

На правах рукописи



**Азаров Антон Витальевич**

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОВЕРХНОСТНЫХ ВОЛН И  
МНОГОКАНАЛЬНАЯ ФИЛЬТРАЦИЯ СЕЙСМИЧЕСКИХ ДАННЫХ НА  
ОСНОВЕ ЧАСТОТНО-ВРЕМЕННЫХ ПРЕДСТАВЛЕНИЙ И  
ПРОЕКЦИОННЫХ МЕТОДОВ**

Специальность 1.2.2 –  
«Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ»

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Новосибирск – 2024

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте горного дела им. Н.А. Чинакала Сибирского отделения Российской академии наук

Научный руководитель **Сердюков Александр Сергеевич**,  
кандидат физико-математических наук,  
Федеральное государственное бюджетное учреждение  
науки Институт нефтегазовой геологии и геофизики им.  
А.А. Трофимука Сибирского отделения Российской  
академии наук

Официальные оппоненты: **Кузнецов Сергей Владимирович**,  
доктор физико-математических наук, профессор,  
Федеральное государственное бюджетное учреждение  
науки Институт проблем механики им. А.Ю.  
Ишлинского Российской академии наук, главный  
научный сотрудник, лаборатория механики  
разрушения и прочности конструкции

**Пономаренко Андрей Валерьевич**,  
кандидат физико-математических наук,  
Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего образования  
«Санкт-Петербургский государственный университет»,  
кафедра физики Земли, старший научный сотрудник

Ведущая организация: Федеральное государственное автономное  
образовательное учреждение высшего образования  
«Балтийский федеральный университет имени  
Иммануила Канта»

Защита состоится 16 апреля 2024 г. в 15.00 на заседании диссертационного совета 24.1.047.01 на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института вычислительной математики и математической геофизики Сибирского отделения Российской академии наук (ИВМиМГ СО РАН) по адресу: 630090, г. Новосибирск, проспект Академика Лаврентьева, 6, конференц-зал ИВМиМГ СО РАН.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ИВМиМГ СО РАН:  
<http://icmmg.nsc.ru>.

Автореферат разослан 9 февраля 2024 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета 24.1.047.01,  
доктор физико-математических наук



Сорокин Сергей Борисович

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность работы.

Сейсмическое зондирование и наблюдения упругих колебаний, генерируемых горными породами при их деформировании, используются для изучения строения и свойств геологической среды, дистанционного контроля геодинамических процессов природного и техногенного происхождения. При разработке полезных ископаемых, например нефти и газа, широкое применение получили сейсмическая разведка месторождений на отраженных волнах и мониторинг состояния продуктивных пластов и технологических процессов, например гидроразрыва, по эндогенному микросейсмическому излучению. При обработке данных, их редактировании, выделении полезных сигналов используются различные подходы, основанные на прямом моделировании распространения сейсмических волн, решении обратных задач динамической теории упругости и анализа сигналов.

Методами решения прямых и обратных задач динамической сейсмологии занимался ряд российских ученых: Г.И. Петрашень, М.М. Лаврентьев, А.С. Алексеев, С.В. Гольдин, Б.М. Михайленко, В.Г. Романов В.Г., С.И. Кабанихин и др., результаты исследований сейсмичности горных пород и ее использования для контроля геодинамических процессов, представлены в работах А.В. Николаева, М.А. Садовского, Г.Н. Ерохина, А.Н. Кремлева и др., развитием численных методов обработки данных микросейсмического мониторинга занимались Колесников Ю.В., В.Н. Мартынов, А.Ф. Кушнир, S. Maxwell, P. Dunkan, L. Eiser, Д.А. Маловичко, V. I. Grechka, В.А. Рыжов, Рабинович Е.В., Вайнмастер П.И., Александров С. И., Мишин В.А., Шмаков Ф.Д., Бортников П.Б., Ерохин Г.Н., Кремлев А.Н. и др.

Регистрация и выделение сейсмических сигналов, приходящих из глубины породного массива, в условиях действующих предприятий затруднена интенсивными шумами, высокий уровень которых снижает информативность и достоверность сейсмических методов разведки и мониторинга месторождений полезных ископаемых. Поэтому задача снижения уровня шума в данных и усиление полезных сигналов является важной, особенно в случае использования наземных систем наблюдения, где основная часть шумов представляет собой совокупность поверхностных волн, амплитуды которых на приемниках могут многократно превышать амплитуды объемных волн.

На сегодняшний день существующие методы не позволяют полностью решить проблему шума в данных, что делает её актуальной. Большая часть разработанных методов основана на использовании некоторых характеристик наблюдаемых сигналов, чаще всего временных и пространственных. При таком подходе могут возникать трудности в случае совпадения характеристик полезных сигналов и волн-помех. Например, применение полосовой фильтрации или  $f$ - $k$  фильтрации при пересечении спектров помех и полезных сигналов может приводить либо к тому, что в данных остается высокий уровень шума, либо к искажению полезного сигнала, либо и к тому и другому. Помимо этого, из-за малого числа используемых приемников при сейсмических наблюдениях, может также возникать пространственный алиасинг, который приведет к снижению эффективности такого типа фильтров.

В данной работе задачу подавления шума предлагается решать путем построения математических моделей и использования методов прямого моделирования. Такой подход позволит выделять только ту часть данных, которая соответствует модели (например, модели шума) и оказывать минимальное влияние на оставшуюся.

**Связь темы диссертации с научно-техническими программами.** Диссертационная работа выполнена в рамках проекта Федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014 - 2020 годы» по теме «Разработка научно-технических основ создания технологии микросейсмического мониторинга геодинамических процессов в массиве горных пород при разработке месторождений твердых полезных ископаемых в сложных горно-геологических условиях» (проект № 14-604-21-0047), а также при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант «Развитие метода эмиссионной томографии в задачах мониторинга добычи полезных ископаемых на основе учета и определения механизмов микросейсмических событий» №16-35-00513, «Развитие методов обработки данных микросейсмического мониторинга с учетом анизотропии горных пород» №15-35-20932, «Создание и исследование новых адаптивных методов частотно-временной и пространственно-временной спектральной фильтрации сейсмических сигналов» №18-35-20030) и Российского научного фонда (проект «Развитие сейсморазведки на поверхностных волнах на основе создания и исследования метода многоканального анализа адаптивных частотно-временных представлений данных» №22-77-10023).

