

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Институт кибернетики
Направление подготовки Прикладная математика и информатика
Кафедра прикладной математики

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

**Оценка поглощающих и отражающих свойств геологических сред по
данным продольного вертикального сейсмического профилирования**

УДК 550.8.053:519.2

Студент

8БМ41	Королькова Елена Сергеевна			
Группа	ФИО		Подпись	Дата

Руководитель

доцент	Степанов Дмитрий Юрьевич	К.Т.Н.		
Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата

КОНСУЛЬТАНТЫ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

доцент	Конотопский Владимир Юрьевич	К.Э.Н.		
Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата

По разделу «Социальная ответственность»

доцент	Анищенко Юлия Владимировна	К.Т.Н.		
Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Зав. кафедрой	Гергет Ольга Михайловна	К.Т.Н.		
Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата

Томск – 2016 г.

Министерство образования и науки Российской Федерации
 Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
 высшего образования
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
 ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Институт кибернетики
 Направление подготовки Прикладная математика и информатика
 Кафедра Прикладной математики

УТВЕРЖДАЮ:

Зав. кафедрой

_____ Геррет О.М.
 (Подпись) (Дата) (Ф.И.О.)

ЗАДАНИЕ

на выполнение выпускной квалификационной работы

В форме:

магистерской диссертации

Студенту:

Группа	ФИО
8БМ41	Корольковой Елене Сергеевне

Тема работы:

Оценка поглощающих и отражающих свойств геологических сред по данным продольного вертикального сейсмического профилирования

Утверждена приказом директора Института кибернетики (дата, номер)

Срок сдачи студентом выполненной работы: (дата)

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

Исходные данные к работе	Реальные данные продольного вертикального сейсмического профилирования скважин месторождений Томской области.
Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов	Аналитический обзор литературных источников по заданной тематике. Анализ существующих моделей распространения сейсмических волн в геологических средах. Определение общих подходов к задаче оценки поглощающих и отражающих свойств геологических сред. Разработка и анализ алгоритмов оценок поглощающих и отражающих свойств на реальных данных скважин месторождений Томской области.
Перечень графического материала	
Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы	

Раздел	Консультант
Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	Конотопский Владимир Юрьевич
Социальная ответственность	Анищенко Юлия Владимировна
Английский язык	Сидоренко Татьяна Валерьевна
Названия разделов, которые должны быть написаны на русском и иностранном языках:	

Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику	
---	--

Задание выдал руководитель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
доцент	Степанов Дмитрий Юрьевич	к.т.н.		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
8БМ41	Королькова Елена Сергеевна		

Реферат

Ключевые слова: вертикальное сейсмическое профилирование, поглощение, коэффициенты отражения, геологическая среда, сейсмические волны, трасса, модель, годограф, интервальные скорости.

Объектом исследования является геологическая среда. Предмет исследования – отражающие и поглощающие свойства геологических сред.

Целью работы является исследование методов оценки поглощающих и отражающих свойств геологических сред по данным продольного вертикального сейсмического профилирования.

В процессе исследования проводился анализ литературы по теме, анализ существующих моделей распространения сейсмических волн в геологических средах, определялись общие подходы к задаче, разрабатывались и анализировались алгоритмы оценок поглощающих и отражающих свойств на реальных данных скважин месторождений Томской области.

В результате исследования проанализированы и реализованы основные методы оценки поглощающих и отражающих свойств геологических сред по данным продольного вертикального сейсмического профилирования на основе реальных данных скважин месторождений Томской области, сделаны соответствующие выводы.

Степень внедрения: полученные результаты использованы при составлении отчетов, накопленный материал будет использован для построения алгоритмов и программ поиска поглощающих и отражающих характеристик геологических сред.

Область применения: поиск месторождений нефти и газа.

В будущем планируется продолжить исследование моделей геологических сред с помощью частотно-зависимых моделей поглощения.

Определения

В данной работе применены следующие термины с соответствующими определениями:

1. **Сейсмическая разведка:** исследование геологического строения земной коры, основанное на изучении распространения в ней упругих волн.
2. **Сейсмическая волна:** упругая волна в геологической среде.
3. **Сейсмическая трасса:** совокупность сейсмических сигналов, зарегистрированных в пункте приема в течение заданного времени после возбуждения упругой волны.
4. **Сейсмограмма:** совокупность сейсмических трасс, сгруппированных по общему признаку.
5. **Продольная волна (Р-волна):** сейсмическая волна, за фронтом которой колебания частиц среды происходят в направлении ее распространения.
6. **Падающая волна:** сейсмическая волна, распространяющаяся от источника вглубь геологической среды.
7. **Отраженная волна:** сейсмическая волна, отразившаяся от границы раздела геологических сред с различными акустическими жесткостями.
8. **Форма сейсмической волны:** распределение амплитуд и энергии сейсмической волны во времени и пространстве.
9. **Амплитуда сейсмической волны:** величина отклонения частиц среды от положения равновесия при прохождении сейсмической волны.
10. **Годограф (сейсмический):** зависимость времени пробега сейсмической волны от расстояния между пунктами возбуждения и приема.
11. **Вертикальный годограф:** сейсмический годограф, построенный по наблюдениям в скважине на вертикальном профиле.
12. **Пластовая скорость:** значение скорости сейсмической волны в однородном пласте.

13. **Модель:** некоторая реально существующая или мысленно представляемая система, которая, замещая в познавательных процессах другую систему – оригинал, находится с ней в отношении сходства (подобия), благодаря чему изучение модели позволяет получить информацию об оригинале, о его существенных свойствах и отношениях.

Оглавление

Введение.....	8
1. Задачи и методы сейсмической разведки	12
1.1. Основные задачи и методы сейсморазведки.....	12
1.2. Метод вертикального сейсмического профилирования	14
1.3. Поглощение и отражение сейсмических волн в геологических средах.....	17
1.3.1. Отражение сейсмических волн.....	17
1.3.1. Поглощение сейсмических волн	20
1.4. Обзор существующих методов оценки отражающих и поглощающих свойств геологических сред	24
2. Модели распространения сейсмических волн в геологических средах	27
2.1. Амплитудные модели	28
2.2. Модели частотно-зависимого поглощения	30
2.2.1. Существующие модели частотно-зависимого поглощения	30
2.2.2. Разработанная модель частотно-зависимого поглощения.....	32
3. Исследование алгоритмов оценки параметров поглощающих сред.....	35
3.1. Амплитудный метод оценки параметров поглощающих сред.....	35
3.2. Исследование моделей частотно-зависимого поглощения	38
3.2.1. Исследование существующих моделей частотно-зависимого поглощения	38
3.2.2. Анализ разработанной модели частотно-зависимого поглощения ...	40
Заключение	45
Список использованных источников	47

Введение

Задача поиска залежей нефти и газа в земной коре является актуальной задачей и привлекает исследователей из различных областей науки и техники своей сложностью и разнообразием методов решения. Сложность поиска месторождений нефти и газа заключается в том, что регистрируемое различными методами сейсморазведки волновое поле и получаемые по нему характеристики разреза отражают геологические параметры среды, но несут их косвенно.

Ввиду особого строения земной коры (среда неупругая, в большинстве своем неоднородная, наблюдаются разломы, наклонные границы сред, слои различной мощности), влияния интерференции, влияния отражения от границ сред с различными характеристиками, диссипативных свойств рассеивания и поглощения, а также других факторов, регистрируемые пространственно-временные сигналы (волны) характеризуются повышенной многофакторностью, имеют интерференционный характер, подвергаются влиянию помех.

Ввиду указанных причин решение задач сейсморазведки: прямых – расчета модельных волновых полей различной сложности на основе задаваемых параметров сейсмогеологического разреза, и обратных – определения внутреннего строения земной коры, ее геологических характеристик по зарегистрированному полю упругих колебаний (рис. 1), становится более сложным и трудоемким.

Существующие идеально-упругие интерпретационные модели, используемые большинством исследователей в качестве приближенного представления реальной геологической среды, не позволяют получить информацию о наличии нефти и газа в пласте-коллекторе из-за ряда причин, одними из которых могут быть грубое упрощение модели или отсутствие в ней важных характеристик (например, учета поглощения).

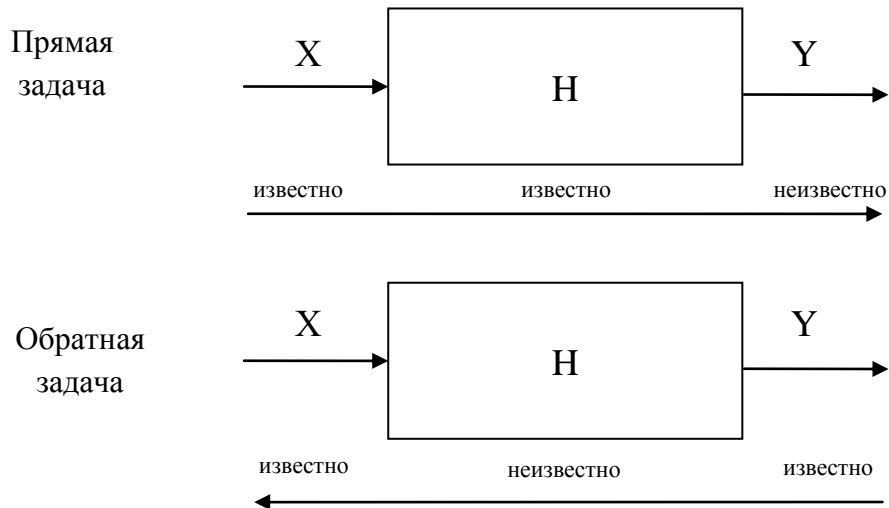


Рисунок 1 – Схема прямой и обратной задачи сейсморазведки. X – входной сигнал, Н – характеристики геологической среды, Y – регистрируемый отклик среды

Теоретические исследования в области физики горных пород, наземные, скважинные и лабораторные исследования показывают, что для расчета модельных волновых полей, наиболее близких к реальным, в модели следует учитывать неупругие свойства насыщенных пористых сред. Исследования [1] показали, что на характеристики распространяющихся в насыщенных пористых средах упругих колебаний влияет их насыщение углеводородами: наблюдаются аномально высокие величины поглощения в широком диапазоне частот.

Один из классов задач, решаемых по данным продольного вертикального сейсмического профилирования (по данным с ближнего пункта взрыва (БПВ) ВСП), относится к решению обратных задач и оценке физических характеристик волнового поля. По физическим характеристикам геологической среды можно оценивать значения параметров разреза: скорости, плотности, поглощение и т.д. В отличие от неперодольного ВСП (где наблюдаются все типы волн: продольные, поперечные, преломленные, дифрагированные и т.д.), использование данных продольного ВСП позволяет представлять систему распространения волн на БПВ ВСП в виде нормального падения луча на

границы раздела сред, что упрощает создание и исследование соответствующих математических моделей геологических сред.

Задачей включения в модель геологической среды поглощения и отражения занимались как иностранные, так и отечественные исследователи. Зачастую исследователи не разделяют такие параметры как затухание волн и поглощение (Воскресенский, Авербух и др.), поскольку оба параметра тесно взаимосвязаны, трудноразделимы и количественно сложно обусловлены. Некоторые выводы выражений для количественной оценки поглощения и отражения получены практически, по данным экспериментов или теоретически (Авербух, Трапезникова, Рыжков). При анализе имеющейся литературы по теме сделан вывод о том, что коэффициенты отражения и поглощения в неупругих геологических средах описываются сложными выражениями, их исследование в общем виде затруднено, а выполненные численные расчеты для отдельных наборов параметров иногда приводят различных авторов к различным выводам.

