

На правах рукописи

РЫЖОВ Василий Александрович

**ОБРАБОТКА МИКРОСЕЙСМИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ
В ЗАДАЧЕ ПАССИВНОГО НИЗКОЧАСТОТНОГО
СЕЙСМИЧЕСКОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ**

Специальность 01.04.03 – радиоп физика

Автореферат
диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Казань – 2009

Работа выполнена на кафедре радиофизики физического факультета Государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Казанский Государственный Университет им. В.И. Ульянова-Ленина»

Научный руководитель:

доктор физико-математических наук, доцент
Казанский государственный университет им. В.И. Ульянова-Ленина
Шерстюков Олег Николаевич

Научный консультант:

кандидат технических наук,
НИИ математики и механики им. Н.Г. Чеботарева
Биряльцев Евгений Васильевич

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук, профессор
Казанский государственный энергетический университет
Минуллин Ренат Гизатуллович

кандидат технических наук, доцент
Казанский государственный университет им. В.И. Ульянова-Ленина
Степанов Андрей Владимирович

Ведущая организация:

Институт физики Земли РАН им. О.Ю. Шмидта
(ИФЗ РАН, г. Москва)

Защита диссертации состоится «26» февраля 2009 г. в ____ часов ____ минут в ауд. 210 физического факультета на заседании диссертационного совета Д212.081.18 в Казанском государственном университете по адресу: 420008, г. Казань, ул. Кремлевская, 16.

С диссертацией можно ознакомиться в Научной библиотеке им. Н.И. Лобачевского Казанского государственного университета

Автореферат разослан «__» января 2009 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета
А.Ф.-м.н, профессор

А.В. Карпов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Настоящая работа посвящена методике обработки микросейсмических сигналов и разработке методов фильтрации помех в задаче пассивного низкочастотного сейсмического зондирования (НСЗ). Среди геофизических методов НСЗ является новым малоизученным методом, который позволяет при небольших трудозатратах с высокой эффективностью оценивать характеристики геологического разреза, в частности, наличие нефтегазовых залежей.

Объект исследования и актуальность темы. Естественные микросейсмические колебания поверхности Земли (микросейсмы) порождаются явлениями как природного характера (удаленные землетрясения, атмосферные явления, морской прибой), так и антропогенного (транспорт, промышленные объекты). На основе изучения характеристик природных микросейсм базируется несколько методов поиска и разведки нефтегазовых залежей, в том числе метод НСЗ. Он основан на изучении явления повышенной (аномальной) низкочастотной (1-10 Гц) энергии в спектре микросейсм над нефтяными объектами. С 1989 г. это явление наблюдается в различных нефтегазовых регионах планеты (С. Дангел, Р. Граф, Ю.Ю. Подладчиков, Г.М. Голошубин). В работах С.А. Арутюнова, Ю.В. Сиротинского, А.Е. Сунцова для его усиления было предложено осуществлять вибровоздействие на залежь с поверхности Земли (технология «АНЧАР»). Метод пассивного низкочастотного сейсмического зондирования развивают Е.В. Биряльцев, Н.Я. Шабалин.

В качестве физического описания явления низкочастотной спектральной аномалии над нефтяными объектами доминировала гипотеза генерации низкочастотных микросейсм нефтегазовой залежью. В виду отсутствия обоснованного количественного объяснения явления потребовалось дополнительное его изучение. В 2005 г. Е.В. Биряльцевым была выдвинута гипотеза резонанса сейсмических волн между поверхностью Земли и нефтегазовой залежью, которая нуждалась в практическом подтверждении. Для выбора корректного теоретического описания этого явления и для получения набора отличительных признаков полезного сигнала от помех необходимо провести детальное исследование характеристик микросейсмического сигнала.

Фоновые микросейсмические колебания чувствительны к локальным поверхностным источникам помех, частотный диапазон которых, в большинстве случаев, пересекается с частотным диапазоном спектральной аномалии, а отношение «сигнал/помеха» может быть существенно меньше единицы. Это значительно осложняет выделение аномалии в спектре. Тот факт, что полезным сигналом для технологии НСЗ является фоновый микросейсмический шум, относит задачу разработки методов фильтрации помех в разряд слабоизученных, где приоритетным является условие сохранения фонового уровня шума. Специфичный характер полезного сигнала и помехи требует разработ-

ки специальных методов фильтрации, в основе которых должна лежать априорная информация об их отличительных признаках.

Для сопоставления спектральных аномалий по территории наблюдения необходимо определиться в выборе информативного параметра спектральной аномалии. Разработка алгоритма его оценки позволит автоматизировать процесс параметризации спектров.

Исследование стационарности параметров аномалии в течение продолжительного времени наблюдения (больше суток) необходимо для ответа на вопрос о корректности сравнения информативного параметра спектральных аномалий, зарегистрированных в разное время на разных точках наблюдения. В случае нестационарности параметров спектральной аномалии необходимо разработать методику наблюдения, позволяющую учитывать их временные вариации.

Как правило, технология НСЗ применяется для исследований территорий вблизи уже разрабатываемых месторождений, на которых регистрируемое микросейсмическое поле обладает повышенным уровнем техногенных помех. Ее адаптация к техногенно-нагруженным районам, а также к условиям нестационарного фоновое микросейсмического поля, позволит проводить исследования зашумленных территорий на наличие нефтегазовых залежей.

