

На правах рукописи



Ислямова Александра Андреевна

ВЛИЯНИЕ ТРЕЩИНОВАТОСТИ И ПОРИСТОСТИ ГОРНЫХ ПОРОД НА  
АМПЛИТУДНЫЙ СПЕКТР СЕЙСМИЧЕСКИХ ТРАСС ПРИМЕНИТЕЛЬНО  
К ОБРАБОТКЕ ВРЕМЕННЫХ РАЗРЕЗОВ

25.00.10 – Геофизика, геофизические методы поисков полезных ископаемых

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени

кандидата геолого-минералогических наук

Томск-2017

**Диссертация выполнена** в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет»

**Научный руководитель:** доктор физико-математических наук,  
**Немирович-Данченко Михаил Михайлович**

**Официальные оппоненты: Ружич Валерий Васильевич,**  
доктор геолого-минералогических наук,  
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт земной коры Сибирского отделения РАН» (г. Иркутск),  
главный научный сотрудник лаборатории тектонофизики

**Сибиряков Егор Борисович,**  
кандидат физико-математических наук,  
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А.Трофимука Сибирского отделения РАН» (г. Новосибирск),  
старший научный сотрудник лаборатории вычислительной физики горных пород

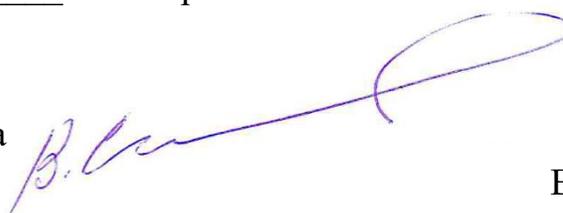
**Ведущая организация:** Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН» (г. Москва)

Защита диссертации состоится «20» декабря 2017 г. в 16-00 на заседании диссертационного совета Д 212.269.12 при ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» по адресу: 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30, корпус 20, ауд. 504.

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» по адресу: 634050, г. Томск, ул. Белинского, 53 и на сайте <http://portal.tpu.ru/council/2802/worklist>

Автореферат разослан «\_\_\_» октября 2017 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
Д 212.269.12, д. г.-м. н.



В.И. Исаев

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** Постепенное истощение запасов углеводородов, локализованных в структурных ловушках, приводит к необходимости выявления нестандартных и сложнопостроенных коллекторов. К числу последних относятся, в том числе, терригенные и карбонатные коллектора, в которых преобладает трещиноватый тип пористости. На территории Западной Сибири наиболее эффективным способом изучения данного объема недр является проведение наземной сейсморазведки. Изучение свойств сейсмического поля с целью выявления зон, указывающих на способность породы содержать флюиды, позволит более достоверно прогнозировать локализацию залежей углеводородов на этапе поисков и разведки нефтяных и газовых месторождений.

**Объектом исследований** являются сейсмические волновые поля, регистрируемые после прохождения через среды, обладающие повышенной микроструктурной неоднородностью, а именно, содержащие пустоты в виде пор или трещин. Предмет исследования – амплитудно-частотные характеристики таких сейсмических волн.

**Степень разработанности темы.** Опубликовано большое количество данных физических экспериментов, посвященных распространению упругих колебаний в образцах горных пород и демонстрирующих затухание (поглощение) сигналов. Уже разработаны и продолжают разрабатываться технологические приёмы выделения зон с повышенным затуханием как следствие комплексирования скважинных наблюдений, петрофизических исследований и данных сейсморазведки. Также ведутся различные разработки вариантов расчетных алгоритмов, описывающих сейсмическое поле в среде с трещинами, которые, тем не менее, не всегда согласуются с реальными физическими процессами и нуждаются в уточнении.

**Цель исследования** заключается в обосновании и проверке применимости способа математического моделирования сейсмического поля (методики создания цифровых моделей трещиноватых и пористых сред и алгоритма расчета сейсмического сигнала), который обеспечивает реально наблюдаемые изменения спектра сейсмических трасс, прошедших участки горных пород, содержащие зоны неоднородностей в микроструктуре (поры и трещины).

Алгоритм был создан на основе решения ряда задач конечно-разностным методом в рамках модели среды со случайно распределенными неоднородностями. Достижение поставленной цели происходит при помощи качественного и количественного сравнения данных моделирования с

опубликованными результатами физических экспериментов по изучению спектральных свойств сигнала при прохождении через образец песчаника, по моделированию дифракции на одиночной поро и по измерению скоростей распространения продольной и поперечной волн в пористом образце. На основании полученных факторов влияния возможно выявление аналогичных зон в сейсмическом поле путем предлагаемого алгоритма оконной фильтрации на реальных временных разрезах.

Осуществление запланированного исследования производилось последовательно, путем решения **следующих задач**:

1) поиск и параметризация результатов физических экспериментов, связанных с распространением сейсмических волн;

2) создание геометрии компьютерных моделей, аналогичных представленным в описании физических опытов, их численная параметризация, определение оптимальных параметров исходного импульса;

3) проведение расчета сейсмических синтетических трасс конечно-разностным методом, позволяющим моделировать полное волновое поле в среде, содержащей произвольную пористость и трещиноватость.

4) сопоставление с опубликованными данными лабораторных исследований, анализ спектра Фурье, оценка применимости используемого подхода;

5) разработка алгоритмов применения выявленных закономерностей в изменении спектральных характеристик для обработки реальных временных сейсмических разрезов с целью обнаружения зон повышенного содержания микроструктурных неоднородностей в разрезе, связанных с коллекторскими свойствами пород.

### **Характеристика исходных данных**

Исходными данными для исследования на различных его этапах являлись следующие разделы информации:

- упругие характеристики и изображения геометрии структуры образцов горных пород, которые были взяты для подготовки математических моделей;

- лабораторные результаты сейсмических исследований прохождения упругого сигнала через образцы и модели горных пород – для сопоставления сейсмических и спектральных характеристик с аналогичными в используемом методе расчета;

- временные сейсмические разрезы по Двуреченской площади (без обработки после суммирования) – для апробации работы алгоритма на реальных данных и выявления предполагаемых зон нефтенасыщенности.

## **Методология и методы исследования**

Методологической основой исследований является модель геологической среды, обладающей упругим поведением и способностью в процессе воздействия колебаний деформироваться на микроструктурном уровне, изменяя конфигурацию пустот и минерального скелета.

Задачи решаются численно явным конечно-разностным методом типа Уилкинса (Уилкинс М.Л. Расчет упругопластических течений // Вычислительные методы в гидродинамике. - М.: Мир, 1967) на лагранжевой сетке, которая движется и деформируется вместе со средой. Моделирование трещиноватой горной породы осуществляется явным образом путем расщепления расчетной сетки (Немирович-Данченко М.М. Модель гипоупругой хрупкой среды: применение к расчету деформирования и разрушения горных пород// Физическая мезомеханика -1998.- Т.1.- №2).

Модель трещиноватости строится методом случайного распределения бесконечно тонких разрезов конечной длины, модель пористой среды – распределением изометричных ячеек пор конечных размеров.

На основании исследований формулируется методика выявления зон затухания, основанная на спектральных преобразованиях Прони и Фурье, позволяющих оценить энергетические потери исходного сигнала для различных частот. Преобразования производятся в скользящем окне, что более контрастно отражает свойства различных интервалов разреза.