**Целью диссертационной работы** является разработка методов математического моделирования поверхностных волн в данных наземной сейсморазведки для последующего их подавления, разработка многоканальной фильтрации микросейсмических данных, численная реализация разработанных методов в виде комплекса проблемно-ориентированных программ.

**Предметом исследования** являются методы подавления помех и усиления полезного сигнала в сейсморазведке на отраженных волнах и пассивном микросейсмическом мониторинге с использованием наземных систем наблюдения, включающие в себя применение многоканальной фильтрации данных, моделирования волн-помех и полезного сигнала.

**Объектом исследования** являются поверхностные сейсмические волны, выступающие в роли помех в данных сейсморазведки на отраженных волнах и микросейсмического мониторинга геодинамических процессов разработки полезных ископаемых осуществляемых с использованием наземных систем наблюдения, а также сейсмические волновые поля, возникающие в результате микросейсмической эмиссии вследствие геодинамических процессов в ходе разработки полезных ископаемых, выступающие в качестве полезного сигнала и требующие усиления в целях проведения мониторинга.

**Основные задачи исследования:**

1. Разработка метода моделирования поверхностных волн в наземной сейсморазведке в условиях пересечения спектров с объемными волнами для

последующего вычитания полученной модели из данных с целью подавления поверхностно-волновых помех.

2. Разработка и исследование метода многоканальной фильтрации микросейсмических данных для подавления сигналов от источников, расположенных вне заданной области среды и селективной фильтрации сигналов, механизм излучения которых соответствует природе наблюдаемого геодинамического процесса.

3. Разработка комплекса программ на основе предложенных методов для моделирования и подавления поверхностных волн в данных наземной сейсморазведки, многоканальной фильтрации и локации микросейсмических событий.

**Методы исследования:** анализ и обобщение сведений и публикаций по методам подавления поверхностно-волновых помех при обработке данных наземной сейсморазведки и микросейсмического мониторинга, методы решения обратных задач, корреляционного анализа, моделирования распространения упругих волн в сложно построенных упругих средах, методы частотно-временного и пространственного спектрального анализа данных на основе применения оконных Фурье и Вейвлет преобразований, преобразования Стоквелла, оптимизационные методы поиска минимума функционалов и решения плохо-обусловленных систем линейных алгебраических уравнений, численный метод конечных разностей моделирования распространения сейсмических волновых полей. Проведение комплексных исследований проблемы повышения эффективности подавления поверхностно-волновых помех и усиления полезного сигнала в данных наземной сейсмической разведки и микросейсмического мониторинга путем выполнения вычислительных экспериментов с использованием алгоритмов моделирования распространения сейсмических волновых полей в неоднородных средах.

**На защиту выносятся** следующие результаты, соответствующие четырем пунктам (1, 2, 3, 9) паспорта специальности 1.2.2 – «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ» по техническим наукам.

*Пункт 1: Разработка новых математических методов моделирования объектов и явлений.*

Метод моделирования поверхностных волн в наземной сейсморазведке, состоящий из последовательно выполняемых операций преобразования сейсмических данных в частотно-временную область, определения групповых скоростей поверхностных волн и соответствующих времен их прихода на приемники, внесения в данные соответствующих временных поправок, выделения мод поверхностных волн путем анализа главных компонент волнового поля и обратного преобразования выделенных мод во временную область.

Выходная модель описывает основные моды поверхностных волн, излучаемых совокупностью поверхностных источников, действующих в зоне приема, и их вклад в сейсмические данные. В численной реализации метода перевод данных из временной области в частотно-временную и обратно выполняется на основе прямого и обратного преобразований Стоквелла (ST), выделение волновых мод – на основе преобразования Кархунена-Лоэва (KLT). Топография дневной поверхности и

нерегулярность расстановки приемников учитываются во временных поправках путем решения прямой задачи распространения поверхностной волны в скоростной модели приповерхностной области среды.

*Пункт 2: Разработка, обоснование и тестирование эффективных вычислительных методов с применением современных компьютерных технологий.*

Метод многоканальной фильтрации микросейсмических данных путем их проецирования в частотной области на пространство решений уравнений распространения сейсмических волн от точечных источников с произвольным сейсмическим моментом, расположенных в заданной области неоднородной среды, с внесением в решения фазовых поправок, определяемых из анализа сигналов от тестового физического источника.

Метод обеспечивает подавление сигналов от источников, расположенных вне заданной (целевой) области среды, и возможность селективной фильтрации сигналов, механизм излучения которых соответствует природе наблюдаемого геодинамического процесса. Искомое пространство решений представляет собой линейную оболочку системы векторов, содержащих все возможные значения амплитуд и фаз сигналов, принимаемых от точечных источников из заданной (целевой) области среды, механизм излучения которых описывается тензором сейсмических моментов. Численная реализация метода основана на аппроксимации проектора микросейсмических данных с использованием усеченного сингулярного разложения.

*Пункт 4: Реализация эффективных численных методов и алгоритмов в виде комплексов проблемно-ориентированных программ для проведения вычислительного эксперимента.*

Комплекс программ на основе разработанных методов для моделирования и подавления поверхностных волн в данных наземной сейсморазведки, многоканальной фильтрации и локации микросейсмических событий. Программы «MSM DatProc» и «PF Seism» из состава комплекса зарегистрированы в Федеральной службе по интеллектуальной собственности и использованы для проведения вычислительных экспериментов.

*Пункт 9: Постановка и проведение численных экспериментов, статистический анализ их результатов, в том числе с применением современных компьютерных технологий.*

Результаты обработки полевых данных микросейсмического мониторинга гидроразрыва пласта на нефтяном месторождении и данных наземной сейсморазведки на основе разработанного комплекса программ.