Все это позволяет сформулировать цель и задачи диссертационной работы.

Целью диссертационной работы является разработка методики регистрации и обработки микросейсмических сигналов для выделения спектральных аномалий, коррелирующих с местоположением нефтегазовых залежей в задаче пассивного низкочастотного сейсмического зондирования Земли в присутствии помех.

Исходя из указанной цели, поставлены следующие **задачи**:

1. Исследование характеристик микросейсмического сигнала для выделения отличительных признаков полезной компоненты сигнала и помех, выявление особенностей полезной компоненты сигнала.
2. Разработка и реализация методов фильтрации полезного (фоновое) сигнала и помех на основе их отличительных признаков.
3. Разработка и реализация метода оценки параметров спектральной аномалии.
4. Разработка методики регистрации, позволяющей учитывать временные вариации параметров спектральной аномалии для выявления их пространственных изменений при ограниченном количестве одновременно наблюдаемых точек, в условиях временной нестационарности и пространственной неоднородности микросейсмического поля.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. Впервые получен набор отличительных признаков, позволяющий качественно и количественно разделить полезную компоненту сигнала от помех. Полезный сигнал в отличие от помех: локализован на участках микросейс-

мического сигнала с минимальной энергией, является широкополосным с шириной полосы спектральных максимумов от 0.5 Гц до 3 Гц. Наиболее информативными являются стационарные участки сигнала, образованные суперпозицией множества случайных колебаний от некогерентных широкополосных источников. Полезный сигнал коррелирован в пространстве, является шумом со временем корреляции 1-5 с. Спектр полезного сигнала содержит амплитудно-частотную характеристику (АЧХ) геосреды, поэтому имеет мультимодальную структуру. Параметры полезного сигнала зависят от влияния интенсивных источников помех. Фоновый микросейсмический шум, составляющий полезный сигнал, имеет случайное азимутальное направление прихода.

2. Разработан и применен комплекс методов для обработки микросейсмических сигналов, позволяющий в автоматическом режиме отфильтровывать основные типы помех, который включает в себя: метод адаптивного определения порогового уровня энергии сигнала для исключения локально-нестационарных помех в сигнале; метод нелинейной фильтрации узкополосных помех с сохранением фонового уровня шума; оптимизационный метод фильтрации квазигармонических помех с сохранением фонового уровня шума.
3. Разработан метод оценки параметров спектральной аномалии на основе анализа локальных максимумов вейвлет-образа спектра микросейсмического сигнала, позволяющий автоматизировать процесс параметризации в технологии НСЗ.
4. Разработана методика регистрации, позволяющая учитывать временные вариации параметров спектральной аномалии при ограниченном количестве одновременно наблюдаемых точек в условиях временной нестационарности и пространственной неоднородности микросейсмического поля. Предложен алгоритм автоматического учета временных вариаций параметров спектральной аномалии для выявления их пространственных изменений.

Практическая ценность работы. Результаты работы составляют методику регистрации и обработки микросейсмических сигналов в технологии пассивного низкочастотного сейсмического зондирования, которая уже применяется на практике. Результаты работы составляют методику регистрации и обработки микросейсмических сигналов в технологии пассивного низкочастотного сейсмического зондирования, которая уже применяется на практике и может быть тиражирована другими компаниями. Выявленный набор отличительных признаков полезной компоненты сигнала позволил обнаруживать аномалии в спектрах сигналов зарегистрированных на неизученных ранее территориях. Разработанный комплекс автоматизированных методов, позволил снизить общее время обработки в несколько раз. Предложенный комплекс методов апробирован при выполнении геологоразведочных работ для нефтяных компаний Республики Татарстан и за ее пределами.

На защиту выносятся:

1. Набор отличительных признаков, позволяющий качественно и количественно выделять полезную компоненту микросейсмического сигнала, в которой может наблюдаться спектральная аномалия.
2. Комплекс методов обработки микросейсмического сигнала, позволяющий в автоматическом режиме отфильтровать основные типы помех.
3. Метод оценки параметров спектральной аномалии, разработанный на основе анализа локальных максимумов вейвлет-образа спектра микросейсмического сигнала, позволяющий автоматизировать процесс параметризации в технологии НСЗ.
4. Методика регистрации микросейсмического поля, позволяющая учитывать временные вариации параметров спектральной аномалии для выявления их пространственных изменений.

Достоверность полученных результатов определяется: применением известных методов оптимизации, аппарата вейвлет-анализа, методов цифровой обработки сигналов; применением регистрирующей аппаратуры, прошедшей метрологическую экспертизу.

Личный вклад автора. Автором выявлены отличительные признаки полезного сигнала и помех, разработаны и программно реализованы методы фильтрации помех, метод оценки параметров спектральных аномалий. Предложена методика регистрации и разработан алгоритм автоматического вычисления поправочных коэффициентов для учета вариаций параметров спектральных аномалий. Разработанные автором методы были апробированы непосредственно при его участии на более 2000 точках наблюдения. Общая площадь исследуемых территорий составила более 150 км².