### **Научная новизна работы**

1) впервые проведен математический расчет полного волнового сейсмического поля с учетом упруго-хрупко-пластических деформаций на моделях с явным описанием трещиноватой и пористой структуры горных пород;

2) впервые проведена оценка характеристик изменения спектральной энергии сейсмических сигналов, как полученных данным способом, так и полевых, при прохождении через трещиноватые и пористые зоны на основе преобразований Фурье и Прони;

3) предложен алгоритм оконной фильтрации для выделения во временных разрезах зон затухания, проведен анализ его эффективности при обработке временного разреза на продуктивном интервале терригенных отложений одного из месторождений Томской области.

### **Степень достоверности результатов**

1) Результаты проведенного расчета сейсмических полей, получаемых при прохождении волны через и трещиноватую, и пористую зоны, на

качественном уровне хорошо согласуются с данными физических экспериментов, опубликованных как итоги изучения распространения волн в образцах на лабораторных установках.

2) Изменение характеристик рассчитанных амплитудно-частотных спектров сейсмических трасс, полученных после прохождения сигналом зоны неоднородностей, согласуется с физическими процессами потери энергии при упругих колебаниях и соответствует спектрам волн после регистрации на аналогичных лабораторных образцах.

3) Расчетные скорости распространения волны, прошедшей через заданные модели с различными коэффициентами пористости, весьма точно соответствуют скоростям, зарегистрированным на таких же пористых образцах в опубликованном физическом эксперименте.

4) Зоны повышенного поглощения упругого сигнала на реальных сейсмических разрезах, полученные в результате предлагаемого алгоритма обработки, согласуются с выделенными на месторождении границами содержания углеводородов в продуктивном интервале.

### **Теоретическая и практическая значимость работы**

1) Результаты анализа амплитудного спектра сейсмических трасс позволили установить характер его изменения после прохождения волной горных пород, содержащих в структуре пустоты (трещины и поры). Изменение спектра всегда имеет характер сдвига в сторону длинных волн.

2) Полученные оценки изменения спектра дают возможность построить алгоритм оконной фильтрации для выделения во временных разрезах зон затухания, соответствующих поглощению энергии, характерного для пористых и трещиноватых коллекторов.

3) Проведенный анализ временного разреза для продуктивной толщи терригенных отложений одного из месторождений Томской области позволил сформулировать признаки выявления на обработанных предложенным образом разрезах поглощающих зон, связанных с повышенным объемом пустот в породе, что является необходимым условием эффективной нефтенасыщенности коллектора.

4) Разработанный алгоритм может быть использован на стадии математической обработки данных сейсморазведки как один из сейсмических атрибутов, позволяющих локализовать и уточнить области повышенных значений фильтрационно-емкостных свойств (ФЕС) пород.

## Апробация результатов исследования

Основные результаты работы ежегодно докладывались на следующих научных мероприятиях:

- 1) Международный научный конгресс «Интерэкспо ГЕО-Сибирь» (Новосибирск, 2013, 2014, 2015);
- 2) Международный научный симпозиум студентов и молодых ученых имени академика М.А. Усова «Проблемы геологии и освоения недр» (Томск, 2011, 2012, 2013, 2014, 2016);
- 3) Всероссийская научно-практическая конференция с международным участием, посвященная 70-летию основания в Томском политехническом институте кафедры "Геофизические методы поисков и разведки месторождений полезных ископаемых" (Томск, 2016);
- 4) Уральская молодежная научная школа по геофизике УрО РАН (Екатеринбург, 2012; Пермь, 2013);
- 5) Всероссийский научно-практический семинар с международным участием имени Г.С. Вахромеева «Современные методы поисков в рудной и нефтяной геологоразведке» (Иркутск, 2016).

Основные положения научной работы изложены в 23 публикациях диссертанта, в том числе 3 статьи в журналах перечня ВАК, 3 статьи, индексируемые в Scopus.

**Структура работы.** Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка использованной литературы (106 наименований). Работа изложена на 96 страницах, включая 34 рисунка и 1 таблицу.

Во **Введении** определены объект и предмет исследования, обоснована его актуальность, сформулированы цель и задача работы, указаны основные ее этапы, приведены защищаемые результаты и охарактеризована их научная новизна, а также значимость работы в целом.

**Глава 1** содержит краткий обзор литературы по моделированию распространения сейсмических волн в средах с трещинами и порами, в ней приводятся сведения об используемом численном методе. Также рассмотрены различные описанные в публикациях лабораторные эксперименты с трещиноватыми и пористыми образцами.

В **Главе 2** приводятся результаты расчетов сейсмического поля для трещиноватого коллектора, рассмотрены несколько моделей среды, выявлены особенности спектров Фурье для синтетических трасс. В общей постановке рассмотрены твердые тела, включающие в себя трещиноватые области. Также выявлена динамика изменения амплитудных спектров сейсмической волны на различных трещиноватых моделях.

В **Главе 3** рассмотрено влияние одиночной поры и совокупности пор на падающую сейсмическую волну. Предложен способ создания пористой среды при математическом моделировании сейсмического поля. Расчеты на качественном и количественном уровне сравниваются с опубликованными данными математических расчетов и лабораторных экспериментов. Оценено влияние пористости среды, созданной предлагаемым способом, на скорость распространения и спектр сейсмического сигнала. Получено хорошее соответствие с расчетными и лабораторными данными.

В **Главе 4** предлагается алгоритм обработки реальных временных разрезов, который учитывает выявленные свойства спектров сейсмических сигналов, дифрагированных на трещинах и порах, и анализируются результаты работы данного алгоритма. Выполняется спектральный анализ реального сейсмического разреза Двуреченского месторождения – одного из высокодебитных месторождений углеводородов Томской области.

В **Заключении** приведены основные выводы по выполненной работе и защищаемым положениям.

#### **Личный вклад автора**

1) Подготовка и создание компьютерных моделей трещиноватых и пористых сред, поиск оптимального соответствия свойствам описываемых образцов горных пород.

2) Выбор параметров рабочего алгоритма оконной обработки: шаг, размеры окна, частотные характеристики фильтров; проведение расчетов.

3) Сравнение и анализ получаемых результатов, выявление характерных особенностей сейсмического сигнала, расчет амплитудно-частотных спектров.

4) Обработка сейсмических разрезов Двуреченской площади, визуализация и анализ результатов, сопоставление с геологической информацией о месторождении.

#### **Защищаемые положения**

1. Создана математическая модель трещиноватой среды, которая при моделировании сейсмического поля адекватно описывает характеристики распространения упругой волны через горные породы, содержащие трещины.

2. Предложен способ создания математической модели пористой среды, при котором характеристики распространения упругой волны в такой среде соответствуют реальным свойствам сейсмических волн в пористых горных породах.

3. Разработан алгоритм применения оконной обработки временных сейсмических разрезов для выделения зон повышенного поглощения сигнала, проверенный на примере Двуреченского месторождения.

