



ООО «Сахалинская Энергия»

**МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ
ПО 4D-СЕЙСМОМОНИТОРИНГУ РАЗРАБОТКИ
НЕФТЕГАЗОКОНДЕНСАТНЫХ ШЕЛЬФОВЫХ
МЕСТОРОЖДЕНИЙ**

г. Южно-Сахалинск, 2023

Методические рекомендации разработаны с использованием опыта проведения многолетних 4D-сейсмоисследований, выполненных Обществом с ограниченной ответственностью «Сахалинская Энергия» на месторождениях углеводородного сырья континентального шельфа Охотского моря, прилегающего к острову Сахалин, анализа мирового и отечественного опыта проведения сейсмических исследований 4D на морских месторождениях УВ, а также обзора современных технологий 4D сейсмических исследований. Также при подготовке данных методических рекомендаций использовались результаты сопоставления данных 4D-сеймики и скважинных исследований и промысловых наблюдений на Пильтун-Астохском месторождении в период с 1999 по 2019 г.

Настоящие методические рекомендации определяют основные требования и методические подходы к проведению 4D-сейсмомониторинга разработки шельфовых месторождений углеводородного сырья на основе данных сейсмических исследований 4D и комплексирования их с ПГИ и ГДИ, промысловыми данными и результатами расчетов показателей разработки месторождений с использованием ГДМ. Вопросы 3D-сейсморазведки освещены реферативно и только в той мере, какой это необходимо для описания 4D-исследований.

Организации:

Общество с ограниченной ответственностью «Сахалинская Энергия»;

Общество с ограниченной ответственностью «Нефтегазовый НИЦ МГУ имени М. В. Ломоносова»;

Публичное акционерное общество «Газпром».

Авторы:

Гафаров Т. Н., Облеков Р. Г., Хабаров А. В. (к.т.н.), Тимофеева О. В., Махорин М. А., Гречишникова Т. А., Песоцкий С. А., Береснев А. В., Харченко К. С., Ахмедсафин С. К. (к.т.н.), Шандрыгин А. Н. (д.т.н.), Хромова И. Ю. (к.г.-м.н.).

СОДЕРЖАНИЕ

1	ОБОСНОВАНИЕ ЦЕЛЕСООБРАЗНОСТИ ПРОВЕДЕНИЯ 4D-СЕЙСМОМОНИТОРИНГА РАЗРАБОТКИ МЕСТОРОЖДЕНИЙ УВ.....	15
1.1	ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ПРОВЕДЕНИЯ 4D СЕЙСМОМОНИТОРИНГА	15
1.2	СЕЙСМИЧЕСКАЯ ПОВТОРЯЕМОСТЬ	17
2	ПЛАНИРОВАНИЕ И ПРОВЕДЕНИЕ ПОЛЕВЫХ РАБОТ	22
2.1	ВИДЫ МОРСКИХ 4D-СЪЕМОК	22
2.2	ВЛИЯНИЕ ГЕОМЕТРИИ СЪЕМКИ НА ПОВТОРЯЕМОСТЬ.....	23
2.3	СТРАТЕГИИ МАКСИМИЗАЦИИ ПОВТОРЯЕМОСТИ ГЕОМЕТРИИ МОРСКИХ СЕЙСМИЧЕСКИХ ДАННЫХ.....	25
3	ОБРАБОТКА МАТЕРИАЛОВ СЕЙСМИЧЕСКОЙ СЪЕМКИ ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ 4D-СЕЙСМОМОНИТОРИНГА РАЗРАБОТКИ МЕСТОРОЖДЕНИЯ	34
3.1	КОМПЕНСАЦИЯ НЕИДЕНТИЧНОСТИ ДАННЫХ И ПОДАВЛЕНИЕ ШУМОВ.....	34
3.2	КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА 4D-ОБРАБОТКИ. АТРИБУТЫ КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА 4D.....	35
3.3	СТРАТЕГИЯ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ 4D	36
3.4	ТИПОВОЙ ГРАФ ОБРАБОТКИ ПРОЕКТА 4D МОРСКИХ ДАННЫХ С ПЛАВАЮЩИМИ КОСАМИ.....	38
3.5	ОСОБЕННОСТИ ГРАФА ОБРАБОТКИ ПРОЕКТА 4D ПРИ РЕГИСТРАЦИИ ДОННЫМИ СИСТЕМАМИ.....	43
4	ИНТЕРПРЕТАЦИЯ МАТЕРИАЛОВ СЕЙСМИЧЕСКОЙ СЪЕМКИ ДЛЯ 4D СЕЙСМОМОНИТОРИНГА РАЗРАБОТКИ МЕСТОРОЖДЕНИЯ	47
4.1	ТРЕБОВАНИЯ К ИНТЕРПРЕТАЦИИ ДАННЫХ И ОБОСНОВАНИЕ СЕЙСМИЧЕСКИХ АТРИБУТОВ ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ 4D-СЕЙСМОМОНИТОРИНГА РАЗРАБОТКИ МЕСТОРОЖДЕНИЯ.....	47
4.2	АНАЛИЗ ДАННЫХ СЕЙСМИЧЕСКОЙ СЪЕМКИ ДЛЯ 4D-СЕЙСМОМОНИТОРИНГА РАЗРАБОТКИ МЕСТОРОЖДЕНИЯ.....	51
4.3	ПЕТРОУПРУГОЕ МОДЕЛИРОВАНИЯ ДЛЯ ЦЕЛЕЙ МОНИТОРИНГА РАЗРАБОТКИ МЕСТОРОЖДЕНИЙ	55
4.4	КОМПЛЕКСИРОВАНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИНТЕРПРЕТАЦИИ 4D-СЕЙСМИКИ С ПРОМЫСЛОВЫМИ ДАННЫМИ И РЕЗУЛЬТАТАМИ ПГИС И ГДИ 56	
4.5	КОМПЛЕКСИРОВАНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИНТЕРПРЕТАЦИИ 4D-СЕЙСМИКИ С ГЕОЛОГО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ МОДЕЛЯМИ МЕСТОРОЖДЕНИЙ УВ.....	58
5	РАБОЧИЙ ПРОЦЕСС 4D-СЕЙСМОМОНИТОРИНГА РАЗРАБОТКИ МЕСТОРОЖДЕНИЙ	63
	ЗАКЛЮЧЕНИЕ	68

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	69
ПРИЛОЖЕНИЕ А	71

ВВЕДЕНИЕ

4D-сейсмомониторинг является одним из элементов контроля и управления разработкой месторождений природных углеводородов (УВ). Значимость метода 4D возрастает для шельфовых месторождений, где осуществление мониторинга другими методами ограничено в силу особенностей обустройства таких объектов. Использование 4D сейсмических исследований на шельфовых месторождениях существенно расширяет возможности наблюдений за процессами, протекающими в пластах в ходе эксплуатации.

Сейсмические исследования 4D представляют собой повторное проведение и последующее сопоставление результатов площадных сейсмических съемок 3D. В ходе исследований определяются волновые характеристики (отклики) двух съемок, которые формируют разностный сигнал 4D, представляющий изменения параметров сейсмической записи.

В числе задач 4D-метода в первую очередь следует отметить: наблюдение за движением контактов флюидов и изменением насыщенности УВ в объеме пласта; отслеживание динамики изменения пластового давления в залежах, определение степени выработанности запасов УВ в эксплуатационных объектах, оценка динамики процесса выделения растворенного газа из нефти в результате падения давления в залежи и ряд других процессов.

В настоящее время в РФ отсутствуют нормативные документы, регламентирующие порядок и методику проведения 4D-сейсмомониторинга. Настоящий документ направлен на регламентирование процесса мониторинга разработки шельфовых НГКМ с использованием данных 4D-сейсмомониторинга, включая: обоснование возможности проведения 4D-изысканий; требования к обработке и интерпретации данных 4D сейсмической съемки, а также комплексированию результатов интерпретации 4D-сейсмике с данными ПГИ и результатами расчетов показателей разработки месторождения, полученными с использованием геолого-технологических моделей. Вопросы выполнения работ 3D (моделирование, планирование, проведение полевых работ и обработки, а также интерпретации сейсмических данных) исключены из данного документа по причине наличия существующей нормативной базы по 3D-сейсморазведке.

Настоящие методические рекомендации разработаны с использованием опыта проведения многолетних 4D сейсмических исследований, выполненных ООО «Сахалинская Энергия» на месторождениях углеводородного сырья континентального шельфа Охотского моря, прилегающего к острову Сахалин, анализа мирового и отечественного опыта проведения

сейсмических исследований 4D на морских месторождениях УВ, а также обзора современных технологий 4D сейсмических исследований. Также при подготовке данных методических рекомендаций использовались результаты сопоставления данных 4D-сеймики и скважинных исследований и промысловых наблюдений на Пильтун-Астохском месторождении в период с 1999 по 2019 г.

ТЕРМИНЫ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ

акустические свойства: физические свойства сред, которые определяют особенности генерации и распространения в данной среде упругих колебаний

амплитудно-частотная характеристика: зависимость амплитуды установившихся колебаний выходного сигнала некоторой системы от частоты её входного сигнала

атрибут (сейсмический): результат некоторых специальных математических преобразований сейсмических данных, нацеленный на извлечение дополнительной информации о кинематических и динамических характеристиках сейсмического сигнала

базовая (опорная) съёмка: съёмка, которая служит базовой основой для ведения дальнейших исследований

бин: элементарная прямоугольная площадка. Все фактические средние точки, попадающие на площадку одного бина, относятся к ее центру, который считается для них общей средней точкой

бинирование: процесс построения равномерной сети бинов на площади съёмки и привязки ОСТ к соответствующим бинам

буксируемые косы: устройство для приема сейсмического сигнала, которое представляет собой секционированный шланг с нейтральной плавучестью, состоящий из приборных и вспомогательных секций и буксируемый позади сейсморазведочного судна

граф обработки: набор процедур, которые должны быть применены к каждой трассе для улучшения соотношения сигнал/помеха, выделения отражённых волн и построения разреза, отражающего геологическое строение района

донные сейсмические станции: устройства для регистрации и хранения сейсмической информации, расположенные на морском дне

коэффициент отражения: величина, равная отношению амплитуды отраженной волны к амплитуде падающей волны

мониторинг: постоянное наблюдение за какими-то процессами для оценки их состояния и прогнозов развития

мониторинговая съёмка – повторная сейсмическая съёмка для задач контроля за изменениями в резервуаре в результате разработки

обработка данных (сейсмических): совокупность операций, проводимых в определенной последовательности по каждой сеймотрассе или группе сеймотрасс с целью максимального подавления регулярных и нерегулярных помех и наиболее полного выявления кинематических и динамических характеристик изучаемых волн

ОСТ (общая срединная точка), общая глубинная точка— ОГТ (способ): основной способ сейсморазведки, основанный на многократной регистрации и последующем накапливании сигналов сейсмических волн, отражённых под разными углами от одного и того же локального участка (точки) сейсмической границы в земной коре

петроупругое моделирование (методы Rock Physics): инструмент для учета влияния внутреннего строения горных пород, анизотропии и насыщения на физические свойства горных пород. Связывает упругие свойства, полученные из геофизических данных, с коллекторскими свойствами пород

пневмоисточник: импульсный генератор, который посредством выброса сжатого воздуха под большим давлением создает волны давления, или упругие волны (низкочастотные и звукового диапазона частот)

профили съемки: линия на поверхности Земли (или морского дна), вдоль которой расставлены сейсмоприемники для изучения упругих (сейсмических) волн

пункт возбуждения: точка возбуждения на, над или под поверхностью наблюдений, в котором производится возбуждение сейсмических колебаний

сейсмическая повторяемость: мера сходства двух или более массивов сейсмических данных, которые были получены в результате проведения работ на одном и том же участке через определённый интервал времени.

сейсмические исследования: один из самых распространенных в геофизике методов исследования структуры, состава и строения объекта, основанный на регистрации искусственно возбуждаемых упругих волн и извлечении из них полезной геолого-геофизической информации

сейсмический отклик: совокупность изменений, которые сейсмические движения претерпевают в недрах в связи с местными геологическими, морфологическими и геотехническими условиями

сейсмическая трасса: совокупность сейсмических сигналов, зарегистрированных в пункте приема в течение заданного времени после возбуждения упругой волны

сейсмический шум: особый тип сейсмических волн со сложной природой и механизмом

сейсмомониторинг (сейсмический мониторинг): серия разнесенных во времени сейсмических исследований для получения динамической картины процессов, протекающих в объекте исследований

4D-эффект (4D-сигнал, 4D-отклик) – изменение амплитуд отраженных волн в результате изменения отражающих способностей пород в ходе разработки УВ залежей (замещение УВ водой, изменение давления, замещение нефти газом и пр.)

СОКРАЩЕНИЯ

АКШ – акустический каротаж широкополосный

АЦП (аналого-цифровой преобразователь) – устройство, преобразующее входной аналоговый сигнал в дискретный код (цифровой сигнал)

ВСП – вертикальное сейсмическое профилирование

ГДИ – гидродинамические исследования

ГДМ – гидродинамическая модель

ГИС – геофизические исследования скважин

ИННК – импульсный нейтрон-нейтронный каротаж

ИНГК – импульсный нейтронный гамма-каротаж

КК (4D) – контроль качества процедур обработки 4D сейсмических данных

МОГТ – метод общей глубинной точки

НГКМ – нефтегазоконденсатное месторождение

СО-каротаж – углерод-кислородный каротаж

ОСТ – общая срединная точка

ПВ – пункты возбуждения

ПГИ – промысловые геофизические исследования

ПДГТМ – постоянно действующие геолого-технологические модели

ПП – пункты приема

ТНПА – телеуправляемый необитаемый подводный аппарат

УВ – углеводороды

ФЕС – фильтрационно-емкостные свойства

3D DAS (Distributed Acoustic Sensing) – скважинные оптоволоконные системы регистрации акустических сигналов

AVO (Amplitude versus Offset) – амплитуды в зависимости от удалений

Ds – разность в координатах источника

Dr – разность в координатах приемника

dNMRS – нормализованная среднеквадратичная разница амплитуд

dRMS – среднеквадратичные значения амплитуд

NdRMS – нормализованные среднеквадратичные значения амплитуд

NRMS или Normalized Root Mean Square – среднеквадратичную амплитуду разницы, нормированную средним значением среднеквадратичных амплитуд базовой съёмки и монитора

OBC (Ocean Bottom Cabel) – донные кабели

OBN (Ocean Bottom Node) – донные станции

PRM (Permanent Reservoir Monitoring) – стационарные системы мониторинга разработки месторождений

Q – фактор добротности

QPSDM – миграция до суммирования временная или/и глубинная с учетом поглощения среды

ОБЛАСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ

Настоящие методические рекомендации определяют основные требования и методические подходы к проведению 4D-сейсмомониторинга разработки шельфовых месторождений природных углеводородов на основе данных сейсмических исследований 4D и комплексирования их с ПГИ и ГДИ, промысловыми данными и результатами расчетов показателей разработки месторождений. Методические рекомендации распространяются на весь спектр сейсмогеологических условий, при которых возможно проведение 3D сейсморазведочных работ, обработка и анализ 3D-данных. При этом вопросы 3D-сейсморазведки освещены реферативно и только в той мере, в какой это необходимо для описания 4D-исследований.

Результаты 4D-сейсмомониторинга предназначены для принятия решений по управлению разработкой шельфовых месторождений УВ.

Данные, полученные при проведении сейсмических исследований 4D в соответствии с настоящими методическими рекомендациями, могут быть представлены недропользователями в государственные органы с целью регулирования разработки месторождений и оценки текущих запасов в процессе их освоения.

НОРМАТИВНЫЕ ДОКУМЕНТЫ

1. «Классификация запасов и ресурсов нефти и горючих газов». Приказ Министерства природных ресурсов и экологии Российской Федерации от 01.11. 2013 г. № 477 «Об утверждении классификации запасов и ресурсов нефти и горючих газов».
2. «Методические рекомендации по применению классификации запасов и ресурсов нефти и горючих газов». Распоряжение Министерства природных ресурсов и экологии Российской Федерации от 01.02.2016 г. № 3-р «Об утверждении методических рекомендаций по применению классификации запасов и ресурсов нефти и горючих газов, утвержденной приказом Министерства природных ресурсов и экологии Российской Федерации от 01.11.2013 г. № 477».
3. «Правила разработки месторождений углеводородного сырья». Приказ Министерства природных ресурсов и экологии от 14 июня 2016 г. № 356 «Об утверждении Правил разработки месторождений углеводородного сырья».
4. «Правила подготовки технических проектов разработки месторождений углеводородного сырья». Приказ министерства природных ресурсов и экологии от 20 сентября 2019 г. № 639 «Об утверждении Правил подготовки технических проектов разработки месторождений углеводородного сырья».
5. «Регламент по созданию постоянно действующих геолого-технологических моделей нефтяных и газовых месторождений». РД 153-39.0-047-00.
6. «Рекомендации к методике построения геологических моделей при подсчете запасов углеводородного сырья». Протокол № 6 заседания Секции государственной политики и регулирования в области геологии и недропользования. Москва 10 февраля 2015 года.
7. РД 153-39.0-109-01. Руководящий документ. Методические указания по комплексированию и этапности выполнения геофизических, гидродинамических и геохимических исследований нефтяных и нефтегазовых месторождений. ОКСТУ-02. Дата введения 2002-03-01.
8. РД 153-39.0-110-01. Руководящий документ. Методические указания по геолого-промысловому анализу разработки нефтяных и газонефтяных месторождений. ОКСТУ-01. Дата введения 2002-03-01.
9. Инструкция по проведению сейсморазведочных работ 2D и 3D. М, 2003 г.