Апробация работы и публикации. Основные положения и выводы диссертации нашли отражение в 10 научных статьях, в том числе в двух статьях в журналах, включенных в перечень ВАК («Научно-технические ведомости СПбГПУ» и «Геология, Геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений») и одной коллективной монографии. Результаты диссертационной работы были представлены и обсуждались на международных конференциях: «General Assembly – 2008», EGU (устный доклад, Вена, Австрия), на X конференции Европейской ассоциации геоученых и инженеров (EAGE) «ГЕОМОДЕЛЬ-2008» (Геленджик), на XIV Международной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Ломоносов» (Москва, 2007), на X Международном научном симпозиуме имени академика М.А.Усова студентов и молодых учёных «Проблемы геологии и освоения недр» (Томск, 2006). А также на региональных конференциях: «Волновые процессы в средах» (Зеленодольск, 2007), «Актуальные проблемы естественных и гуманитарных наук» (Зеленодольск, 2006).

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения. В ней содержится 157 страниц печатного текста, приводится 77 рисунков и 11 таблиц. Список литературы содержит 134 наименования.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность и научная новизна темы, определяется цель и задачи, формулируются положения, выносимые на защиту, дается научная новизна, практическая значимость и достоверность полученных результатов исследования.

В **первой главе** проводится обзор литературы в области микросейсмических колебаний. Особое внимание уделяется явлению низкочастотной аномалии над нефтяными месторождениями. Проводится сопоставление основных физических моделей явления: резонанс сейсмических волн внутри нефтегазовой залежи и резонанс продольных волн в геосреде между поверхностью Земли и нефтегазовой залежью. На наш взгляд наиболее обоснованной является гипотеза резонанса продольных сейсмических волн между поверхностью Земли и нефтегазовой залежью. Она основывается на выявленной нами зависимости частотного положения спектральных максимумов аномалии от времени прохождения продольной сейсмической волны между поверхностью и нефтеносным объектом. Спектр аномалии микросейсмического сигнала состоит из множества спектральных максимумов, частоты которых рассчитываются как:

$$f_p = (p+1) \cdot \Delta f, \quad \Delta f = \frac{1}{2T}, \quad T = T_{\text{ВСП}} - t_{\text{ЗМС}},$$

где $T_{\text{ВСП}}$ – время распространения продольной волны от поверхности до нефтегазовой залежи по данным вертикального сейсмического профилирования (ВСП), $t_{\text{ЗМС}}$ – поправка, равная времени распространения волны в приповерхностной зоне малых скоростей (ЗМС), p – номер моды. На рис. 1 приведен пример аномалии в спектре микросейсмического сигнала, зарегистрированного над нефтегазовой залежью, в котором наблюдаются две первые моды на частотах $f_0 = 2.4$ Гц и $f_1 = 5.2$ Гц.

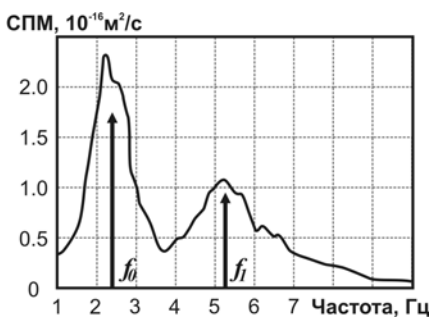


Рис. 1. Пример спектра микросейсм над нефтяным месторождением

В работе приводится описание аппаратного комплекса НСЗ, рабочий частотный диапазон которого 0.5-40 Гц. Диапазон регистрируемых амплитуд скорости вертикальной компоненты механических колебаний поверхности Земли: $0.4 \cdot 10^{-9} - 3 \cdot 10^{-3}$ м/с. Частота дискретизации и разрядность АЦП $f_d = 125$ Гц и 24 bit.

При разбиении сигнала на кадры для его спектрального оценивания обосновывается наиболее приемлемый размер кадра, который составляет 4096

отсчетов. Статистически показано, что в условиях стабильной микросейсмической обстановки достаточно 3-5 мин. наблюдения для того, чтобы определить наличие аномального спектрального максимума.

Вторая глава посвящена изучению характеристик микросейсмического сигнала. Автором выявляются отличительные признаки полезного сигнала и помех, подробно рассматриваются характеристики полезного микросейсмического сигнала.

Показано, что регистрируемый сигнал, помимо фонового микросейсмического шума содержит аддитивную помеховую компоненту от различных источников локальных поверхностных вибраций, как антропогенного, так и природного происхождения. Наблюдаемые помехи способны значительно искажать спектр фонового микросейсмического сигнала, что может приводить к ошибочным прогнозам нефтеносности. Выделение полезной компоненты сигнала на фоне помех осложняется пересечением их частотных диапазонов и тем, что амплитуда помех может превышать амплитуду фонового шума в несколько десятков раз.

