, отвечающая за времена пробега волн, не может быть определена с использованием рассматриваемой системы наблюдений. Отсюда можно сделать вывод, что целесообразно выполнение только первого шага итерационного процесса Ньютона, то есть линейного обращения, в решаемой задаче. Последующие шаги не позволят улучшить результат в силу незнания геометрического расхождения. Для его определения необходимо привлечение в итерационный алгоритм кинематических методов.

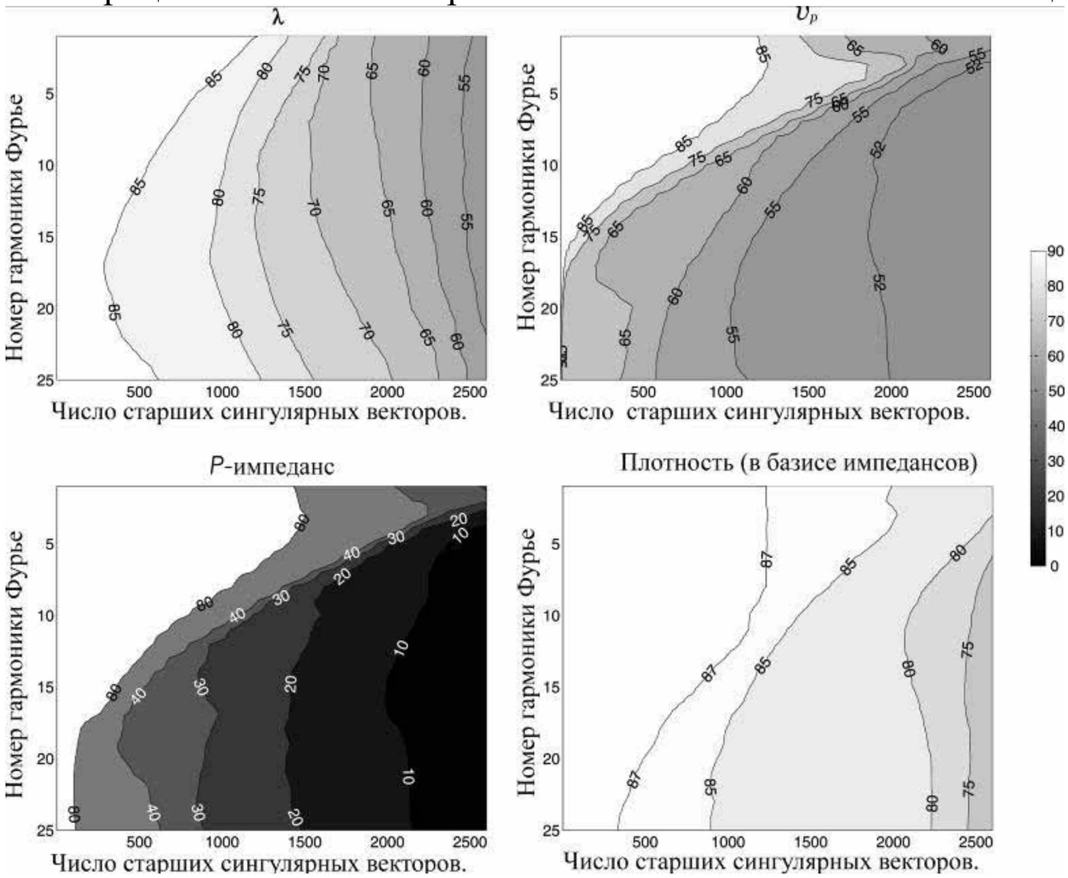


Рис. 3. Линии уровней углов (в градусах) между гармониками Фурье и линейной оболочкой старших сингулярных векторов для различных параметров

В третьей главе разрабатывается, программно реализуется и тестируется алгоритм численного решения обратной задачи в произвольной неоднородной среде. При этом учитываются результаты, полученные во второй главе, согласно которым выполняется только первый шаг процесса Ньютона, то есть линеаризованное обращение. В качестве неизвестных параметров выступают только упругие импедансы.