10. Методические рекомендации по применению пространственной сейсморазведки 3D на разных этапах геологоразведочных работ на нефть и газ. Левянт В.Б. Издание: Министерство природных ресурсов РФ, Москва, 2000 г., 65 с.
11. Методические рекомендации по использованию данных сейсморазведки (2D, 3D) для подсчета запасов нефти и газа. Левянт В.Б. и др. ООО ЦГЭ. 2006. 40 с.

ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Настоящими методическими рекомендациями регламентируется процесс мониторинга разработки шельфовых месторождений УВ с использованием данных сейсмических исследований 4D, включая: обоснование возможности проведения 4D-сейсмомониторинга; требования к полевым работам, обработке и интерпретации данных 4D сейсмической съемки; комплексирование результатов интерпретации 4D-сейсмики с промысловыми данными и результатами проведения ПГИС и ГДИ; комплексирование с результатами расчетов показателей разработки месторождения, полученными с использованием геолого-технологических моделей. Вопросы выполнения работ 3D (моделирование, планирование, проведение полевых работ и обработки, а также интерпретации сейсмических данных) исключены из данного документа по причине наличия существующей нормативной базы по 3D-сейсморазведке.

Мониторинг разработки месторождений УВ основан на регистрации и интерпретации изменения 4D сейсмического сигнала, обусловленного физическими явлениями, происходящими в залежах месторождения и влияющими на акустические свойства среды. В числе этих явлений следует указать изменение: флюидонасыщения порового пространства пластов, порового (пластового) давления и пластовой температуры. В Приложении 1 приводится краткий анализ возникающих эффектов в пластах месторождений УВ при изменении указанных параметров и их влияние на физические и акустические свойства насыщенных флюидом пород. Для решения задач мониторинга разработки необходимо выполнить ряд условий по проведению сейсмических исследований 4D, включая особые требования к проведению базовой и мониторинговых съемок, обработке и анализу данных.

Ввиду низкой интенсивности 4D-отклика и его чувствительности к критериям повторяемости сейсмических съемок и процедур обработки, а также в связи с неоднозначностью решения обратной задачи, необходимо использовать строгий методический подход к осуществлению рабочего процесса 4D-сейсмомониторинга.

В настоящих методических рекомендациях излагаются основные требования к осуществлению данного рабочего процесса.

1 ОБОСНОВАНИЕ ЦЕЛЕСООБРАЗНОСТИ ПРОВЕДЕНИЯ 4D СЕЙСМОМОНИТОРИНГА РАЗРАБОТКИ МЕСТОРОЖДЕНИЙ УВ

1.1 ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ПРОВЕДЕНИЯ 4D СЕЙСМОМОНИТОРИНГА

Целесообразность 4D-мониторинга разработки месторождения обосновывается путем подтверждения формирования сейсмического отклика от процессов, протекающих при разработке в пластах месторождения, при этом величина отклика должна быть фиксируема доступными методами регистрации и выделяема на фоне предполагаемого шума. Иными словами, любой способ определения интенсивности 4D-сигнала на момент планируемой съемки может использоваться для обоснования применимости 4D сейсмических исследований для мониторинга разработки месторождения. Методы оценки отличаются степенью детальности, трудоемкостью, и, соответственно, своей точностью.

Для обоснования целесообразности проведения 4D-мониторинга разработки месторождения рекомендуется следующая последовательность действий:

- Определить влияние изменения эффективного напряжения (стресса) на акустические свойства пород коллектора по данным лабораторных исследований керна.
- Определить свойства пласта (плотность минерального скелета породы, пористость, насыщенность, поровое давление, песчанистость) и флюидов (объемные коэффициенты нефти, газа и воды, газовый фактор, минерализацию воды).
- Выполнить численную симуляцию/моделирование для определения чувствительности акустических параметров (сейсмические скорости, плотности, акустической жесткости) к ожидаемым пластовым изменениям.
- Оценить изменение коэффициента отражения при нормальном падении и AVO-эффекты.
- Рассчитать/сгенерировать 1D-синтетику для ожидаемого 4D-эффекта.
- Рассчитать модельную 4D-сейсмику на основании результатов гидродинамического моделирования.
- Выполнить анализ качества сейсмических данных и уровня шума 4D-данных.

Метод обоснования, основанный на численной симуляции 4D-эффектов, рекомендуется как быстрая оценка на начальном этапе планирования исследования. Примером такого метода является оценочная система на исторических данных [6], где численные оценки свойств пласта и флюида, а также изменений в процессе разработки, анализируются совместно с качеством сейсмических данных. Для анализа такого рода разработана оценочная система и критерии 4D-чувствительности. Данный подход следует

использовать для быстрой оценки возможности применения 4D-метода для рассматриваемого участка на конкретном этапе разработки месторождения.

Оценку чувствительности акустических параметров к изменениям в пласте следует рассматривать как первый шаг к оценке 4D-эффекта. Рекомендуется выполнить расчёт относительных изменений сейсмических скоростей, плотности и акустической жесткости при изменении давления и флюидонасыщения. Температурный эффект, как правило, невелик, и поэтому не является обязательным к оценке.

В ходе обоснования применимости 4D сейсмических исследований для мониторинга разработки месторождений рекомендуется выполнить оценку изменений коэффициента отражения в зависимости от угла падения. Это позволит определить пригодность AVO анализа в качестве инструмента для интерпретации 4D-эффектов и, в частности, для дифференциации изменений пластового давления и флюидонасыщения.

Наличие акустического и плотностного каротажа позволяет рассчитать кривую изменения акустической жесткости и, следовательно, коэффициента отражения вдоль ствола скважины. Для получения синтетической сейсмограммы при начальных условиях данную кривую необходимо свернуть с сейсмическим импульсом. После пересчета синтетики для различных сценариев изменения давлений и флюидонасыщенности, можно оценить 4D-эффект в зоне пластопересечения. Данный метод рекомендуется использовать для оценки чувствительности 4D-мониторинга к толщине пласта-коллектора и величине тестируемого параметра. Последовательное изменение давлений и насыщения позволит определить разрешающую способность 4D-метода для исследуемого участка и коллектора. Подробнее процесс петроупругого моделирования 4D-сигнала представлен в разделе 4.3.

С целью оценки площадных 4D-эффектов рекомендуется выполнять моделирование 3D синтетических сейсмограмм. Синтетический куб 4D-разницы позволяет добавлять шум и, следовательно, определять информативность планируемого исследования более достоверно. Кроме того, результаты такого моделирования могут быть крайне полезны на этапе интерпретации реальных 4D-данных. Сравнение модельной сеймики с фактическим 4D-откликом позволит лучше понять обнаруженные эффекты, а значит, снизить неопределенность интерпретации.

Техническое обоснование проведения 4D-мониторинга неразрывно связано с предварительной оценкой уровня 4D-шумов, которые в свою очередь, зависят от степени

повторяемости базовой и мониторинговой съёмок. Этот вопрос подробно рассмотрен в разделах 1.2 и 2.2.

1.2 СЕЙСМИЧЕСКАЯ ПОВТОРЯЕМОСТЬ

При проведении полевых сейсморазведочных работ 4D основным критерием успеха является высокая степень повторяемости между базовой (опорной) съёмкой и последующими (мониторинговыми) съёмками. Повторяемость – это мера сходства двух или более массивов сейсмических данных, которые были получены в результате проведения работ на одном и том же участке через определённый интервал времени.

Для количественной оценки степени повторяемости наиболее часто используют нормированное среднеквадратичное значение 4D-шума или амплитуды разницы между базовой и повторной съёмкой (NRMS или Normalized Root Mean Square).

Согласно их определению значение NRMS представляет собой среднеквадратичную амплитуду разницы, нормированную средним значением среднеквадратичных амплитуд базовой съёмки и монитора:

$$\text{NRMS} = \frac{2\text{rms}(\text{monitor} - \text{base})}{\text{rms}(\text{monitor}) + \text{rms}(\text{base})},$$

где среднеквадратичная (rms) амплитуда вычисляется как сумма N-ого количества отсчётов X_i внутри выбранного временного диапазона (окна):

$$\text{rms} = \sqrt{\frac{\sum x_i^2}{N}}.$$

Значение NRMS может быть выражено в долях или процентах и является мерой неповторимости. Используя это определение, значения NRMS могут варьироваться от 0 до 2 (или от 0 до 200%). Если NRMS = 0, то две сейсмических трассы идеально повторяются. Если NRMS = 2, то две сейсмических трассы находятся в противофазе или одна из них состоит только из нулевых дискретов. Если две трассы содержат случайный шум, то значение NRMS = $\sqrt{2} \approx 1.41$.

Параметр NRMS чувствителен к разнице фаз и амплитуд (искажениям), временным сдвигам, частотному диапазону, уровню шума (случайных помех) и выбору временного окна для расчётов. Типовыми приемлемыми значениями NRMS для 4D съёмки, опубликованными в разных источниках, являются значения от 0.1 до 0.3 (от 10% до 30%). Благодаря методам и технологиям, специально предназначенным для решения задач 4D-

сейсморазведки, таким как управляемые буксируемые косы и источники, можно добиться NRMS ниже 20%. Значения около 10% можно ожидать при проведении съёмок 4D с использованием донных сейсмических станций, а значения около 5–7% (и ниже) при использовании систем с постоянно установленными донными датчиками.

В таблице 1.1 ниже приведены основные факторы, которые могут повлиять на качество повторяемости сейсмических данных.

Категория	Факторы, которые могут повлиять на повторяемость
1. Различия в геометрии систем наблюдений	Ориентация профилей ПП и ПВ Курс судна с буксируемыми косами и судна-источника (в случае, если источник находится на отдельном судне) Расстояние источник-приемник, вынос (удаление) источника Шаг ПП и ПВ (интервал между ПП и между ПВ) Расстояние между линиями пунктов возбуждений и приёма (сепарация между буксируемыми косами) Угол сноса буксируемых кос Глубина источников и приёмников Уменьшение зоны покрытия из-за новой инфраструктуры (платформы, трубопроводы, и т. п.) Координаты ПП и ПВ (в том числе и точность определения координат при проведении базовой и мониторинг съёмки) Распределение азимутов и удалений
2. Приповерхностные условия	Изменения скоростей продольных и поперечных волн в ЗМС (зоны скопления приповерхностного газа или таяния вечной мерзлоты) Контакт приёмника с грунтом (для донных систем регистрации)

Категория	Факторы, которые могут повлиять на повторяемость
3. Окружающая среда	Уровень моря Скорость и направление течений (для буксируемых кос) Состояние моря и шум зыби Температура воды Соленость (плотность) воды Уровень грунтовых вод Изменение геоморфологии морского дна (например, песчаные банки, смещения и седиментация)
4. Уровень шума	Микросейсмы Шум генерируемый пневмоисточником (собственным или от другой сейсмической партии на соседнем участке) Остаточные кратные волны Частично-кратные и внутренне-кратные отражённые волны
5. Геология и процессы разработки и эксплуатации месторождения	Газовые шапки, газовые трубы Крутые наклоны отражающих горизонтов Экранирующие разломы Продуктивные резервуары (закачка воды или газа, флюидозамещение, истощение, и т. п.)
6. Различия в технологиях и аппаратуре	Чувствительность и тип сейсмических датчиков (гидрофоны, геофоны и акселерометры) Частотный диапазон источников и приёмников Разные типы систем регистрации (жидконаполненная или твердотельная буксируемая коса, донные косы, донные станции, оптико-волоконные системы)

Категория	Факторы, которые могут повлиять на повторяемость
	Количество гидрофонов и длина группы приёмников (для буксируемых кос)
7. Параметры регистрации данных и их стабильность	Объём и геометрия групп пневмоисточников (амплитудно-частотная характеристика и характеристика направленности) Допуски по сепарации между центрами групп источников и между линиями пневмоисточников внутри группы Допуски по давлению и глубине пневмоисточников Допуски по синхронизации пневмоисточников Допуски по замене элементов в группе пневмоисточников (gun drop-out specs) Точность позиционирования источников и приёмников Допуски по сепарации между косами и глубине приёмников Уровень усиления сигнала в предусилителе АЦП

Таблица 1.1 Ключевые факторы, влияющие на сейсмическую повторяемость

Факторы, оказывающие влияние на сейсмическую повторяемость данных, можно разделить на две большие группы: контролируемые в процессе проектирования и выполнения полевых работ и неконтролируемые.

Среди контролируемых факторов, приведенных в таблице 1.1, основными являются: повторяемость геометрии наблюдения в ходе выполнения полевых работ (п. 1, подробнее гл. 2.2) и повторяемость используемого полевого оборудования, параметров регистрации базовой и мониторинговой съемок (п. 6,7). Для обеспечения повторяемости состояния окружающей среды (п. 3) и, соответственно, температуры воды, солености, направления и интенсивности течений и т. д. рекомендуется использование гидрометеорологических данных на этапе проектирования и выполнение полевых работ с их учетом (как правило в то же календарное время-месяц-сезон). Минимизация уровня сейсмического шума (п. 4)

достигается путем постоянного контроля качества за выполнением полевых работ и остановкой их при ухудшении погоды, наличием контроля за работой судов сопровождения и согласованием времени разрешенного выполнения сейсмических работ в случае наличия активности на соседней площади. Изменение приповерхностных условий с течением времени (п. 2) и степень контакта приёмника с грунтом (для донных систем регистрации) хотя и являются неконтролируемыми факторами на этапе выполнения полевых работ, но могут быть полностью или частично скомпенсированы при выполнении обработки данных.

2 ПЛАНИРОВАНИЕ И ПРОВЕДЕНИЕ ПОЛЕВЫХ РАБОТ

2.1 ВИДЫ МОРСКИХ 4D-СЪЕМОК

По своему типу, морские 4D-съёмки обычно классифицируются как унаследованные, специальные и полученные с помощью стационарных донных систем регистрации, и качество их геометрической повторяемости увеличивается в этом порядке.

Для 4D-съёмок унаследованного типа повторные съёмки чаще всего проводятся для целей отличных от мониторинга, например, с целью получения более качественных 3D-данных. В таких случаях мониторинговые съёмки обычно имеют параметры сбора данных, отличные от параметров базовой съёмки, и время их проведения оказывается неоптимальным с точки зрения повторяемости. Такие съёмки могут быть успешными в случае сильного 4D-сигнала.

Специальные съёмки составляют подавляющее большинство текущих проектов 4D-сейсморазведки в мире и на шельфе РФ. При таких съёмках сейсмический мониторинг является основной целью. Полевые работы планируются с учетом обеспечения максимальной повторяемости, а интервалы повторений выбираются таким образом, чтобы интерпретация новых 4D данных помогала принимать важные решения в процессе разработки месторождения. Специальные морские 4D-съёмки можно проводить с помощью буксируемых кос, донных кабелей (ОВС) или донных станций (OBN).

Для съёмок, в которых используются стационарные системы, мониторинг резервуара будет единственной целью. Такие системы характеризуются фиксированными позициями приемников (как правило, ОВС или оптоволоконные кабельные системы, зарытыми в морское дно) и возможностью проводить съёмку с короткими интервалами повторения. С точки зрения геометрической повторяемости, такие съёмки являются самыми качественными, но экономическая целесообразность установки и обслуживания стационарных донных датчиков будет зависеть от конкретных геологических условий и режима разработки месторождения.

Для случаев локального (в пределах ограниченной площади или определенного целевого интервала) 4D-мониторинга следует упомянуть метод трёхмерного вертикального сейсмического профилирования (3D ВСП). В настоящее время при строительстве современных морских скважин в них возможно размещение оптоволоконного кабеля, позволяющие регистрировать сейсмические волны, используя метод 3D DAS (Distributed Acoustic Sensing). Регистрация 4D DAS (Distributed Acoustic Sensing) ВСП данных может осуществляться одновременно с данными 3D/4D сейсморазведки МОГТ или как

отдельная съёмка с более плотной сеткой ПВ (например, по круговым профилям) и более частыми временными интервалами (при необходимости 1–2 раза в год).

2.2 ВЛИЯНИЕ ГЕОМЕТРИИ СЪЕМКИ НА ПОВТОРЯЕМОСТЬ

При проведении полевых работ 4D-сейсморазведки рекомендуется уделять основное внимание влиянию геометрии съемки. Небольшие ошибки в горизонтальном положении ПВ и ПП и сдвигах во времени редко влияют на трехмерное сейсмическое изображение, но они могут повлиять на повторяемость и интерпретируемость четырехмерных сейсмических данных.

С другой стороны, точное повторение геометрии базовой съемки может быть сложной задачей как с технической, так и с экономической точки зрения. В результате уровень усилий при регистрации полевых данных должен быть соизмерим со степенью повторяемости, требуемой уровнем обнаружения 4D-сигнала. Необходимо принимать во внимание сложность геологического строения и другие факторы (такие как глубина воды), влияющие на чувствительность NRMS и других показателей повторяемости к различиям в геометрии.