Предлагается классификация часто встречающихся помех и полезного сигнала по: форме спектра; происхождению; стационарности; степени вклада АЧХ геосреды в формирование микросейсмического сигнала. По характеру спектра полезный сигнал является широкополосным фоновым шумом с шириной полосы спектральных максимумов от 0.5 Гц до 3 Гц (на территории Республики Татарстан). Общая ширина спектральной аномалии может достигать 10 Гц, в то время как помехи могут носить высокоамплитудный узкополосный характер (ширина полосы помехи ~ 0.2 Гц на частотах выше 1 Гц). Узкополосные помехи в большинстве случаев можно отнести к квазигармоническим. Полезный сигнал преимущественно эндогенного происхождения, в то время как помехи зарождаются на поверхности, как техногенными, так и природными источниками вибраций. Некоторые источники помех (ветер, нефтепровод, электроприборы), находящиеся вблизи датчика (на расстоянии менее чем 100 м) оказывают мощное прямое вибрационное воздействие на него, поэтому наблюдать фоновые микросейсмические колебания не представляется возможным. Полезный сигнал образован удаленными источниками вибраций, не оказывающими прямого воздействия на датчик, поэтому в спектре регистрируемого сигнала наблюдается отклик АЧХ геосреды.

Анализ корреляционных характеристик полезного сигнала, зарегистрированного над нефтегазовой залежью, показал, что сигнал представляет собой широкополосный шум, состоящий из суперпозиции множества волновых пакетов (цугов) длительностью порядка 1-5 с со случайным временем появления. Показано, что наиболее информативными являются стационарные участки сигнала, образованные суперпозицией множества случайных колебаний от некогерентных широкополосных источников. Фоновый микросейсмический шум, составляющий полезный сигнал, имеет случайное азимутальное направление прихода, тогда как микросейсмические колебания, вызванные

близкими (~ 500 м) источниками помех, имеют ярко выраженное направление прихода сейсмической волны.

Показано, что на амплитуду полезного сигнала влияют высокоамплитудные широкополосные локально-нестационарные помехи, а также интенсивность антропогенной деятельности.

Спектральная аномалия наблюдается в среднем в частотном диапазоне 1-6 Гц. В различных геологических регионах при неизменности частотного диапазона проявления аномалии меняется ее структура. Показано, что спектральная аномалия состоит из микроаномалий сдвинутых относительно друг друга на Δf . Например, для регионов с глубиной залегания нефтяных объектов ~ 4000 м, $\Delta f \sim 0.6$ Гц, для глубины залегания нефтяных объектов ~ 800 м, $\Delta f \sim 2.5$ Гц. Это наблюдение является одним из важнейших признаков полезного микросейсмического сигнала, позволяющего связать аномалию с глубиной залегания нефтяного объекта.

В **третьей главе** предлагаются автоматизированные методы фильтрации помеховой компоненты сигнала позволяющие отфильтровывать основные типы помех с сохранением фонового уровня микросейсмического шума являющегося, в технологии НСЗ, полезным сигналом. Приведенные методы делятся на две группы: 1) методы фильтрации локально-нестационарных помех; 2) методы фильтрации узкополосных и квазигармонических помех.

Идея методов фильтрации локально-нестационарных помех заключается в разбиении сигнала на кадры и сопоставлении каждому кадру скалярного значения, характеризующего его свойства, например, энергия кадра. Строится кривая плотности вероятности этого значения, задаются пороги, за пределами которых кадр считается зашумленным и исключается из рассмотрения. Результирующая спектральная плотность мощности формируется путем усреднения спектральной плотности мощности оставшихся не зашумленных кадров. На рис. 2 приведен пример плотности вероятности энергии сигнала, осложненного локально-нестационарными широкополосными помехами, где кадры отчетливо разбиваются на три статистические моды. Кадры, образующие первую моду, относятся к незашумленным, так как характеризуются фоновым уровнем энергии. Кадры, образующие вторую и третью моды, зашумлены локально-нестационарными помехами.

Предлагается метод адаптивного определения порогового значения энергии кадров, выше которого кадры будут считаться зашумленными. Он основан на статистических оценках среднего и СКО распределения энергии микросейсмического сигнала с учетом минимизации влияния на смещение оценок среднего и среднеквадратического отклонения высокоэнергетических кадров.

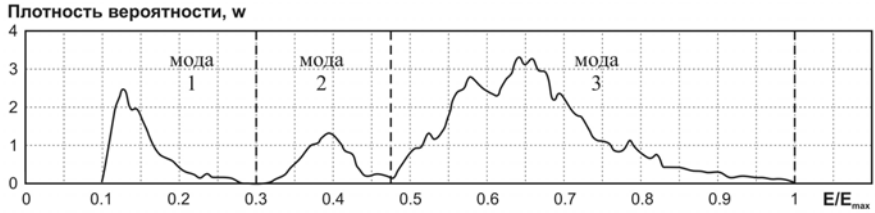


Рис. 2. Плотность вероятности энергии сигнала, осложненного широкополосными помехами

На распределение энергии сигнала значительное влияние оказывают нестационарные узкополосные помехи, поэтому первоначально выполняется фильтрация узкополосных помех с условием сохранения временного представления фоновый микросейсмического шума. Для этого были разработаны методы фильтрации узкополосных и квазигармонических помех. Оба они требуют первичной оценки частоты узкополосной помехи, которую может дать анализ спектра Фурье с точностью до шага дискретизации. Для этого вводится ρ -функция, которая принимает высокие значения ρ_i в случае наличия узкого пика в спектре:

$$\rho_i = \frac{|Y_i| - \text{med}(|Y|, N_{\text{win}})_i}{\text{med}(|Y|, N_{\text{win}})_i},$$

где $|Y_i| = \sqrt{\text{Re}(Y_i)^2 + \text{Im}(Y_i)^2}$,

$\text{med}(|Y|, N_{\text{win}})$ – функция медианного сглаживания спектра $|Y|$ с размером окна, равным N_{win} . Имитационным моделированием было получено распределение ρ -функции приведенное к соотношению «сигнал/шум» амплитуды гармонического сигнала и среднего уровня белого шума (A_S / A_N) (рис. 3). Также была исследована зависимость чувствительности ρ -функции к размеру окна N_{win} при различных соотношениях «сигнал/шум».