## ДОКАЗАТЕЛЬСТВО ЗАЩИЩАЕМЫХ ПОЛОЖЕНИЙ

**ПОЛОЖЕНИЕ 1.** *Создана математическая модель трещиноватой среды, которая при моделировании сейсмического поля адекватно описывает характеристики распространения упругой волны через горные породы, содержащие трещины.*

Горные породы, включающие в себя трещиноватые области, влияют на характеристики упругих волн, проходящих через них. При прохождении сейсмического сигнала (упругой волны) свойства сигнала меняются по-разному для сплошной среды и для трещиноватой. При математическом моделировании существуют различные способы задания ориентированной трещиноватости в твердом теле. Нами предложено описывать отдельную трещину как бесконечно тонкий разрез конечной длины и нулевой толщины, распределение трещин по среде производить случайным образом. Необходимо оценить, насколько достоверно данный способ создания модели меняет спектральные характеристики сейсмических сигналов в процессе численного моделирования с помощью конечно-разностного алгоритма расчета. В качестве моделей использовались свойства и геометрия реальных образцов, что позволяет на фактическом материале оценить соответствие полученных сейсмических полей физическим процессам, происходящим в горных породах при распространении упругой волны.

Один из физических экспериментов с трещиноватыми образцами проведен А.Р. Грегори (см. Сейсмическая стратиграфия: использование при поисках и разведке нефти и газа. Ч.1 / Под ред. Ч. Пейтона. – Москва: Мир, 1982. – 375 с.). По описанию использованного образца была построена модель для последующего расчета (рис. 1).

По аналогии с экспериментом Грегори, модель состоит из 3 слоев. Первый и третий слой – алюминий, между которым находится трещиноватый песчаник с известной долей пустотного пространства (песчаник Береа). В созданной модели возможно задавать песчанику различный процент пустотного пространства (например, 10%, как в физическом эксперименте), в том числе и отсутствие трещин.

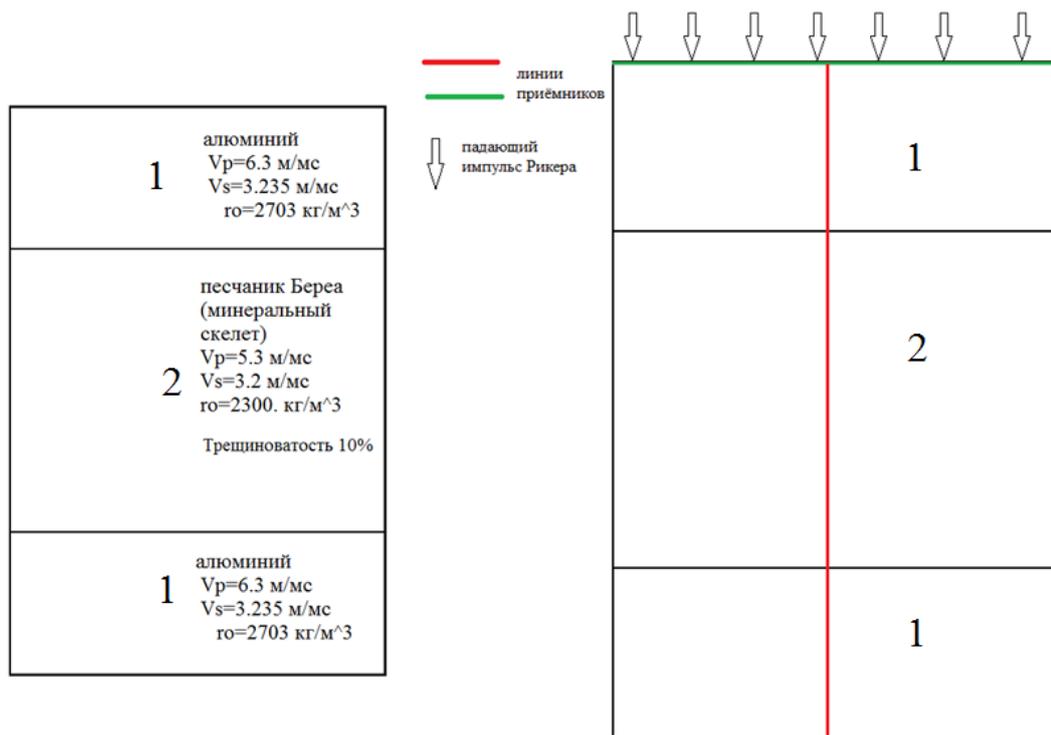


Рис. 1. Геометрия и свойства исходной модели для сравнения с лабораторным экспериментом Грегори

Трещины в модели распределяются случайным образом, двукратным обращением к датчику случайных чисел с нормировкой по размеру области 2. Отдельная трещина описывается двумя берегами и вершинами. Берега трещин нормальны лучу падающей волны (в данном случае – горизонтальны). Такие трещины ведут себя как трещины 1 типа (трещины отрыва). Расчеты проводились конечно-разностным методом НЕМР (методом Уилкинса) по существующей программе.

Ниже приведен пример схемы модельной среды, на которой рассчитывался и изучался характер дифракции падающей волны на системе случайных трещин. Для наглядности трещиноватая область ограничена по латерали (рис. 2).

Параметры вмещающей среды:  $V_p=3000$  м/с,  $V_s=2000$  м/с,  $\rho=2000$  кг/м<sup>3</sup>. Параметры слоя:  $V_p=2000$  м/с,  $V_s=1500$  м/с,  $\rho=2000$  кг/м<sup>3</sup>, сверху расположена линия «источник-приемник». Грани АВ, ВС, DA свободны от напряжений, на грань CD нормально падает плоская волна – импульс Рикера:

$$\dot{U}_y|_{CD} = F(t) = -2\pi f\sqrt{e} (t - t_0) \cdot e^{-2\pi f(t-t_0)^2}, \quad (1)$$

где  $\dot{U}_y$  – Y-компонента скорости смещения. Этот импульс характеризуется высокой плавностью функции, её производных и спектра.

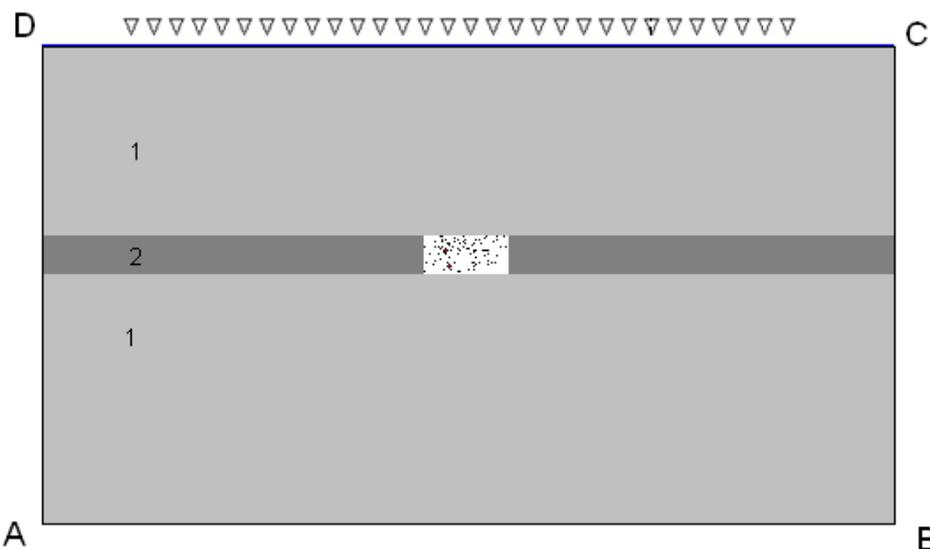


Рис. 2. Модель трещиноватой среды с трещинами 1-го типа (отрыва), трещиноватость 2%.