Для решения линейного уравнения (1) применяется итерационный метод LSQR, предложенный в работе C.C. Paige (1982). Аналитически последовательность этого метода эквивалента последовательности сопряженных градиентов для уравнения, приведенного к нормальной форме. Как и для всех методов подобного типа, для реализации LSQR необходимо только знание действия операторов DB и DB^T на векторы из соответствующих пространств. Следуя работам A. Tarantola, в разделе 3.2 показывается, что эти действия вычисляются как решение задач прямого моделирования со специальными правыми частями. Оператор DB^T при этом задается сопряженной задачей, решаемой в обратном времени. Необходимо отметить, что метод LSQR играет в данном случае роль регуляризирующего алгоритма с параметром регуляризации, равным числу итераций.

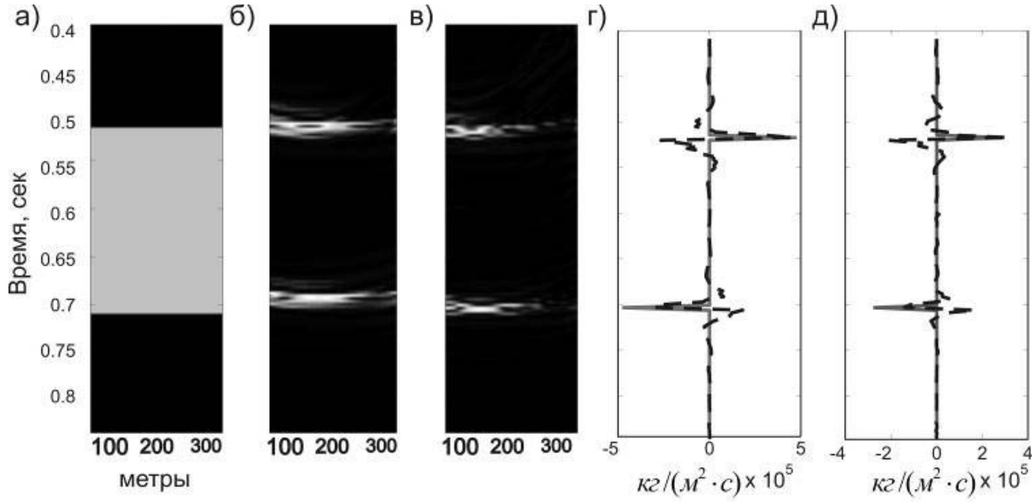


Рис. 4. Результат решения обратной задачи для горизонтально слоистой среды а) истинная среда; б,в) восстановленные границы разрывов P и S импедансов; г,д) амплитуды истинного (сплошная линия) и восстановленного разрыва P и S импедансов вдоль вертикальной линии, соответствующей 150м по горизонтали. Ошибка определения амплитуды на нижней границе связана со смещением области освещения.

Для моделирования волновых полей в работе используется модификация конечно-разностной схемы второго порядка на сдвинутых сетках, предложенной в работе J. Virieux (1986). В качестве неотражающих условий для ограничения расчетной области применяются идеально согласованные поглощающие слои (PML), предложенные в работе J.P. Berenger (1994). Программный код, реализующий данную схему, был разработан в Лаборатории вычислительных методов геофизики ИНГГ СО РАН и модифицирован соискателем для использования в решении обратной задачи. Все программное обеспечение, созданное в ходе выполнения, работы написано на языке программирования C++. Раздел 3.3. посвящен тонкостям реализации алгоритма и разработанному программному обеспечению.

В разделе 3.4 приводятся результаты решения обратной задачи по синтетическим данным для сред различной степени сложности. В качестве первого теста использовалась среда с одним точечным рассеивателем. Было показано, что с числом итерации метода LSQR локализуется в пространстве, а так же подавляются ошибки в решении (известные в сейсморазведке как артефакты миграции), связанные с ограниченностью системы наблюдений и с наличием в данных обменных волн. В качестве следующего тестового примера была взята среда с двумя горизонтальными отражающими границами. Результат решения обратной задачи приведен на Рис. 4. Видно, что местоположение (по времени) и амплитуды разрывов упругих импедансов восстановлены достаточно точно. Однако форма полученного решения осложнена формой импульса зондирующего сигнала. Это было предварительно предсказано с использованием SVD-анализа.