Описываемые многими авторами задачи оценки поглощения и отражения решаются в виде прямых задач сейморазведки. Решение же обратных задач (оценка поглощающих и отражающих свойств геологических сред) встречается не часто и приводит к выводу о том, что решение обратных задач сводится к получению некоторых других характеристик, косвенно связанных с поглощением и отражением (Рапопорт, Рыжков, Авербух).

Ввиду вышеизложенного, проблемы оценки отражающих и поглощающих свойств геологических сред имеют серьезный теоретический задел.

Объектом исследования является геологическая среда и распространяющиеся в ней сейсмические волны. Предмет исследования – отражающие и поглощающие свойства геологических сред.

Цель работы – исследовать методы оценки поглощающих и отражающих свойств геологических сред по данным продольного вертикального сейсмического профилирования.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие **задачи:**

1) провести анализ существующих моделей распространения сейсмических волн в геологических средах;

2) определить общие подходы к оценке поглощающих и отражающих свойств геологических сред;

3) реализовать и провести исследования основных методов оценки поглощающих и отражающих свойств геологических сред по данным продольного вертикального сейсмического профилирования.

Решению вышеуказанных задач и посвящены следующие разделы магистерской диссертации.

1. Задачи и методы сейсмической разведки

1.1. Основные задачи и методы сейсморазведки

Беря свое начало в XVII в. и получив наиболее широкое развитие в конце XIX и XX в., сейсморазведка по сей день остается ведущим методом геофизических исследований геологической толщи, основанным на изучении искусственно возбуждаемых упругих волн [2].

Основная задача сейсморазведки – восстановление упругих параметров среды по зарегистрированному искусственно возбужденному волновому полю. Качество зарегистрированных данных искусственно возбужденного поля в сейсморазведке определяется особенностями методов сейсморазведки.

Возбуждение упругих волн от источника лежит в основе сейсмических методов. В результате воздействия на среду источником возбуждений, в геологической среде возникает реакция в виде периодического колебательного процесса и как следствие - образованием упругой волны. Распространяясь в объеме горных пород и попадая на границы раздела сред с различными свойствами, упругая волна изменяет свое направление и динамические свойства, так образуются новые волны.

Точки наблюдения – сейсмоприемники - размещаются на пути следования волн, в которых механические колебания упругих волн преобразуются в переменный электрический ток. Электрические импульсы вырабатываются в сейсмоприемниках при перемещении частиц горных пород вблизи их корпуса, а затем они откладываются на оси времени. Зависимости, получаемые таким образом, называются сейсмотрассами (рис. 2).

Зарегистрированные сейсмотрассы объединяются в первичный полевой материал сейсморазведки – сейсмограммы (рис. 3). Далее сигналы от приемников подвергаются процедурам предобработки: усилению, фильтрации шумов и преобразований в цифровую форму.

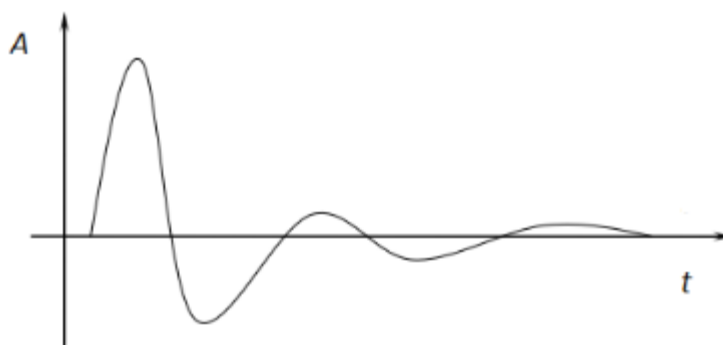


Рисунок 2 – Сейсмограмма, t – время, A – амплитуда

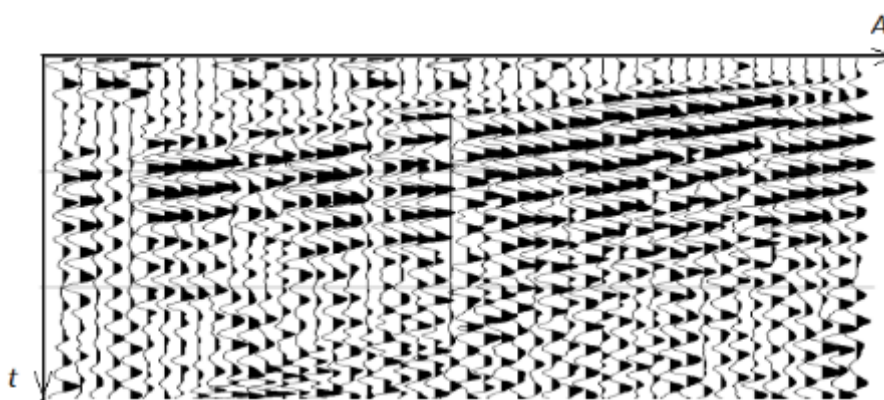


Рисунок 3 – Сейсмограмма, t – время, A – амплитуда

Регистрация волн осуществляется двумя различными методами: наземными и скважинными методами сейсморазведки. В случае наземных методов получения сейсмической информации (например, МОГТ – метод общей глубинной точки) сейсмические колебания возбуждаются в источниках и регистрируются в точках приема на поверхности земли. В скважинной сейсморазведке (ГИС – геофизические методы исследования скважины, одним из методов которого является ВСП – вертикальное сейсмическое моделирование) искусственно возбуждаемая упругая волна регистрируется в стволе скважины, а не на дневной поверхности, что позволяет более полно описывать околоскважинное пространство.

В рамках магистерской диссертации используется скважинный метод сейсморазведки – ВСП, по реальным материалам которого исследованы основные оценки отражающих и поглощающих характеристик геологических

сред.

1.2. Метод вертикального сейсмического профилирования

Как метод скважинных, околоскважинных и межскважинных сейсмических исследований, метод вертикального сейсмического профилирования (ВСП) предназначен для повышения геолого-экономической эффективности разведки и эксплуатации месторождений. Метод ВСП подразумевает изучение процессов распространения сейсмических волн во внутренних точках геологических сред. При проведении наблюдений один из двух элементов - источник возбуждения или приемник упругих колебаний - размещается и передвигается с одинаковым шагом по глубине в стволе скважины, а второй – располагается на дневной поверхности или в другой скважине. К разведочным возможностям метода ВСП относятся: экспериментальное изучение всего процесса формирования волновой ситуации, определение влияния на волновое поле различных элементов разреза, определение природы регистрируемых волн, осуществление их стратиграфической привязки и т.д. [3].

При использовании метода ВСП следует учитывать отличительные особенности и преимущества данного скважинного метода.

Во-первых, с помощью метода проводится не только изучение наблюдаемого волнового поля, сформировавшегося на дневной поверхности, но и сам процесс его формирования. Одновременно выделяются, прослеживаются и изучаются возбуждаемые в источнике, а затем образовавшиеся на неоднородностях среды в данном методе прямые, отраженные, продольные, поперечные и обменные волны, кратные, преломленные волны.

Во-вторых, ВСП позволяет исследовать околоскважинное и межскважинное пространство на значительных расстояниях от скважины и в большом диапазоне геологических условий (не только в интервале глубин,

вскрытых скважиной, но и глубже забоя). В то время как традиционные геофизические (электрические, акустические и др.) скважинные измерения изучают разрез только на небольшом расстоянии от ствола скважины.

В-третьих, являясь одновременно как сейсмическим, так и скважинным методом, ВСП является связующим звеном для наземной сейсморазведки и методов ГИС. По сравнению с наземной сейсморазведкой и ГИС, ВСП позволяет: достичь близкой к ГИС разрешенности при исследовании геологического разреза вдоль ствола скважины и распространять полученные характеристики разреза на околоскважинное пространство.

К модификациям ВСП относят два метода: продольное и не продольное вертикальное сейсмическое профилирование. Различие методов заключается во взаимном расположении точек приема (обозначены синим) и источников колебаний (обозначены красным)[3]. Системы наблюдений схематически изображены на рисунке 4.

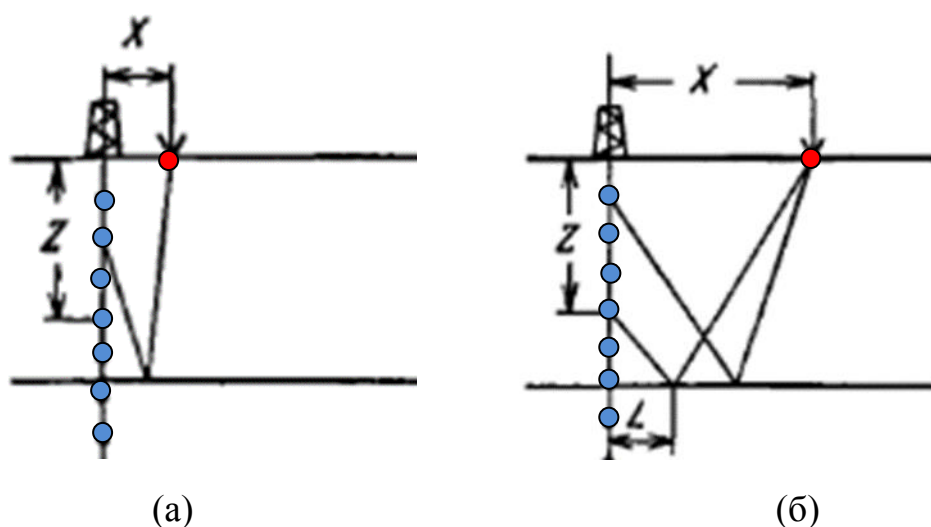


Рисунок 4 – (а) – продольное ВСП (расстояние $X \ll Z$), (б) – не продольное ВСП (НВСП) в скважинах, красным точками обозначены пункты возбуждения сигнала, синими – пункты приема сигнала

Продольное ВСП (с англ. zero-offset VSP) - стандартная модификация метода. В данной схеме наблюдений удаление ближнего ПВ (X) от скважины

считается пренебрежимо малым по сравнению с глубиной приема Z. Модификация метода применяется с целью изучения волнового поля, изучения затухания и поглощения волн при прохождении геологических сред, определения сейсмических скоростей (средних, пластовых, интервальных), стратиграфической привязки волн, а также для прогноза разреза ниже забоя скважины[3].

Первая волна на сейсмограмме ВСП, регистрируемая на всех глубинах и полученная от близкого к скважине пункта взрыва (БПВ) - падающая продольная волна (прямая волна). В случае возбуждения волны с более удаленного расстояния от БПВ (с расстояния, большего глубины устья скважины) в первых вступлениях может регистрироваться образующаяся на границах с резким увеличением скорости преломленная волна, могут регистрироваться преломленные волны, пришедшие от более глубоких границ[4].

Отличительной особенностью продольного ВСП является возможность представления системы распространения волн в виде нормального падения луча на границы раздела сред. Использование в качестве входных данных в данной работе данных продольного ВСП позволяет построить упрощенную математическую модель слоистой геологической среды с горизонтальными границами, с диссипативными свойствами (поглощением и рассеянием волн), в которой наблюдается явление нормального падения волны.

Модификация метода ВСП, в которой удаление фиксированного ПВ от скважины по отношению к глубине точки приема велико, называется непродольным ВСП (НВСП) (с англ. offset VSP). Построение упрощенной плоскопараллельной системы с нормальным падением луча, в данном методе невозможно. Метод НВСП используется при решении структурных, параметрических и литолого-стратиграфических задач [3].