Форма реальной узкополосной помехи может значительно отличаться от формы гармонического сигнала, что приводит к уширению ее полосы частот. Для фильтрации такого рода узкополосных помех разработан метод нелинейной фильтрации узкополосных помех с сохранением фоновый уровня

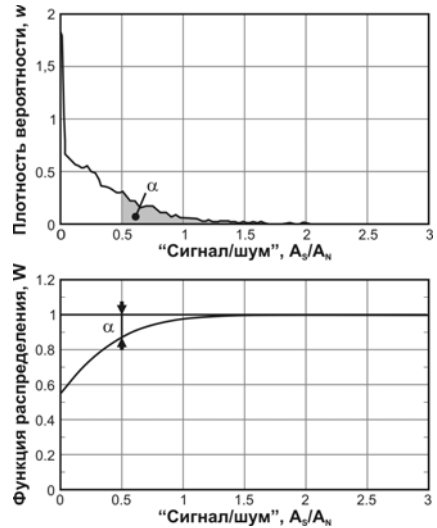


Рис. 3. Распределение ρ -функции спектра белого шума от соотношения «сигнал/шум»

шума. Метод заключается в подавлении частотного диапазона узкополосной помехи и заполнении его копиями фонового шума с соседних участков спектра с целью выравнивания фонового уровня спектра. Данный метод позволяет фильтровать нестационарные узкополосные помехи, однако имеет ограничения при фильтрации близко расположенных узкополосных помех, расстояние между которыми меньше 0.1 Гц.

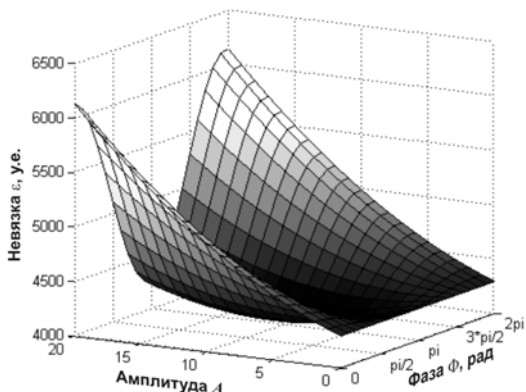


Рис. 4. Целевая функция при фиксированной частоте

В большинстве случаев узкополосная помеха в микросейсмических сигналах имеет незначительные отклонения формы от идеального гармонического сигнала. Такие помехи фильтруются оптимизационным методом фильтрации квазигармонических помех с сохранением фонового уровня шума. Метод выделяет гармоническую компоненту в сигнале на основе того, что время корреляции фонового микросейсмического шума составляет 1-5 с, а время корреляции квазигармонической помехи много больше 5 с. Данный метод фильтрации осуществляет подбор параметров модели квазигармонической помехи. Модель квазигармонической помехи представляется в виде гармонического сигнала с параметрами: частота, амплитуда и фаза. Подбор параметров модели гармонического сигнала осуществляется на основе применения адаптированных к форме целевой функции оптимизационных алгоритмов, которые минимизируют энергию результирующего сигнала после вычитания модели гармонической помехи. На рис. 4 представлен пример целевой функции при фиксированной частоте.

Параметры амплитуда и фаза модельного гармонического сигнала чувствительны к изменению параметра частота (f), поэтому необходимо определить f с высокой точностью. Так, например, для гармонического сигнала (помехи) на частоте 10 Гц при ошибке определения частоты $\varepsilon = 10^{-4}$ Гц в сигнале после фильтрации остается около 1 % помехи. Как правило, для получения параметра f с такой точностью хватает двух итераций алгоритма оптимизации целевой функции. В качестве критерия принятия решения о правильно подобранных параметрах модели гармонического сигнала выбирается

$$\frac{|f^{(k)} - f^{(k-1)}|}{(N/f_d)} < \varepsilon, \text{ где } k - \text{номер итерации, } N - \text{размер кадра, } f_d - \text{частота}$$

дискретизации. Далее производится вычитание модели гармонического сигнала из реального сигнала с учетом уровня фонового шума.

На рис. 5 представлен пример спектров и динамических спектрограмм сигнала, построенных до и после фильтрации. Предложенный метод успешно отфильтровал все ярковыраженные квазигармонические помехи. Он позволяет фильтровать близкие по частоте узкополосные помехи с сохранением фонового уровня шума, являющегося полезным сигналом.