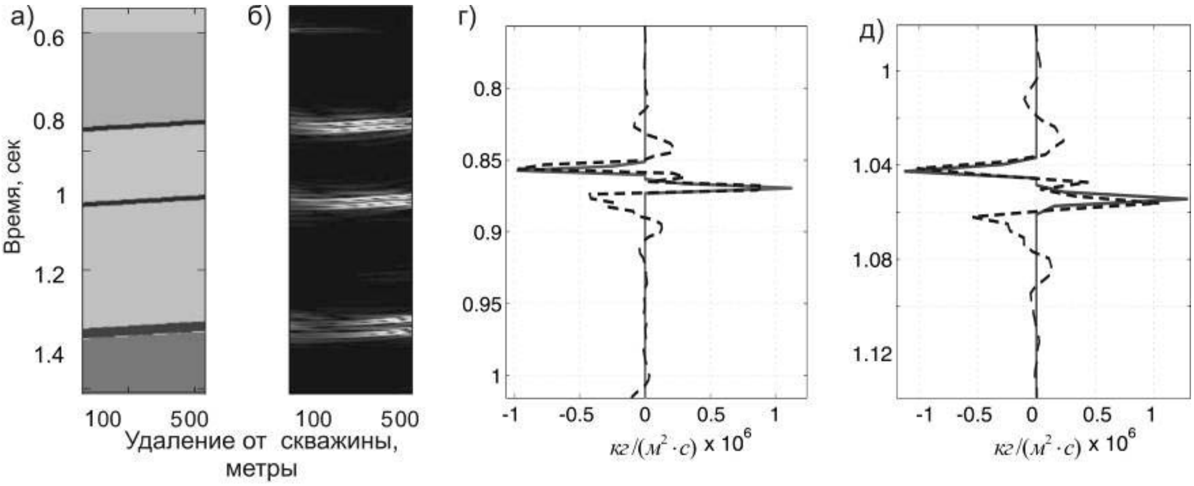


Рис. 5. Результат решения обратной задачи для среды с наклонными тонкослоистыми пропластками а) истинная среда; б) восстановленные границы разрыва Р-импеданса; в) амплитуды истинного (сплошная линия) и восстановленного разрыва Р импеданса на первой границе вдоль вертикальной линии, соответствующей 225м по горизонтали; г) амплитуды истинного (сплошная линия) и восстановленного разрыва Р импеданса на второй границе вдоль вертикальной линии, соответствующей 300м по горизонтали.

Следующим этапом была проверка работоспособности алгоритма в средах с наклонными границами. В качестве теста была взята среда с двумя границами, верхняя из которых наклонена. Алгоритм позволил восстановить как геометрию этих границ, так и контрастность среды. Для этого примера в работе приведены графики сходимости невязки решения, а также относительной разности между последующим и предыдущим решениями, которую можно использовать в качестве критерия остановки итераций LSQR. В заключении данной главы приведен пример решения обратной задачи для достаточно сложной наклонно слоистой среды с тонкими пропластками (см. Рис. 5). Было показано достаточно высокое качество восстановления наклонов границ, их местоположений, а также амплитудных характеристик в областях с хорошей освещенностью (то есть таких, отраженные лучи от которых достигают приемников колебаний). Использование нескольких источников позволило проследить границы и определить амплитуды разрывов на различных их участках.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Обратная динамическая задача определения упругих параметров среды ниже забоя скважины по данным вертикального сейсмического профилирования с выносным источником решалась методом Ньютона на основе двумерных уравнений изотропной теории упругости. Предложенное в работе решение выгодно отличается от известных тем, что оно основано на анализе сингулярного разложения линеаризованного оператора динамической теории упругости. С помощью такого анализа в работе впервые было проведено строгое исследование структуры получаемых решений при заданном уровне помех в данных.

Преимуществом разработанного алгоритма численного решения обратной задачи является то, что он нацелен на определение исключительно положений и амплитуд разрывов упругих импедансов среды, так как именно они являются наиболее точно определяемыми параметрами при решении обратной задачи. Плотность среды при этом восстановлена быть не может. Теоретически доказано, что использование в качестве неизвестных в дополнение к плотности параметров Ламе либо скоростей продольных и поперечных волн, как это делается в некоторых работах, дает для рассматриваемой системы наблюдений неверный результат, так как эти параметры являются сильно связанными друг с другом. Поэтому неоднородность в среде только по одному из них проявляется в решении на остальных параметрах. По-видимому, именно этот эффект ошибочно зачастую трактуется как правильное восстановление плотности среды. Созданный алгоритм выполняет только первый шаг процесса Ньютона, то есть работает в линейном приближении, так как было доказано, что применяемое другими авторами нелинейное обращение в решении поставленной задачи не дает улучшения результатов, а лишь затрачивает вычислительные ресурсы. Проведенный анализ сингулярного разложения показал, что с использованием только динамического подхода при рассматриваемой системе наблюдений невозможно восстановление скоростей распространения волн ниже забоя скважины. Поэтому последующие шаги не позволяют уточнить ни местоположения границ в среде, ни амплитуд разрывов упругих параметров на них в силу незнания геометрического расхождения.