На рисунке 1.1 показано, как изменяется значение параметра NRMS при увеличении горизонтального смещения от нуля до 16 м. При помощи этого графика можно оценить влияние изменения геометрии (ошибки повторения координат ПП и ПВ) на повторяемость, например, при сдвиге 10 м, значение NRMS достигает 20%. В данной работе [1] авторы сместили результаты 3D-сейсморазведки по горизонтали на один бин, а затем заново обработали и вычли из первоначального результата обработки. Процедура повторялась несколько раз с разной величиной смещения. Эта зависимость не является закономерностью для всех съёмок 4D, и аналогичные графики должны быть построены по реальным данным 4D-сейсморазведки (если они доступны) для конкретных регионов, где планируется проведения работ. Если реальные 4D-данные отсутствуют, то на этапе обоснования проведения 4D-работ предлагается проводить теоретическую оценку стабильности 4D-сигнала в зависимости от смещений ПП и ПВ. По результатам обработки данных без смещений и с ними можно будет уточнить или обосновать допуски по смещениям ПП и ПВ для планируемых полевых работ в конкретных геологических условиях.

Следует обратить внимание на то, что повторяемость также зависит от угла наклона отражающих границ и частотного диапазона полезного сигнала и помех.

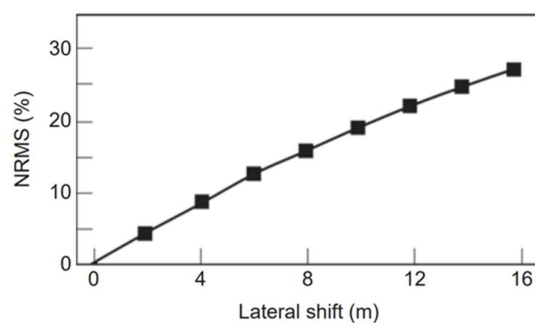


Рисунок 1.1. Значения NRMS (%) в зависимости от величины горизонтального сдвига [1]

Меры сходства геометрии могут включать разницу в расстоянии до центра бина, положений общей средней точки, азимутов, координат положений источника и приемника (рисунок 1.2). Для определения подобия в геометрии рекомендуется использовать параметр $\Delta S + \Delta R$. Во время проведения полевых работ необходимо рассчитывать и использовать эту меру сходства как аспект контроля качества повторяемости геометрии.

На рис. 1.3 показаны значения NRMS как функция $\Delta S + \Delta R$ для 4D-съемок, выполненных на нескольких месторождениях, каждая точка на графике соответствует одной 4D-съемке. Если на одном и том же месторождении проводилось несколько 4D-съемок, то такие точки соединены стрелками. И поскольку они связаны с одним и тем же месторождением, эффекты сложного геологического строения и другие факторы, влияющие на повторяемость, практически исключены.

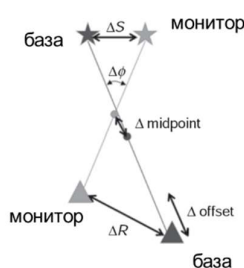


Рисунок 1.2. Показатели повторяемости геометрии трасс базовой и мониторинговых съёмок в одном и том же сейсмическом бине. Здесь ΔS – разность положений источника, ΔR – разность положений приемника, $\Delta\phi$ – разность азимутов [3]

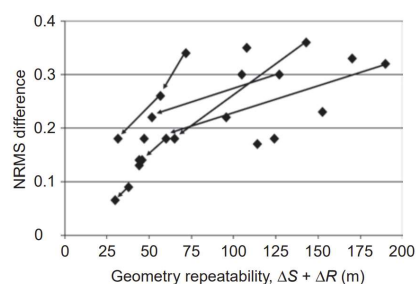


Рисунок 1.3. Соотношение между значениями NRMS и значениями $\Delta S + \Delta R$ для 4D-съёмок в Северном море. Стрелки соединяют повторные съёмки одного и того же месторождения [9]

2.3 СТРАТЕГИИ МАКСИМИЗАЦИИ ПОВТОРЯЕМОСТИ ГЕОМЕТРИИ МОРСКИХ СЕЙСМИЧЕСКИХ ДАННЫХ

Выбор и элементы стратегии улучшения повторяемости при планировании и проведении полевых работ будут зависеть от таких факторов, как геологическое строение и задачи, качество данных базовой съёмки, технология регистрации полевых данных, условия окружающей среды, наличие производственной инфраструктуры, стадия разработки месторождения и бюджет проекта.

Специальная съёмка 4D с буксируемыми косами

Основная проблема 4D-съёмок с буксируемыми косами – это невозможность повторения положений пунктов возбуждений и приёма базовой съёмки из-за течений, сноса кос, состояния моря и других факторов. Из-за изменения угла сноса кос повторяемость геометрии для дальних удалений всегда хуже, чем для ближних. Кроме того, со временем на месторождениях появляется инфраструктура, которой не существовало во время проведения базовой съёмки, и которая создаёт препятствия для мониторинга с помощью буксируемых кос. Рекомендуется несколько стратегий оптимизации повторяемости геометрии съёмок с буксируемыми косами, которые перечислены ниже.

1. Повторение ориентации профилей и направления отстрела

Необходимо добиться совпадения ориентации профилей ПВ/ПП и направления отстрела базовой и мониторинговой съёмок. Несмотря на принцип взаимности, единый курс сейсмического судна для базы и монитора, является обязательным условием, так как для

расстановок с несколькими косами азимуты ближних удалений сильно различаются для противоположных направлений, и эта разница может ухудшить повторяемость сейсмических данных.

2. Повторение координат пунктов возбуждений

Одним из элементов, который можно контролировать при работе с буксируемыми косами, является позиционирование судна и источника. Для достижения максимально близкого соответствия координат пунктов возбуждений проектному профилю рекомендуется, помимо управления самим судном, применять технологии активного управления положением линий пневмоисточников.

3. Перекрытие буксируемых расстановок (кос) между соседними профилями

Если буксируется больше кос, чем требуется, то площадь покрытия увеличивается, что позволяет выбрать во время обработки данных наиболее подходящие пары трасс базамонитор. При отстреле базовой съёмки необходимо выбрать интервал между линиями пунктов возбуждений, который соответствует меньшему количеству кос в расстановке, чем есть фактически. Например, если планируется выполнять работы с расстановкой из 8 буксируемых кос, то интервал между профилями ПВ лучше выбрать как для расстановки из 6 кос. В случае, если базовая съёмка была уже выполнена с 6 косами, то для съёмки-монитора рекомендуется использовать судно с 8 или даже с 10 косами. Чем больше перекрытие, тем выше порог допуска для разницы между углами сноса кос при проведении повторных съёмок.

4. Повторение сноса буксируемых кос

Перекрытие линий приёмников (кос) работает только при незначительной и умеренной разнице в углах сноса расстановки. В результате необходимо выполнять повторные съёмки таким образом, чтобы угол сноса приёмной расстановки на протяжении каждого профиля максимально соответствовал углу сноса базовой съёмки. Для этого необходимо определять углы сноса кос для каждого пункта возбуждения базовой съёмки.

На этапе планирования повторных съёмок 4D рекомендуется проводить тщательный анализ течений и приливов, который может показать, что угол сноса кос можно предсказывать с высокой вероятностью. Если это так, то время отстрела профилей повторной съёмки может быть выбрано таким образом, чтобы соответствовать направлению и скорости течений во время регистрации данных базовой линии.

На этапе выполнения работ требуется использование специализированного программного обеспечения для предсказания углов сноса на основании реальных скоростей и направлений течений, полученных с помощью доплеровского измерителя течений, установленного на сейсморазведочном судне и настроенного на регистрацию данных в интервале глубин, который соответствует глубине буксировки кос. Специалист по планированию 4D-съёмки выбирает приоритетные профили и время начала их отработки таким образом, чтобы обеспечить максимальную повторяемость геометрии. При заходе на профиль необходимо следить за разницей между фактическим и ожидаемым сносом кос, и в случае неблагоприятных течений требуется принять решение о задержке начала отстрела или переходе на другой профиль.

При проведении морских 4D-съёмок с управляемыми косами и коррекциями сноса кос меньше 3 градусов, можно добиться значений NRMS, сравнимых с результатами съёмок донными системами регистрации. Использование управляемых кос является стандартным требованием при проведении морских 4D-съёмок с буксируемыми косами.

Безопасное повторение углов сноса кос может быть невозможно возле объектов инфраструктуры (платформ), которые отсутствовали во время проведения базовой съёмки, особенно если направление течений было в сторону новых препятствий. В таких случаях рекомендуется смоделировать стратегии подстрела, обычно с использованием двух сейсмических судов, которые обеспечат получение данных с лучшей степенью повторяемости геометрии.

5. Планирование заполняющих профилей на основе критериев повторяемости

Для 4D-сейсмомониторинга, для принятия решений о дополнительном проходе по профилю, рекомендуется использовать атрибуты степени повторяемости (а не карты кратности), например карты $\Delta S + \Delta R$ для разных интервалов удалений, которые могут быть построены в полевых условиях в режиме реального времени или в течение нескольких часов после завершения работ на профиле.

На рисунке 2.1 показан пример 4D-съёмки с относительно равномерным распределением кратности (рис. 2.1а) за исключением неотработанного участка в центральной части. При анализе этих данных нет необходимости в дополнительном отстреле заполняющих профилей. На карте $\Delta S + \Delta R$ (рис. 2.1б) показаны несколько профилей с плохой повторяемостью геометрии, отмеченных синим цветом. Эти профили представляют собой потенциальные цели для 4D-дострела (или перестрела), если предположить, что течения будут более благоприятными для повторения угла сноса кос.

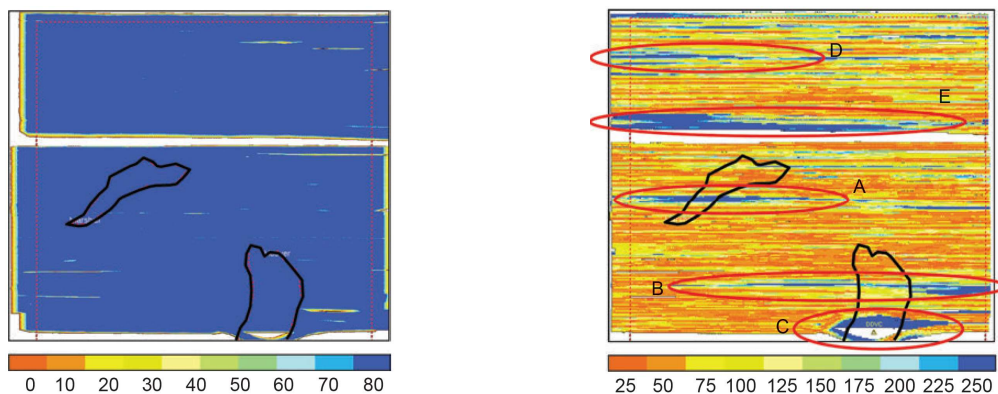


Рисунок 2.1. (а) Карта кратности ОСТ в ближнесреднем диапазоне удалений для 4D-съемки. За исключением полосы в центре площади, где ещё не выполнялась регистрация данных, покрытие кратности хорошее. (б) Значения $\Delta S + \Delta R$ на удалении 2500 м для той же съемки, области плохой повторяемости положений источников и приемников показаны синим цветом. Черные полигоны показывают контуры залежей УВ. Области, где требуется принять решение о регистрации дополнительных данных с целью улучшения геометрической повторяемости, выделены красными эллипсами

На этапе планирования работ необходимо определить пороговое значение $\Delta S + \Delta R$, при котором запись дополнительных данных считается обязательной. Для мелководных районов работ 4D эти значения будут более жёсткими, чем для глубоководных.

6. *Планирование и выполнение базовых 4D-съемок таким образом, чтобы их было легко повторять*

При планировании морской 3D-сейсморазведки для целей разработки месторождений рекомендуется учитывать потенциальную необходимость 4D-мониторинга.

Чтобы базовую съемку было легко повторить в будущем, рекомендуется выполнять отстрел по прямым профилям ПВ, а не с целью равномерного покрытия кратности ОСТ. Также рекомендуется использование систем управления горизонтальным положением источников и поддержание номинальной сепарации между центрами групп пневмоисточников и равномерного интервала ПВ независимо от направления отстрела.

Следует избегать использования групп пневмоисточников с направленностью, которая сильно зависит от направления отстрела, или которую будет трудно повторить. В идеале для базовых съемок рекомендуется использовать симметричный всенаправленный

источник близкий по своим характеристикам к точечному. Для исключения влияния сепарации между пушечными линиями на сигнатуру источника можно рассмотреть источник, состоящий всего из одной линии. При этом нужно учитывать амплитудные характеристики такого источника, исходя из геологических задач.

Для базовых съёмок с буксируемыми косами рекомендуется перекрытие кос между соседними профилями. Это снизит объём дополнительных заполняющих профилей, особенно если при выполнении работ на соседних профилях будет учитываться направление сноса кос (согласование). Кроме того, избыточность исходных данных, обеспечиваемая перекрывающимися косами, благоприятно скажется на 4D-бинировании во время обработки данных.

Рекомендуется сбалансировать количество профилей по направлению их отстрела таким образом, чтобы будущие 4D-монитор-съёмки были более эффективными с точки зрения производительности. Если уже известно расположение будущих объектов инфраструктуры, то можно заранее запланировать и выполнить «виртуальный» подстрел под планируемой платформой с помощью дополнительного судна или отработать несколько ортогональных профилей для получения данных в будущей зоне отсутствия кратности вокруг новой инфраструктуры. Повторение базовых профилей, записанных одним сейсмическим судном, является предпочтительным, чем подстрел с помощью дополнительного судна-источника.

7. Более жёсткие допуски спецификации базовой съёмки

Каждая из вышеупомянутых стратегий нацелена на повторение геометрии. Помимо того, необходимо приложить все усилия, чтобы ограничить шум и вариации формы импульса.

Уровень микросейсм может быть основным фактором качества 4D-данных. Помимо помех от волнения моря и других шумов сейсмической косы, например, механических, повышенный уровень шума может регистрироваться от внешних источников, таких как помехи от соседней сейсмической съёмки, танкеры, платформы и другие работы на месторождении. Рекомендуется рассмотреть возможность установки более низких порогов шума для базовой 4D-съёмки, чем для 3D-съёмки.

Различия в форме номинального сейсмического импульса и спектров между базовой и контрольной съёмками можно компенсировать при обработке данных, используя согласующий фильтр. Однако, если глубина источника или приёмника отклоняется от номинальных значений, результирующие изменения в волнах-спутниках, генерируемых источниками и регистрируемых приемниками, могут значительно повлиять на

повторяемость. В результате допустимые отклонения глубины источника и приемника для 4D-съемки должны быть более ограничены, чем для 3D-съемки. Рекомендуемые коэффициенты могут варьироваться в пределах от 0.75 до 0.5 стандартного значения допуска для 3D сейсморазведочных работ.

Другой причиной изменчивости формы импульса является производительность пневмоисточников. Изменения высоты волны, давления и геометрии (включая замену или отключение элементов в группе) приводят к изменениям сигнатуры источника от выстрела к выстрелу. Поэтому требуется применять более жесткие спецификации для допусков к изменению давления, геометрии источника и формы импульса. Рекомендуемые допустимые отклонения от номинального давления для 4D-съемок не должны превышать 5%.

8. Альтернативные методы регистрации данных, в том числе под объектами инфраструктуры

Вышеупомянутые стратегии для морских 4D-съемок с буксируемой косой позволяют выполнять 4D-съемки с высокой повторяемостью (значения NRMS от 10% до 20%). Поэтому большинство морских съемок 4D в мире проводится с помощью буксируемых кос. Тем не менее, получение сейсмических данных с высокой повторяемостью вокруг объектов инфраструктуры остается нерешенной проблемой для кос. Повторить геометрию подстрелом с двумя судами очень сложно, а отсутствие близких удалений ограничивает возможности обработки данных.

Добиться высокой повторяемости под объектами инфраструктуры можно с помощью донной сейсморазведки, в том числе возможно проведение комбинированных съемок с буксируемыми косами и донными системами.

Специальная съемка 4D с донными системами регистрации

Специально спланированные базовые и контрольные 4D-съемки с донными системами регистрации данных имеют несколько значительных преимуществ по сравнению с буксируемыми косами:

- Повторяемость положения пунктов приёма намного выше и не зависит от удалений, так как приёмники не подвергаются воздействию переменчивых течений и сносу.

- Донные расстановки позволяют использовать системы наблюдений с разной геометрией и получать полно- или широко- азимутальные данные, что имеет явные преимущества на месторождениях со сложной структурой.
- Улучшается покрытие кратности вокруг и под объектами инфраструктуры, нет необходимости планировать подстрелы.
- Не требуются заполняющие профили, так как приемники не меняют своего положения во время съемки.
- Направление отстрела не зависит от поверхностных течений, приливов и отливов (за исключением экстремальных ситуаций).
- Возможность регистрации как продольных, так и поперечных волн с помощью многокомпонентных датчиков (P , V_z , V_x , V_y), построения разрезов обменных PS волну
- Совмещённые датчики давления и скорости позволяют различать восходящие и нисходящие волновые поля, и эффективно вычитать кратные нисходящие волны от свободной поверхности.
- Низкий уровень микросейсм.