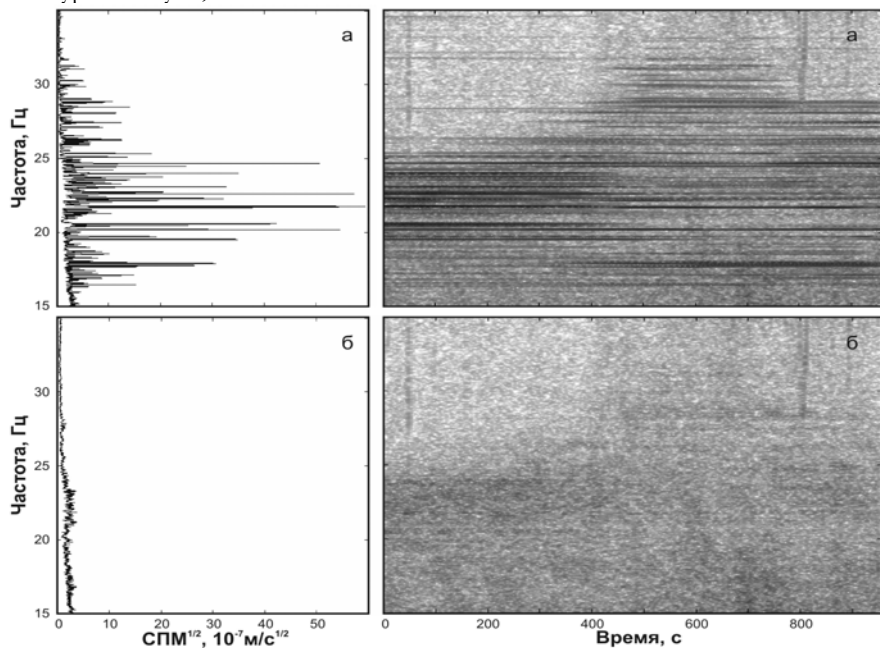


Рис. 5. Пример спектральных характеристик микросейсмического сигнала: а) до фильтрации, б) после фильтрации. Слева – кумулятивные амплитудные спектры сигнала, справа – динамические спектрограммы (темные цвета соответствуют более высоким значениям спектральной плотности мощности)

В **четвертой главе** предлагается метод параметрического оценивания аномалий (спектральных максимумов) и методика регистрации, позволяющая учитывать вариации параметров, описывающих спектральную аномалию при количестве одновременно наблюдаемых точек много меньшем общего числа точек наблюдения.

Теоретическое описание явления низкочастотной аномалии предполагает, что она является следствием возрастания добротности геосреды над нефтегазовой залежью. Для оценки добротности Q , а также частоты F и ширины W спектрального максимума по спектральным характеристикам микросейсмического сигнала предлагается метод оценки параметров спектральных

максимумов, основанный на оптимизации вейвлет-образа спектра. Алгоритм метода определяет координаты (частота f_0 , масштаб вейвлета σ_0) локальных максимумов вейвлет-образа, которые образуются из-за наличия спектральных максимумов в оцениваемом спектре Фурье. В качестве вейвлета выбрана вторая производная функции Гаусса («мексиканская шляпа»):

$$\varphi(f, \sigma) = \frac{\sqrt{e}}{2\sigma} \cdot \left(1 - \frac{f^2}{\sigma^2}\right) \cdot e^{-\frac{f^2}{2\sigma^2}}.$$

Алгоритм определения координат локальных максимумов вейвлет-образа реализован с учетом особенностей неравномерного распределения их плотности. Генерируется массив стартовых точек в плоскости (f, σ) . Для каждой стартовой точки, выполняется уточнение координат f и σ ближайшего локального максимума, с применением метода прямого поиска Хука-Дживса. Несколько сконцентрированных вблизи одного локального максимума вейвлет-образа точек объединяются в одну с помощью применения кластерного анализа. Мера близости между двумя точками на вейвлет-образе определяется как:

$$l(f_1, \sigma_1, f_2, \sigma_2) = \sqrt{\left(\frac{f_2 - f_1}{2\tau} \left(\frac{1}{\sigma_1} + \frac{1}{\sigma_2}\right)\right)^2 + (\log_2 \sigma_2 - \log_2 \sigma_1)^2},$$

где (f_1, σ_1) и (f_2, σ_2) координаты двух точек на вейвлет-образе, τ – период вейвлета в отсчетах при $\sigma = 1$.

В результате работы алгоритма формируется сводная таблица, каждая строка, которой содержит оценку параметров f_0 и σ_0 одного из спектральных максимумов.

Для спектрального максимума формы:

$$Y(f, f_0, \sigma_0, A_s, A_N) = \begin{cases} A_s \cdot \left(1 - \frac{(f - f_0)^2}{\sigma_0^2}\right) \cdot e^{-\frac{(f - f_0)^2}{2\sigma_0^2}} + A_N & |f \in (-\sigma_0, \sigma_0), \\ A_N & |f \in (-\infty; -\sigma_0] \cup [\sigma_0; +\infty) \end{cases}$$