**Научная новизна** выносимых на защиту результатов заключается в следующем.

Отличительной особенностью разработанного метода моделирования поверхностных волн в данных наземной сейсморазведки являются: 1) состав и последовательность выполнения численных операций преобразования сейсмических данных; 2) определение временных поправок, вводимых в частотно-временное представление данных на основе анализа дисперсионных кривых групповой скорости

поверхностных волн; 3) получение математической модели, описывающей основные моды поверхностных волн, которые излучаются совокупностью поверхностных источников, действующих в зоне приема.

Новизна разработанного метода многоканальной фильтрации микросейсмических данных состоит в: 1) выделении полезных сигналов путем проецирования данных микросейсмического мониторинга в частотной области на пространство решений уравнений распространения сейсмических волн от точечных источников с произвольным сейсмическим моментом, расположенных в заданной области неоднородной среды; 2) введении в решения фазовых поправок, определяемых из анализа сигналов от тестового физического источника.

Предложены численные реализации разработанных методов в виде комплекса программ для моделирования и подавления поверхностных волн в данных наземной сейсморазведки, многоканальной фильтрации и локации микросейсмических событий.

**Достоверность и обоснованность научных результатов, выводов и рекомендаций** обеспечивается использованием в качестве основы моделирования фундаментальных законов динамической теории упругости (сеймики), выбором теоретически обоснованных численных алгоритмов преобразования сейсмических данных, корректностью принятых допущений, достаточным количеством численных экспериментов, использованием большого объема синтетических данных и примеров для сравнения разработанных методов с известными методами полосовой и f-k фильтраций, работоспособностью созданного комплекса программ на примере натуральных данных микросейсмического мониторинга гидроразрыва нефтяного пласта.

**Практическая ценность** диссертационной работы заключается в возможности применения ее результатов (методов, комплекса программ, численных расчетов) для повышения эффективности подавления поверхностных волн в данных наземной сейсморазведки, выделения полезных сигналов микросейсмического мониторинга геодинамических процессов различной природы и локации микросейсмических событий в условиях развитой инженерной инфраструктуры района работ (населенные пункты, транспортные пути, горнодобывающие предприятия и др.) и связанных с ней интенсивных техногенных помех. Моделирование разработанным методом поверхностных волн с последующим их вычитанием из сейсмограмм подавляет поверхностные волны-помехи в данных наземной сейсморазведки более эффективно, чем известные методы полосовой и f-k фильтраций, особенно при нерегулярных и разряженных расстановках приемников. Применение разработанного метода многоканальной фильтрации к данным микросейсмического мониторинга обеспечивает возможность локализации гипоцентров микросейсмических событий методом эмиссионной сейсмической томографии в условиях сильных помех, начиная с минимального отношения сигнал/шум минус 17,6 дБ.

Численная реализация разработанных методов в виде комплекса программ для ЭВМ «MSM DatProc» и «PF Seism» обеспечивает возможность применения результатов исследований в обработке натуральных данных наземной сейсморазведки, микросейсмического мониторинга гидроразрыва нефтяных пластов, других геодинамических процессов.

**Теоретическая значимость результатов** заключается в разработке, тестировании, численном исследовании и обосновании применимости новых эффективных методов моделирования поверхностных волн в данных наземной сейсморазведки и многоканальной фильтрации микросейсмических данных.

Разработанный метод математического моделирования решает задачу построения модели, описывающей основные моды поверхностных волн, которые излучаются совокупностью поверхностных источников, действующих в зоне приема, и нахождения их вклада в сейсмические данные. Результаты моделирования поверхностных волн разработанным методом образуют основу эффективного их подавления в данных наземной сейсморазведки. Область применения метода включает сейсмические наблюдения с нерегулярными, разряженными и неплоскими расстановками приемников.

Предложенный метод многоканальной фильтрации микросейсмических данных применим для усиления полезных сигналов от микросейсмических событий, индуцированных локальными геодинамическими процессами, например, гидроразрывом нефтяного пласта. Алгоритм проецирования микросейсмических данных в частотной области, лежащий в основе метода, обеспечивает подавление сигналов от точечных источников с произвольным сейсмическим моментом, расположенных вне заданной (целевой) области неоднородной среды, и возможность селективной фильтрации сигналов, механизм излучения которых соответствует природе наблюдаемого геодинамического процесса.

**Представление работы и апробация результатов.** Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на семинарах «Геофизический семинар», ИНГГ СО РАН (руководитель член-корреспондент РАН, профессор И.В. Кулаков); «Современные геофизические поля и процессы, вызванные техногенной деятельностью; геомеханика горных пород и их массивов», ИГД СО РАН (руководитель, д.т.н., профессор В.М. Серяков), на всероссийских научных конференциях «Горняцкая смена» (Новосибирск, ИГД СО РАН, в 2015 и 2017 году); «Геодинамика и напряженное состояние недр Земли» (Новосибирск, ИГД СО РАН, 2015, 2017, 2019 и 2022); на всероссийской научной молодежной конференции с участием иностранных ученых «Трофимуковские Чтения» (Новосибирск, ИНГГ СО РАН, 2015); на XX и XXII Международном научном симпозиуме имени академика М. А. Усова «Проблемы геологии и освоения недр» (Томск, ТГУ, 2016, 2018); Международном форуме «Интерэкспо ГЕО-Сибирь» (Новосибирск, в 2016, 2017, 2018, 2019, 2020, 2022); на 15-ой международной конференции «15th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM» (Болгария, Албена, 2015); на международной конференции «Теория и численные методы решения обратных и некорректных задач» (Новосибирск, СО РАН, 2015), на Society of Exploration Geophysicists International Exposition and Annual Meeting 2019, SEG 2019 (San Antonio, Texas, 15-20 September 2019); и 80th EAGE Conference and Exhibition 2018: Opportunities presented by the energy transition (Copenhagen, Denmark, 11-14 June 2018).