1 – вмещающая среда, 2 – слой с трещиноватой зоной, ▽- падающая волна

После расчета трассы для Y-компоненты скорости смещения визуализировались либо в авторском графическом пакете, реализованном на Fortran-90, либо в открытом пакете SeiSee. На рис. 3 приводится визуализированный в SeiSee результат расчета волнового поля.

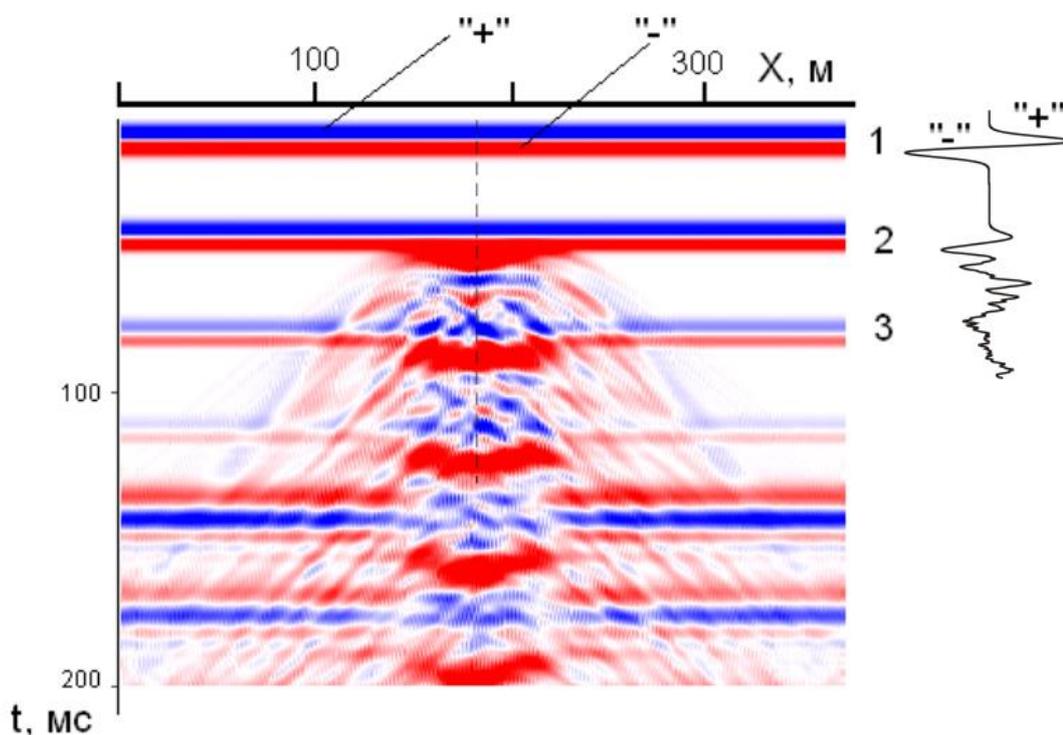


Рис. 3. Модельная сейсмограмма вертикальных смещений. Справа приведен участок трассы для пунктирной линии. Знаками "+" и "-" показаны положительная и отрицательная фазы импульса Рикера. Цифрами обозначены: 1 - падающая волна, 2 - отражение от кровли слоя, 3 - отражение от подошвы слоя

В модели среды задается множественная трещиноватость – 2% трещин 1-го типа. Зона трещиноватости (выделена светлым участком слоя 2 на рис. 2) составила 1600 расчетных точек – 32 трещины. Учитывая линейный размер зоны (80 ячеек) можно предполагать, что взаимный импеданс трещин невелик, но при длине волны около 100 ячеек дифракция в целом будет носить френгоферовский характер. На сейсмограмме хорошо виден общий вклад области дифракции в волновое поле: дифракция начинается сразу после образования отраженной волны (цифра 2) с 50 мс и к 175 мс достигает краев модели.

Вернемся к основной для данной главы задаче. В результате расчета получен синтетический временной разрез для линии регистрации сверху модели. По рассчитанным трассам изображенной сейсмограммы были проанализированы амплитудные спектры Прони и Фурье.

На рис. 4 приведены для сравнения спектры волны, прошедшей через модельный песчаник с трещиноватостью 10% (а) и спектры из работы Грегори (б). Видно качественное сходство изменений спектральных характеристик сейсмической волны в физическом эксперименте и математическом моделировании. В результате взаимодействия волны с трещинами происходит снижение энергии сейсмической волны, что в спектральной области отражается снижением амплитуд как на несущих, так и, в меньшей степени, на остальных частотах. Кроме того, максимум спектра смещается в более низкочастотную область, что говорит о повышенном поглощении высоких частот на мелких структурных неоднородностях.

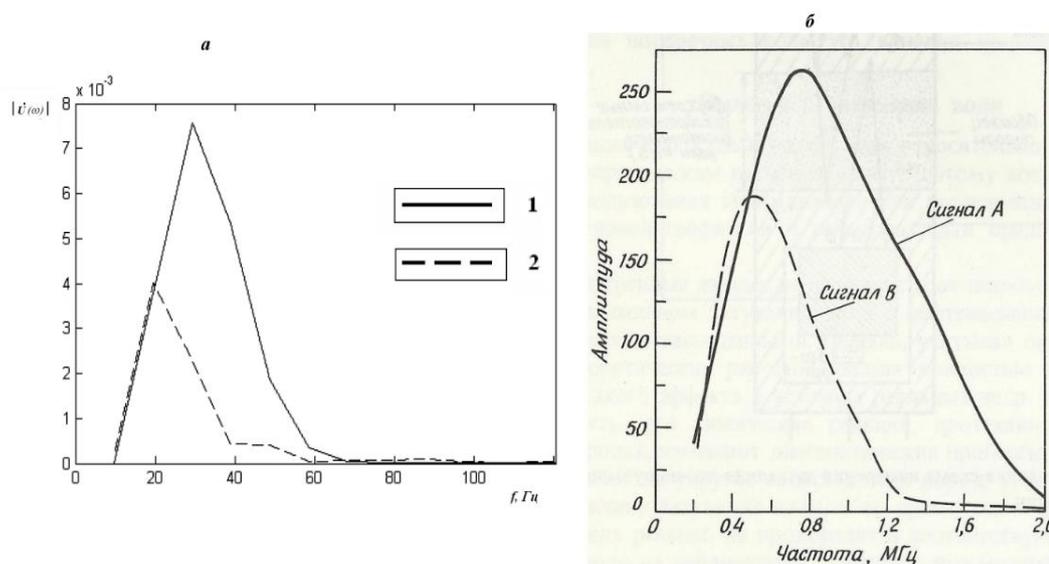


Рис. 4. Сравнение спектров с экспериментом Грегори. а – спектр падающего сигнала (1) и спектр сигнала на линии регистрации (2), б – результат Грегори

Таким образом, проведены расчеты и выполнено сопоставление с лабораторными данными по влиянию трещиноватости на спектр сейсмических трасс, что подтверждает **первое защищаемое положение**. Установлено, что предложенная математическая модель трещиноватой среды при моделировании сейсмического поля адекватно описывает характеристики распространения упругой волны через горные породы, содержащие трещины. Описанные в главе методы и результаты изложены в публикациях автора [2, 6, 8, и др.].