Переход от точечных скважинных данных к распределенным сейсмическим – это нахождение соответствия между данными различного мас-

штаба, поэтому большое значение имеет точность их привязки. Важную роль на этом этапе играют данные ВСП, которое представляет собой соотношение «время-глубина» (годограф) в точке скважины в соответствии с данными волновых полей отраженных волн. Годограф падающей волны является графиком времен вступления прямой волны, определяющим вертикальное время пробега сейсмической волны от поверхности до заданной глубины. Значение скорости определяется наклоном годографа в каждой точке среды. Средняя скорость определяет осредненную характеристику среды от поверхности наблюдений до заданной глубины. Также по годографу определяются значения и других характеристик среды [4].

Использование данных ВСП позволяет получать характеристики геологической среды в глубинном масштабе, необходимые в дальнейшем для поиска залежей нефти и газа, а также производить привязку данных наземной и скважинной сейсморазведки и получать количественные характеристики геологических сред.

Задача исследования с физической точки зрения может быть сформулирована как задача построения сейсмологической модели среды по данным продольного ВСП, учитывающей поглощающие и отражающие характеристики геологических сред.

1.3. Поглощение и отражение сейсмических волн в геологических средах

1.3.1. Отражение сейсмических волн

Геологические среды в первом приближении можно считать упругими, поэтому теория распространения упругих (сейсмических) волн базируется на известной теории упругости, согласно которой абсолютно упругое тело - это тело, которое восстанавливает свою первоначальную форму и объем после прекращения действия приложенных к нему сил. Пластичными и неупругими называются тела и среды, в которых развиваются необратимые деформации.

При возбуждении упругой волны в среде создается волновой процесс из-за возникшего смещения и возмущения ее упругих частиц. Возникая вблизи источника, волновой процесс путем передачи деформаций и напряжений за счет упругих связей между частицами постепенно переходит в другие части среды. Так в среде возникают независимые от источника объемные и поверхностные упругие волны. Наибольшее применение в сейсморазведке нашли объемные волны: продольные (Р-волны) и поперечные (S-волны) волны. Скорости продольных волн V_P всегда больше, чем скорости поперечных V_S .

На рисунке 5 изображена прямая падающая волна P_1 . Попадая на горизонтальную границу, продольная волна будет отражаться и преломляться, порождая 4 типа вторичных волн: две в верхней среде (продольная отраженная волна P_{11} и поперечная отраженная волна P_1S_1) и две в нижней среде (продольная проходящая волна P_{12} и поперечная проходящая волна P_1S_2).

Волны, которые не меняют свой тип на границе разделов сред, называют монотипными (P_{11}, P_{12}), а меняющие – обменные (P_1S_1, P_1S_2).

Необходимым условием формирования отраженных волн является акустическая жесткость $\gamma = \rho V$, равная произведению плотности на скорость в каждом слое. Тогда коэффициент отражения на границе раздела двух сред будет выглядеть следующим образом [4]

$$K_{pp} = \frac{\rho_2 \cdot V_2 - \rho_1 \cdot V_1}{\rho_2 \cdot V_2 + \rho_1 \cdot V_1}, \quad (1)$$

где ρ_1, ρ_2 и V_1 и V_2 – плотность среды и скорость волны в среде падения плоской волны и среды ниже отражающей границы двух сред. Принято считать, что при $K_{pp} < 0,1$ наблюдаются слабые акустические границы (АГ), при $0,1 < K_{pp} < 0,5$ – средние АГ, а при $K_{pp} > 0,5$ – сильные АГ. Отраженные и преломленные волны представлены на рис. 6.

Когда частицы среды колеблются вдоль направления распространения волны и происходят деформации объема, наблюдаются продольные волны;

когда частицы колеблются в плоскости, перпендикулярной распространению, и вызываются деформации формы, - наблюдаются поперечные.

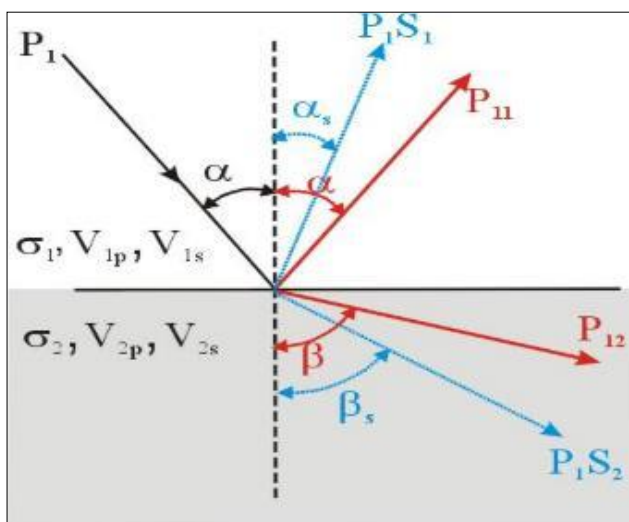


Рисунок 5– Распространение упругой волны в объеме горных пород

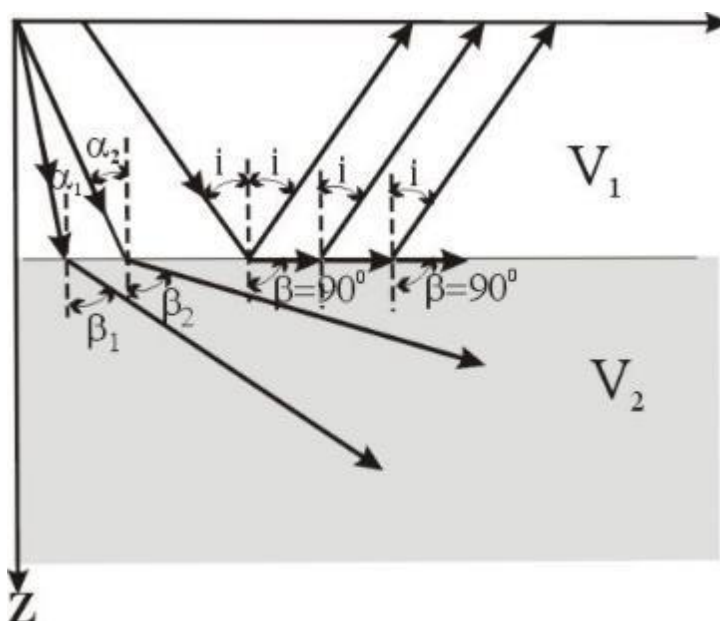


Рисунок 6– Отраженные (верхний слой со скоростью V_1) и преломленные (нижний слой со скоростью V_2) волны

Исследование отражающих свойств геологических сред позволяет определить акустические границы разделов сред, используемые для поиска залежей нефти и газа.

1.3.1. Поглощение сейсмических волн

Сейсмическими волнами принято называть волны напряжений, распространяющиеся в земной коре (вне зависимости от их типа и происхождения). В классической теории упругости предполагается, что распространение сейсмических волн в идеально упругих гомогенных средах не сопровождается необратимым превращением упругой энергии в энергию других видов, например, в тепловую.

Однако грунты как многокомпонентные системы, состоящие из твердой, жидкой и газовой компонент, не являются однородными (гомогенными) упругими средами. Они представляют собой гетерогенные (разнородные) среды, при распространении волн напряжений в которых происходит потеря энергии не только за счет геометрического расхождения волнового фронта, но и отражения, и преломления на границах, рассеяния энергии на различного рода неоднородностях, имеющихся в массиве горных пород, поглощения, как за счет неидеальной упругости, так и вязкости среды. В результате этого наблюдается процесс поглощения упругой энергии разнородной средой. Нахождение зависимости убывания упругих волн с расстоянием становится сложной задачей, определяемой лишь размерами неоднородности, физико-механическими свойствами удельных компонент, частотой колебаний и др. [5].

В зависимости от механизма потерь энергии волны выделяют несколько видов затухания: вызванноерасхождением, рассеянием на различных неоднородностях среды и поглощением.

Геометрическое или радиационное затухание, называемое расхождением, обуславливает по мере удаления от источника уменьшение удельной энергии на единицу площади фронта волны.

Рассеяние волн на любом препятствии зависит от его формы и размеров, а также от плотности и сжимаемости вещества препятствия. Если сжимаемость и плотность неоднородности такие же, как и у остальной среды, то она не

вызовет рассеяния. Если рассеивателей на пути первичной волны много, то по мере ее распространения произойдет накопление рассеянных волн.

Затраты энергии волны при прохождении геологической среды на тепловые потери, пластические и нелинейно-упругие деформации обуславливают поглощение.

Совместный учет эффектов рассеяния и поглощения предполагает понятие эквивалентного затухания. Обычно в толще грунтов все три вида затухания проявляются одновременно. Однако, в зависимости от состава и свойств самого грунта, разного удаления от источника, типа и частоты бегущей волны соотношение между ними может существенно изменяться.

Принято считать, что затухание вследствие расхождения подчиняется степенному закону:

$$A_l = \frac{A_0}{l^n}, \quad (2)$$

где n - показатель функции расхождения (обычно интенсивность обратно пропорциональна квадрату расстояния от источника), A_0 - начальная амплитуда колебаний, A_l - амплитуда колебаний на расстоянии l от источника.

Затухание же вследствие поглощения происходит по экспоненциальному закону:

$$A_l = A_0 e^{-a(f)l}, \quad (3)$$

Суммарное действие поглощения и рассеяния соотносятся следующим образом:

$$A_l = \frac{A_0}{l^n} e^{-a(f)l}, \quad (4)$$

где a - коэффициент поглощения, зависящий от частоты f , l - расстояние, пробегаемое волной.

Зависимость между декрементом поглощения, амплитудой и энергией волны представлена в табл. 1 [5].

Таблица 1– Зависимость между декрементом поглощения, амплитудой и энергией (по данным О. Ферч, Г. Шульце, 1953)

Декремент поглощения	Падение амплитуды, %	Падение энергии, %
0,1	9,5	18,1
0,2	18,1	33,0
0,3	25,9	45,1
0,4	33,0	55,1
0,5	39,3	63,2
0,6	45,1	69,9
0,7	50,3	75,3
0,8	55,1	79,8
0,9	59,3	83,5
1,0	63,2	86,5

Затухание сейсмических импульсов с расстоянием, не связанное с явлением отражения и преломления на границах, т.е. собственно поглощение, вводится при решении прямых задач в виде экспоненциального множителя $e^{-a(f)l}$, где a - коэффициент поглощения, зависящий от частоты f , l - расстояние, пробегаемое волной.

Введение экспоненциального множителя не является строго обоснованным теоретически и осуществляется только по аналогии с колебательными системами, которые описываются обыкновенными дифференциальными уравнениями, однако, для приближенного описания реально наблюдаемого явления поглощения введение экспоненциального множителя оправданно [5].

По результатам большинства экспериментов данные, не смотря на их значительный разброс, характеризуют линейную зависимость коэффициента поглощения от частоты (рис. 7) в широком диапазоне частот [5]. На рис. 7

приведена сводка данных по поглощению продольных сейсмических волн в горных породах по данным сейсмологии, сейсморазведки, акустического каротажа и лабораторных измерений.