Следует отметить, что повышенное качество данных также имеет и более высокую стоимость съёмки, поэтому съёмки с донными приёмниками рекомендуется планировать только в случаях, когда данные, полученные с буксируемыми косами, не позволяют решать геологические задачи или такая съёмка невозможна из-за наличия объектов инфраструктуры (препятствий).

Донные съёмки могут быть выполнены с донными кабелями (OBC), нодами (OBN) или системами мониторинга, постоянно установленными на дно (PRM).

Большинство донных съёмок выполняется с донными станциями (нодами), которые можно устанавливать с помощью телеуправляемых необитаемых подводных аппаратов (ТНПА) или спускать с судна-раскладчика на верёвке (тросе). Первый способ установки отличается низкой производительностью и высокой точностью позиционирования в пределах 5 м от положения ПП базовой съёмки. Второй способ раскладки донных датчиков похож на съёмки с донным кабелем, он отличается более высокой производительностью (скорость раскладки 1.2–1.5 узла) и более плотным квантованием по пунктам приёма, но точность позиционирования и производительность зависят от глубины моря, поэтому такие съёмки рекомендованы на относительно мелководных участках (до 300 м).

Качество повторяемости для донных 4D-съёмок в меньшей степени зависит от геометрии (при соблюдении всех процедур контроля позиционирования), но подвержено влиянию других факторов.

Контакт приёмника с грунтом и волны-помехи морского дна являются основными факторами, влияющими на качество данных. Точность определения (восстановления) вектора регистрируемых колебаний важна для полноазимутальной съёмки и анализа обменных PS-волн. В этом отношении съёмки OBN имеют преимущество перед съёмками OBC, так как существует вероятность смещения донного кабеля от исходного положения под воздействием сильных придонных течений или приливов и отливов при работе в прибрежных зонах. Вертикальные датчики после переустановки донного кабеля относительно повторяемы, а горизонтальные компоненты, особенно поперечные, нет. Донные кабели без карданного подвеса демонстрируют более стабильную векторную точность, но в них устанавливают сейсмоприёмники (геофоны) с более высокой собственной частотой.

В некоторых районах обеспечить приемлемый контакт донной станции с грунтом может быть невозможно из-за твёрдого каменистого дна. Этот фактор необходимо учитывать при планировании съёмки.

Данные донных датчиков подвержены некоторым типам шума, которые не видны на данных буксируемой косы (например, поперечные обменные волны на вертикальной компоненте геофона «shear on Vz»). Помехи морского дна зависят от местоположения и неповторяемы, поэтому их удаление при обработке имеет решающее значение.

Другой способ добиться повторяемого контакта с грунтом – это установка постоянных донных систем мониторинга залежи (PRM), для которых положения приемников фиксированы и их контакт с грунтом не меняется от съёмки к съёмке. В дополнение, такие системы регистрации позволяют выполнять мониторинг 4D-съёмки с более короткими интервалами.

При планировании работ с донными регистраторами требуется уделять внимание особенностям оборудования, которое предлагают исполнители работ, таким как тип датчиков, их амплитудно-частотные характеристики, чувствительность и идентичность, срок службы батареи, диапазон рабочих температур, уход внутренних часов, процедура его коррекции, методы раскладки и сбора донного оборудования, точность позиционирования приборов, процедуры контроля качества. Следует помнить, что в отличие от съёмок с буксируемыми или донными косами сейсмические данные,

регистрируемые донными станциями, не будут доступны для анализа и контроля качества до подъёма приёмников на борт. Поэтому рекомендуется тщательная проверка всех станций перед их установкой на дне на предмет соответствия всем техническим параметрам и спецификациям (уровень зарядки батареи, параметры усиления, дискретизации, фильтрации).

3 ОБРАБОТКА МАТЕРИАЛОВ СЕЙСМИЧЕСКОЙ СЪЕМКИ ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ 4D-СЕЙСМОМОНИТОРИНГА РАЗРАБОТКИ МЕСТОРОЖДЕНИЯ

Основной задачей обработки данных 4D, как и в случае с проведением съемки, является достижение максимальной повторяемости сейсмических данных разных лет. Вызванный процессами разработки месторождения 4D-сигнал может быть достаточно слабым на фоне разного рода шумов, причиной которых, в большинстве случаев, являются различия в параметрах отстрела и обработки данных базовой и повторной съемок. Поэтому при обработке данных необходимо обеспечить максимальную повторяемость графа и параметров обработки базовой и мониторинговой съемок, включая программные средства обработки данных (пакет обработки и его версию). Ввиду этого, стратегию обработки данных 4D следует выбирать с учетом необходимости компенсации неидентичности съемок и данных, обусловленных возможными различиями в геометрии наблюдения, выявленными на этапе планирования работ по обработке данных и далее при анализе реальных данных.

3.1 КОМПЕНСАЦИЯ НЕИДЕНТИЧНОСТИ ДАННЫХ И ПОДАВЛЕНИЕ ШУМОВ

Для компенсации неидентичности данных рекомендуется применение алгоритмов обработки, нацеленных на устранение ее возможных причин, исключая путь построения операторов путем прямого приведения сейсмических данных съемок разных лет друг к другу.

Обработка 4D-данных на начальных этапах включает в себя компенсацию неидентичности, вызванной отличиями в параметрах и оборудовании полевых работ с последующим сведением к минимуму других различий в сейсмической записи – подавление промышленных шумов и шумов окружающей среды, помех от морского дна, случайных и когерентных помех, включая подавление кратных волн, то есть всех типов помех, представляющие собой 4D-шум и не имеющих отношения к 4D-сигналу. При необходимости граф обработки может включать в себя и компенсацию различий съемок в верхней части разреза.

Для решения задач сигнальной обработки данных 4D, таких как подавление шумов (технологических, шумов оборудования, помех от морского дна, случайных и т. д.), коррекция за неидентичность полевого оборудования и в том числе условий возбуждения и приема, подавление кратных волн могут быть использованы стандартные алгоритмы обработки. Детерминистический подход компенсации неидентичности съемок является основным. При невозможности применения детерминистического подхода при

выполнении сигнальной обработки и при вынужденном применении статистических подходов (операторов), предпочтительным является выбор, обеспечивающий максимальную стабильность решения. Граф обработки данных 4D требует также применения специальных алгоритмов обработки, таких как: 4D-бинирование, 4D-коррекция амплитуд, 4D-компенсация абсолютных временных сдвигов между съемками, 4D-учет остаточных статических поправок и, в качестве завершающего этапа обработки, выполнение статистического выравнивания данных (см. гл. 4.1).

Миграция в проектах обработки данных 4D выполняется с использованием единой (общей) скоростной модели для базовой и мониторинговой съемки.

Обработка базовой съемки и последующих мониторинговых съемок выполняются в единой сетке бинирования (гриде), с сохранением соотношения амплитуд и контролем фазовой составляющей сигнала. При этом предпочтение отдается детерминистическим методам (и операторам) обработки при обязательном выполнении контроля качества 4D после каждого значимого этапа.

3.2 КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА 4D-ОБРАБОТКИ. АТРИБУТЫ КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА 4D

Большинство тестов и оценок эффективности выбранных процедур-параметров при обработке данных 4D необходимо выполнять на значимом объеме данных 3D-4D, поскольку эффект их применения в большинстве случаев может быть оценен на основе анализа карт атрибутов, которые рассчитываются на основе функций автокорреляции и взаимной корреляции между базовой и повторными съемками. Следует учитывать, что незначительное и приемлемое при обработке 2D- или 3D-данных различие в параметризации процедур обработки может привести к появлению значимого уровня 4D-шума в кубе 4D сейсмической разницы. Общей практикой контроля качества и применимости выполненных процедур при 4D-обработке является оценка сходимости данных на основе анализа 4D-атрибутов после каждого значимого шага. На основе оценки сходимости принимается решение о применимости процедуры и ее параметризации. Анализ карт 4D-атрибутов является составной частью контроля качества обработки, дополняющий стандартный контроль качества до и после выполнения процедуры по сейсмограммам, суммарным разрезам, подборкам равных удалений-каналов и т. д. На каждом из этапов контроля качества следует оценивать эффект от примененных процедур. Проверяется корректность применения процедуры, наличие неожиданного ухудшения или изменения степени проявленности 4D-сигнала после применения процедуры, в том числе оценивается степень сходимости съемок на данном шаге обработки. Таким образом, после каждого значимого шага в дополнение к стандартному набору обязательных

процедур 3D-контроля качества, необходимо получить куб 4D сейсмической разницы и рассчитать набор 4D-атрибутов. Полученный набор 4D-контроля качества (4D-КК) следует сопоставлять с набором 4D-КК предыдущего этапа, оценить степень сходимости, а именно определить уменьшились ли различия между съемками. На основе данного сравнения принимаются решения о корректности и применимости процедур. Основными атрибутами 4D-контроля качества являются: карта нормализованной среднеквадратичной разницы (dNMRS), карта отношения амплитуд съемок в выбранном окне (карта амплитудных скаляров), карты временных сдвигов и фазовой подвижки между съемками.

Атрибуты 4D-контроля качества рассчитываются в нескольких окнах – одно из которых выбирается в верхней части разреза, заведомо вне зоны возможного наличия 4D-сигнала. Верхнее окно служит для анализа сходимости данных и выбора возможных временных подвижек между съемками, построения операторов приведения, анализа эффективности применения различных процедур компенсации различия между съемками. Нижнее окно (или несколько окон) выбираются в целевой толще, в интервале ожидаемого 4D-сигнала, с целью раннего его выделения на картах атрибутов и дальнейшего наблюдения- контроля его выраженности от этапа к этапу обработки. Желательно контролировать каждый значимый шаг обработки.

Интерпретационная обработка данных с привлечением специалистов-интерпретаторов в последние годы является базовым подходом при обработке данных 3D. При обработке данных 4D для целей контроля качества рекомендуется расширение совместной рабочей группы и дополнительного привлечения инженеров-разработчиков и сохранением принципов подхода интерпретационной обработки данных, а именно- выполнение анализа промежуточных материалов обработки с привлечением результатов интерпретации данных ранее выполненной 3D базовой съемки и, в случае если это не первый проект мониторинговой съемки на площади, то также и с привлечением результатов интерпретации данных 4D.

Привлечение специалистов-интерпретаторов, инженеров-разработчиков, конечных пользователей к анализу промежуточных результатов является важным моментом выполнения контроля качества 4D-обработки, поскольку именно у этой группы специалистов есть четкое понимание ожидаемого 4D-эффекта, его типа и положения на съемке во времени и пространстве, приоритетных зон интереса и, соответственно, зон повышенного контроля качества в процессе выполнения обработки. Стратегия обработки данных 4D

Обработку данных 4D с целью обеспечения максимальной повторяемости желательно выполнять одновременно для базовой и повторных съемок. При этом, принимая во внимание, что 4D-съемки по своему типу могут являться унаследованными или специальными, стратегия обработки может быть различной (подробнее о типе 4D-съемки см. раздел 2.1 данных методических рекомендаций). При обработке данных 4D специальных съемок применяется подход «совместной» обработки, подразумевающий выполнение переобработки базовой съемки с одновременным выполнением обработки мониторинговой съемки. При выполнении «совместной» обработки повторяемость алгоритмов обработки и их параметризации является обязательной для базовой и повторных съемок. «Совместная» обработка обеспечивает идентичность (насколько это возможно) процедур и параметров обработки, полноту и одновременность анализа по данным базовой и повторной съемки, идентичность версий программного обеспечения. Критерием при выборе графа обработки и параметризации процедур является минимизация различий между съемками с каждым шагом обработки. В процессе выполнения обработки обязательно проведение контроля качества 4D, который следует рассматривать как итеративный процесс, на основании которого принимается решение о применимости процедуры и ее параметров к производственному применению. При выполнении «совместной» обработки лишь некоторые процедуры на начальных этапах, такие как подавление помех, могут быть выполнены с разной параметризацией для базовой и мониторинговой съемок с обязательным выполнением 4D-контроля качества. В общем случае от этапа к этапу обработки средние статистические значения атрибутов контроля качества 4D, таких как NRMS и временной сдвиг, должны уменьшаться по мере увеличения степени подобия между съемками.

Обработка данных 4D унаследованного типа может быть осложнена проблемами дополнительной компенсации неидентичности съемок, что приводит к необходимости применения специальных процедур и/или применения различных параметров обработки. К группе проектов 4D обработки, при выполнении которых граф сигнальной обработки может значительно отличаться для базовой и мониторинговой съемок, относятся также проекты с разным типом систем регистрации. Например, базовая съемка выполнена с использованием плавающих кос, а мониторинговая съемка с применением донных станций. В подобных случаях, кроме согласования съемок с использованием детерминистического подхода, для компенсации остаточной неидентичности применяется статистический подход с применением нескольких операторов приведения между съемками. Возможно использование различных сортировок или пространств расчета и применения операторов (например, curvelet пространство или частотно-

зависимое от углов наклона пространство). Глобальных статистических операторов приведения может быть несколько с применением их на разных этапах обработки. Кроме того, при 4D-обработке данных, полученных с использованием разных типов систем регистрации, рекомендуется рассмотреть возможность применения алгоритмов миграции со встроенной опцией компенсации полей на этапе выполнения миграции до суммирования (например, по алгоритму LS Prestack Kirchhoff). Основным критерием при выборе графа обработки и параметризации процедур в подобных случаях также служит минимизация различий между съемками с каждым шагом обработки.

3.3 ТИПОВОЙ ГРАФ ОБРАБОТКИ ПРОЕКТА 4D МОРСКИХ ДАННЫХ С ПЛАВАЮЩИМИ КОСАМИ

Ниже представлена последовательность процедур обработки для случая специальной 4D морской съемки с плавающими косами зоны мелководного шельфа. Рекомендованный граф обработки приведен в обобщенном виде, с пояснениями, имеющими отношение к специфике 4D-обработки и не включает в себя детальное описание вопросов 3D-обработки и выполнения стандартного 3D-контроля качества, которое является базовой частью обработки морских данных. Обсуждение темы выбора типа и алгоритма миграции и методологии построения глубинно-скоростной модели находятся за пределами текущего документа.

Рекомендованный граф 4D обработки:

- Ввод данных, редакция и выполнение анализа различий между базовой и повторными съемками: в параметрах отстрела, геометрии-наблюдений, оборудования и сейсмических характеристиках данных. Выполнение 4D контроля качества (4D-КК), как часть анализа исходных данных.
- Подавление помех разного типа (амплитудные выбросы, шумы водной зыби, сейсмической интерференции, технологические шумы, линейные помехи т. д.) в различных сортировках, компенсация неустойчивости работы оборудования (расчет и ввод коэффициентов нормализации чувствительности сейсмоприемников, оценка и при необходимости коррекция неустойчивости работы источника), 4D-КК,
- Коррекция глубины источника/приемника.

Коррекцию глубины источника и приемника с использованием статических поправок рекомендуется применять только для целей контроля качества (при получении суммарных разрезов). Вариации заглубления приемников, связанные с волнением моря, учитываются при выполнении процедуры подавления волн-спутников (дегостинг) с приведением заглубления приемников на номинальный уровень. Рекомендуемым способом коррекции

заглубления оборудования является описание реальной геометрии наблюдения при построении глубинно-скоростной модели миграции и выполнение миграции на уровень приведения с учетом глубины погружения источников и приемников.

- Применение априорных статических поправок (поправка за приливные течения в случае морских съемок с плавающими косами) и выбор единого уровня (поверхности) обработки, 4D-KK.
- Для определения статических поправок за приливные движения используются прямые полевые наблюдения и/или модельные данные на основе предыдущих многолетних наблюдений в зоне проекта.
- Ввод поправки за движение судна, 4D-KK.
- Компенсация неидентичности систем регистрации (наблюдения) с использованием детерминистического подхода, приведение сигнала к нуль-фазовому виду и подавление эффекта вторичной пульсации (если не являются частью процедуры подавления волн-спутников (дегостинга)), 4D-KK.
- Подавление волн-спутников (дегостинг) со стороны источника и приемника с коррекцией глубины источника/приемника на номинальную глубину или на уровень приведения обработки, 4D-KK.
- Подавление волн-спутников (дегостинг) компенсирует «провалы» в амплитудно-частотном спектре, зависящие от углов/удалений и, выполненное в опции с применением детерминистического оператора расширения спектра, позволяет увеличить рабочий диапазон частот сейсмической записи.
- Подавление кратных волн преимущественно с применением технологий, основанных на моделировании: подавление донно-кратных волн на основе моделирования, подавление кратных волн от свободной поверхности на основе моделирования, подавление межслойных кратных волн на основе моделирования, применение деконволюции в Т-Х или Тау-Р области, 4D-KK после каждого из этапов подавления кратных волн.