**Публикации.** Основные результаты диссертации опубликованы в более чем 25 печатных работах, в том числе в 17 статьях, из которых 3 опубликованы в научных журналах, включенных в перечень ВАК Минобрнауки РФ [7-9], 5 – в научных



изданиях, индексируемых в международной базе данных Web of Science [1-5], 1 – в Scopus [6], из них 3 в журналах, входящих в Q1 в области геофизики [1-3]. Получено два свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ [10,11].

**Личный вклад автора.** Результаты, составляющие основное содержание диссертации, получены автором самостоятельно. Во всех совместных работах автор участвовал в формулировании постановок задач, разрабатывал математические модели, методы фильтрации.

В работе [3] автору принадлежит метод моделирования поверхностных волн и численно реализованный на его основе метод фильтрации поверхностно-волновых помех; в работе [1] многоканальный метод фильтрации сигналов от источников из заданной области геологической среды и его численная реализация; в работах [4,5,7] численные реализации алгоритмов моделирования синтетических сейсмограмм; в работах [6, 8, 9] алгоритмы восстановления параметров сейсмических источников, их численные реализации, результаты тестирования; в работе [2] численная реализация алгоритма восстановления полезного сигнала на основе использования преобразования Стоквелла; в [10,11] комплекс программ обработки данных сейсморазведки.

Самостоятельно выполнен аналитический обзор известных исследований по теме работы. Самостоятельно создан комплекс программ для обработки данных микросейсмического мониторинга с дневной поверхности в условиях интенсивных помех на основе разработанных алгоритмов. Выполнено его тестирование на синтетических и полевых данных.

**Структура и объем работы.** Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения и содержит 116 страниц машинописного текста, включая 33 рисунков, 4 таблицы, список литературных источников из 111 наименований.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** дана общая характеристика диссертационной работы, указана её связь с научно-техническими программами, обоснована актуальность, приведены цель и задачи исследований, защищаемые научные положения, научная новизна и практическая значимость полученных результатов.

**В первой главе** диссертации представлен аналитический обзор методов фильтрации сейсмических данных. Рассмотрены существующие методы подавления поверхностных волн-помех в данных сейсморазведки на отраженных волнах и пассивного микросейсмического мониторинга (МСМ), полученных с использованием наземных систем наблюдения. По результатам выполненного анализа сформулированы цель и задачи диссертационной работы.

**Во второй главе** изложен метод моделирования поверхностно-волновой части волнового поля данных наземной сейсморазведки, основанный на поиске главных компонент поверхностно-волнового поля путем эффективного численного поиска собственных векторов комплекснозначных ковариационных матриц, получаемых после применения частотно зависимых временных поправок, соответствующих групповым скоростям поверхностной волны. В рамках работы была предложена

следующая модель поверхностно-волнового пакета, записанная в частотно-временной области:

$$q(x, \tau, f) = Q(f, \tau - x / u(f))P(f, x),$$

где  $u(f) = 1/k'(f)$  – групповая скорость поверхностной волны,  $x$  – точка пространства,  $\tau$  – время,  $f$  – частота. Задача моделирования поверхностной волны, рассматриваемая в диссертационной работе, заключается в поиске групповой скорости  $u(f)$  (при фиксированной частоте  $f$  это скалярная величина) и двух комплекснозначных функций одного переменного (вторая переменная – частота  $f$  предполагается заданной)  $Q$  и  $P$ , которые определяют модель и минимизируют норму разности:

$$\sum_{n=1}^N \int_0^T [g(x_n, \tau, f) - q(x_n, \tau, f)]^2 d\tau \rightarrow \min,$$

где  $g(x_n, \tau, f)$  исходные данные в частотно-временной области,  $x_n$  – позиция  $n$ -ого приемника. Основные шаги поиска  $u(f)$ ,  $Q$  и  $P$  состоят в следующем:

1. Представление данных в частотно-временной области с помощью S-преобразования;
2. Поиск и внесение в данные временных задержек, соответствующих групповым скоростям поверхностных волн;
3. Выделение когерентной части данных с помощью метода главных компонент, внесение обратных временных задержек;
4. Применение обратного S-преобразования.

В случае сейсморазведки на отраженных волнах с использованием линейных систем наблюдения групповые скорости предлагается находить перебором, в ходе которого ищется максимальное значение величины:

$$E = \sum_{x_n} \left| g_f \left( \frac{x_n}{u}, x_n \right) \right|,$$

где  $x_n$  – расстояние вдоль линии наблюдения до приемника с номером  $n$ ,  $g_f(\mathbf{x}_n, \tau) = S[g(\mathbf{x}_n, f)](\mathbf{x}_n, \tau, f)$ ,  $S[g(\mathbf{x}_n, f)]$  – S-преобразование сигнала  $n$ -го приемника,  $u$  – тестируемая групповая скорость, суммирование проводится по всем приемникам. Выбирается значение  $u$ , для которого  $E$  максимально. Если приемники расставлены нерегулярно на поверхности земли, то подобный перебор групповых скоростей неприменим. В этом случае возможно проводить расчет групповых времен пробега поверхностных волн путем решения прямых задач для известной скоростной модели поверхностного слоя земли (эта модель может быть найдена путем применения методов малоглубинной сейсморазведки, в том числе, с использованием поверхностных волн).

При реализации третьего шага метода (выделение когерентной части данных) используется метод главных компонент, реализация которого основана на применении известного преобразования Karhunen-Loeve (KL) к ковариационной матрице данных. В матричном виде применение KL преобразования записывается следующим образом:

$$\mathbf{G}_{kl} = \mathbf{R}^{-1} \Psi,$$

где  $n$ -ая строка матрицы  $\mathbf{G}_{kl}$  является сигналом на  $n$ -ом приемнике,  $\mathbf{R}$  – матрица, составленная правых собственных векторов ковариационной матрицы данных, а  $\mathbf{\Psi} = \mathbf{R}^T \mathbf{D}$ , где  $\mathbf{D}$  – матрица данных, строки которой составляют дискретные записи данных. В работе для вычисления  $\mathbf{G}_{kl}$  используется только один собственный вектор  $\mathbf{r}$ , соответствующей максимальному по модулю собственному значению  $\lambda$  ковариационной матрицы данных.