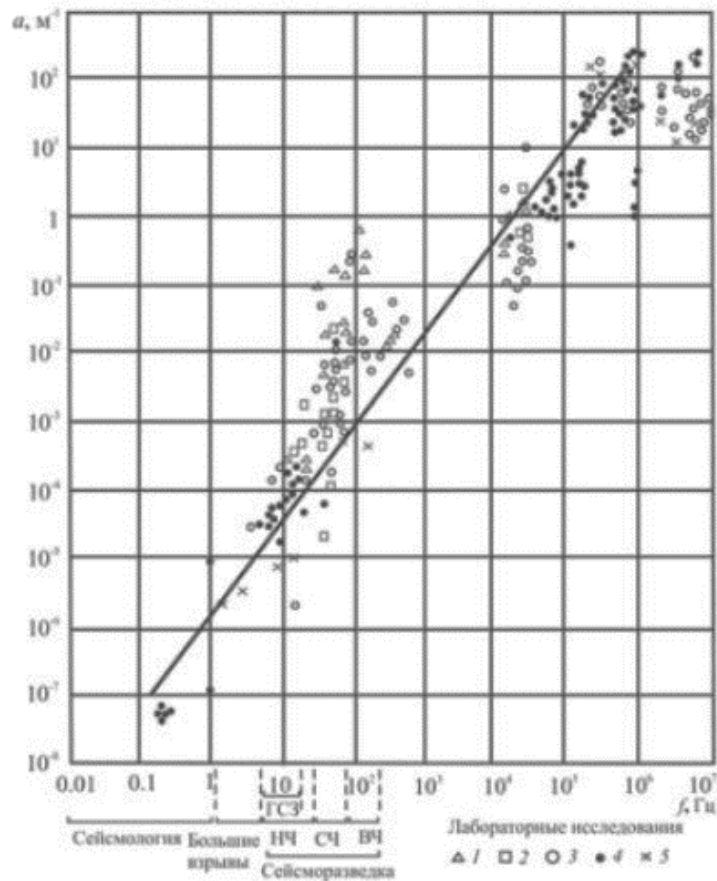


Рисунок 7– Зависимость коэффициента поглощения от частоты для пород различного литологического состава (Берзон и др . 1962) 1-3 – осадочные породы, 1 – рыхлые. 2 – слабосцементированные, 3 – плотные, 4 – изверженные, 5 – метаморфические

Ввиду более сильного затухания высокочастотных компонент волн, их спектры становятся более низкочастотными при удалении от источника колебаний, что вызывает изменение формы волны. Можно заключить, что в грунтах поглощение волн действует на спектральный состав сейсмических волн

аналогично фильтру низкой частоты (подавляется высокочастотная часть спектра).

Таким образом, при изучении геологических сред и дальнейшем построении их математических моделей важное место занимают поглощающие и отражающие свойства, хранящие в себе информацию об акустических границах слоев и свойствах слоев (наличии аномалий, вызванных наличием пор и его содержимого), необходимые при поиске зон коллекторов.

1.4. Обзор существующих методов оценки отражающих и поглощающих свойств геологических сред

В 50х годах XX века было впервые определено поглощение в скважинах [6, 7, 8] путем измерения амплитудных затуханий с глубиной. По результатам исследований [9] для мощной однородной толщи применима количественная интерпретация данных амплитудного затухания, а в остальных случаях погрешности измерений слишком велики.

В работах [10, 11, 12] используется время нарастания переднего фронта для оценки поглощения. Этот подход опирается не только на уменьшение амплитуды и энергии с глубиной, но и на распространение сигнала в поглощающей среде, при котором с глубиной изменяется форма сигнала (становится более низкочастотным) [13, 14, 15]. Однако помехоустойчивость этого подхода невысока [1].

Другой подход к оценке поглощения представлен в статьях [16, 17]. В нем для решения задач прогнозирования геологического разреза применяются фазочастотные характеристики сейсмических волн. Данный метод сводится к решению прямых задач и построению модели слоистых поглощающих сред с горизонтальными границами, характеристики которых вносят определенные изменения в проходящие через эти границы колебания. На примере четырех рассмотренных моделей слоистых поглощающих сред сделан вывод о том, что в области залежи углеводородов изменение фазовых

спектров отраженных волн может быть использовано при прогнозе нефтегазоносности осадочных толщ.

Авторами Рапопорт М.Б., Рапопорт Л.И. и Рыжковым В.И. разработаны возможные механизмы аномального поглощения и дисперсии скорости (метод ПДС – поглощение и дисперсия скорости) искусственно возбуждаемых волн в залежах нефти и газа [18, 19, 1]. Критерием поиска залежи является аномальное увеличение затухания (поглощения) и дисперсии фазовой скорости сейсмических волн для любого содержимого коллектора, кроме случая заполнения пор водой.

Результаты исследований по данным ВСП, обобщенные в работах Рыжкова В.И, используются для изучения связи затухания с литологией и характером насыщения горных пород. Однако, не смотря на актуальность задачи определения поглощения по данным ВСП во внутренних точках среды, автором подчеркивается, что объем таких исследований мал [1].

Чаще всего для количественной характеристики поглощения и построения моделей геологической среды используются следующие параметры, характеризующие поглощение:

а) коэффициент поглощения α , определяемый относительным изменением амплитуды колебаний на заданном расстоянии x_0 . Амплитуда волны $A(x)$ в поглощающих средах в таком случае с расстоянием убывает по следующему закону [5]

$$A(x) = A_0 e^{-\alpha(x-x_0)}, \quad (5)$$

где A_0 - амплитуда волны в начале распространения (x_0). Величина α измеряется в единицах обратного расстояния (м^{-1} , км^{-1});

б) логарифмический декремент поглощения ϑ , являющийся безразмерной величиной относительного изменения амплитуды колебаний на периоде или на длине волны λ [5]

$$\vartheta = \alpha \lambda = \alpha v / f, \quad (6)$$

где f - частота колебаний, а v - скорость волны;

в) добротность среды Q , являющаяся обратной величиной относительных потерь энергии на периоде колебаний:

$$Q = \frac{2\pi E}{\Delta E}.$$

Добротность связана с логарифмическим декрементом поглощения приближенным соотношением: $Q \approx \pi/\delta$.

Изучение коэффициентов отражения по данным ВСП необходимо при проектировании систем наземных наблюдений, для стратиграфической и литологической интерпретации данных сейсморазведки. Изучение отражающих свойств проводится в первую очередь для тех границ, которые неустойчиво прослеживаются на разрезах наземных наблюдений (ОГТ), но представляют большой разведочный интерес.

Методика изучения отражающих свойств разреза успешно реализуется для вскрытой скважинной части разреза и для прогноза акустических свойств ниже забоя скважины.

Путем изучения спектров импульсов падающих и отраженных волн, ВСП позволяет наиболее надежно получать коэффициенты отражения и их зависимости от частоты. Коэффициенты отражения определяются на таких расстояниях от границ, где отраженная волна отчетливо регистрируется вне области интерференции с прямой волной, тем самым достигается максимальная точность результатов [3].

Таким образом, решение прямых задач (нахождение отклика системы при известных входных возбуждениях и характеристиках среды) встречается у многих авторов. Однако сделан вывод о том, что на данный момент не существует методов решения обратных задач (нахождение характеристик среды по известным входным возбуждениям и выходным зарегистрированным колебаниям) относительно нахождения коэффициентов отражения и коэффициентов поглощения, а существуют только методы решения прямых задач или решение обратных задач на уровне получения некоторых других характеристик, косвенно связанных с поглощением и отражением.

2. Модели распространения сейсмических волн в геологических средах

Пространственное распределение упругих и поглощающих свойств сложноустроенной реальной среды отображает регистрируемое волновое поле при методе ВСП. Регистрируемое поле является довольно сложным для полного описания происходящих процессов в среде, поэтому необходимо упрощение такого поля некоторой моделью.

Модель геологической среды по данным ВСП представим в виде горизонтально-слоистой среды (скорость распространения волн V является в общем случае кусочно-непрерывной функцией вертикальной координаты) с различными акустическими жесткостями γ (рис. 8).

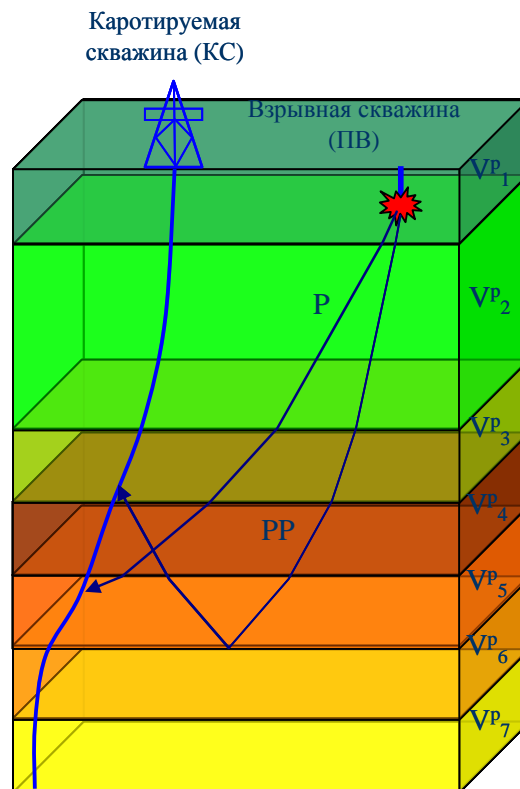


Рисунок 8 - Модель однородной горизонтально-слоистой геологической среды

Модели распространения сейсмических волн в поглощающих геологических средах обычно разделяют на две группы: амплитудные модели и модели частотно-зависимого поглощения.

2.1. Амплитудные модели

Одна из моделей прохождения волны через горизонтально-слоистую среду, используемая для оценки поглощения, основывается на том, что при распространении сигнала в однородной среде его амплитуда убывает с расстоянием по экспоненциальному закону [17]

$$A(l) = A_0 e^{-\alpha(l) l}, \quad (7)$$

где A_0 – начальная амплитуда волны, $A(l)$ – амплитуда волны, прошедшей расстояние l через поглощающую среду, $\alpha(l)$ – коэффициент поглощения, относительное изменение амплитуды колебаний на пройденном волной расстоянии l . Величина $\alpha(l)$ измеряется в единицах обратного расстояния (м^{-1} , км^{-1}).

Из выражения (7) в общем виде получаем оценку коэффициента поглощения:

$$\alpha(l) = -\frac{1}{l} \ln\left(\frac{A(l)}{A_0}\right). \quad (8)$$

Такие модели и методы оценки коэффициента поглощения обычно называют амплитудными.

Для геологических сред, представляющих собой совокупность поглощающих слоев с различными значениями скоростей V_i , коэффициентов поглощения $\alpha_i(h)$ и мощностью слоев Δh_i (рис. 9), запишутся следующие выражения для определения амплитуд проходящей через слои волны:

$$A_1(h) = A_0(h) e^{-\alpha_1 \Delta h_1}, \quad (9)$$

$$A_2(h) = A_1(h) e^{-\alpha_2 \Delta h_2} = A_0(h) \cdot e^{-(\alpha_1 \Delta h_1 + \alpha_2 \Delta h_2)}, \quad (10)$$

и для N -го слоя по рекуррентной формуле:

$$A_N(h) = A_{N-1} e^{-\alpha_N \Delta h_N} = A_0 e^{-(\alpha_1 \Delta h_1 + \alpha_2 \Delta h_2 + \dots + \alpha_{N-1} \Delta h_{N-1} + \alpha_N \Delta h_N)} = A_0 e^{-\sum_{i=1}^N \alpha_i \Delta h_i}. \quad (11)$$