Корректное подавление кратных волн, особенно донно-кратных, является одним из ключевых этапов обработки для морских проектов 4D мелкого морского дна. Кратные от морского дна в морских данных 4D-проектов не повторяются по причине вариации мощностей и скоростей водного слоя между базовой и повторной съемками. Ситуация осложняется тем, что небольшие различия в периодах кратных волн усиливаются с каждым последующим переотражением внутри водного слоя. Наличие значительного фона кратных волн оказывает негативный эффект как на амплитуды, так и на времена полезных отражений, и в отдельных случаях может иметь более значимое влияние на

возможность выделения 4D-сигнала чем, например, погрешности в навигации. Принципиально важным моментом при подавлении кратных волн (особенно донно-кратных) является применение технологии, основанной на корректном моделировании полей кратных волн с дальнейшим их адаптивным вычитанием из данных. При этом эффективность подавления кратных волн с применением моделирования (донно-кратных волн, кратных волн от свободной поверхности, межслойных кратных волн) и корректность выбранных параметров адаптивного вычитания моделей оценивается преимущественно по кубу 4D сейсмической разницы. С каждым этапом последовательного вычитания различного типа кратных волн на 4D сейсмической разнице при сохранении 4D-сигнала должна наблюдаться минимизация общей энергии. Дополнительным контролем служат также 4D-атрибуты контроля качества. Контроль качества подавления кратных с использованием 4D-атрибутов должен быть в большей степени сфокусирован не на оценках нормализованной среднеквадратичной разницы (NRMS), а на атрибутах, характеризующих амплитудные различия между съемками (атрибут «отношение амплитуд съемок»).

- Анализ стабильности работы сейсмоприемников и взрывной группы с последующей их коррекцией, 4D-КК.
- Компенсация частотно-зависимого поглощения среды/Q-компенсация, с постоянным значением фактора добротности на данном этапе (применение фазовой компоненты для скоростного анализа, амплитудной компоненты только для целей контроля качества).

Обработка данных с применением процедуры подавления волн-спутников подразумевает выполнение компенсации фазовой и амплитудной компоненты частотно-зависимого поглощения среды. Q-компенсация может быть выполнена с применением постоянного регионального значения фактора добротности (Q), при необходимости компенсации локальных аномальных зон поглощения (например, газовые включения), предпочтительно применение амплитудной и фазовой Q-компенсации при выполнении глубинной миграции до суммирования с учетом поглощения.

- Подавление остаточных помех, 4D-КК.
- Расчет и применение 4D статических поправок за проход судна (единая статическая поправка на морской профиль), компенсирующих остаточный недоучет приливных течений, 4D-КК.
- Анализ скоростей суммирования и построение глубинно-скоростной модели миграции (в случае наличия в графе обработки глубинной миграции до суммирования).

- Стандартной практикой при обработке данных 4D представляется применение одних и тех же скоростей суммирования и миграции для базовой и мониторинговой съемок.
- Компенсация изменения скорости в водном слое – замещение переменной скорости в водном слое единой постоянной скоростью для базовой и мониторинговой съемок (при необходимости и в согласовании с построением глубинно-скоростной модели), 4D-KK.

Отработка морских сейсмических съемок может занимать несколько месяцев. За этот период времени и тем более за период времени, разделяющий отработку съемок базовой и мониторинговой, свойства водного слоя могут существенно меняться. Основные факторы – это влияние погодных условий и течений на температуру и соленость морской воды, от которых зависит скорость в водном слое. Небольшое изменение в скоростях может привести к значительным изменениям во временах пробега. В отличие от статических поправок за приливные движения, временные сдвиги, связанные с изменениями в скоростях, увеличиваются с удалением. В данных 3D изменение скорости водного слоя в течении выполнения полевых работ вызывают «дребезг» времен T_0 в направлении кросслайн, который приводит к появлению миграционных артефактов. В данных 4D, например, в случае значительной мощности водного слоя или при наличии/появления нестабильного пресноводного «клина» в толще соленой воды, временные сдвиги между съемками могут быть достаточно значительными для того, чтобы маскировать сигнал 4D на уровне резервуара. Также возможны существенные ошибки в значениях амплитуд и откликах AVO. Как и в целом в обработке данных 4D, применение детерминистических методик является наилучшим решением. Для коррекции изменения скоростей в водном слое возможно использование метода, основанного на прямых замерах скоростей RMS и времен T_0 морского дна, снятых по сейсмическим данным.

- 4D-коррекция высокочастотных остаточных статических поправок в согласовании с построением глубинно-скоростной модели, 4D-KK.
- 4D поверхностно-согласованная компенсация амплитуд (при необходимости), 4D-KK.
- Анализ различий между базовой и повторной съемками, расчет и применение глобального оператора приведения между съемками, 4D-KK.
- 4D-бинирование на основе критериев минимизации геометрических различий между съемками, максимизации «похожести» трасс с использованием оценки

коэффициента кросс-корреляции (значения NRMS), возможно привлечение иных критериев, значимых для оценки различия между съемками, 4D-KK.

Совместное 4D-бинирование базовой и повторной съемок выполняется с целью увеличения степени подобия трасс ценой уменьшения соотношения сигнал/помеха данных индивидуальных съемок. Для этого при выполнении 4D-бинирования при наличии нескольких трасс в пределах бина производится оценка степени подобия между трассами базовой и повторной съемками, и далее на основе этой оценки выбирается и для дальнейшей обработки остается только одна пара трасс, наилучшим образом удовлетворяющая критериям выбора. Критериями выбора чаще всего служат характеристика геометрической повторяемости (минимизация значения $D_s + D_r$, где D_s – разность в координатах источника, D_r – разность в координатах приемника) с одновременной оценкой степени подобия выбранных пар трасс на основе нормализованной среднеквадратичной разницы (NMRS difference) в верхнем окне заведомого отсутствия наличия 4D-сигнала. В качестве дополнительного критерия повторяемости также может быть использована разность азимутов отстрела или иной критерий, определяющий степень подобия базовой и повторной съемок.

В том случае, если для части данных базовой съемки вследствие наличия пропусков в системе наблюдения отсутствуют соответствующие данные повторной съемки (или наоборот), такие данные могут быть удалены из базовой или повторной съемки. При этом допускается оставить зону пропуска незаполненной в обеих съемках, либо заполнить отсутствующие трассы (обычно в повторной съемке) трассами из другой съемки (как правило, базовой) или с помощью интерполяции. Следует учитывать, что первый вариант может привести к наличию сильных миграционных шумов от краев, в результате второго варианта может быть получено более «чистое» изображение, но полученный отклик 4D в зоне пропуска будет носить ложный характер, так как трассы обеих съемок в ней в этом случае идентичны. Решение в отношении участков пропуска трасс из-за проблем системы наблюдения вследствие наличия инфраструктуры, принимается на основе тестирования.

- Регуляризация, 4D KK,

Необходимой процедурой обработки данных является их регуляризация, которая выполняется, как правило, в опции консервативной 3D-регуляризации. Процедура регуляризации заполняет пропуски в данных с одновременным приведением трассы на центр бина.

- Миграция до суммирования временная или/и глубинная, предпочтительно с учетом поглощения среды (QPSDM), 4D КК. Как правило миграция выполняется с использованием единой (общей) скоростной модели для базовой и повторной съемки, в том числе и в случае наличия и разработки многоуровневых залежей, когда разработка верхних уровней может привести к изменениям в покрывающей толще для нижележащих горизонтов. В подобных случаях оценка влияния разработки верхних уровней на нижележащие горизонты выполняется с привлечением кубов временных сдвигов, рассчитанных в локальных окнах, ассоциированных с интересующими горизонтами. Коррекция влияния разрабатываемых вышележащих пластов может быть выполнена несколькими способами – на этапе выполнения финального приведения повторной съемки к базовой (статистическое выравнивание (cross-equalization)) или, в случае наличия значительного эффекта, путем дополнительного уточнения глубинно-скоростной модели для данных повторной съемки с целью выполнения анализа влияния изменения скоростной характеристики среды.

- Обработка сейсмограмм после миграции: подавление остаточных шумов и остаточных кратных волн, коррекция остаточных кинематических поправок, 4D-КК.
- Выбор мьютинга для суммирования, получение полных и частичных (угловых) суммарных разрезов.
- Обработка суммарных данных: подавление следов расстановки съемки, подавление остаточных помех с предпочтительным применением 4D-подхода, процедуры повышения разрешенности и когерентности записи (в случае необходимости).
- Выполнение финального приведения повторной съемки к базовой, включая анализ и применение постоянных временных и фазовых подвижек, оценки и коррекции (при необходимости) затухания амплитуд во времени, нормализацию амплитуд, построение и применение согласующих амплитудно-частотных операторов, переменных (локальных) временных подвижек.

Финальное приведение съемок выполняется с контролем сохранения 4D-сигнала и при активном участии специалистов-интерпретаторов.

3.4 ОСОБЕННОСТИ ГРАФА ОБРАБОТКИ ПРОЕКТА 4D ПРИ РЕГИСТРАЦИИ ДОННЫМИ СИСТЕМАМИ

В отличие от данных с плавающими косами, которые в массе своей отстреливаются в концепции узко-азимутальных съемок, сейсмические данные донных систем наблюдения, в силу технологии отстрела, являются широко-азимутальными (в предельном случае полно-азимутальными). Кроме того, донные системы наблюдений (донные кабели и донные

станции) оборудованы многокомпонентными датчиками, совмещающими в себе датчики измерения давления (P) и скорости (V_z , V_x , V_y). Использование донных систем наблюдений позволяет зарегистрировать как продольную, так и поперечную компоненту сейсмического поля. При этом использование для регистрации продольной компоненты совмещенных датчиков давления (P) и скорости (V_z) позволяет различать восходящие и нисходящие волновые поля. Различия в типе и количестве компонент сейсмического поля, зарегистрированного с использованием донных систем наблюдения, приводит к существенному различию сигнальной части графа 3D обработки данных. При обработке данных продольных волн донных систем наблюдений появляется необходимость выполнения ряда процедур, отсутствующих в графе обработки данных плавающих кос. Наиболее значимыми среди дополнительных процедур графа обработки донных станций являются: учет различия амплитудно-частотных характеристик и чувствительности геофонов и гидрофонов за разность физических принципов, остаточная векторная ротация компонент геофонов (V_z , V_x , V_y), выполнение калибровки вертикальной компоненты геофонов (V_z) и данных гидрофонов (P) с последующим их суммированием (PZ-суммирование). В результате выполнения PZ-суммирования решается задача подавления кратных волн от свободной поверхности со стороны приемника, что облегчает решение задачи подавления кратных и волн-спутников (дегостинг выполняется только со стороны источника). Данные донных станций также характеризуются наличием дополнительных типов шумов, таких как помехи от морского дна, поперечные обменные волны на вертикальной компоненте данных геофонов, поверхностные волны. Соответственно, граф сигнальной обработки дополняется процедурами подавления данного типа помех.

При этом значительная часть задач и процедур обработки данных донных станций повторяет граф обработки данных плавающих кос (с некоторыми изменениями в параметризации процедур). Среди них – необходимость ввода коррекции за движение судна, ввод статических поправок за приливные течения, подавление волн-спутников и кратных волн, подавление различных помех (линейных, шумов волнения моря, сейсмической интерференции и т. д.), бинирование и последующая регуляризация, построение глубинно-скоростной модели, миграция, обработка данных после миграции и суммирование. Выбор последовательности процедур и параметров обработки выполняется на основе анализа атрибутов 4D-контроля качества результатов тестирования (необходимо после каждого значимого шага обработки). В процессе 4D-обработки данных донных станций уделяется дополнительное внимание позиционированию пунктов приема на морском дне – выполняется анализ и коррекция положения пунктов приема, для компенсации различий в качестве контакта донных

приемников с грунтом применяется 4D поверхностно-согласованная коррекция амплитуд (оценивается и применяется высокочастотная компонента за пункты приема, стабилизированная для базовой и мониторинговой съемок). В процессе выполнения сигнальной обработки выполняется анализ различий между базовой и мониторинговой съемками, расчет и применение одного или нескольких глобальных операторов приведения между съемками.

Процесс 4D-обработки данных донных систем наблюдения, также как и данных плавающих кос, нацелен на минимизацию различий между съемками разных лет и на начальных этапах включает в себя компенсацию неидентичности, вызванной отличиями в параметрах и оборудовании полевых работ с последующим сведением к минимуму других различий в сейсмической записи – подавление промышленных шумов и шумов окружающей среды, помех от морского дна, случайных и когерентных помех, включая кратные волны, коррекцию позиционирования пунктов приема и коррекцию амплитуд, – то есть всех типов помех и 4D-шумов, не имеющих отношения к 4D-сигналу.

Сейсмические данные донных систем наблюдения являются **широ**-азимутальными, что является преимуществом для месторождений со сложной структурой. При обработке **широко**-азимутальных данных рекомендуется выполнение анализа на предмет наличия и определения типа сейсмической анизотропии среды с последующим ее учетом при построении глубинно-скоростной модели и миграции до суммирования. В зависимости от выбранной стратегии учета анизотропии (в случае ее наличия), на этапе подготовки данных к миграции выбирается тип сортировки данных. Параметры и критерии, обеспечивающие наилучшую повторяемость при выполнении 4D-бинирования заданного типа сортировки, выбираются на основе тестирования и 4D-контроля качества. При выборе параметризации 4D-бинирования желательно выполнение тестовой миграции до суммирования фрагмента данных для подтверждения сделанного выбора. Обработка данных после миграции (сейсмограмм и суммарных разрезов) выполняется в стандартной последовательности – подавление остаточных помех, коррекция остаточной кинематики, подавление остаточных кратных волн, суммирование и последующая обработка после суммирования. Как и в случае 4D-обработки данных плавающих кос, завершающим этапом обработки является выполнение финального приведения повторной съемки к базовой, включая анализ и применение постоянных временных и фазовых подвижек, нормализацию амплитуд, оценки и коррекции (при необходимости) затухания амплитуд во времени, построение и применение согласующих амплитудно-частотных операторов, переменных (локальных) временных подвижек. Для компенсации остаточной

неидентичности возможно применение нескольких операторов приведения между съемками с использованием различных сортировок или пространств расчета и применения операторов. Статистических операторов приведения может быть несколько с применением их на разных этапах обработки.

Финальное приведение съемок выполняется с контролем сохранения 4D-сигнала и при активном участии специалистов-интерпретаторов.

4 ИНТЕРПРЕТАЦИЯ МАТЕРИАЛОВ СЕЙСМИЧЕСКОЙ СЪЕМКИ ДЛЯ 4D-СЕЙСМОМОНИТОРИНГА РАЗРАБОТКИ МЕСТОРОЖДЕНИЯ

Интерпретация материалов сейсмической съемки для 4D-сейсмомониторинга разработки месторождения выполняется путем непосредственно анализа сейсмических данных и комплексирования результатов интерпретации 4D-сеймики с промысловыми данными, результатами ПГИ, а также результатами расчетов показателей разработки месторождений, полученных с использованием геолого-технологических моделей месторождений УВ.

4.1 ТРЕБОВАНИЯ К ИНТЕРПРЕТАЦИИ ДАННЫХ И ОБОСНОВАНИЕ СЕЙСМИЧЕСКИХ АТТРИБУТОВ ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ 4D СЕЙСМОМОНИТОРИНГА РАЗРАБОТКИ МЕСТОРОЖДЕНИЯ

Интерпретацию данных и обоснование сейсмических атрибутов для проведения 4D-сейсмомониторинга разработки месторождения рекомендуется предварять расчетом и применением временных сдвигов, выполнением глобальной фильтрации для выравнивания амплитуд и частот.

Для снижения уровня 4D-шумов и повышения повторяемости базовой и повторной съемок к кубам сейсмических данных, полученным в результате обработки, применяется статистическое выравнивание, которое включает в себя расчет и применение глобальных временных сдвигов, оператора приведения, нормализацию амплитуд, и поля локальных временных сдвигов. Рассчитанные поправки и операторы приведения применяются только к данным одной съемки (как правило повторной), при контроле и условии сохранения 4D-сигнала.

Первым шагом при выполнении статистического выравнивания является контроль и, в случае необходимости, коррекция глобального временного и фазового сдвига между съемками. Этот анализ рекомендуется выполнять в верхнем окне – окне заведомого отсутствия 4D-сигнала.

Следующим шагом статистического выравнивания является оценка сходимости съемок в амплитудно-частотной области и построение амплитудно-частотного оператора приведения. В целом, обеспечение сходимости съемок в части учета глобальных временного и фазового сдвигов и коррекции амплитудно-частотных характеристик представляется задачей обработки данных, однако в некоторых случаях возникает необходимость в дополнительной коррекции на этапе интерпретации. Последующая амплитудная нормализация может быть выполнена в переменных во времени окнах, но при этом являющихся устойчивыми по площади (глобальными). Завершающей частью

статистического выравнивая съемок является расчет поля локальных временных сдвигов, которое рассчитывается для каждой сейсмической трассы и каждого отсчета для данных повторной съемки с целью коррекции смещения во времени между базовой и повторными съемками. Результатом этого процесса является куб поля временных сдвигов для каждого отсчета повторной съемки и улучшенный (согласованный) куб данных мониторинговой съемки. Источником остаточных временных сдвигов могут служить различия в полевых системах наблюдений, проблемы, которые были не до конца решены в процессе обработки данных. В дополнение к этому на кубе временных сдвигов могут быть выделены зоны изменения порового давления и флюидозамещения, которые приводят к изменению скоростной характеристики среды в районе зон разработки резервуара и, следовательно, проявленные в поле временных сдвигов.

Последующие шаги подготовки к интерпретации данных 4D перечислены ниже и описаны в последующих разделах. Технология расчета в общем виде атрибутов приведена на рисунке 4.1.

- Преобразование отражений в квадратуру для базовой и контрольной съемок.
- Расчет объемных атрибутов 4D.
- Расчет поверхностных атрибутов 4D.