Далее найденный волновой пакет  $q$  вычитается из данных  $g$ . При рассмотрении задачи сейсморазведки вдоль профилей, предлагаемую методику моделирования поверхностных волн целесообразно повторять для каждой частоты несколько раз, что, как показали численные эксперименты, будет приводить к извлечению нескольких мод поверхностной волны из данных и, как следствие, более полному подавлению поверхностно-волновых помех в данных.

Разработанный метод моделирования поверхностных волн с реализованным на его основе методе фильтрации тестировался на синтетических данных. Один из примеров приведен на рис. 1, где для расчета синтетических сейсмограмм использовалась неоднородная среда с криволинейной свободной поверхностью.

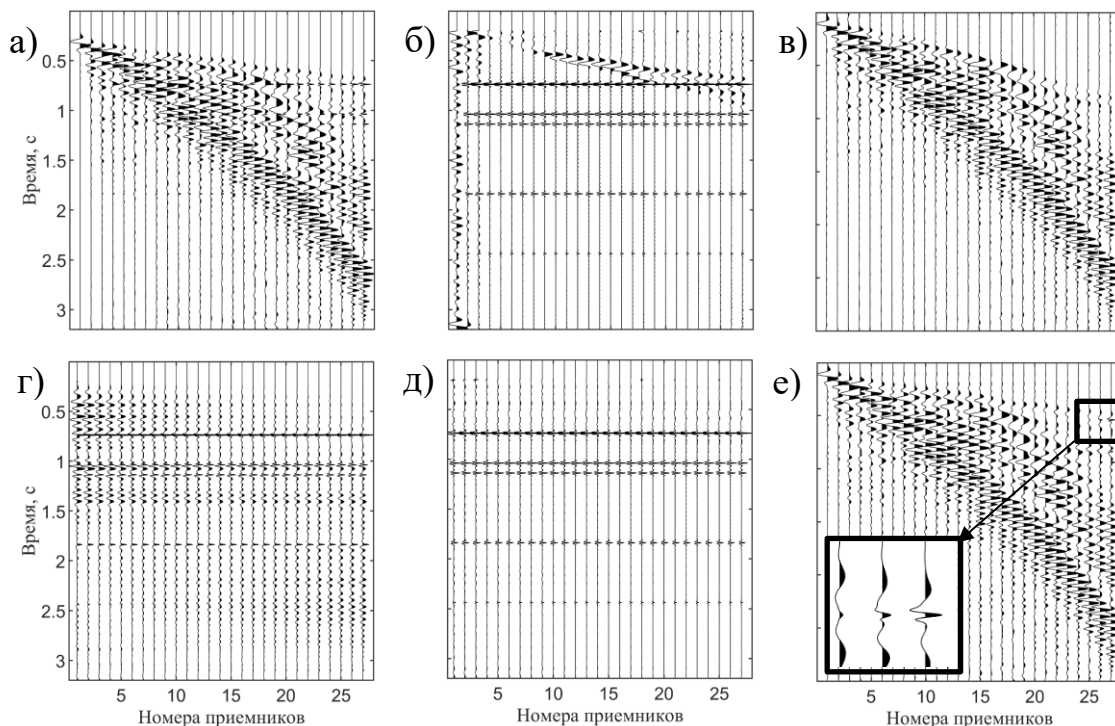


Рисунок 1 – а) синтетическая сейсмограмма для среды с криволинейной свободной поверхностью; б) результат фильтрации поверхностных волн предложенным методом; в) часть данных, удаленных предложенным методом; г) результат f-k фильтрации; д) результат последовательного применения предложенного метода и f-k фильтрации; е) часть данных, удаленных f-k фильтром.

На рис. 1а изображены полученные синтетические данные, к которым дополнительно были добавлены сигналы плоских волн (играющих в данном случае роль полезного сигнала). Амплитуды плоских волн выбирались значительно ниже по сравнению с рассчитанными поверхностными волнами (см. рис. 1а). Использование разработанного в работе алгоритма позволило успешно подавить основную часть

энергии поверхностных волн, сохранив сигналы плоских волн (рис. 1б). Для сравнения на рис. 1г приведен результат  $f-k$  фильтрации (стандартный метод, применяемый для подавления поверхностных волн), которая в данном случае не позволила полностью извлечь поверхностную волну (рис. 1г), при этом в отфильтрованной части данных можно наблюдать импульсы полезных сигналов (рис. 1е, внутри красного прямоугольника). Наилучший результат подавления поверхностных волн можно получить путем последовательного применения предложенного метода и  $f-k$  фильтрации (рис. 1д).

**В третьей главе** приведено описание и результаты исследования метода фильтрации микросейсмических данных, обеспечивающего подавление сигналов от источников, расположенных вне заданной целевой области геологической среды, в которой предполагается находятся источники полезного сигнала.

Метод основан на следующей модели полезного сигнала:

$$u_k(t) = \sum_j G(\mathbf{x}_k, \mathbf{y}_j, t, \mathbf{M}^j) * s_j(t) + \mu_k(t),$$

где  $\mathbf{x}_k$  – координаты приемников;  $k$  – номера приемников;  $\mathbf{y}_j$  – координаты источников;  $j$  – номера источников;  $\mathbf{M}^j = (\mathbf{M}_{11}^j, \mathbf{M}_{22}^j, \mathbf{M}_{33}^j, \mathbf{M}_{12}^j, \mathbf{M}_{23}^j, \mathbf{M}_{13}^j)$  – компоненты тензора сейсмического момента, определяющие механизм  $j$  – того точечного источника;  $s_j(t)$  – функция характеризующая форму импульса генерируемую источником;  $G$  – функция Грина, которая характеризует распространение сейсмических волн;  $\mu_k(t)$  – шум.