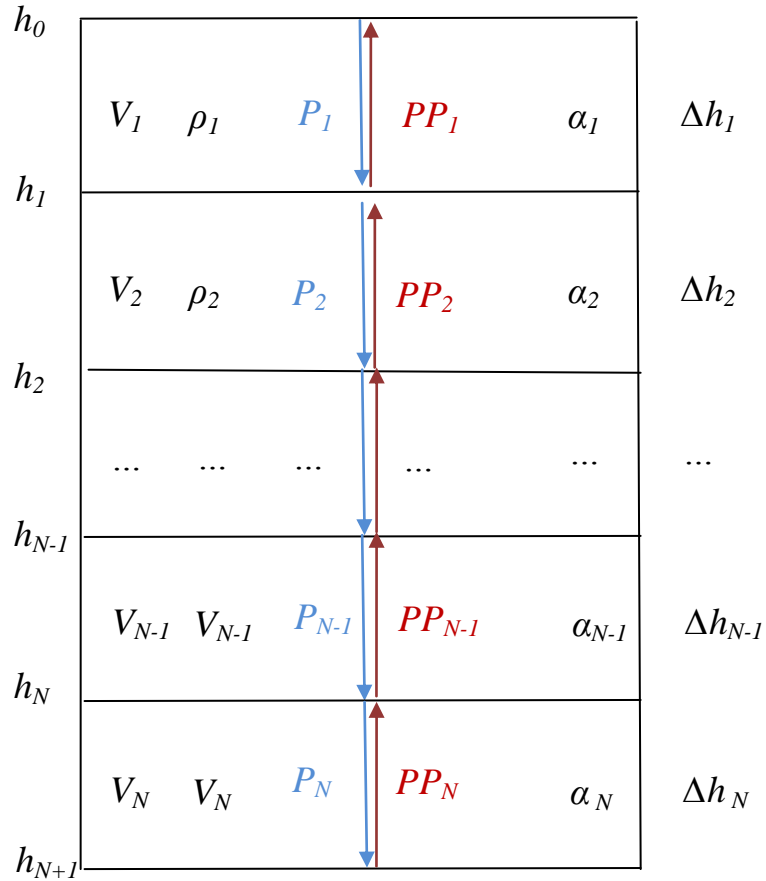


Рисунок 9 - Модель горизонтально-слоистой среды с нормальным падением (P – прямая падающая, PP –отраженная волны на границе слоев)

Логарифмируя преобразованное выражение(11), определяем формулы для оценки коэффициентовпоглощения $\alpha_i, i = 1, N$:

в первом слое

$$\alpha_1 = -\frac{1}{\Delta h_1} \ln\left(\frac{A_1}{A_0}\right), \quad (12)$$

во втором слое

$$\alpha_2 = -\frac{1}{\Delta h_2} \ln\left(\frac{A_2}{A_1}\right), \quad (13)$$

в N -ом слоепо рекуррентной формуле

$$\alpha_N = -\frac{1}{\Delta h_N} \ln\left(\frac{A_N}{A_{N-1}}\right). \quad (14)$$

В приведенной модели коэффициенты отражения k на границах сред могут определяться отношением амплитуд (A) и энергий (E) падающей (p) и отраженной (pp) волн от каждой границы слоев согласно [21]

$$k_{omp} = \pm \sqrt{\frac{E^{pp}}{E^p}} \quad (15)$$

или

$$k_{omp} = \frac{A^{pp}}{A^p} \quad (16)$$

Полученные выражения используются в амплитудных моделях оценки поглощающих и отражающих свойств геологических сред. Однако определение поглощения и отражения производится отдельно, а сама характеристика поглощения является неотъемлемой частью затухания, в которое также входит коэффициент преломления и отражения.

2.2. Модели частотно-зависимого поглощения

2.2.1. Существующие модели частотно-зависимого поглощения

Вторая группа моделей, описывающая подход ко оценке поглощающих и отражающих свойств геологических сред, подразумевает оценку частотно-зависимого поглощения.

Согласно первому подходу к оценке частотно-зависимого поглощения, процесс отражения от кровли и подошвы линейно неупругого слоя 2 согласно [17, 18] можно представить в виде эквивалентной системы, представленной на рис. 10 б.

Частотную характеристику такой системы можно записать в виде:

$$H_{\Sigma}(f) = r_{12}(f) \cdot H_c(f) \cdot k_{23}(f) \cdot r_{21}(f) + k_{12}(f) = \left| H_{\Sigma}(f) \right| e^{j\varphi_{\Sigma}(f)}, \quad (17)$$

где коэффициенты отражения от кровли и подошвы поглощающего слоя 2 - $k_{12}(f)$ и $k_{23}(f)$, коэффициенты преломления на кровле слоя 2 - $r_{12}(f)$ и $r_{21}(f)$, характеризующая распространение волны в слое 2 в двух направлениях

частотная характеристика частной системы $H_c(f)$, амплитудно-частотная характеристика $|H_\Sigma(f)|$ и фазочастотная характеристика слоев $\varphi_\Sigma(f)$. Коэффициенты в поглощающих средах $k_{12}(f)$, $k_{23}(f)$, $r_{12}(f)$ и $r_{21}(f)$ - комплексные функции частоты f . $S_0(t)$ в данном случае - исходный сейсмический сигнал, сигналы $S_1(t)$ и $S_2(t)$ - отраженные от кровли и подошвы поглощающей толщи 2.

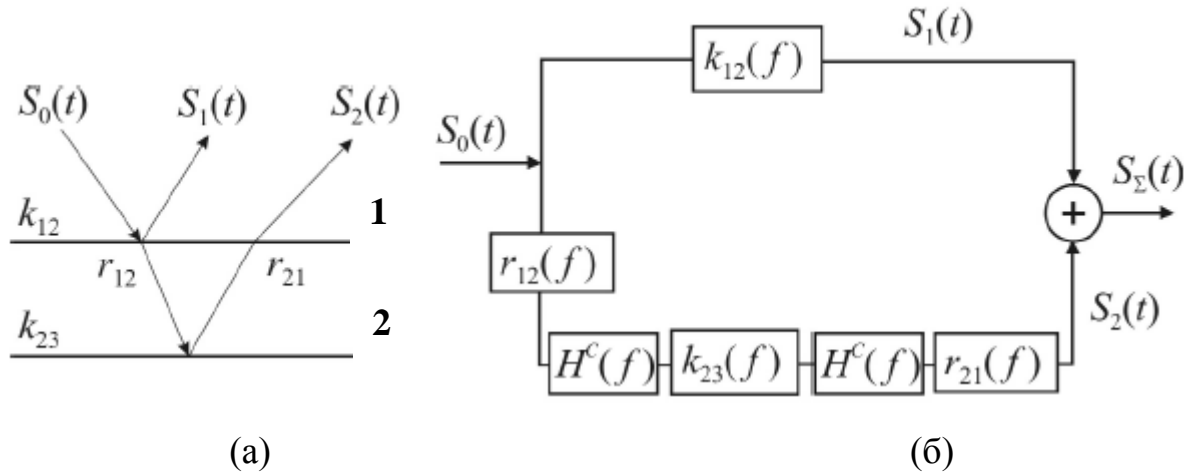


Рисунок 10 – Модель плоскопараллельной слоистой поглощающей толщи.

Для двух изотропных полупространств, разделенных плоской границей, в соответствии с [17, 18, 20], выражения для комплексных коэффициентов отражения и преломления могут быть представлены в виде:

$$k(f) = \frac{2\pi(\rho_2 V_2(f) - \rho_1 V_1(f)) - j(\rho_2 V_2(f)\delta_1(f) - \rho_1 V_1(f)\delta_2(f))}{2\pi(\rho_2 V_2(f) + \rho_1 V_1(f)) - j(\rho_2 V_2(f)\delta_1(f) + \rho_1 V_1(f)\delta_2(f))}, \quad (18)$$

$$r(f) = \frac{2(2\pi\rho_1 V_1(f) - j\rho_1 V_1(f)\delta_2(f))}{2\pi(\rho_1 V_1(f) + \rho_2 V_2(f)) - j(\rho_1 V_1(f)\delta_2(f) + \rho_2 V_2(f)\delta_2(f))}, \quad (19)$$

где $V_i(f)$, $\rho_i(f)$ - соответственно скорость распространения продольных волн и декремент поглощения в i -ой среде на частоте f_i , ρ_i - плотность i -ой среды ($i=1, 2$). При этом декремент поглощения определяется как

$$\delta_i(f) = \frac{\alpha_i(f)V_i(f)}{f}. \quad (20)$$

Здесь $\alpha_i(f)$ - коэффициент поглощения в i -ой среде.

Выражение для частотная характеристики поглощающего слоя $H(f)$ [16]:

$$H_c(f) = |H_c(f)|e^{-j\varphi_H(f)} = e^{-\alpha(f)h} \cdot e^{-j2\pi\alpha(f)h\left[\frac{1}{V_0} - \frac{1}{V(f)}\right]}, \quad (21)$$

где h - мощность слоя, V_0 - скорость в идеально-упругой среде при частоте f_0 .

Принимая для поглощающего слоя минимально-фазовую модель, и учитывая ранее сделанное допущение о линейной зависимости коэффициента поглощения от частоты, выражение для модуля и аргумента $H(f)$ приводят к виду [18]:

$$|H(f)| = e^{-\alpha(f)2h}, \quad (22)$$

$$\varphi_H(f) = 4\pi fh \left[\frac{1}{V(f_0)} - \frac{\alpha(f)}{\pi^2} \ln \frac{f}{f_0} \right], \quad (23)$$

где $V(f_0)$ - скорость распространения волны на опорной частоте f_0 .

При изучении данного метода возникает вопрос выбора опорной частоты, непосредственно влияющей на результат оценки параметров поглощения.

2.2.2. Разработанная модель частотно-зависимого поглощения

Оценка поглощения и отражения по данным ВСП может также проводиться на основе анализа скоростей (интервальных, средних), полученных упрощенной модели (рис. 11) и по прослеженному годографу по сейсмограммам ВСП методом узкополосной фильтрации. Поскольку фазовое прослеживание первой падающей волны по данным БПВ не составляет трудностей, применение этого подхода является оправданным.

Зная по данным продольного ВСП формы волн $S_0(t)$ и $S_I(t)$, и определяя частотную характеристику поглощающего слоя $H(f)$ согласно выражению (21), получаем следующие уравнения

$$\begin{aligned} S_1(f) &= S_0(f)H(f) \\ S_2(f) &= r_{12}(f)S_0(f)H(f) \end{aligned} \quad (24)$$

из которых получаем

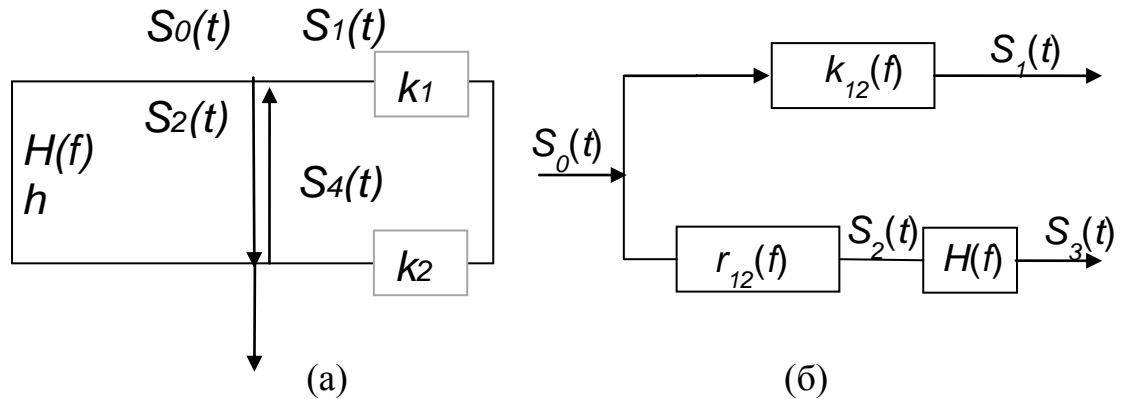


Рисунок 11 - Модель (а) и эквивалентная система (б) плоскопараллельной слоистой поглощающей толщи с нормальным падением луча

$$\begin{aligned} \frac{S_2(f)}{S_1(f)} - r_{12}(f)H(f) &= 0 \\ \arg\left(\frac{S_2(f)}{S_1(f)}\right) - 4\pi fh \left[\frac{1}{V(f_0)} - \frac{\alpha(f)}{\pi^2} \ln \frac{f}{f_0} \right] &= 0 \end{aligned} \quad (25)$$

Данный метод включает в себя проведение следующих этапов:

- 1) фильтрацию волнового поля ближнего пункта взрыва по данным ВСП набором неперекрывающихся узкополосных фильтров;
- 2) фазовое прослеживание экстремумов (отрицательных) первой падающей волны на разных фильтрациях;
- 3) проведение сглаживания полученных в предыдущем этапе годографов (1-4 раз с целью получения равномерного шага по глубине в 10 метров);
- 4) получение из прослеженных годографов скоростей (интервальных, а затем и средних);
- 5) расчет декремента поглощения [19]

$$D = \frac{\pi^2}{\ln\left(\frac{f}{f_0}\right)} \cdot \frac{[V(f_0) - V(f)]}{V(f_0) \cdot V(f)}, \quad (26)$$

где f_0 – фиксированная опорная частота, $V(f_0)$ – скорость на некоторой опорной фиксированной частоте f_0 , $V(f)$ – скорость.