(где f_0 – частота, A_s – амплитуда спектрального максимума над фоном, A_N – амплитуда фона, σ_0 – полуширина основания спектрального максимума, SNR – соотношение «сигнал/шум», W – ширина), аналитически было получено, что «добротность геосреды» по спектру можно оценить как:

$$Q = SNR + 1 = \frac{A_s}{A_N} + 1 = \frac{\sigma_0}{0.3863 X_Y^Z(f_0, \sigma_0) - \Phi_Y^p(f_0, \sigma_0)} + 1, \text{ где}$$

$$\chi(f, \sigma) = \begin{cases} \varphi(f, \sigma) & |x \in (-\sigma, \sigma) \\ 0 & |x \in (-\infty; -\sigma] \cup [\sigma; +\infty) \end{cases},$$

$$\Phi_Y^p(f, \sigma) = \frac{\Delta f}{\sqrt{|\sigma|}} \sum_{f'} Y(f') \varphi^*(f' - f, \sigma), X_Y^z(f, \sigma) = \frac{\Delta f}{\sqrt{|\sigma|}} \sum_{f'} Y(f') \chi^*(f' - f, \sigma).$$

Параметр «частота спектрального максимума» F равен f_0 , параметр «ширина спектрального максимума» вычисляется как $W = 1.252 \cdot \sigma_0$.

Неоднократные наблюдения за спектрами микросейсмических полей показали наличие вариаций параметров, описывающих спектральные аномалии, которые, заметны при сравнении кумулятивных спектров, зарегистрированных, например, в ночное и дневное время. Они связаны с глобальной нестационарностью фонового микросейсмического шума, а также вариациями аддитивной компоненты поверхностных шумов.

Для условий временной нестационарности и пространственной неоднородности микросейсмического поля предлагается методика регистрации, позволяющая корректировать вариации параметров спектральной аномалии при ограниченном количестве одновременно наблюдаемых точек.

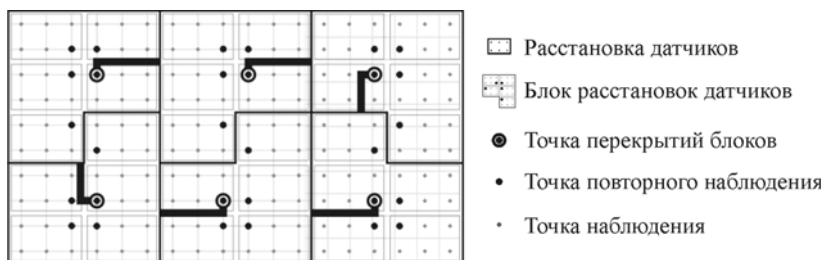


Рис. 6. Пример схемы расположения точек регистрации микросейсмического поля

Наблюдения выполняются в три уровня. На нулевом логическом уровне регистрируется вся площадь расстановками по n датчиков (где n – количество датчиков в комплекте, в данном случае 6). Проектируются точки повторного наблюдения. На первом логическом уровне выполняется регистрация в каждой точке повторного наблюдения методом иерархического объединения расстановок в блок. Каждый блок содержит $n-1$ точку повторного наблюдения. На втором логическом уровне блоки последовательно перекрываются со следующими по порядку блоками. Один из вариантов реализации схемы расположения точек регистрации микросейсмического поля представлен на рис. 6. Результатом вычислений являются поправочные коэффициенты, определяемые для каждой точки наблюдения, учет которых позволяет выявлять пространственные изменения параметров аномалии. Для упрощения процедуры учета временных вариаций параметров спектральной аномалии был разработан и реализован алгоритм автоматического вычисления поправочных коэффициентов.

В **заключении** диссертации подводятся итоги работы и формулируются выводы основанные на анализе и обработке микросейсмических сигналов, зарегистрированных на исследуемых территориях общей площадью более чем 150 км² (больше 2000 точек наблюдения).

1. Выявлен набор отличительных признаков, который позволяет качественно и количественно выделить полезную компоненту сигнала на фоне техногенных и природных помех. Полезный сигнал локализован на участках микросейсмического сигнала с минимальной энергией, является шумом со временем корреляции 1-5 с, образован суперпозицией множества случайных колебаний от удаленных некогерентных широкополосных источников. Спектр полезного сигнала содержит АЧХ геосреды, поэтому имеет мультимодальную структуру, которая состоит из спектральных максимумов с шириной от 0.5 Гц до 3 Гц. Амплитуда полезной компоненты сигнала зависит от влияния интенсивных источников помех. Наиболее информативными являются стационарные участки сигнала. Фоновый микросейсмический шум, составляющий полезный сигнал, коррелирован в пространстве и имеет случайное азимутальное направление прихода доминирующей волны.
2. Разработан комплекс методов фильтрации для задачи пассивного низкочастотного сейсмического зондирования, в которой важен приоритет сохранения фонового уровня шума, включающий в себя методы фильтрации локально-нестационарных и узкополосных помех. Для фильтрации локально-нестационарных помех предлагается метод адаптивного определения энергетического порога для автоматической отбраковки высокоэнергетических участков сигнала в условиях меняющейся интенсивности зашумления. Для фильтрации нестационарных узкополосных помех разработан метод нелинейной фильтрации с сохранением фонового уровня шума, который основан на подавлении частотного диапазона узкополосной помехи и заполнении его копиями фонового шума с соседних участков спектра с целью выравнивания фонового уровня спектра. Этот метод имеет ограничения при фильтрации близко расположенных узкополосных помех, расстояние между которыми, меньше 0.1 Гц (для наиболее часто встречающихся узкополосных помех). Для фильтрации квазигармонических помех разработан оптимизационный метод фильтрации с сохранением фонового уровня шума на основе минимизации энергии результирующего сигнала после вычитания модели гармонической помехи путем подбора параметров модели гармонического сигнала частота, амплитуда и фаза.
3. Разработан метод оценки параметров спектральных аномалий, на основе определения локальных максимумов вейвлет-образа спектра микросейсмического сигнала, который позволяет численно оценить информативные параметры (частота, ширина и «добротность» аномалии) и автоматизировать процесс параметризации в технологии НСЗ. Анализ оцененных па-

параметров спектральных аномалий по наблюдаемой территории позволяет: 1) визуально оценить характер распределения значений параметров, образующих кластер; 2) отделить устойчивые по территории наблюдения спектральные аномалии от случайных; 3) автоматизировать построение физических полей значений параметров аномалий; 4) численно сравнить параметры аномалий между различными территориями.