Суть предлагаемого метода заключается в оценке проекции вектора данных, представленного в частотной области  $\hat{\mathbf{u}}(\omega) = (\hat{u}_1(\omega), \dots, \hat{u}_k(\omega), \dots, \hat{u}_N(\omega))^T$ , на линейное пространство полезных сигналов  $\mathbf{V}$ , где  $N$  – количество приемников,  $\omega$  – выбранная частота. Пространство  $\mathbf{V}$  является линейной оболочкой набора векторов  $S = \{ \mathbf{v}_{nm}^j \mid n, m = 1, \dots, 3, j = 1, \dots, Q \}$ , где  $Q$  – число пробных источников внутри целевой области пространства. Каждый вектор  $\mathbf{v}_{nm}^j$  характеризует распределение фаз и амплитуд от выбранного пробного источника с заданным механизмом на каждом приемнике и имеет вид:

$$\mathbf{v}_{nm}^j = \begin{pmatrix} A(\mathbf{x}_1, \mathbf{y}_j, \omega, M_{nm}^j) \exp(-i\omega\tau(\mathbf{x}_1, \mathbf{y}_j, \omega, M_{nm}^j)) \\ A(\mathbf{x}_2, \mathbf{y}_j, \omega, M_{nm}^j) \exp(-i\omega\tau(\mathbf{x}_2, \mathbf{y}_j, \omega, M_{nm}^j)) \\ \vdots \\ A(\mathbf{x}_k, \mathbf{y}_j, \omega, M_{nm}^j) \exp(-i\omega\tau(\mathbf{x}_k, \mathbf{y}_j, \omega, M_{nm}^j)) \\ \vdots \\ A(\mathbf{x}_N, \mathbf{y}_j, \omega, M_{nm}^j) \exp(-i\omega\tau(\mathbf{x}_N, \mathbf{y}_j, \omega, M_{nm}^j)) \end{pmatrix},$$

где  $j$  – номер источника,  $k$  – номер приемника,  $nm$  – компонента тензора сейсмического момента,  $A(\mathbf{x}_k, \mathbf{y}_j, \omega, M_{nm}^j)$  – амплитуда от  $j$ -го источника имеющего механизм  $M_{nm}^j$ , наблюдаемая в приемнике  $k$ ,  $\mathbf{x}_k$  – координаты приемников;  $\mathbf{y}_j$  –

координаты тестовых источников. Местоположения тестовых источников выбираются так, чтобы равномерно заполнить целевую область.

Разработанный метод пространственно-временной фильтрации тестировался на синтетических и полусинтетических данных. На рис. 1а изображен пример обработки синтетических данных. Синтетическая сейсмограмма (рис.2а), содержит волны от трех источников с различными механизмами излучения, один из которых расположен внутри выделенной области геологической среды (на сейсмограмме обозначен цифрой 2), а два других - вне ее. На рис. 2б представлен результат обработки данных. Как видно, предложенный метод фильтрации подавляет сигналы от источников 1 и 3, при этом сохранив волны без искажения фаз (полярностей) от источника 2.

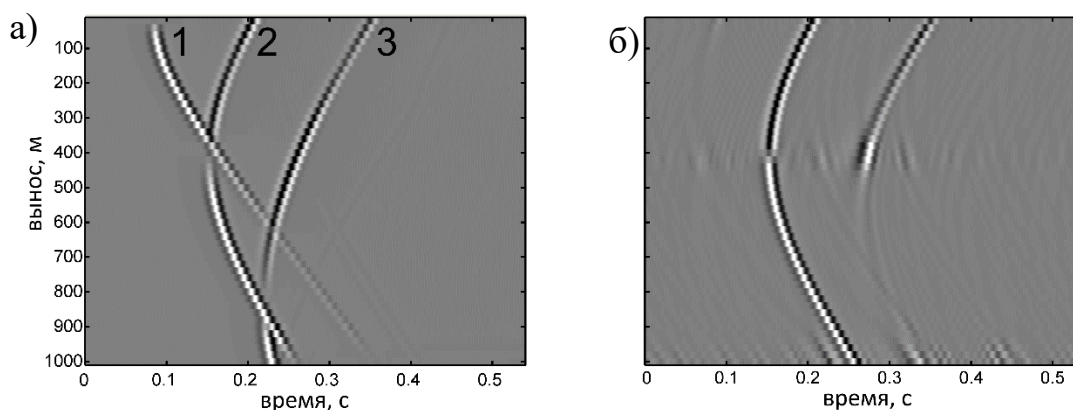


Рисунок 2 – Обработка синтетических данных проекционным фильтром: а) синтетическая сейсмограмма (продольные волны P1, P3 и поперечные волны S1, S3 распространяются от источников, расположенных вне выделенной области геологической среды, а волны P2 и S2 от источника в ней); б) результат обработки данных разработанным методом.

Также метод тестировался путем обработки полусинтетических данных, для генерации которых использовались полевые данные микросейсмического мониторинга ГРП на нефтяном месторождении. В качестве полезного сигнала использовалась запись перфорационного взрыва, который производился в скважине на глубине 1260 метров. В качестве шума использовался интервал записи МСМ ГРП. Чтобы оценить эффективность фильтра, обработанные данные использовались при расчете меры когерентности с целью локации источника. На рисунке 3 показан результат локации микросейсмических источников при уровне шума -17.6 дБ. В первом случае (рис. 3а) не удалось определить истинное положение источника, а во втором (рис. 3б) - использование разработанного метода фильтрации обеспечило выделение микросейсмических событий в условиях действия интенсивных волн-помех.