В данном методе оценивается декремент поглощения по интервальным скоростям, полученным по годографам прямой продольной волны по данным продольного ВСП. Особенностью метода является то, что в нем рассматривается решение обратной задачи сейсморазведки.

3. Исследование алгоритмов оценки параметров поглощающих сред

3.1. Амплитудный метод оценки параметров поглощающих сред

В соответствии с (14) по данным скв. Даненбергская 7 получены значения коэффициента поглощения α . График изменения величины коэффициента поглощения с глубиной представлен на рис. 12.

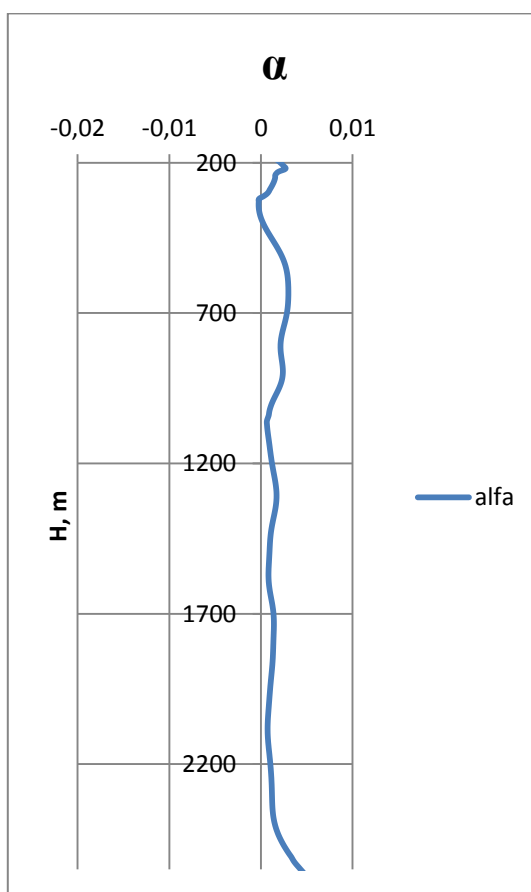


Рисунок 12 - Коэффициент поглощения, посчитанный амплитудным методом по данным скв. Даненбергская 7

На рис. 12 значения декремента поглощения варьируются от 0 до 0,01 м⁻¹. Сводная схема стратиграфической привязки по данным продольного ВСП, скважинных методов ГИС и литологии в скважине Даненбергская 7, представлена на рис. 13.

Скважина Даненбергская 7

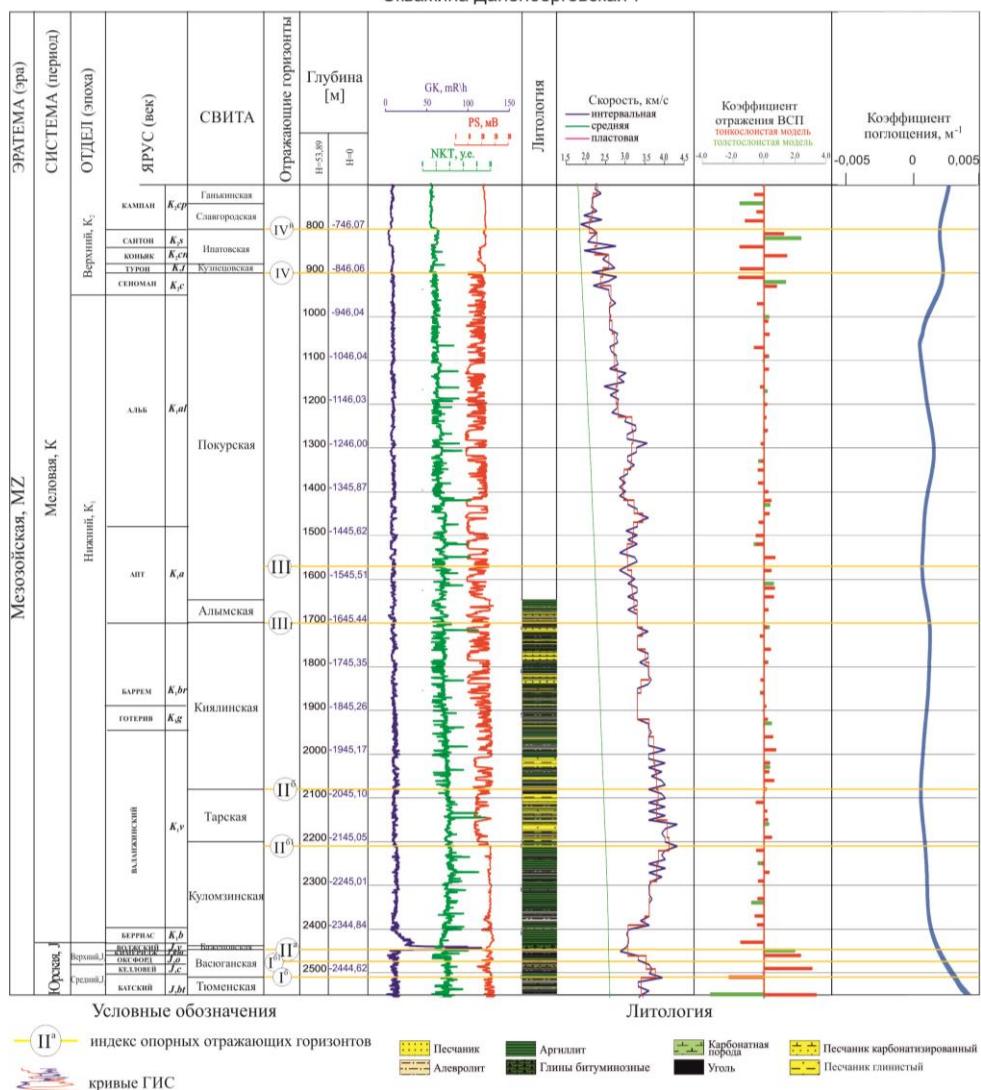


Рисунок 13 - Сводная схема по данным скв. Даненбергская 7

Анализируя кривые коэффициентов отражения и поглощения по рис. 13, можно сделать следующие выводы. Кривая коэффициентов отражения по продольному ВСП чувствительна к акустическим границам. Кривая коэффициентов поглощения *а* по данным продольного ВСП имеет монотонный характер, по которому затруднительно определить акустические границы.

Также в описанном методе требуется информация об истинной амплитуде падающих волн, которая изменяется в скважине с глубиной. При регистрации в скважине импульсов с глубиной в методе ВСП чаще всего

применяется методика, описанная ниже, меняющая коэффициент усиления в аппаратуре, что приводит к искажениям истинных амплитуд.

Цифровая регистрирующая аппаратура (сейсмостанция) в методе ВСП состоит из двух частей:

- наземного блока;
- блока скважинных приборов.

Ретранслятор может располагаться между скважинными приборами и поверхностным блоком, где обычно выполняет функции предварительного усилителя сигнала (рис. 14).



Рисунок 14 - Блок-схема цифровой скважинной аппаратуры

Попадая на сейсмоприемник и преобразовываясь в электрический сигнал, исходный сейсмический сигнал усиливается (величина сигнала увеличивается на фиксированные четыре постоянных коэффициента усиления) и фильтруется в аналоговом блоке прибора. Далее в блоке аналогово-цифрового преобразования (АЦП) производится оцифровка сигнала. На рис.15 показана схема работы аналоговых усилителей и АЦП. Преобразование аналогового сигнала в цифровой - важный этап[4].

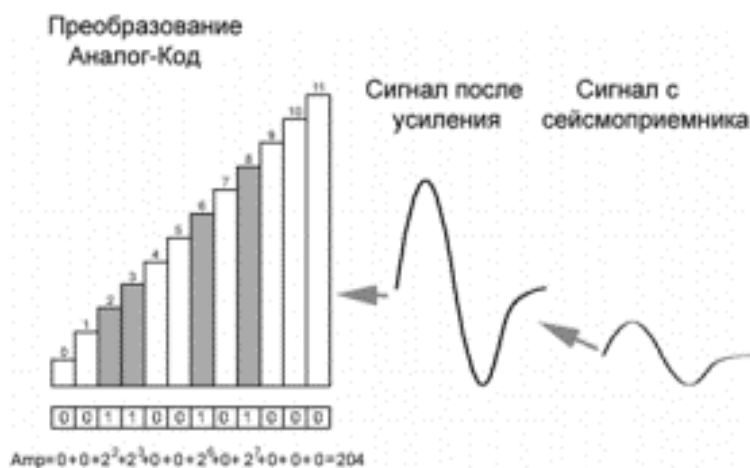


Рисунок 15- Схема работ аналоговых усилителей и АЦП в скважинном приборе

Поскольку колебания среды принимаются в аналоговом виде, и именно к аналоговым данным применены различные по глубине коэффициенты усиления, которые затем были преобразованы в цифровой формат, задача восстановления истинных амплитуд колебаний в теории хоть и описывается как решаемая, но на практике становится невозможной.

Количество материалов ВСП с единым по глубине коэффициентом усиления очень мало. За неимением материалов с истинными амплитудами, приходим к выводу о том, что метод оценки поглощения по амплитудам волн, уменьшающимся с глубиной по экспоненциальному закону(7), в рамках данного исследования не позволяет корректно оценить поглощающие свойства геологической среды.

3.2. Исследование моделей частотно-зависимого поглощения

3.2.1. Исследование существующих моделей частотно-зависимого поглощения

При анализе выведенной функции(23) для оценки аргумента $H(f)$ возникает вопрос выбора используемой в теории некоторой f_0 - опорной частоты. Для анализа вышеописанного фазочастотного метода для скважины

Даненберговская 7 взяты 2 формы импульса S_1 и S_2 с разницей по глубине $h = 100$ м (рис. 16), применено прямое преобразование Фурье, рассчитаны амплитудные (22) и фазовые (23) характеристики (рис. 17).