**ПОЛОЖЕНИЕ 2.** *Предложен способ создания математической модели пористой среды, при котором характеристики распространения упругой волны в такой среде соответствуют реальным свойствам сейсмических волн в пористых горных породах.*

Повышенная пористость горных пород также влияет на характеристики сейсмических волн. При математическом моделировании существуют различные способы задания пор в твердом теле. Нами предложено описать пористую среду математически, как область, состоящую из квадратных ячеек, причем некоторые ячейки обладают свойствами пористого пространства. То есть, в изначально сплошной среде твердой фазы случайным образом задать распределение пустот, при этом отдельные ячейки пор могут оказаться соединены друг с другом, что обеспечивает природную сложность и связность пористого пространства. Необходимо оценить, насколько достоверно данный способ создания модели меняет спектральные характеристики сейсмических сигналов в процессе численного моделирования с помощью конечно-разностного алгоритма расчета. В качестве моделей использовались свойства и геометрия реальных образцов. Рассмотрено влияние одиночной поры и совокупности пор на падающую сейсмическую волну. Расчеты на качественном и количественном уровне сравниваются с опубликованными данными математических расчетов и лабораторных экспериментов. Работа представляется поэтапно, в виде отдельных задач для проведения сейсмического моделирования.

#### *Задача об одиночной поре*

Рассмотрена модель одной крупной поры, заполненной жидкостью, и распространение упругих волн в такой среде. Для этой постановки целью расчета является сравнение общего волнового поля на качественном уровне с имеющимися расчетными результатами других исследователей.

Одна из недавних работ (Bagus Endar B. Nurhandoko, Pongga Dikdya Wardaya, John Adler, and Kisko R. Siahaan Seismic wave propagation modeling in porous media for various frequencies: A case study in carbonate rock Citation: AIP Conference Proceedings 1454, 109 (2012); doi: 10.1063/1.4730699) посвящена расчету дифракции сейсмического поля на одиночной поре для различных частот. В ней приведен срез изображения образца карбонатной породы и упрощенная матрица упругих свойств для проведения расчетов.

Исходными данными для проведенного нами расчета распространения плоской упругой волны через одиночную пору были параметры модели образца из данной работы и характеристики падающего сигнала (рис.5). Сигнал (упругая волна) взят в виде затухающей синусоиды с длиной волны, примерно в 10 раз меньшей характерной «толщины поры»  $L$  (показана на рисунке). Конкретно в расчете  $L$  составило 200 расчетных ячеек, длина волны  $\lambda=20$  расчетных ячеек.

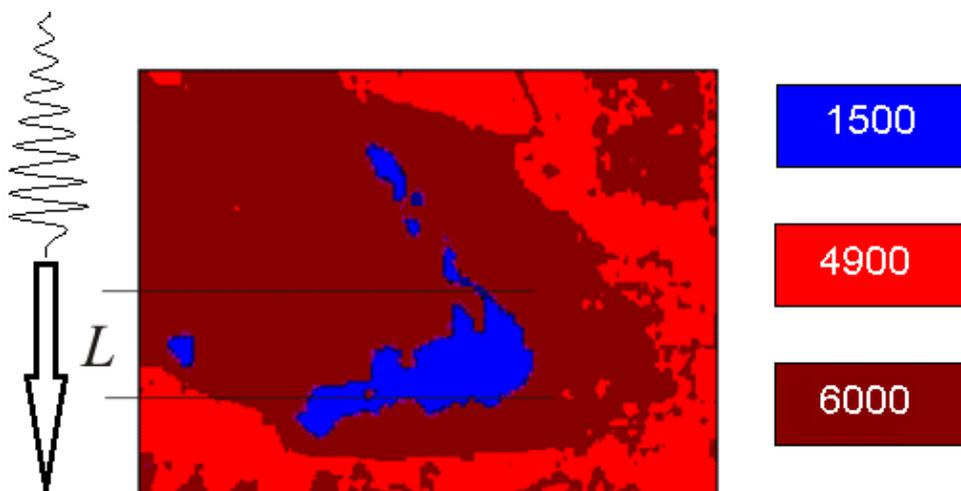


Рис. 5. Модель среды в задаче об одиночной поре. Справа приведена шкала продольной скорости в среде, м/с

В такой постановке основной особенностью начала дифракционного процесса является обтекание фронта падающей волны вокруг поры. Материал поры – флюид – обладает существенно более низким импедансом. Совокупность преломлений-отражений на отдельной поре приводит к хорошо различаемому эффекту локального замедления фронта волны.

На более поздней стадии (рис. 6, а), когда волна прошла через пору, отразилась от границы модели и вновь прошла через пору, волновая картина в целом становится почти хаотичной. Остаются небольшие участки с цугами продольных волн (показаны на рис. 6 литерами Р). Так как мы сравниваем свой расчет с имеющимся результатом из упомянутой работы, то на рис. 6, б приводится рис. 10 из этой работы.

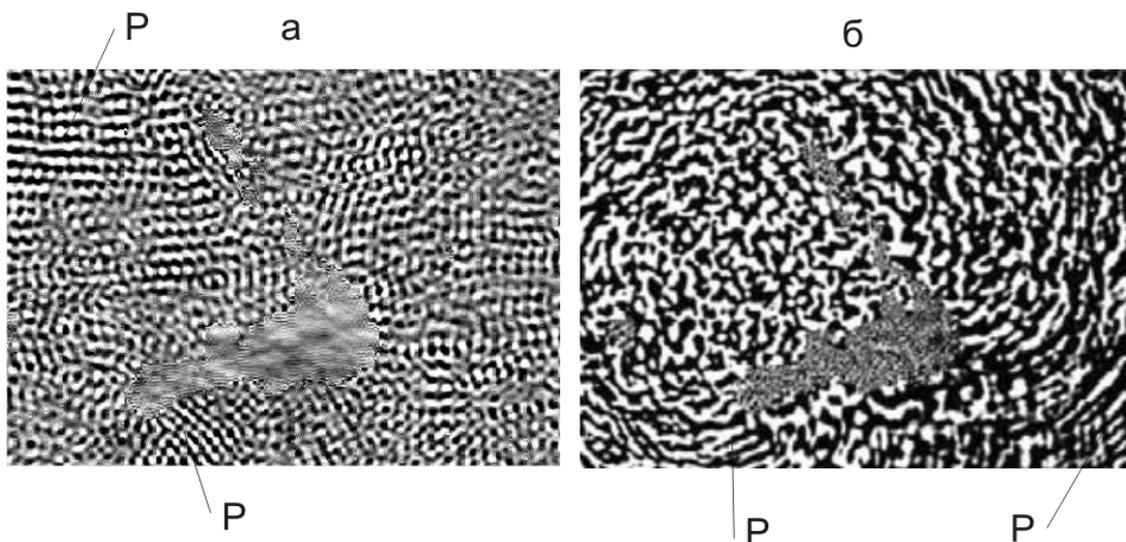


Рис. 6. Сейсмическое поле в среде с одиночной порой. а – результат расчета, выполненного в диссертации, б – результат из указанной статьи

Видно, что пора в обоих случаях насыщена короткопериодными колебаниями, берега поры отчетливо «прорисованы» сейсмическим полем, волновому полю присущи явно выраженные картины дифракции. Тем самым было выполнено своего рода качественное тестирование расчетной программы, которая далее применена для решения следующей задачи.