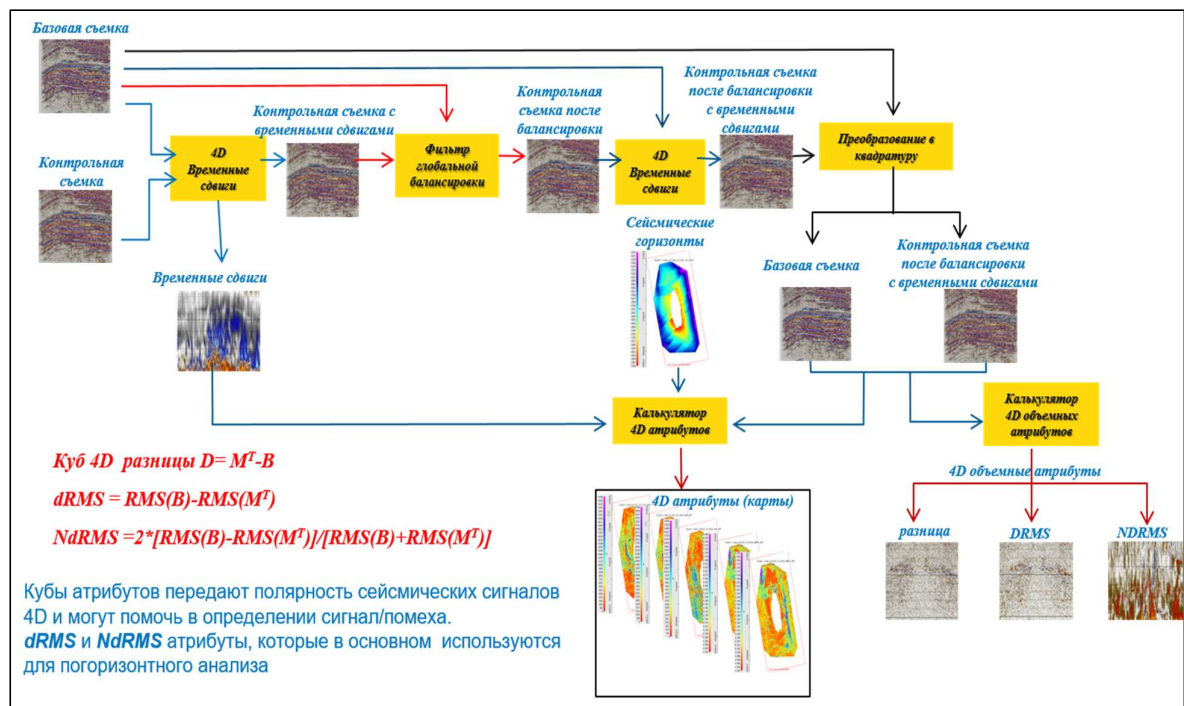


Рисунок 4.1 Схема технологии расчёта 4D-атрибутов

Ниже приведен обзор объемных и поверхностных атрибутов, которые можно рассматривать как рекомендуемые. Однако следует учитывать, что ограничений по использованию сейсмических атрибутов для анализа 4D-сигнала нет и интерпретатор на основе тестирования может выбрать свой уникальный набор, который отвечает задачам анализа.

4.1.1 Объемные атрибуты.

Куб временных сдвигов. На основе кубов базовой и мониторинговой съемок, используя кросс-корреляцию, выполняется временная увязка. При этом, полученный куб временных сдвигов может быть использован как 4D-атрибут, который характеризует накопленные изменения сейсмических скоростей.

Куб 4D-разницы. Куб сейсмической разницы, рассчитанный после увязки кубов по времени, содержит лишь информацию об изменении амплитуд и наравне с кубом временных сдвигов является ключевым сейсмическим атрибутом, используемым для интерпретации. Кубы сейсмической разницы и временных сдвигов характеризуют весь спектр изменений: сейсмические скорости и амплитуды. И именно совокупность этих факторов лежит в основе 4D-анализа (рисунок 4.2)

Куб dRMS. RMS-атрибут или среднеквадратичные значения амплитуд рассчитываются в установленном окне по формуле $RMS = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n A_i^2}}{n}$. Данный атрибут является мерой «энергии» и не зависит от знака расчётных значений. RMS-атрибут рассчитывается последовательно для результатов базовой и мониторинговой съемок после чего вычисляется разница – dRMS. Данный объемный атрибут подходит для быстрого просмотра результатов 4D поскольку подчеркивает даже незначительные изменения амплитуд, которые будет сложно идентифицировать на кубе разницы.

Куб NdRMS. Данный атрибут представляет собой нормализованный dRMS-атрибут и является стандартом контроля качества обработки 4D, который используется для анализа повторяемости базовой и мониторинговой съемок, что характеризует степень надежности 4D -данных.

Общей рекомендацией для расчета объемных 4D-атрибутов является вычисление искомого атрибута для базовой и мониторинговых съемок отдельно, за которым и следует расчет разницы. Атрибуты, рассчитанные на основе куба разницы, являются более чувствительными к неидентичности базовой и мониторинговой съемок. Следует учитывать, что RMS-атрибуты в случае вычисления на основе куба разницы, теряют

информацию о знаке изменений и не позволяют судить об относительном увеличении/уменьшении амплитуд.

4.1.2 Поверхностные атрибуты – карты сейсмических атрибутов.

К использованию для анализа 4D-данных рекомендуется три вида сейсмических атрибутов (приведены в таблице 4.1), описывающих изменения энергии сигнала, площади и экстремума сейсмического импульса. Эти атрибуты получили широкое применение в анализе амплитудных изменений, а также рекомендованы к использованию для построения 4D-атрибутов, описанных ниже.

$dAttr = Attr_база - Attr_монитор$. Расчет данного 4D-атрибута ведется на основе атрибутов, снятых вдоль целевых интервалов с базовой и мониторинговой съемок отдельно.

$Attr_Diff = Attr(Seis_монитор - Seis_база)$. Расчет данного атрибута ведется на основе куба разницы.

Следует обратить внимание, что при вычислении разницы рекомендуется придерживаться стандарта полярности 4D-данных: увеличение акустической жесткости со временем должно соответствовать положительному изменению 4D-сигнала и, напротив, уменьшение акустической жесткости – отрицательному 4D-отклику. В случае акустически мягких коллекторов и при нормальной полярности базовой и мониторинговой съемок порядок вычисления $dAttr$ и $Attr_Diff$, описанный выше, обеспечивает соответствие стандарту полярности 4D.

Группа нормализованных атрибутов применяется для целей сравнительного анализа 4D-отклика от разных коллекторов. Кроме того, данный вид атрибута будет в меньшей степени подвержен тьюнинг-эффекту, однако при этом останется весьма чувствителен изменениям литологии и ФЕС. Нормализованные атрибуты определяются по формуле:

$$N_Attr = \frac{Attr}{(Attr_{база} + Attr_{монитор})/2}$$

Таблица 4.1. Виды поверхностных атрибутов, рекомендованных для 4D-анализа

Энергия	Площадь	Экстремум
RMS_база	SNA_база	AmpTrough_база
RMS_монитор	SNA_монитор	AmpTrough_монитор
dRMS	dSNA	dAmp_Trough
RMS_Diff	SNA_Diff	AmpTrough_Diff
NdRMS	NdSNA	NdAmp_Trough
NRMS_Diff		

При качественной интерпретации поверхностные атрибуты, описанные в таблице 4.1, служат различным задачам.

1. RMS-атрибуты или среднеквадратичные значения учитывают все значения амплитуд в заданном окне вне зависимости от знака сигнала. Таким образом, данный 4D-атрибут определяет изменение кумулятивной энергии сейсмического сигнала и полезен для первичной оценки 4D-эффектов.
2. SNA/SPA атрибуты или сумма негативных/позитивных значений определяет площадь сейсмического импульса. Разностный 4D-атрибут может характеризовать изменения насыщенных толщин, при этом следует учитывать чувствительность атрибута к тюнинг-эффекту.
3. AmpTrough/AmpPeak атрибут или максимальные/минимальные значения определяет экстремумы сейсмического импульса в заданном окне. 4D-атрибут является выражением изменений средних коллекторских свойств и является чувствительным как к изменениям фильтрационно-емкостных свойств (например, в случае уплотнения), так и изменениям флюидонасыщения.

4.2 АНАЛИЗ ДАННЫХ СЕЙСМИЧЕСКОЙ СЪЕМКИ ДЛЯ 4D-СЕЙСМОМОНИТОРИНГА РАЗРАБОТКИ МЕСТОРОЖДЕНИЯ

Анализ рассмотренных выше 4D-атрибутов является основой качественной интерпретации сейсмомониторинга. Интерпретация включает сравнение фактического 4D-сигнала с результатами моделирования 4D-отклика. Магнитуда и знак 4D-амплитуды, а также характеристики временного сдвига позволяют дифференцировать протекающие в пластах в ходе разработки месторождений процессы.

Так, замещение углеводородов водой в интервале коллектора приводит к увеличению акустической жесткости на повторной съемке, что соответствует положительному 4D-сигналу. Прорыв газа или расширение газовой шапки вызывают снижение акустической жесткости и соответствуют отрицательным значениям на картах 4D-атрибута. При этом в результате снижения сейсмических скоростей формируются отрицательные временные сдвиги. Схожие изменения акустических свойств происходят при увеличении пластового давления – в этом случае также ожидаются отрицательные 4D-амплитуды и временные сдвиги. В то же самое время истощение коллектора и вызванное им уплотнение горных пород приводит к увеличению акустической жесткости и сейсмических скоростей в интервале коллектора, что, в свою очередь, характеризуется положительными значениями на 4D-атрибутах и временных сдвигах.

В силу того, что существует лишь два вида 4D-сигнала (сигнал уменьшения и увеличения акустической жесткости), возникает неопределенность в интерпретации данных. Для разрешения неоднозначности рекомендуется привлекать к анализу промысловые данные, а также данные ГИС и ПГИ (см раздел 4.3). Кроме того, совместный анализ изменения амплитуд и временных сдвигов может применяться для установления физического явления, который привел к формированию 4D-отклика (рисунок 4.2). Так, рост пластового давления и газонасыщенности находятся в одном квадранте на приведенной схеме. Однако в случае выделения газа доминирует изменение амплитуды, а при увеличении давления в большей степени проявляется изменение сейсмических скоростей, что сказывается на величине временных сдвигов. Замещение углеводородов водой и уплотнение породы при одинаковых начальных пластовых условиях и ФЕС также можно разделить по амплитуде 4D-сигнала – изменение насыщенности характеризуется гораздо более яркими амплитудами на картах атрибутов.

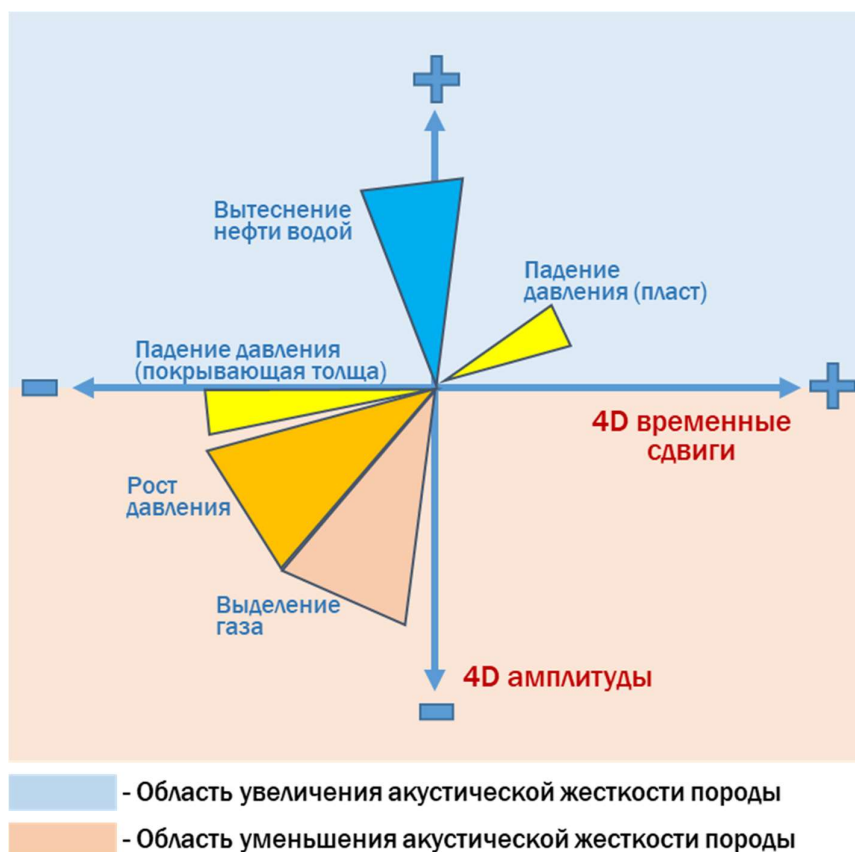


Рисунок 4.2 Изменение акустических свойств в зависимости от эффектов, влияющих на «жесткость» породы [2]

Наличие связи между 4D-откликом и изменениями в пласте во время разработки, позволяет проводить сравнительный анализ карт атрибутов с картами, полученными в результате гидродинамического моделирования. При этом рекомендуется контролировать расположение аномалии в пространстве и знак сигнала относительно модельных параметров. По результатам такого сравнения, в случае выявления противоречий, рекомендуется использовать 4D-данные для адаптации модели (см раздел 4.4).

При проведении сравнительного анализа рекомендуется тестировать различные модельные параметры. Так, интерпретацию изменения флюидонасыщения, атрибуты dRMS и dSNA следует использовать для контроля изменений насыщенных толщин, а не насыщенности.

Помимо совместного анализа результатов сейсмомониторинга и гидродинамического моделирования, 4D-данные могут использоваться для контроля целостности пластов-

флюидоупоров при осуществлении закачки в нагнетательные скважины для поддержания пластового давления.

Для оценки видимых признаков нарушения целостности геологических флюидоупоров рекомендуется выполнение анализа следующих данных 4D сейсмомониторинга:

- Куб 4D сейсмической разницы.
- Карты 4D-атрибутов на уровне коллекторов и выше флюидоупора.
- Куб 4D сейсмической разницы дифракционной составляющей.

В случае нарушения целостности флюидоупора и нецелевой закачки следует ожидать снижение акустического импеданса вышележащей толщи в результате увеличения пластового давления. Кроме того, формирование трещиноватой зоны в околоскважинном пространстве в результате закачки приводит к возникновению отклика на дифракционных данных, и может прослеживаться как в районе перфораций нагнетательных и поглощающих скважин, так и вне целевой зоны в случае прорыва трещины.

Наряду с интерпретацией 4D сейсмических атрибутов для определения качественных характеристик протекающих в пластах процессов можно выполнять и количественную оценку 4D-данных. Условно количественную интерпретацию 4D- сейсмических данных можно разделить на три вида в порядке возрастания сложности и трудоемкости исполнения:

1. Анализ, основанный на скважинных данных. Данный вид интерпретации подразумевает построение регрессионных зависимостей между промысловыми данными в скважинах и неким 4D сейсмическим атрибутом.
2. Анализ, основанный на моделировании с использованием свойств горных пород и флюида. Данный вид интерпретации подразумевает расчёт синтетического сейсмического сигнала, используя результаты гидродинамического моделирования.
3. Анализ, основанный на инверсионном преобразовании.

Результаты количественного анализа позволяют установить более жесткие граничные условия для гидродинамической модели по сравнению с результатами качественной интерпретации. Однако при адаптации модели на 4D-результаты необходимо учитывать ограничения метода: а именно, влияние сейсмического шума и конечную чувствительность метода к пластовым изменениям.

При анализе результатов сейсмического мониторинга необходимо учитывать ограничения, связанные с чувствительностью метода, и наложением полярных сигналов –

например, повышение давления в результате закачки воды и сопутствующие процессы флюидозамещения. Данные проблемы рекомендуется решать с помощью моделирования – как одномерного на скважинных данных, так и трехмерного на основе существующих моделей.

4.3 ПЕТРОУПРУГОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДЛЯ ЦЕЛЕЙ МОНИТОРИНГА РАЗРАБОТКИ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

Для целей петроупругого моделирования критически важным является наличие в комплексе ГИС методов плотностного и акустического каротажа. Наличие достаточного объема качественных данных ГИС, включая широкополосную акустику (АКШ), позволяет провести моделирование петроупругих свойств, в том числе замещения флюидов на основе теории Гассмана, с использованием скважинных данных. Моделирование изменения насыщенности, происходящее в процессе разработки месторождения, следует выполнять в следующей последовательности.

1. Расчет пористости и начальной насыщенности по данным ГИС, оценка литологии.
2. Расчет объемного модуля сжатия и сдвига насыщенной породы по данным ГИС (при начальной насыщенности).
3. Расчет упругих свойств матрицы.
4. Расчет упругих свойств флюидов (при начальной насыщенности).
5. Расчет объемного модуля сжатия сухой породы.
6. Изменение начальной насыщенности (флюидозамещение).
7. Расчет упругих свойств флюидов после флюидозамещения.
8. Расчет объемного модуля сжатия насыщенной породы после флюидозамещения.
9. Расчет скоростей и плотности после флюидозамещения.
10. Расчет и сравнение синтетических сейсмограмм до и после флюидозамещения.