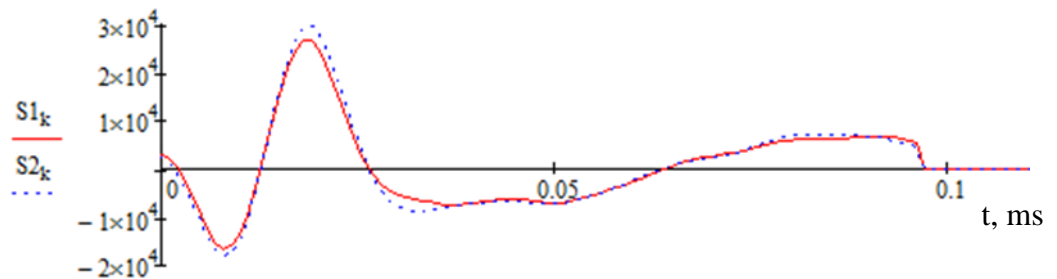


Рисунок 16 - Сравнение двух форм импульсов S_1 и S_2 с разной глубины в скважине Даненберговская 7

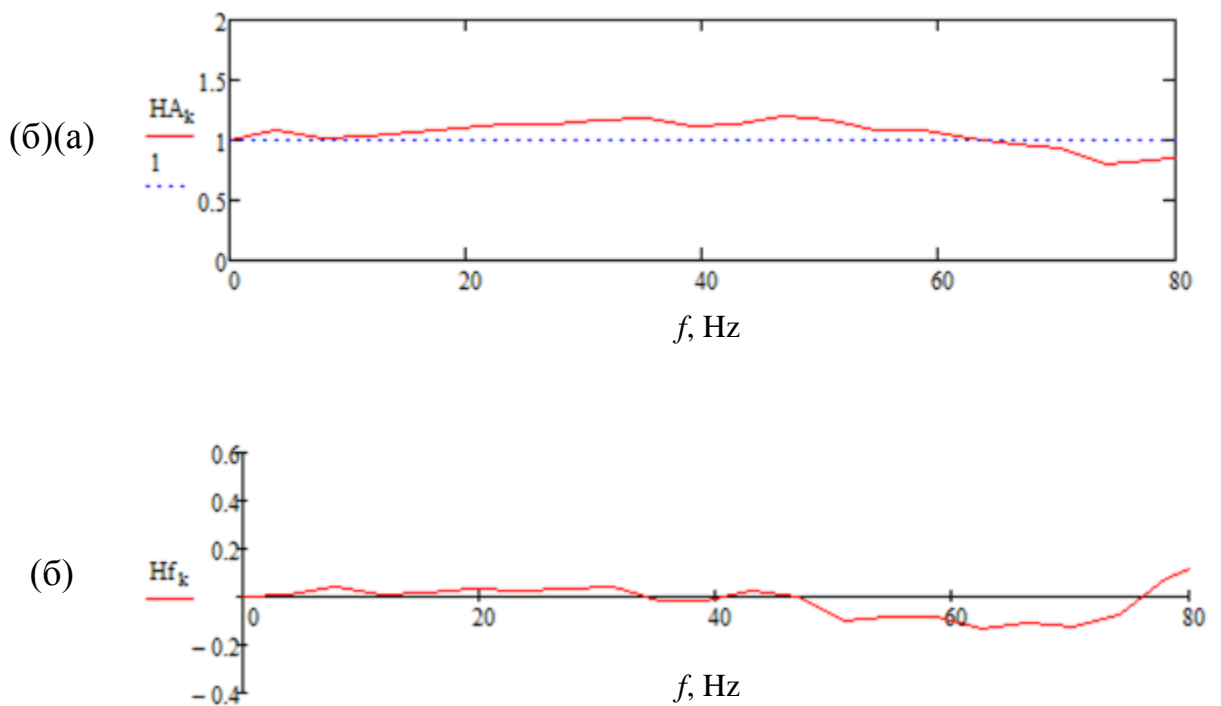


Рисунок 17 - Амплитудные (а) и фазовые (б) характеристики в скважине Даненберговская 7

В качестве f_0 взята частота 15 Гц, скорость при данной частоте $V(f_0)=3100$ м/с, начальное значение исследуемого параметра $a = 0,001 \text{ м}^{-1}$ для построения

графика решения относительно неизвестного параметра $a(f)$ с помощью функции rootMathcad из условия

$$4\pi fh \left[\frac{1}{V(f_0)} - \frac{a(f)}{\pi^2} \ln\left(\frac{f}{f_0}\right) \right] - \arg \left| \frac{S_2}{S_1} \right| = 0. \quad (27)$$

Функция (23) в значении некоторой частоты терпит разрыв (рис. 18). Относительно выбора значения опорной частоты авторами дана следующая рекомендация: f_0 – преобладающая частота импульса в начале его пути.

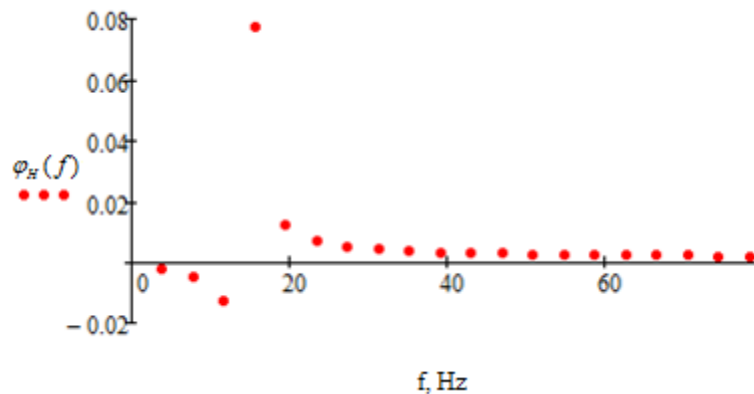


Рисунок 18 - График функции (23)

Поскольку в данном методе данных авторами рекомендаций по подбору частоты f_0 недостаточно и ввиду наличия у функции (23) разрыва в некоторой частоте f_0 , использование на практике данного метода, также как и амплитудного, является затруднительным.

3.2.2. Анализ разработанной модели частотно-зависимого поглощения

Методика оценки поглощающих и отражающих свойств геологических сред применена к реальным данным, полученным методом ВСП в модификациях продольного ВСП (один ближний пункт взрыва, далее БПВ или ПВ0) и непродольного ВСП (четыре-пять удаленных ПВ) в скважинах Конторовичская 5 и Даненберговская 7 Томской области. Интервал наблюдений – от устья до забоя скважины. Шаг пунктов приема сигналов внутри скважины – 10 метров, с шагом дискретизации 1 мсек. Анализ данных

ВСП, полученных в скважинах, проводился как по ближайшему пункту взрыва (ПВ0 для скважин Конторовичская 5 и Даненбергская 7, так и по более удаленным пунктам взрыва (ПВ1, ПВ2, ПВ3, ПВ4, ПВ5) в программном комплексе VspTracker (разработка кафедры Прикладной математики ТПУ).

Диапазон исследуемых частот, применяемых далее к другим данным скважин, определен по двумерному спектру разреза ПВ0 (рис. 19 в), и ограничивается 20-60Гц с шагом 10Гц. Для каждой из частот 20Гц, 30Гц, 40Гц, 50Гц и 60Гц по каждому из ПВ прослежены годографы прямой падающей волны по первым вступлениям (первый отрицательный экстремум выражен слабо, обозначен на рис. 19 б желтым цветом).

При обработке данных продольного ВСП были использованы в качестве скоростей интервальные и средние скорости, а затем рассчитан декремент поглощения:

$$D = \frac{\pi^2}{\ln\left(\frac{f}{f_0}\right)} \cdot \frac{[V(f_0) - V_i(f)]}{V(f_0) \cdot V_i(f)}, \quad (28)$$

где f_0 – фиксированная опорная частота (20, 40 или 60 Гц), $V(f_0)$ – скорость при фиксированной опорной частоте f_0 , $V_i(f)$ – значение скорости (интервальной или средней) для текущей частоты f , $f \in [20, 30, 40, 50, 60]$ Гц.

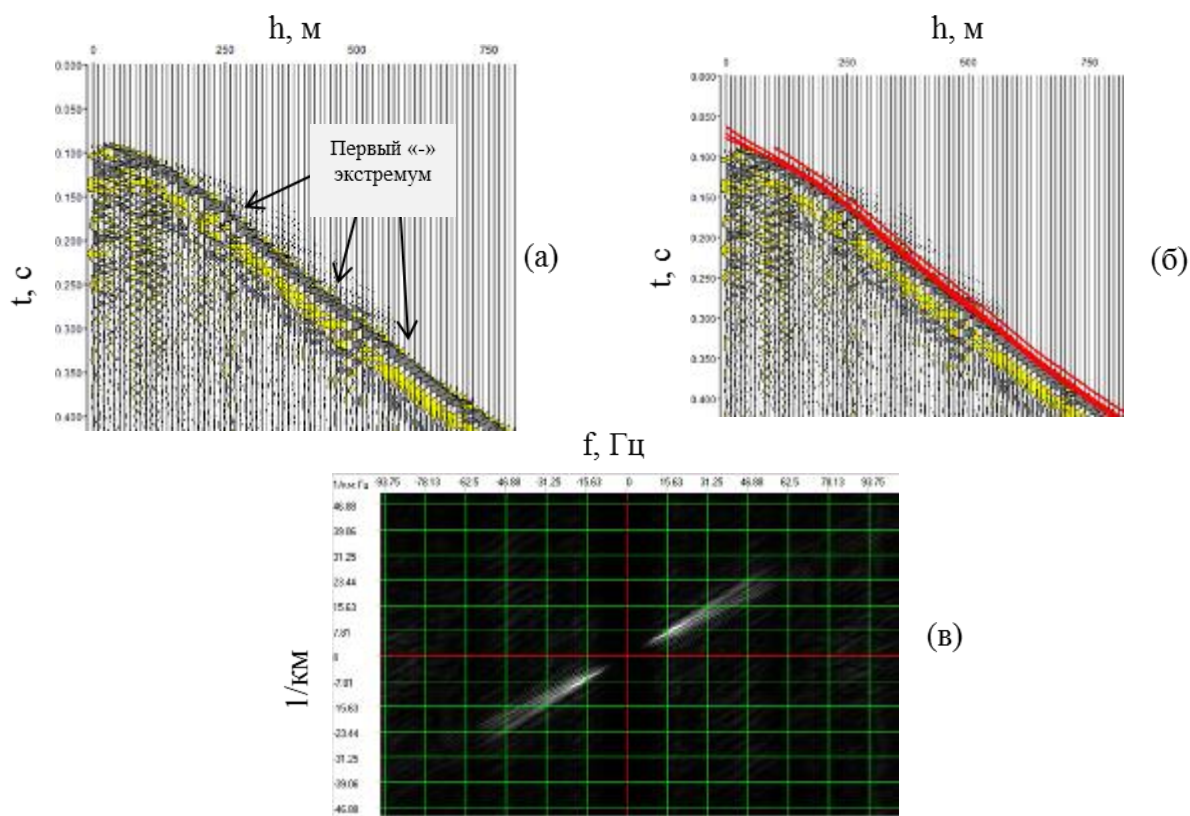


Рисунок 19 - Разрез амплитуд ПВОскв. Конторовичская 5 в интервале 0-0,5с (а) с прослеженными годографами (б), двумерный спектр разреза ПВО (в)

Средние скорости получены из интервальных путем пересчета по формуле:

$$V_{sr} = \frac{\sum l_i}{\sum \frac{l_i}{V_{int_i}}}, \quad (29)$$

где l_i – пройденное волной расстояние в метрах, V_{int_i} – интервальная скорость для текущей частоты f , $f \in [20, 30, 40, 50, 60]$ Гц.