4. Предложена методика регистрации, позволяющая учитывать временные вариации параметров спектральных аномалий при ограниченном количестве одновременно наблюдаемых точек в условиях временной нестационарности и пространственной неоднородности микросейсмического поля для выявления их пространственных изменений. Предложен алгоритм автоматического учета временных вариаций параметров спектральной аномалии, который в несколько раз ускорил вычисление поправочных коэффициентов на этапе обработки. Поправочные коэффициенты для параметра «добротность» аномалии варьируются в пределах от 0.3 до 3.

Основное содержание диссертации отражено в следующих публикациях:

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК:

1. Рыжов, В. А. Параметризация спектров в технологии низкочастотного сейсмического зондирования на основе вейвлет-преобразования [Текст] / В. А. Рыжов, В. А. Кипоть, Е. В. Биряльцев // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Информатика. Телекоммуникации. Управление. – 2008. – № 5 (65). – С. 58–62.
2. Биряльцев, Е. В. Некоторые характеристики аномалий низкочастотного сейсмоакустического поля над нефтегазовыми залежами в республике Татарстан [Текст] / Е. В. Биряльцев, В. А. Рыжов // Геология, Геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. – 2008. – № 4. – С.16–22.

Публикации в других научных изданиях:

3. Rizhov, V. The microseism spectral analysis at the range from 1 to 20 Hz for the geology prospecting [Electronic resource] / V. Rizhov, E. Birialtsev // European Geosciences Union 2008 (EGU). – URL: <http://www.cosis.net/abstracts/EGU2008/05718/EGU2008-A-05718-2.pdf?PHPSESSID=>
4. Бережной, Д. В. Анализ спектральных характеристик микросейсм как метод изучения структуры геологической среды [Текст] / Д. В. Бережной, Е. В. Биряльцев, Т. Е. Биряльцева, В. А. Кипоть, В. А. Рыжов, Д. Н. Тумаков, М. Г. Храмченков // НИИ математики и механики Казанского университета. 2003–2007гг. / Научн. ред. и сост. А.М. Елизаров. – Казань: Изд-во Казанск. гос. ун-та, 2008. – С.360–386.

5. Рыжов, В. А. Характерные параметры сейсмоакустического сигнала при поиске залежей углеводородных флюидов [Текст] // Материалы XIV Международной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Ломоносов». – М.: СП «Мысль», 2007. – Т. II. – С. 129-130.
6. Рыжов, В. А. Некоторые особенности спектров низкочастотных микросейсм над нефтегазовыми залежами [Текст] / В. А. Рыжов, В. А. Кипоть, Е. В. Биряльцев // Сборник докладов Поволжской региональной молодежной конференции «Волновые процессы в средах». – Казань: Изд-во Казанск. гос. ун-та, 2007. – С. 36-39.
7. Биряльцев, Е. В. Особенности интерпретации спектральных характеристик природных микросейсм для локального прогноза нефтеносности в условиях республики Татарстан [Текст] / Е. В. Биряльцев, В. А. Рыжов, Н. Я. Шабалин // Прием и обработка информации в сложных информационных системах. – Казань: Изд-во Казанск. гос. ун-та, 2005. – Вып. 22. – С. 113-120.
8. Биряльцев, Е. В. Параметры полезного сигнала низкочастотного сейсмического зондирования при поиске залежей углеводородных флюидов [Текст] / Е. В. Биряльцев, В. А. Кипоть, В. А. Рыжов, О. Н. Шерстюков // Доклады научной конференции «Актуальные проблемы естественных и гуманитарных наук». – Казань: Изд-во Казанск. гос. ун-та, 2006. – С. 28-30.
9. Вильданов, А. А. Некоторые корреляционные зависимости между параметрами аномального низкочастотного спектра микросейсм и характеристиками геологического разреза [Электронный ресурс] / А. А. Вильданов, Е. В. Биряльцев, Е. В. Еронина, Ю. Е. Биряльцева, В. А. Рыжов // Конференция EAGE, ГЕОМОДЕЛЬ-2008. – Геленджик, 2008. – Электрон. опт. диск (CD-ROM).
10. Рыжов, В. А. Природа низкочастотной аномалии спектра микросейсм над нефтяными залежами [Текст] / В. А. Рыжов, Е. В. Биряльцев, О. Н. Шерстюков // Материалы X Международного научного симпозиума имени академика М.А. Усова студентов и молодых учёных «Проблемы геологии и освоения недр». – Томск, 2006. – С. 43-44.