#### *Задача о пористом слое*

Рассмотрим характеристики прохождения плоской волны через пористый слой со случайным распределением пор. Поры заданы явно, в виде объектов конечных размеров с отличными от вмещающих минералов свойствами. Конкретное положение ячеек пор в массиве твердой фазы было определено алгоритмом случайного распределения, в результате чего геометрия микроструктуры содержит поры, которые при формировании соединились друг с другом случайным образом.

Рассмотрены два значения пористости – 9% и 17 %, так как именно для таких значений в литературе имелись данные лабораторного моделирования (Bonnan S., Hereil P-L., Collombet F. Experimental characterization of quasi static and shock wave behavior of porous aluminum // Journal of applied physics. - 1998. - V. 83. - No. 11. -P. 5741-5749). Геометрия задачи показана на рис. 7.

На границу АВ падает плоская продольная волна скорости смещения. Среда до линии EF – однородная, с параметрами алюминия Al-6061:  $V_p = 6260$  м/с,  $V_s = 3080$  м/с,  $\rho = 2700$  кг/м<sup>3</sup>, после линии EF задается случайная пористость (конкретно на рисунке – 11 %), свойства флюида  $V_p = 331$  м/с,  $V_s = 0$  м/с,  $\rho = 1,225$  кг/м<sup>3</sup>.

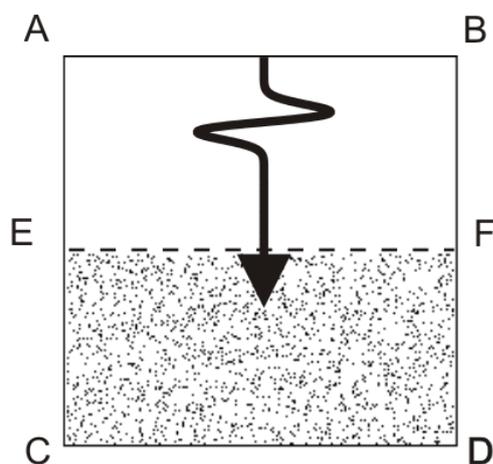


Рис. 7. Геометрия модели, содержащей пористый слой

В отличие от предыдущей задачи, в данном случае для точного определения скорости волны необходимо оценивать перемещение экстремума волны вдоль модели, поэтому в качестве исходного сигнала взят импульс Рикера (см. формулу (1)).

Выбор размеров пор и характерных длин волн определялся, исходя из возможности количественного сравнения с результатами физического моделирования. Наиболее оптимальны для данной цели следующие параметры: размер поры порядка  $20 \times 10^{-6}$  м, частота акустического сигнала 5 МГц, длина волны  $\approx 0,1$  см.

Качественный групповой эффект от ансамбля пор показан на рис. 8 а, б, на котором приведены поля скоростей смещений для двух моментов времени.

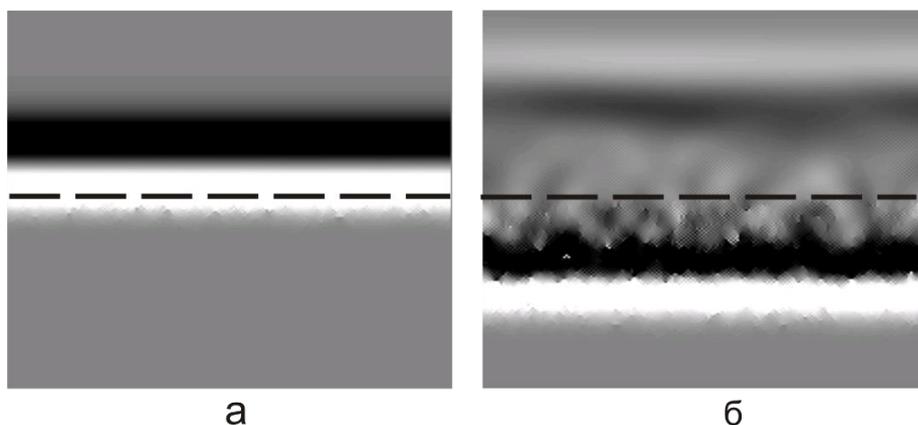


Рис. 8. Изменение фронта падающей волны на ансамбле пор

Групповой эффект от ансамбля пор прежде всего (и очевиднее всего) сказывается на кинематическом параметре – скорости распространения упругих волн. Для спеченного алюминия в упомянутой работе опубликованы данные физического моделирования и рассмотрены два случая пористости – 9% и 17%.

Для анализа вида зависимости скорости волны от пористости также дополнительно были проведены расчеты для нескольких различных значений

пористости (рис. 9). Очевидно, что зависимость близка к линейной, а также заметно весьма точное соответствие опубликованных результатов (обозначены квадратами) полученному тренду.

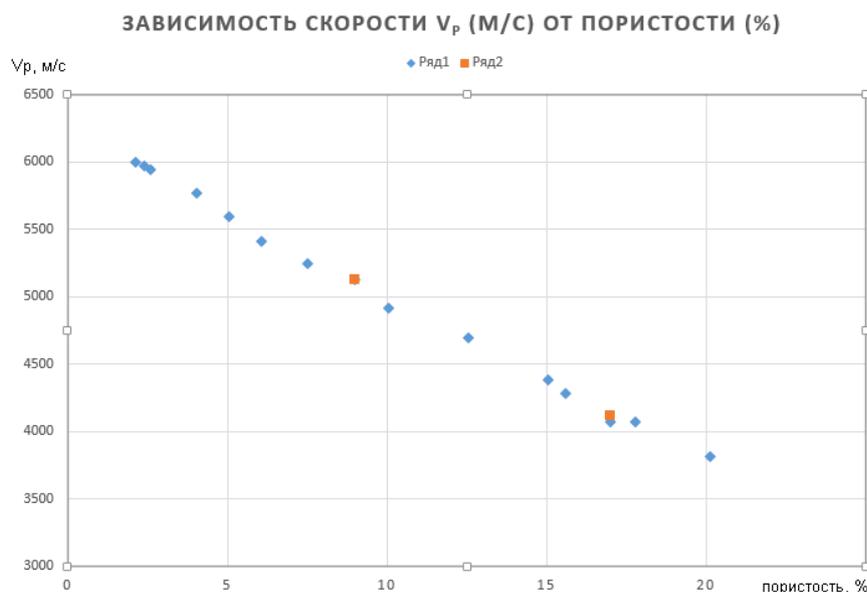


Рис. 9. Зависимость  $V_p$  от пористости. Квадраты – экспериментальные данные

В расчетах были получены следующие значения: при пористости 9% значение скорости продольной волны  $V_p = 5123$  м/с, а при пористости 17% значение скорости продольной волны  $V_p = 4074$  м/с.

Таким образом, при численном моделировании значения скоростей в пористом алюминии отличались от скоростей из эксперимента при пористости 9% на 0,04 %; а при пористости 17 % отличие составило 1,1 %.

Кроме изменения кинематической характеристики – скорости распространения – пористая среда влияет и на динамическую характеристику – спектр сигнала – так же, как это было показано во второй Главе для трещин.

Таким образом, оценено влияние пористости среды на скорость распространения и спектр сейсмического сигнала. Получено хорошее соответствие с расчетными и лабораторными данными, что подтверждает **второе защищаемое положение**: характеристики распространения упругой волны в математической модели пористой среды, созданной предложенным способом, соответствуют реальным свойствам сейсмических волн в пористых горных породах. Описанные в главе методы и результаты изложены в публикациях автора [1, 5, 7, и др.].