Для оценки влияния изменения пластового давления на упругие свойства пород и на сейсмический отклик необходимо привлекать результаты лабораторных исследований керна, а именно измерения скоростей распространения упругих волн при изменении эффективного давления. В случае если такие измерения для объекта изучения не проводились, рекомендуется привлекать данные месторождений-аналогов. Критериями для выбора аналога могут служить схожесть минералогии и фильтрационно-емкостных свойств. На основе определенных зависимостей может быть смоделирован 4D-сигнал, сформированный как в результате увеличения, так и падения пластового давления. Как правило, такой отклик менее выражен по сравнению с 4D-сигналом, полученным в результате флюидозамещения (рисунок 4.3).

Установленные петроупругие зависимости позволяют моделировать всевозможные комбинации изменения флюидонасыщенности и пластового давления и тестировать различные гипотезы, которые могут описать фактически наблюдаемый 4D-сигнал.

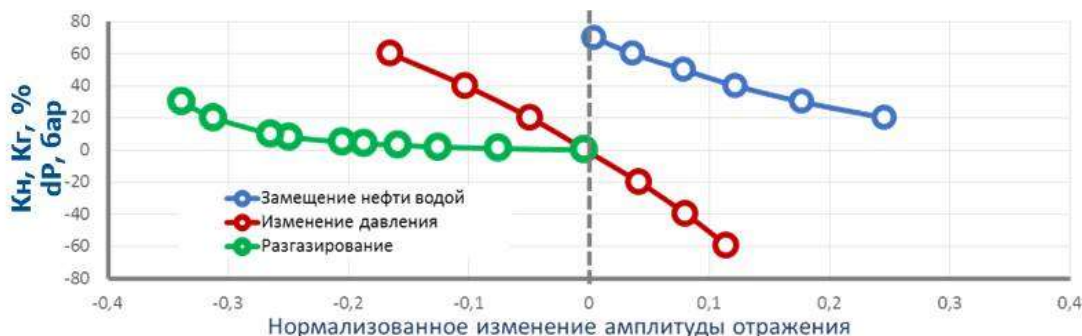


Рисунок 4.3 Пример результатов моделирования 4D-сигнала при изменении флюидонасыщенности и пластового давления

4.4 КОМПЛЕКСИРОВАНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИНТЕРПРЕТАЦИИ 4D СЕЙСМИКИ С ПРОМЫСЛОВЫМИ ДАННЫМИ И РЕЗУЛЬТАТАМИ ПГИС И ГДИ

Целью комплексирования 4D-материалов с промысловыми данными является обобщение результатов конкретного этапа сейсмомониторинга, выполнение оценки качества интерпретации, а также оценка ее информативности. В ходе такого обобщения рекомендуется выполнять анализ:

- динамики обводнения по промысловым данным;
- динамики изменения пластового давления;
- промыслово-геофизических исследований: профиль и состав притока, контроль текущей насыщенности.

Визуально-сопоставительный анализ заключается в наложении карт 4D-атрибута (например, dRMS) и карт, характеризующих фронт продвижения воды, изобар или изменения насыщенности.

Карта 4D разностного атрибута отражает полярность изменения сейсмических амплитуд, которые сонаправлены со снижением и увеличением акустической «жесткости» породы.

К увеличению акустической «жесткости» породы приводит (рисунок 4.2, верхняя область диаграммы): замещение менее плотного флюида на более плотный, например, вытеснение нефти водой; уплотнение породы, обусловленное снижением пластового давления;

К эффектам «смягчающим» породу относятся (рисунок 4.2, нижняя область диаграммы): замещение более плотного флюида на менее плотный, либо снижение плотности флюида, например, разгазирование нефти в пласте; разуплотнение породы, обусловленное ростом пластового давления.

Комплексирование результатов интерпретации 4D-сейсмики с промысловыми данными и результатами ПГИС и ГДИ рекомендуется проводить следующим образом.

До проведения сопоставления данных 4D-сейсмики с другими видами исследований необходимо определить на основе моделирования какой из этих факторов можно считать превалирующим в случае одновременного протекания двух разнонаправленных процессов (например, разгазирования нефти и обводнения пласта). Разрезы 4D-разницы могут привлекаться в случаях, когда на скважину оказывают влияние несколько эффектов, противоположно влияющих на изменение атрибута, для более подробного рассмотрения процессов, происходящих по стволу скважины.

Ниже представлена последовательность сопоставления результатов 4D-сейсмомониторинга с динамикой обводнения. Зоны продвижения фронта воды выделяются по нагнетательным скважинам и скважинам, по которым наблюдается рост обводненности. Границы зон продвижения фронта воды проводятся через середину расстояния между соседними скважинами. Критерием корреляции является совпадение зоны продвижения фронта воды с зоной изменения атрибута dRMS в положительную сторону.

При сопоставлении результатов 4D-сейсмомониторинга с динамикой изменения пластового давления следует учитывать в первую очередь сопутствующие процессы:

- Уплотнение породы, обусловленное снижением пластового давления, приводит к увеличению акустической «жесткости», однако снижение пластового давления ниже давления насыщения приводит к разгазированию нефти в скважинах, что, в свою очередь, приводит к снижению акустической «жесткости». Поскольку разгазирование, как правило, является превалирующим фактором в условиях одновременного протекания процессов флюидозамещения и изменения давления, 4D-отклик будет характеризоваться снижением акустической «жесткости». В качестве критерия корреляции газового фактора с изменением сейсмического атрибута следует рассматривать увеличение газового фактора выше начального газосодержания нефти по скважинам, которые располагаются в зонах со снижением сейсмического атрибута.

- Разуплотнение породы, обусловленное ростом пластового давления, приводит к снижению акустической «жесткости» при условии, что процесс флюидозмещения не происходит (начальный этап законтурного заводнения). Таким образом сигнал, связанный с изменением пластового давления, проявляется только в областях закачки, расположенных за контуром нефтеносности. Критерием корреляции динамики пластового давления с изменением сейсмического атрибута при законтурном заводнении является увеличение пластового давления по скважинам, которые располагаются в зонах со снижением сейсмического атрибута.

Промыслово-геофизические исследования (ПГИ) используются для выделения интервалов притока, расчета интервальных дебитов, определения профиля и состава притока. Для комплексирования данных ПГИ с 4D-результатами необходимо выделить обводненные интервалы, которые затем можно сопоставить с характеристиками сейсмического сигнала на кубе разности или карте 4D-атрибута.

Геофизические методы контроля текущей насыщенности (например ИННК/ИНГК/СО-каротаж) используются для определения изменения насыщенности в прискважинной зоне в процессе разработки. Сравнение в этом случае ведется на основе сопоставления с 4D-сигналом в точке пластопересечения и околоскважинном пространстве. В случае мощного коллектора, анализ сейсмического профиля через куб 4D-разницы может быть информативным с точки зрения анализа характера флюидозамещения (например, продвижение воды в приподошвенной зоне или формирования вторичной газовой шапки в кровельной части пласта).

Таким образом, сопоставительный анализ промысловых данных и данных ПГИ с результатами сейсмомониторинга позволяет установить зависимость между изменением сейсмических атрибутов и динамикой промысловых показателей (обводненность, пластовое давление и газовый фактор). При этом на основе полученных результатов может быть сделан вывод о надежности и информативности результатов этапа сейсмомониторинга.

4.5 КОМПЛЕКСИРОВАНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИНТЕРПРЕТАЦИИ 4D СЕЙСМИКИ С ГЕОЛОГО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ МОДЕЛЯМИ МЕСТОРОЖДЕНИЙ УВ

Постоянно действующие геолого-технологические модели (ПДГТМ) являются одним из основных инструментов для выполнения прогнозных расчетов и принятия на их основе решений при проектировании разработки месторождений нефти и газа. 4D-сейсмомониторинг разработки шельфовых месторождений позволяет увеличить объем исходных данных для построения ПДГТМ и снизить уровень неопределенности при

проектировании. При этом комплексирование данных 4D сейсмических исследований с промысловыми данными и результатами моделирования позволяет более полно охарактеризовать процессы, протекающие в пластах в ходе их разработки.

Способ учета результатов 4D-мониторинга в построении ПДГТМ зависит от характера и надежности сейсмических данных, а также от типа анализа, выполненного в ходе сейсмического мониторинга.

При использовании результатов 4D-съемки унаследованного типа следует учитывать высокую конечную неопределенность. В этом случае рекомендуется ограничиться верификацией модели на 4D-данные. Это можно сделать на качественном уровне путем визуального сравнения 4D-атрибутов и карт изменения насыщенности, построенных на результатах моделирования за исторический период времени, охваченный сейсмомониторингом. Для того, чтобы повысить надежность такого сравнения, рекомендуется выполнить расчет синтетического куба 4D-разницы, который затем следует анализировать совместно с реальными сейсмическими данными. При обнаружении расхождений в наблюдаемых и модельных данных рекомендуется установить причины расхождения и исключить влияние других факторов кроме эффектов от разработки. Если 4D-сигнал является надежным, рекомендуется внести изменения в текущую ПДГТМ для достижения соответствия сейсмическому отклику.

Данные специальной 4D-съемки как правило гораздо более информативны и менее подвержены влиянию артефактов, связанных с низкой повторяемостью базовой и мониторинговой съемок. Сейсмическая интерпретация таких данных может проводиться как на качественном, так и на количественном уровне. При выполнении инверсии полученные карты насыщенности могут быть напрямую учтены в процессе моделирования. Помимо этого, результаты атрибутивного анализа 4D-могут быть также использованы для калибровки ПДГТМ на количественном уровне.

Ниже приведен рекомендуемый алгоритм учета в ПДГТМ 4D-данных о продвижении фронта воды в процессе разработки. Данный алгоритм может применяться как к площади залежи в целом, так и к отдельным участкам, а также использовать многократно на нескольких временных отрезках в случае проведения повторных 4D-съемок.

При формировании подхода для учета данных 4D в ГДМ необходимо учитывать, что результаты интерпретации 4D-сейсморазведки характеризуются неопределенностью ввиду проявления следующих факторов.

1. Ограничения по разрешающей способности сейсмических исследований, например: изменение насыщенности в маломощных относительно общей толщи целевого пласта пропластках сказывается на обводненности скважин, но может быть не идентифицировано на 4D-атрибутах;

2. Различные по своей природе процессы могут приводить к формированию схожего 4D-сигнала, к примеру: увеличение акустической жесткости со временем может наблюдаться как ввиду замещения УВ водой при поднятии контакта или закачке воды, так и при уплотнении пород в результате истощения пласта.

Для целей ГДМ целесообразно использовать контур продвижения воды, который характеризует области подтвержденного по данным 4D-изменения водонасыщенности в результате разработки изучаемого пласта. Данный контур строится на основании 4D-атрибута с обязательной валидацией на промысловые данные, данные ГИС и ПГИС перед использованием для целей ГДМ.

Указанный контур может быть сопоставлен с контуром, осредненным по соответствующему пласту изменением водонасыщенности в 3D ГДМ в соответствии со следующим алгоритмом.

1. В каждой ячейке модели в пределах целевого пласта вычисляется трехмерный параметр изменения водонасыщенности (dSw) на момент проведения соответствующего 4D-исследования:

$$dSw[i, j, k] = Sw[i, j, k] - Sw_{ini}[i, j, k]$$

где $Sw[i, j, k]$ – водонасыщенность в ячейке 3D ГДМ на момент 4D-съёмки,

$Sw_{ini}[i, j, k]$ – водонасыщенность в ячейке 3D ГДМ на момент 4D-съёмки.

2. Строится карта (dSw_{map}) средневзвешенного по поровому объему значения изменения водонасыщенности в модели (рисунок 4.4a) с унаследованной латеральной размерностью 3D-грида:

$$dSw_{map}[i, j] = \frac{\sum_{k=1}^{Nk} dSw[i, j, k] \times PV[i, j, k]}{\sum_{k=1}^{Nk} PV[i, j, k]}$$

где $PV[i, j, k]$ – поровый объем ячейки 3D ГДМ,

Nk – количество слоев в 3D-модели целевого пласта.

3. Производится дискретизация модельной карты изменения средней насыщенности (dSw_{sim}) с учетом разрешающей способности сейсмических исследований (рисунок 4.4b):

$$dSw_{sim}[i,j] = \begin{cases} 1, & \text{если } dSw > th2 \\ 0.5, & \text{если } dSw \in [th1, th2] \\ 0, & \text{если } dSw < th1 \end{cases}$$

где диапазон граничных значения $[th1, th2]$ характеризует минимальные изменения средней насыщенности, которые могут быть идентифицированы на основании 4D-сигнала в конкретных условиях целевого пласта, обосновывается по результатам прямого петроупругого моделирования 4D-сигнала с учетом оценки уровня шума реальной сейсмической записи.

4. Производится перенос контура изменения насыщенности согласно интерпретации 4D-сигнала ($4D_contour$) на сетку модели (рисунок 4.4c):

$$dSw_{4D}[i,j] = \begin{cases} 1, & \text{если ячейка } [i,j] \text{ в пределах } 4D_contour \\ 0, & \text{если ячейка } [i,j] \text{ не в пределах } 4D_contour \end{cases}$$

5. Рассчитывается карта невязок $dSw_{error}[i,j]$ (рисунок 4.4e) и интегральная численная ошибка воспроизведения данных 4D с учетом зон неопределенности (площадь с ошибкой при воспроизведении 4D-данных, отнесенная к общей площади зоны наблюдения):

$$dSw_{error}[i,j] = \begin{cases} 1, & \text{если } dSw_{4D}[i,j] = 1 \text{ И } dSw_{sim}[i,j] = 0 \\ 1, & \text{если } dSw_{4D}[i,j] = 0 \text{ И } dSw_{sim}[i,j] = 1 \\ 0 & - \text{ во всех остальных случаях} \end{cases}$$

$$4D_{error} = \frac{\sum_{i=1}^{Ni} \sum_{j=1}^{Nj} dSw_{4D}[i,j] * A[i,j]}{\sum_{i=1}^{Ni} \sum_{j=1}^{Nj} A[i,j]}$$

где $A[i,j]$ – площадь элемента 2D сетки.

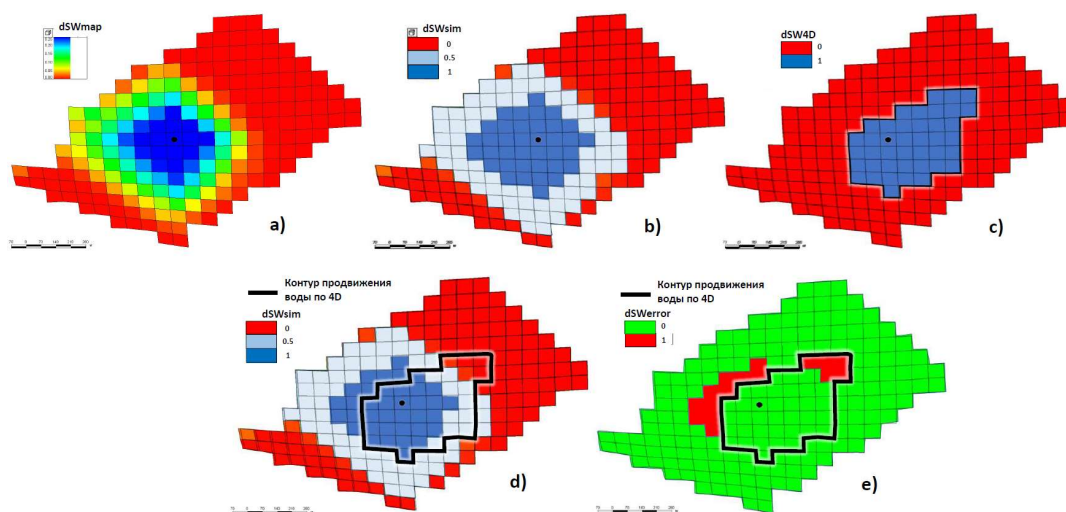


Рисунок 4.4. Синтетический пример оценки ошибки адаптации на данные 4D (продвижение фронта воды)

Полученные в результате применения алгоритма карта невязок, а также интегральная оценка ошибки адаптации на 4D-данные могут быть использованы как для визуальной, так и для численной оценки качества настройки модели.

В целом следует отметить, что вне зависимости от способа внедрения результатов 4D, воспроизведение в модели распространения фронта воды по площади позволяет уточнить геологическую модель объекта и снизить неопределенности в локализации остаточных запасов.

5 РАБОЧИЙ ПРОЦЕСС 4D-СЕЙСМОМОНИТОРИНГА РАЗРАБОТКИ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

Сейсмические исследования 4D представляют собой повторное проведение площадной сейсмической съемки 3D. В ходе эксплуатации месторождения в результате добычи углеводородов и мероприятий, направленных на поддержание пластового давления, происходят изменения в пласте-коллекторе, которые влияют на его физические свойства, а значит и на характер сейсмической записи. Анализ 4D-данных заключается в сравнении базовой и повторной съемок. Наиболее распространенными эффектами, которые удастся интерпретировать на 4D-данных, является изменение флюидонасыщения и давления.