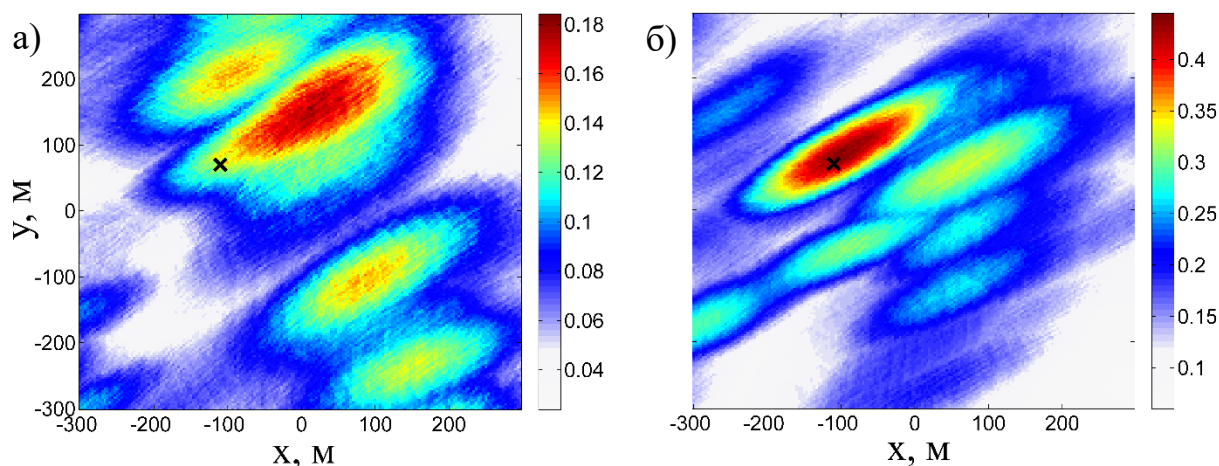


Рисунок 3 – Мера когерентности в горизонтальной плоскости на глубине 1260 метров: а) к данным применялась только полосовая фильтрация; б) к данным применялся разработанный фильтр. Истинное положение источника обозначено знаком «х». Для локации использовались полусинтетически данные.

**В четвертой главе** приводится описание разработанных комплексов программ «MSM DatProc» и «PF Seism». Комплекс «MSM DatProc» предназначен для обработки данных наземного микросейсмического мониторинга, включающий в себя численные реализации представленных в работе методов фильтрации поверхностно-волновых помех и усиления полезного сигнала. Комплекс «PF Seism» предназначен для решения задачи подавления поверхностных волн-помех в данных наземной сейсморазведки.

Комплекс «MSM DatProc» состоит из 6 программных модулей: 1) модуль одноканальной фильтрации, в котором реализованы полосовой фильтр и фильтр гармонических сигналов; 2) модуль расчета прямых задач распространения волн, обеспечивающий вычисление ожидаемых времен пробега для заданного набора источников и приемников, волновых полей от источников с различными механизмами излучения; 3) модуль определения статических поправок (калибровки скоростной модели); 4) модуль многоканальной фильтрации, в котором реализованы методы, разработанные в диссертационной работе; 5) модуль локации и определения механизмов источников; 6) модуль визуализации результатов, предназначенный для графического отображения сейсмограмм, спектрограмм, систем наблюдения, положения локализованных источников.

В диссертации приводятся результаты тестирования комплекса на синтетических и полевых данных микросейсмического мониторинга ГРП на нефтяном месторождении.

Комплекс программ «PF Seism» состоит из двух основных модулей: 1) модуль фильтрации; 2) модуль решения прямых задач. В первом модуле реализованы: полосовой фильтр, f-k фильтр и, разработанный в работе, фильтр подавления поверхностных волн, который описан в главе 2 диссертации. Во втором модуле реализованы численные методы моделирования сейсмических волновых полей.

На рис. 4 представлен пример обработки полевых данных сейсморазведки, с помощью комплекса программ «PF Seism» с применением различных методов. На рис. 4а изображены исходные натурные данные, на рис.4б данные после фильтрации

предложенным методом. Поверхностные волны в данных были успешно подавлены. Использование f-k фильтра не позволило качественно обработать данные (рис. 4д). На рис. 4г приведены данные после применения полосовой фильтрации, входе которой подавлялись частоты до 25 Гц. Визуально получен хороший результат, но если рассмотреть данные, удаленные полосовым фильтром (рис. 4е), то видно, что часть отраженных волн (т.е. полезный сигнал) была отфильтрована. В то же время, предложенный метод фильтрации удалил только часть данных, которая относится к поверхностным волнам (рис.4в). На сейсмограммах фиолетовым цветом выделены области, где видно, что часть синфазных событий, связанных с отраженными волнами, исчезают после применения полосовой фильтрации. f-k фильтр, результат применения которого приведен на рис.4д не подавляет полезный сигнал, после него в данных остается существенная часть поверхностных волн.