**ПОЛОЖЕНИЕ 3.** Разработан алгоритм применения оконной обработки временных сейсмических разрезов для выделения зон повышенного поглощения сигнала, проверенный на примере Двуреченского месторождения.

Выявленные свойства спектров сейсмических сигналов, дифрагированных на трещинах и порах, возможно использовать для обработки реальных временных разрезов. Цель такой обработки – выявление тех зон на разрезах, где изменения спектра будут свидетельствовать об относительно повышенном затухании сигнала.

Был выполнен спектральный анализ реального сейсмического разреза одного из высокодебитных месторождений углеводородов Томской области. Воспользовавшись известным алгоритмом преобразования Прони, произведем блочную обработку трасс временного разреза. При этом каждой точке обрабатываемой трассы будем ставить в соответствие спектральную плотность Прони, тем самым снова формируя трассу (рис. 10). Эллипсом на рис. 10, d обозначен хорошо видный участок, на котором в спектре почти исчезла составляющая 27 Гц. Этот участок в действительности соответствует скоплению углеводородов, выявленному ранее по итогам работы В.А. Конторовича с коллегами (2011 г.) в коллекторе с высокой проницаемостью.

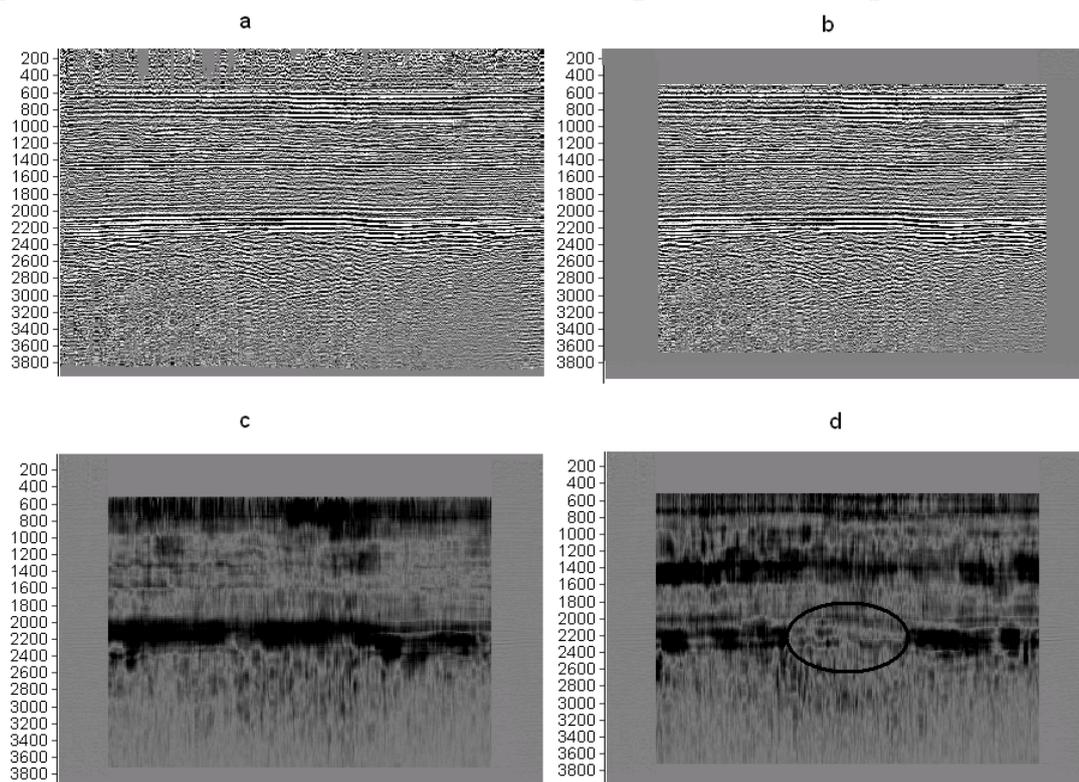


Рис. 10. Демонстрация возможностей фильтрации Прони. a – исходный временной разрез, b – окно обработки, c – разрез из «трасс» для частоты 20 Гц, d – разрез из «трасс» для частоты 27 Гц

Приведем окончательный результат обработки выбранного на профиле интервала по всей оси времен с помощью оконной фильтрации Фурье с восстановлением временного характера разреза (рис. 11).

Благодаря примененному нами графу обработки разреза, зоны неоднородностей должны выделяться на разрезе меньшими амплитудами волны, по сравнению с окружающими трассами. Такой эффект мы наблюдаем в средней части изучаемого профиля на временах 2100-2300 мс, где среди четких фаз юрских горизонтально-слоистых отложений осадочного чехла появляется лагуна с нарушением чередования и прослеживания фаз, с низкими амплитудами волн (рис. 11). Положение в плане данной низкоамплитудной зоны соответствует контуру обнаруженной залежи (по результатам исследований В.А. Конторовича с соавторами). Возможно, именно за счет наличия флюида происходит существенная потеря энергии сейсмической волны.