Разработанное программное обеспечение основано на применении современных методов вычислительной математики. С целью решения задачи моделирования распространения волнового процесса используется эффективная конечно-разностная схема Вирьё на сдвинутых сетках. Ограничение расчетной области происходит при помощи идеально согласованных слоев (PML). Решение системы линейных уравнений выполняется широко используемым и зарекомендовавшим свою эффективность при решении многих задач итерационным методом LSQR.

Путем решения обратной задачи на основе синтетических данных для различных сред была показана эффективность алгоритма и достоверность получаемых результатов как в простых средах (с точечным рассеивателем, с горизонтальным слоем, с одним наклонным слоем), так и в достаточно сложноустроенных средах (с несколькими наклонными слоями). При этом не накладываются ограничения ни на макроскоростную модель, ни на углы наклонов отражающих границ, так как используется конечно-разностное моделирование волновых полей. Естественно, что это требует существенных временных затрат, но, как было показано, при использовании небольшого количества источников задачу удается решить на современных персональных компьютерах в реальные сроки. Увеличение числа источников влечет необходимость продолжения разработки алгоритма, основным аспектом которой должно быть построение эффективного предобуславливателя для линеаризованного оператора прямой задачи. Это позволит снизить количество итераций LSQR, и, следовательно, существенно увеличит быстродействие всей процедуры обращения.

Список основных работ по теме диссертации

Рецензируемые журналы по Перечню ВАК

1. Сильвестров И. Ю. Анализ сингулярного разложения линеаризованного оператора динамической теории упругости для случая вертикального сейсмического профилирования // Вычислительные технологии. – 2007. – Т. 12. – №6. – С. 90-100.
2. Сильвестров И.Ю. Прогнозирование строения среды ниже забоя скважины с помощью многокомпонентного обращения данных ВСП с выносным источником // Технологии сейсморазведки. – 2007. – № 3. – С. 44-50.

Труды конференций

3. Сильвестров И.Ю. Применение SVD-анализа для выбора оптимальной параметризации среды при решении обратной задачи вертикального сейсмического профилирования // Сб. тр. XI Всероссийской школы-семинара «Современные проблемы математического моделирования». – Ростов н/Д, Ростовский гос. унив., 2005, с. 452. – С. 369-376.

Расширенные тезисы международных конференций

4. Silvestrov I. Full waveform inversion of multicomponent offset VSP data for recovery impedances bellow borehole bottom // Extended Abstracts 69th EAGE Annual Conference&Exhibition. – 2007. – London. UK. – CD-ROM. – P.4. ISBN 978-90-73781-54-2.
5. Silvestrov I. Full waveform inversion of VSP data for prediction of impedances below borehole bottom // Extended Abstracts EAGE Conference& Exhibition «Geosciences - To Discover and Develop». – 2006. – Saint Petersburg. – CD-ROM. – P.4. ISBN 978-90-73781-64-1.

Тезисы российских и международных конференций

6. Сильвестров И.Ю. Анализ сингулярного разложения линеаризованного оператора динамической теории упругости для задачи прогнозирования строения среды ниже забоя скважины по данным НВСП // Тез.докл. VII Ежегодной международной Конференции «Гальперинские чтения-2007». – М. – 2007. – С.50-54.
7. Сильвестров И.Ю. Итерационный метод решения обратной динамической задачи вертикального сейсмического профилирования // Тез.докл. III Всероссийской конференции «Актуальные проблемы прикладной математики и механика». – Абрау-Дюрсо. – 2006. – С.94-96.
8. Сильвестров И.Ю. О выборе параметров среды при обращении данных вертикального сейсмического профилирования // Тез.докл. V Международной научно-практической геолого-геофизической конференции-конкурса молодых ученых и специалистов "Геофизика 2005". – Санкт-Петербург. – С.262-264

Технический редактор О.М. Вараксина

Подписано к печати 25.04.2008

Бумага 60x84/16. Бумага офсет № 1. Гарнитура Таймс. Офсетная печать

Печ. л. 0.9. Тираж 100. Заказ № 7

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