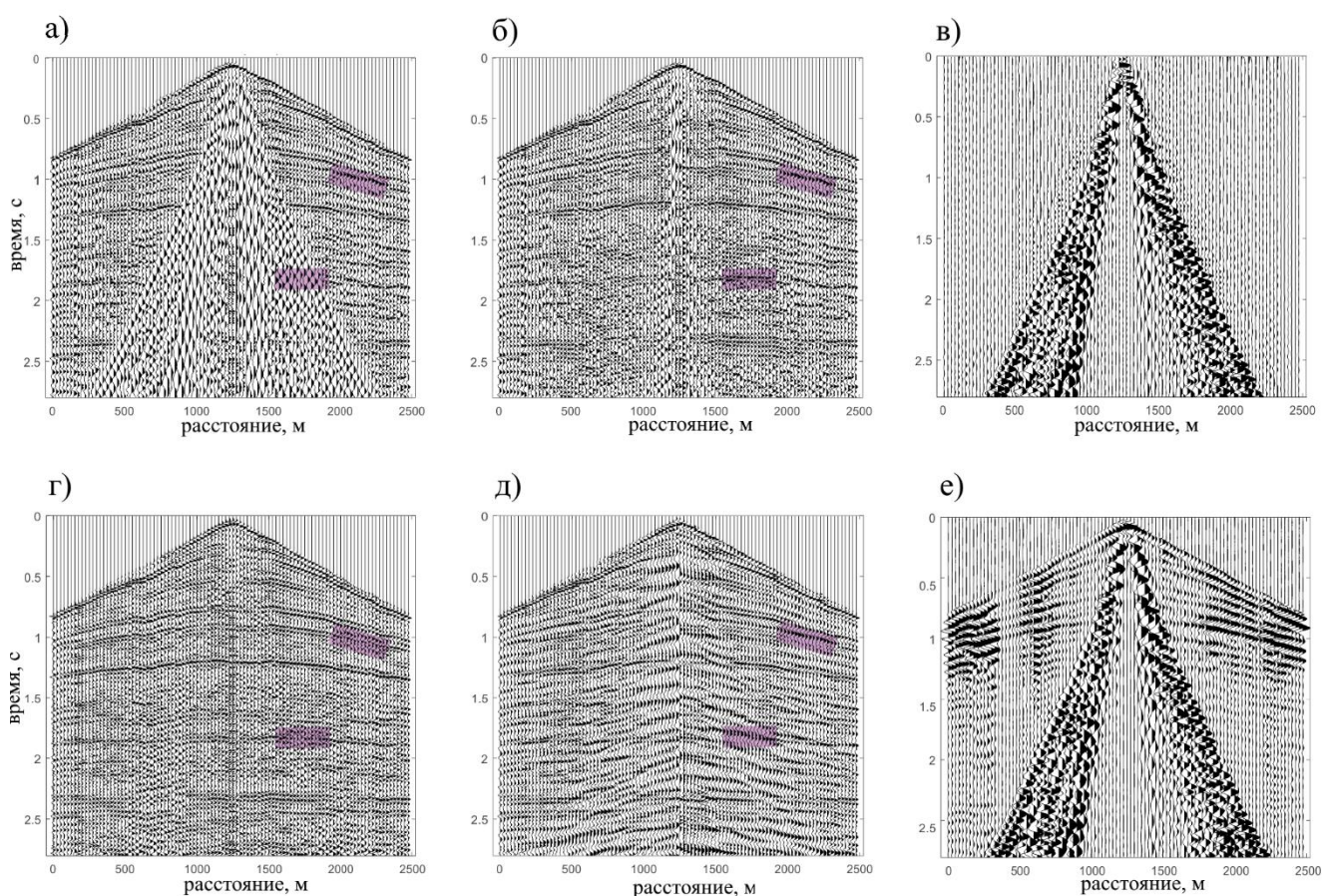


Рисунок 4 – Обработка полевых данных сейсморазведки. а) исходные полевые данные; б) данные, обработанные предложенным методом; в) часть данных, удаленных предложенным методом; г) данные после полосовой фильтрации; д) данные после f-k фильтрации; е) часть данных удаленных предложенным методом

**В заключении** приведены основные выводы и результаты, полученные в ходе выполнения диссертационной работы.

## Список основных публикации по теме диссертации:

1. **Azarov A. V.**, Serdyukov A. S., Gapeev D. N. Research Note: Frequency domain orthogonal projection filtration of surface microseismic monitoring data // *Geophysical Prospecting*. – 2020. – Т. 68. – №. 2. – С. 382-392. DOI:10.1111/1365-2478.12847 (*WoS*)
  2. Serdyukov A. S. **Azarov, A. V.**, Yablokov, A. V., Shilova, T. V., & Baranov, V. D. Research Note: Reconstruction of seismic signals using S-transform ridges // *Geophysical Prospecting*. – 2021. – Т. 69. – №. 4. – С. 891-900 (*WoS*)
  3. Serdyukov A. S., Yablokov A. V., Duchkov A. A., **Azarov A. A.**, Baranov V. D. Slant f-k transform of multichannel seismic surface wave data // *Geophysics*. – 2019. – Т. 84. – № 1. – С. A19-A24 (*WoS*)
  4. Kurlenya, M. V., Serdyukov, A. S., **Azarov, A. V.**, & Nikitin, A. A. Numerical modeling of wavefields of microseismic events in underground mining // *Journal of Mining Science*. – 2015. – Т. 51. – С. 689-695 (*WoS*)
  5. Serdyukov S., **Azarov, A.**, Dergach, P., & Duchkov, A. Equipment for microseismic monitoring of geodynamic processes in underground hard mineral mining // *Journal of Mining Science*. – 2015. – Т. 51. – №. 3 (*WoS*)
  6. **Azarov A. V.** Locating harmonic microseismic sources using phases of signals and spectral transformations / Serdyukov A. S. // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. – IOP Publishing, 2019. – Т. 262. – №. 1. – С. 012004. (*Scopus*)
  7. **Азаров А. В.**, Сердюков А. С., Никитин А. А. Численное моделирование микросейсмического шума в блочно-иерархических неоднородных средах // *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*. – 2015. – №. 9. – С. 328-335 (*БАК*)
  8. **Азаров А. В.**, Сердюков А. С., Яблоков А. В. Методика определения механизмов очагов микросейсмических событий на основе моделирования полных волновых полей в горизонтальнослоистых средах // *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*. – 2016. – №. 10. – С. 131-143 (*БАК*)
  9. **Азаров А. В.**, Сердюков А. С. Комплекс программ обработки данных микросейсмического мониторинга разработки месторождений полезных ископаемых. средах // *Горный информационно-аналитический бюллетень. средах* – 2023. – № 2. – С. 58-71 (*БАК*)
- Свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ:*
10. **Азаров А.В.**, Сердюков А.С. Программа обработки многоканальных данных микросейсмического мониторинга наземными системами наблюдения «MSM DatProc», 2021, № RU 2021666184.
  11. **Азаров А.В.**, Сердюков А.С. Программа подавления поверхностных волн в данных сейсморазведки «PF Seism», 2021, № RU 2021666477.



Технический редактор Т.С. Курганова

---

Подписано к печати 08.02.2024

Бумага 60x84/16. Бумага офсет № 1. Гарнитура «Таймс».

Печ. л. 0,9. Тираж 80. Заказ № 226

---

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