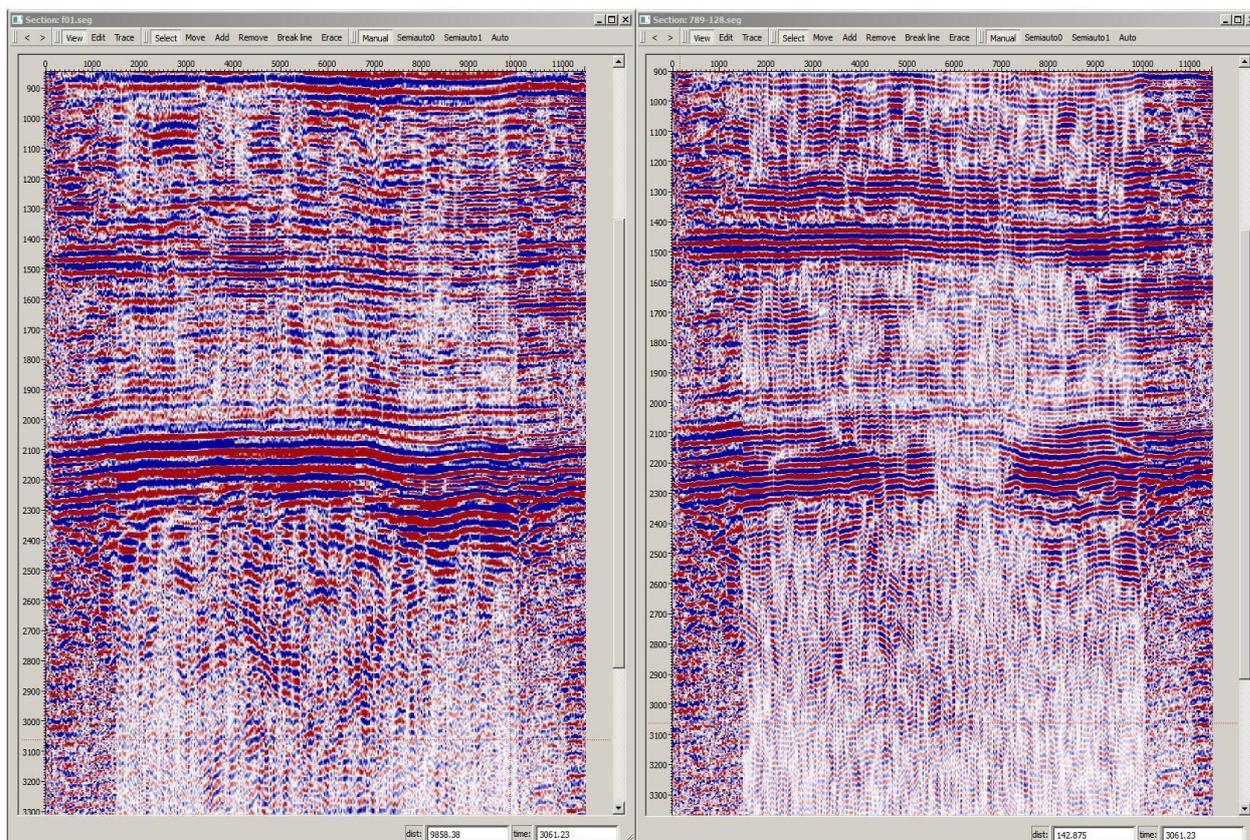


Рис. 11. Обработка сейсмического разреза с помощью преобразования Фурье. Появление «лагуны». Слева – необработанный разрез, справа – обработанный

Анализ результатов обработки, проведенной на примере Двуреченского месторождения, позволяет утверждать, что разработан новый алгоритм применения оконной обработки временных сейсмических разрезов для выделения зон повышенного поглощения сигнала, что подтверждает **третье защищаемое положение**. Алгоритм позволяет без предварительного знания данных ГИС и петрофизических данных выделять возможные коллектора, как зоны, определяющие наибольшее поглощение/затухание энергии сейсмических волн. Описанные в главе методы и результаты изложены в публикациях автора [4 и др.].

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертации показано, что явное описание определенных структурных неоднородностей среды – пор и трещин при численном моделировании является простым и эффективным способом изучения их влияния на характеристики проходящих упругих волн.

В частности, трещиноватая среда может быть описана моделью изначально однородной среды с наложением случайно распределенных трещин, каждая из которых представляет собой разрез конечной длины и нулевой толщины. Созданная математическая модель трещиноватой среды при моделировании сейсмического поля адекватно описывает характеристики распространения упругой волны через горные породы, содержащие трещины (**первое защищаемое положение**).

Другой вид микроструктуры пород – пористая среда – может быть описана моделью однородного твердого скелета со случайно распределенными порами, каждая из которых представляет собой включение конечных размеров и состоит из одной или нескольких изометричных ячеек. Предложенный способ создания математической модели пористой среды, обеспечивает совпадение характеристик распространения расчетной упругой волны в такой среде с реальными свойствами сейсмических волн в пористых горных породах (**второе защищаемое положение**).

В рамках подхода явного задания неоднородностей среды был установлен характер изменения амплитудного спектра сейсмических трасс после прохождения волной трещиноватой и пористой зоны. При этом изменение свойств спектра, рассчитанных при моделировании сейсмических сигналов прямо соответствует спектральным изменениям опытно обнаруженных волн, прошедших через пористые и трещиноватые образцы.

Сходный характер изменений спектра колебаний плоской продольной волны, прошедшей через слой среды с ориентированной трещиноватостью и с насыщенными изолированными порами позволяет предположить, что механизмы взаимодействия и влияния похожи. В результате взаимодействия волны с данными особенностями структуры происходит снижение энергии сейсмической волны, что в спектральной области отражается снижением амплитуд на несущих (в основном) частотах. Кроме того, максимум спектра смещается в более низкочастотную область, что говорит о повышенном поглощении высоких частот на мелких структурных неоднородностях.

На основании первых двух защищаемых положений предложен алгоритм оконной фильтрации для выделения во временных разрезах зон затухания, проведен анализ временного разреза для продуктивной толщи терригенных отложений одного из месторождений Томской области. Область

повышенного затухания после фильтрации наблюдается в целевом интервале на каждом из обработанных разрезов, причем положение в плане данных низкоамплитудных зон тяготеет к контурам обнаруженной залежи, где, возможно, за счет наличия флюида происходит существенная потеря энергии сейсмической волны. Таким образом, доказывается **третье защищаемое положение**, и утверждается, что разработан алгоритм применения оконной обработки временных сейсмических разрезов для выделения зон повышенного поглощения сигнала, проверенный на примере Двуреченского месторождения. Разработанный алгоритм может быть использован на стадии математической обработки данных сейсморазведки как один из сейсмических атрибутов, позволяющих локализовать и уточнить области повышенных значений фильтрационно-емкостных свойств (ФЕС) пород.

## СПИСОК ОСНОВНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

### Публикации в журналах перечня ВАК

1. Ислямова (Шатская) А. А. Численное моделирование распространения сейсмических волн в среде, содержащей одиночную пору или пористый слой / Немирович-Данченко М. М., Ислямова (Шатская) А. А. // Физическая мезомеханика. – 2015. – Т. 18 – №. 3. – С. 101-104.
2. Ислямова (Шатская) А. А. Моделирование влияния трещиноватости и пористости горных пород на сейсмический сигнал / Ислямова (Шатская) А. А. // Международный научно-исследовательский журнал. – 2016. – № 11-5. – С. 81-85.
3. Ислямова (Шатская) А.А. Комбинированная методология вычисления фронтов сейсмических волн для анизотропных сред на примере гексагональных кристаллов / Мельникова Н.А., Немирович-Данченко М.М., Ислямова (Шатская) А.А., Кпата М.Э. // Успехи современного естествознания. – 2017. – № 2., с. 123-127

### Публикации в изданиях, индексируемых в Scopus и WoS

4. Shatskaya A. A. Modeling of inclined fracture network and calculation of fracture effect on seismic signal spectrum / Shatskaya A. A., Nemirovich-Danchenko M. M., Terre D. A. // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – IOP Publishing, 2014. – Т. 21. – №. 1. – С. 012016.
5. Shatskaya A. A. Modeling of seismic field in porous medium: Simulation study of single pore and pore ensemble effects / Shatskaya A. A., Nemirovich-

- Danchenko M. M., Terre D. A. //IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – IOP Publishing, 2015. – Т. 27. – №. 1. – С. 012027.
6. Islyamova A. Detection of attenuation zones in a time section based on running window filtration / Islyamova A., Nemirovich-Danchenko M., Terre D. // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – IOP Publishing, 2016. – Т. 43. – №. 1. – С. 012056.

#### Публикации в прочих научных изданиях

7. Шатская А. А. Численное моделирование влияния трещиноватости пласта на амплитудный спектр сейсмического сигнала / Немирович-Данченко М. М., Шатская А. А. // Интерэкспо Гео-Сибирь. – 2013. – Т. 2. – №. 2. – С. 141-144.
8. Шатская А. А. Расчет влияния системы наклонных трещин на сейсмическое поле / Немирович-Данченко М. М., Шатская А. А. // Интерэкспо Гео-Сибирь. – 2014. – Т. 2. – №. 2. – С. 177-180.
9. Шатская А. А. Моделирование сейсмического поля в пористой среде: расчет для одиночной поры и для ансамбля пор / Немирович-Данченко М. М., Шатская А. А. // Интерэкспо Гео-Сибирь. – 2015. – Т. 2. – № 3. – С. 159-163.