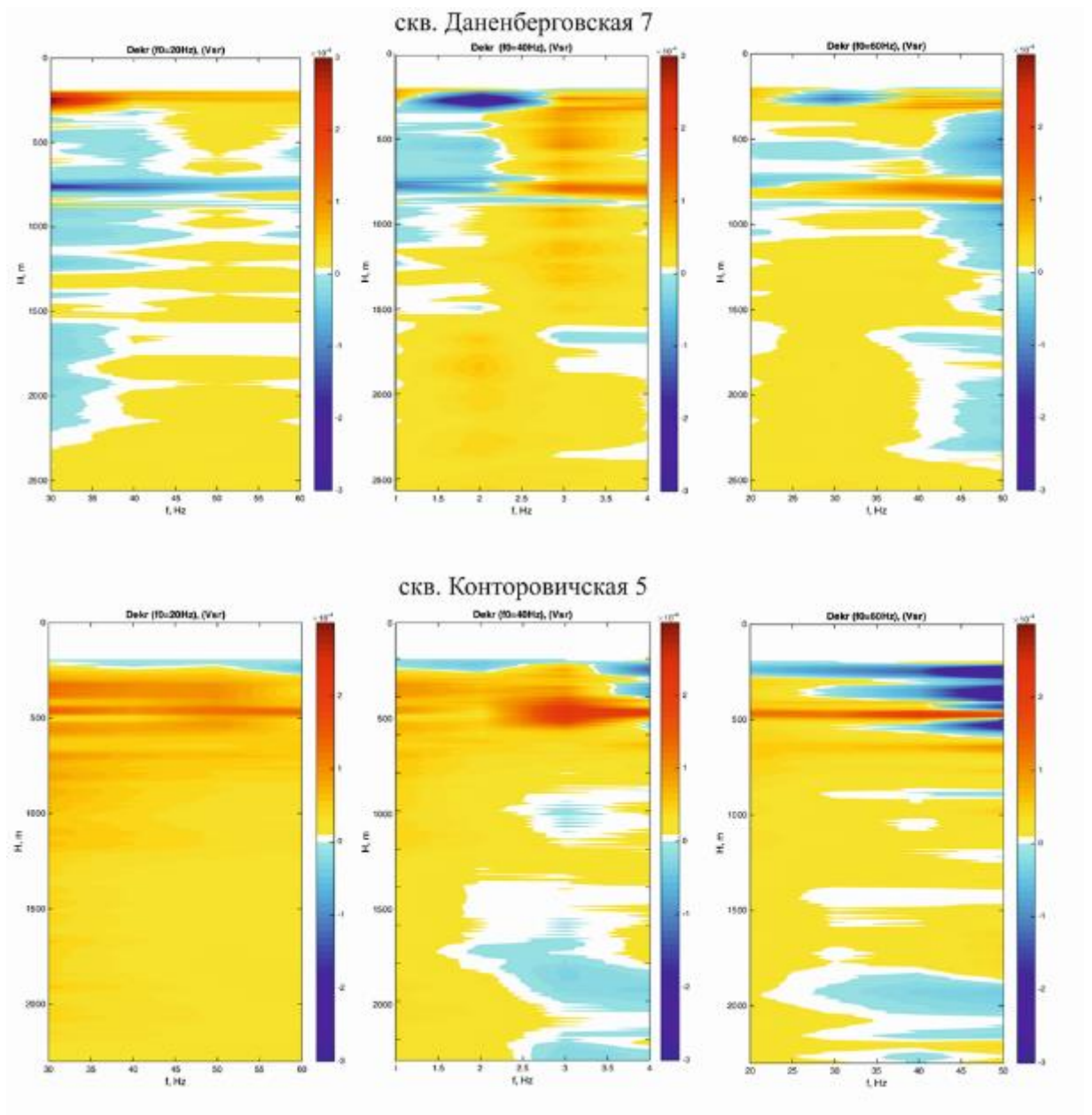


Рисунок 20 - Декремент поглощения, посчитанный по средним скоростям ПВО по данным скв. Даненберговская 7 и Конторовичская 5 Томской области с частотой $f_0=20, 40$ и 60 Гц (слева-направо)

Согласно этапам разработанного упрощенного частотно-зависимого метода оценки поглощающих и отражающих свойств геологических сред по материалам скважин Конторовичская 5 и Даненберговская 7 Томской области построены изолинии декрементов поглощения, посчитанные по формуле (28). Графики изолиний полученных декрементов поглощения, посчитанных по

средним скоростям ПВО с частотой $f_0=20, 40$ и 60Гц (слева-направо) представлены на рис. 20.

Полученные характеристики по формуле (28), согласно [19] называемые декрементом затухания (поглощения), лежат в пределах значений $\pm 3 \cdot 10^{-4}$. Согласно литературе [5], поглощение - величина положительная. Полученные отрицательные значения декремента поглощения невозможно объяснить с точки зрения геологии, хотя они используются авторами для получения поглощающих характеристик среды без объяснения причин возникновения значений, меньше нуля [1, 18].

Также, поглощение характеризует потерю высокочастотных составляющих в спектре сигнала с глубиной. Анализируя рисунок 20, приходим к выводу о том, что с глубиной не наблюдается ослабление высоких частот, что противоречит теории [15].

Отличительной характеристикой данного метода являлось решение обратной задачи (оценка поглощающих и отражающих свойств геологических сред). Однако, получить корректную оценку поглощающих свойств геологических сред данным методом не удалось.

Заключение

В процессе исследований рассмотрены основные термины и методы сейсморазведки, исследовано распространение искусственно возбужденных волн в геологических средах, поглощающие и отражающие свойства геологических сред и границ.

Подробно исследован метод продольного ВСП, позволяющий получать характеристики геологической среды в глубинном масштабе для дальнейшего поиска залежей нефти и газа, привязки данных наземной и скважинной сейсморазведки.

В качестве моделей для изучения свойств геологических сред выбраны модели, характеризующие поглощающие и отражающие свойства: амплитудные модели и модели частотно-зависимого поглощения.

Найдены общие подходы к оценке поглощающих и отражающих свойств геологических сред по амплитудным моделям и моделям частотно-зависимого поглощения. Для количественной характеристики поглощения чаще всего используются следующие параметры, характеризующие поглощение: декремент поглощения, коэффициент поглощения и добротность среды.

Первый подход основывается на определении убывания амплитуды с расстоянием в виде экспоненты, а полученные значения коэффициента поглощения по амплитудам продольного ВСП скважины Даненбергская 7 Томской области варьируются от 0 до $0,01 \text{ м}^{-1}$. По результатам исследования амплитудного метода составлена сводная схема стратиграфической привязки по данным продольного ВСП, скважинных методов ГИС, полученных коэффициентов отражения и поглощения и литологии в скважине. Сделаны выводы о том, что в данном методе производится решение прямых задач, оценка поглощения и отражения производится отдельно, полученные оценки поглощения не чувствительны к акустическим геологическим границам, а поглощение как характеристика является неотъемлемой частью затухания (в которое также входит коэффициент преломления и отражения), которое

оценить отдельно невозможно. Также использование данного метода затрудняется ввиду отсутствия реальных амплитуд колебаний, не усиленных при переводе из аналогового в цифровой формат при полевой регистрации.

Второй подход к оценке поглощающих и отражающих свойств геологических сред подразумевает оценку частотно-зависимого поглощения и использования фазочастотных характеристик распространяющихся сейсмических волн. Использование данного метода затруднено ввиду особенности выбора частоты, используемой для расчета частотной характеристики среды.

Оценка поглощения и отражения по данным ВСП может также проводиться на основе анализа скоростей по прослеженному годографу по сейсмограммам ближнего пункта наблюдений ВСП. В скважинах Конторовичская 5 и Даненберговская 7 Томской области методом узкополосной фильтрации по разработанной в рамках данной магистерской диссертации модели прослежены годографы прямой падающей волны для частот 20 Гц, 30 Гц, 40 Гц, 50 Гц и 60 Гц по первым вступлениям и получены интервальные и средние скорости. По последним определялся декремент поглощения, значения которого варьируются в пределах $\pm 3 \cdot 10^{-4}$. Отличительной характеристикой данного метода являлось решение обратной задачи. Указанный метод, как и ранее приведенные, имеет недостатки: не соблюдается теоретические положения о положительном значении коэффициента поглощения и затухании высоких частот с глубиной, вызванном их поглощением.

Как показали исследования на реальных данных, оценка поглощающих свойств сводится к получению некоторых других характеристик, косвенно связанных с поглощением и отражением. И получить корректную и геологически обоснованную оценку поглощающих свойств геологических сред методами с частотно-зависимым поглощением не предоставляется возможным.

Список использованных источников

1. Рыжков В.И. Сейсмоакустические неупругие эффекты. Их применение при поисках, разведке и мониторинге месторождений нефти и газа. Москва, 2009г.
2. Ильина Т.Д. Формирование советской школы разведочной геофизики (1917-1941 гг.). - М.: Наука, 1983, 216 с.
3. Гальперин Е. И. Вертикальное сейсмическое профилирование. Опыт и результаты / Гальперин Е. И. – М.: Наука, 1994. – 320 с.
4. Шевченко А. А. Скважинная сейсморазведка. М.: РГУ нефти и газа, 2002. – 129 с.
5. Вознесенский Е.А. Природа и закономерности затухания волн напряжений в грунтах [Электронный ресурс]: монография / Е.А. Вознесенский. Е.С. Кушнарёва. В.В. Фуникова. - 2-е изд., стер. – М.: ФЛИНТА, 2013. - 104с.
6. Chuen H.C. and Toksoz M.N., 1981, Elastic wave propagation in a fluid-filled borehole and synthetic acoustic logs: *Geophysics*, 46, 1042-1053.
7. Levin F.K., Lynn R.D., 1958, Deep-hole geophone studies, *Geophysics*, vol 23, 639-664.
8. Matsushima J., 2006, Seismic wave attenuation in methane hydrate-bearing sediments: Vertical seismic profiling data from the Nankai Trough exploratory well, offshore Tokai, central Japan. *J. Geophys. Res.*, 111.
9. Ахмедов А.К. Поглощение прямых продольных волн в сводовых и крыльевых частях складок Азербайджана - Ж. «Разведочная геофизика», 1973, вып.59, с.27-31.
10. Gladwin M.T. and F.D. Stacey, 1974, An elastic degradation of acoustic pulses in rocks, *Phys. Earth Planet Inter.*, 8, 332- 336.
11. Meisser R., Theilen F., 1983, Attenuation of seismic waves in sediments, Preprint of the 11-th World Petroleum Congress, №4, 363-379.
12. Norris A.N., 1993, Low-frequency dispersion and attenuation in partially saturated rocks: *Journal of the Acoustical Society of America*, 94, 359-370.

13. Берзон И.С., Епинатьева А.М., Парийская Г.Н., Стародубская С.П. Динамические характеристики сейсмических волн в реальных средах. М.: Изд. АН СССР, 1962, 511 с.
14. Коган С.Я. О влиянии поглощения на форму сейсмического импульса. М.: Изв. АН СССР. Сер. Физика Земли, 1961, №9, с. 1280-1289.
15. Птецов С.Н. Анализ волновых полей для прогнозирования геологического разреза. – М.: Недра, - 135с.: ил.
16. Иванченков В.П., Кочегуров А.И., Орлов О.В. Фазочастотные характеристики сейсмических волн и основные предпосылки их применения для решения задач прогноза геологического разреза. Известия Томского политехнического университета., 2008. -т. 313 -№ 5 -с. 132-138.
17. Иванченков В. П. , Кочегуров А. И. , Купина Н. А. , Орлов О. В. Методы фазочастотного прослеживания отраженных волн и их применение в задачах обработки сейсмической информации. Технологии сейсморазведки. - 2013 - №. 3. - С. 5-10.
18. Рапопорт М.Б., Рапопорт Л. И., Рыжков В. И. Поглощение и дисперсия скорости сейсмических волн в залежах углеводородов. 2-я Международная конференция SEG, Москва, 1993 г.
19. Авербух А.Г. Изучение состава и свойств горных пород при сейсморазведке. Издание: Недра, Москва, 1982 г., 232 стр.
20. Лоссовский Е.К. Теоретические сейсмограммы на идеализированных моделях нефтегазовой залежи/ Геофизический журнал, 1982, №5.
21. Поданёва Д. С. Восстановление фазочастотных характеристик продольных отраженных волн. Технологии Microsoft в теории и практике программирования: сборник трудов X Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, г.Томск, 19-20 марта 2013 г.