По своему типу, морские 4D-съёмки обычно классифицируются как унаследованные и специальные (рисунок 5.1). Для 4D-съёмок унаследованного типа повторные съёмки чаще всего проводятся для целей, отличных от мониторинга, например, с целью получения более качественных 3D-данных. В таких случаях мониторинговые съёмки обычно имеют параметры сбора данных, отличные от параметров базовой съемки, и время их проведения не оптимально с точки зрения повторяемости. Специальные съёмки составляют подавляющее большинство текущих проектов 4D-сейсморазведки в мире и на шельфе РФ и являются предметом обсуждения данных методических рекомендаций.

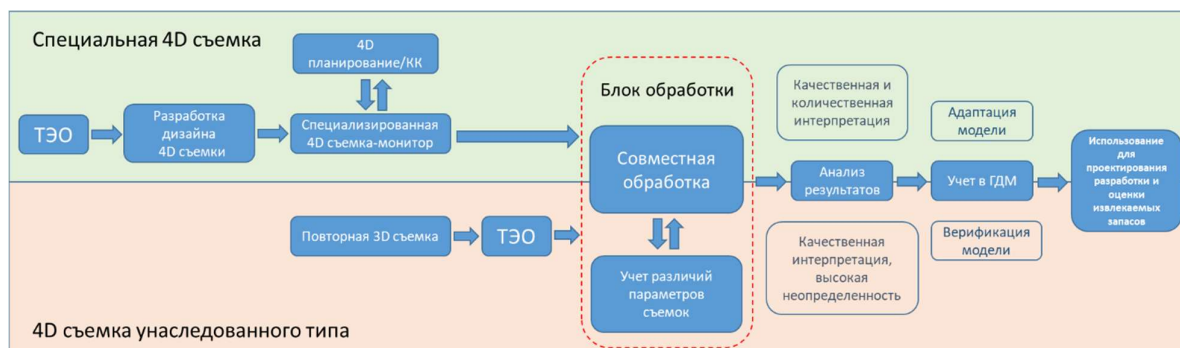


Рисунок 5.1. Схема рабочего процесса по осуществлению 4D-сейсмомониторинга

При проведении специальной 4D-съёмки полевые работы необходимо планировать для обеспечения максимальной повторяемости, а сроки выбирать таким образом, чтобы интерпретацию новых 4D-данных было возможно использовать для принятия проектных решений касательно дальнейшей разработки месторождения. Для выбора дизайна съемки и оптимального срока проведения выполняется технико-экономическое обоснование 4D сейсмических работ на начальном этапе планирования сейсмомониторинговой кампании. Техническое обоснование подразумевает подтверждение формирования сейсмического отклика от процессов, протекающих при разработке месторождения. Причем необходимо

продемонстрировать, что прогнозируемая величина отклика фиксируема доступными методами регистрации и может быть выделена на фоне предполагаемого шума.

При проведении полевых сейсморазведочных работ 4D основным критерием успеха является высокая степень повторяемости между базовой (опорной) съёмкой и последующими (мониторинговыми) съёмками. Повторяемость – это мера сходства двух или более массивов сейсмических данных, которые были получены в результате проведения работ на одном и том же участке через определённый интервал времени. Поэтому при планировании и проведении сейсморазведки 4D основные усилия должны быть сосредоточены на геометрической и аппаратурной повторяемости между базовой и повторной съёмками. Точное повторение геометрии базовой съёмки является сложной задачей как с технической, так и с экономической точки зрения. В результате уровень усилий при регистрации полевых данных должен быть соизмерим со степенью повторяемости, требуемой уровнем обнаружения 4D-сигнала. Поиск оптимального дизайна осуществляется на этапе планирования 4D сейсмических работ.

Специальные морские 4D-съёмки допускается проводить с помощью буксируемых кос, донных кабелей (ОВС) или донных станций (ОВН). При проведении работ с помощью буксируемых кос невозможно повторить положение пунктов возбуждения и приёма базовой съёмки из-за течений, сноса кос и состояния моря. Поэтому следует контролировать ряд параметров, ключевые из них перечислены ниже:

- Повторение ориентации профилей и направления отстрела.
- Повторение координат пунктов возбуждений.
- Перекрытие буксируемых расстановок (кос) между соседними профилями.
- Повторение сноса буксируемых кос.
- Планирование заполняющих профилей на основе критериев повторяемости.

Донные съёмки могут быть выполнены с донными кабелями, нодами или системами мониторинга, постоянно установленными на дно.

В настоящее время, большинство донных съёмок выполняется с донными станциями (нодами), которые можно устанавливать с помощью телеуправляемых необитаемых подводных аппаратов (ТНПА) или спускать с судна-раскладчика на верёвке (тросе).

Качество повторяемости для донных 4D-съёмок в меньшей степени зависит от геометрии (при соблюдении всех процедур контроля позиционирования), при этом данная технологий сопряжена с более высокой стоимостью проведения работ.

Основной задачей обработки данных 4D, как и в случае с проведением съемки, является достижение максимальной повторяемости сейсмических данных разных лет. Поэтому при обработке данных необходимо обеспечить повторяемость графа и параметров обработки базовой и мониторинговой съемок, включая программные средства обработки данных (пакет обработки и его версию). Ввиду этого, стратегию обработки данных 4D следует выбирать с учетом необходимости компенсации неидентичности съемок и данных, обусловленных возможными различиями в геометрии наблюдения, выявленными на этапе планирования работ по обработке данных и далее при анализе реальных данных.

Обработка 4D-данных на начальных этапах включает в себя компенсацию неидентичности, вызванной отличиями в параметрах полевых работ с последующим сведением к минимуму других различий в сейсмической записи – подавление промышленных шумов и шумов окружающей среды, случайных и когерентных помех, включая подавление кратных волн, то есть всех типов помех, представляющие собой 4D-шум и не имеющих отношения к 4D-сигналу. При необходимости граф обработки может включать в себя и компенсацию различий съемок в верхней части разреза. Миграция выполняется с использованием единой (общей) скоростной модели для базовой и мониторинговой съемки.

Обработка базовой съемки и последующих мониторинговых съемок выполняются в единой сетке бинирования (гриде) с сохранением соотношения амплитуд и контролем фазовой составляющей сигнала. При этом предпочтение отдается детерминистическим методам (и операторам) обработки при обязательном выполнении контроля качества 4D после каждого значимого этапа.

Интерпретация материалов сейсмической съемки для 4D-сейсмомониторинга разработки месторождения должна выполняться путем анализа сейсмических данных и комплексирования результатов интерпретации 4D-сеймики с промысловыми данными, результатами ПГИС и ГДИ, а также результатами расчетов показателей разработки месторождений, полученных с использованием геолого-технологических моделей месторождений УВ.

При анализе результатов сейсмического мониторинга необходимо учитывать ограничения, связанные с чувствительностью метода, и наложением полярных сигналов. Данные проблемы следует решать с помощью моделирования – как одномерного на скважинных данных, так и трехмерного на основе существующих моделей.

Интерпретацию данных и обоснование сейсмических атрибутов для проведения 4D-сейсмомониторинга разработки месторождения рекомендуется предварять расчетом и применением временных сдвигов, а также выполнением глобальной фильтрации для выравнивания амплитуд и частот. Затем производится преобразование отражений в квадратуру для базовой и контрольной съемок, расчет объемных и поверхностных атрибутов 4D.

Кубы временных сдвигов и 4D-разницы являются ключевыми объемными атрибутами, так как характеризуют весь спектр изменений: изменения сейсмических скоростей и амплитуд. Совокупность этих двух факторов лежит в основе 4D-анализа. Помимо этого, широко применяются кубы NdRMS. Данный атрибут является стандартом контроля качества обработки 4D, который используется для анализа повторяемости базовой и мониторинговой съемок, что характеризует степень надежности 4D-данных. Общей рекомендацией для расчета объемных 4D-атрибутов является вычисление искомого атрибута для базовой и мониторинговых съемок отдельно, за которым и следует расчет разницы. Атрибуты, рассчитанные на основе куба разницы, являются более чувствительными к неидентичности базовой и мониторинговой съемок.

К использованию для анализа 4D-данных рекомендуется три вида поверхностных сейсмических атрибутов, описывающих изменения энергии сигнала, площади и экстремума сейсмического импульса. А именно группа RMS-атрибутов, группа атрибутов сумм негативных/позитивных значений, а также группа атрибутов, характеризующих экстремальные значения.

Анализ 4D-атрибутов является основой качественной интерпретации сейсмомониторинга и включает сравнение фактического 4D-сигнала и результатов моделирования. Магнитуда и знак 4D-амплитуды, а также характеристики временного сдвига позволяют дифференцировать протекающие в пластах в ходе разработки месторождений процессы. В силу того, что существует лишь два вида 4D-сигнала (сигнал уменьшения и увеличения акустической жесткости), возникает неопределенность в интерпретации данных. Для разрешения неоднозначности рекомендуется привлекать к анализу промысловые данные, а также данные ГИС и ПГИ.

Наряду с интерпретацией 4D сейсмических атрибутов для определения качественных характеристик можно выполнять и количественную оценку 4D-данных. Условно количественный анализ 4D сейсмических данных можно разделить на три вида в порядке возрастания сложности и трудоемкости исполнения:

1. Анализ, основанный на скважинных данных. Данный вид интерпретации подразумевает построение регрессионных зависимостей между промысловыми данными в скважинах и неким 4D сейсмическим атрибутом.
2. Анализ, основанный на моделировании с использованием свойств горных пород и флюида. Данный вид интерпретации подразумевает расчёт синтетического сейсмического сигнала, используя результаты гидродинамического моделирования.
3. Анализ, основанный на инверсионном преобразовании.

Результаты количественного анализа позволяют установить более жесткие граничные условия для гидродинамической модели по сравнению с результатами качественной интерпретации. Однако при адаптации модели на 4D-результаты необходимо учитывать ограничения метода: а именно, влияние сейсмического шума и конечную чувствительность метода к пластовым изменениям.

4D-сейсмомониторинг разработки шельфовых месторождений позволяет увеличить объем исходных данных для построения постоянно действующих геолого-технологических моделей (ПДГТМ) и снизить уровень неопределенности исходной информации. Ключевым результатом интерпретации данных 4D-сейсморазведки, который может быть на количественном уровне использован для калибровки ПГДМ разрабатываемых объектов, является контур изменения контактов флюидов и/или продвижение фронтов нагнетаемой в пласт воды. Данный контур строится на основании 4D-атрибута с обязательной валидацией на промысловые данные, данные ГИС и ПГИ перед использованием для целей моделирования. Эти данные рекомендуется сопоставить на качественном или количественном уровне с контуром изменения водонасыщенности в 3D-модели.

Таким образом, данные о площадном распространении областей продвижения воды могут быть использованы при адаптации гидродинамической модели на историю разработки наряду с данными добычи, геофизическими исследованиями скважин уплотняющего фонда и промыслово-геофизическими исследованиями скважин. Воспроизведение в модели распространения фронта воды по площади позволяет уточнить геологическую модель объекта и снизить неопределенности в локализации остаточных запасов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Методические рекомендации содержат основные требования к осуществлению 4D-сейсмомониторинга разработки шельфовых месторождений углеводородов от этапа планирования 4D-исследований до этапа анализа изменений пластовых давлений и насыщенности по результатам интерпретации 4D-данных. При подготовке методических рекомендаций был выполнен сбор, анализ и обобщение материалов исследований, выполненных на месторождениях ООО «Сахалинская Энергия».

Данные, полученные при проведении сейсмических исследований 4D в соответствии с настоящими методическими рекомендациями, могут быть представлены недропользователями в государственные органы с целью регулирования разработки месторождений и оценке текущих запасов в процессе их освоения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Eiken, O., G. U. Haugen, M. Schonewille, and A. Duijndam, 2003, A proven method for acquiring highly repeatable towed streamer seismic data: *Geophysics*, 68, 1303–1309.
2. Foreste K., Robertson J., Boekholt M. Опыт и результаты первых в России морских сейсморазведочных работ 4D на шельфе Сахалина // Материалы 7-й конф. «Шельф России 2012». М., 2012.
3. Johnston, D., 2013, Practical Applications of Time-lapse Seismic Data: SEG Distinguished Instructor Series, No. 16.
4. Kragh, E., and P. Christie, 2002, Seismic repeatability, normalized rms, and predictability: *The Leading Edge*, 21, no. 7, 640–647.
5. Landrø, M., 1999, Repeatability issues of 3-D VSP data: *Geophysics*, 64, 1673–1679.
6. Lumley D.E. Assessing the technical risk of a 4D seismic project /D.E. Lumley, R.A. Behrens, Z. Wang // *The Leading EDGE*. – 1997. –N 16(9).
7. Misaghi, A., M. Landrø, and S. A. Petersen, 2007, Overburden complexity and repeatability of seismic data: Impacts of positioning errors at the Oseberg field, North Sea: *Geophysical Prospecting*, 55, no. 3, 365–379.
8. Ronen, S., R. van Waard, and J. Keggin, 1999, Repeatability of sea bed multi-component data: 69th Annual International Meeting, SEG, Expanded Abstracts, 1695–1698.
9. Smit, F., J. Brain, and K. Watt, 2005, Repeatability monitoring during marine 4D streamer acquisition: 67th Conference and Exhibition, EAGE, Extended Abstracts, C015.
10. Widmaier, M., S. Hegna, F. Smit, and E. Tijdens, 2003, A strategy for optimal marine 4D acquisition: 73rd Annual International Meeting, SEG, Expanded Abstracts, 1533–1536.
11. Тимофеева О. В., Дашков Р. Ю., Гафаров Т. Н., 2022, 4D-сейсморазведка как инструмент эффективного мониторинга разработки морских месторождений, *Газовая промышленность*, №. 7.

РЕКОМЕНДОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

12. Ампилов Ю. П., Батурин Д. Г., 2013 Новейшие технологии сейсмического мониторинга 4D при разработке морских месторождений нефти и газа // *Технологии сейсморазведки*, № 2, 2013, с. 31–36
13. Boekholt M., Broker K., Bell D., Terwogt D., 4D-seismic to support the Astokh field development offshore Sakhalin // *Society of petroleum engineers – SPE Russian oil and gas technical conference and exhibition* 2010.
14. Calvert, R.C., Insights and Methods for 4D reservoir monitoring and characterisation. // *SEG/EAGE Distinguished Instructor Short Course*, 2005.
15. Hatchell, P.J., Wills, P.B., Landro, M., 2007, Analysis of guided modes on permanent OBC data, 69th MTG. Eur. Assn. Geosc. Eng.
16. Hatchell, P. J. and Bourne, S.J. [2005] Measuring reservoir compaction using time-lapse time-shifts. 75th SEG Annual International Meeting, Expanded Abstracts, 2500–2503.
17. Landro, M. [2002] Uncertainties in quantitative time-lapse seismic analysis. *Geophysical Prospecting*, 50, 527–538.

18. Kommedal, J. H., Barkved, O.I., van Gestel, J.P. and Pettersen, R. [2007] Processing strategies for multiple repeat 4D seismic. 77th SEG Annual International Meeting, Expanded Abstracts, 2908.
19. Olden, P., Corbett, P., Westerman, R., Sommerville, J., Smart., B. and Koutsabeloulis, N. [2001] Modeling combined fluid and stress change effects in the seismic response of a producing hydrocarbon reservoir. The Leading Edge, 20(10), 1154-1163.
20. Johnston, D. H. Johnston and Gouveia, W. P. (ExxonMobil Exploration Company); Solberg, A. and Lauritzen, M. (Esso Norge as) Integration of Time-Lapse Seismic and Production Logging Data: Jotun Field, Norway, OTC 16927
21. Fanchi, J.R., 2001, Time-lapse seismic monitoring in reservoir management, The Leading Edge, v. 20 (10), p. 1140–1147.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Краткий анализ возникающих эффектов в пластах месторождений УВ и их влияние на физические и акустические свойства насыщенной жидкостью и газом пород

Существует три первичных эффекта, влияющие на акустические свойства среды и формирование 4D-отклика, а именно изменение: порового (пластового) давления, типа и свойств пластового флюида и температуры. Можно также выделить ряд вторичных эффектов, возникающих при проявлении первичных эффектов.

Первичные эффекты	Вторичные эффекты
Поровое давление	Уплотнение горной породы, пористость, плотность породы и флюида, напряжения, плотность трещиноватости, сейсмические скорости породы и флюида, фаза порового флюида
Пластовый флюид	Плотность, сейсмические скорости флюида, сжимаемость, вязкость
Температура	Вязкость флюида, плотность флюида и породы, сжимаемость, фаза флюида, пористость, напряжения, плотность трещиноватости

Поровое давление может снижаться в результате добычи, в частности, вблизи добывающих скважин. При этом оно растет благодаря закачке, которая осуществляется в нагнетательные или поглощающие скважины. Наличие барьеров и флюидоупоров может приводить как к вариациям в изменении давления на различных глубинах, так и к формированию латеральных аномалий.

Замеры давлений, выполненные во время испытания нагнетательных и добывающих скважин, а также при исследованиях с помощью опробователя пласта на кабеле (ОПК и ГДК) во время бурения скважин, являются источником информации об изменении давления во время эксплуатации месторождения.

Изменение порового давления сказывается на уплотнении горных пород, что естественным образом отражается на плотности породы и пористости коллектора. Допуская, что поровое давление снижается, эффективное давление на коллектор со

стороны вышележащей толщи возрастает. Это приводит к снижению пористости и, следовательно, увеличению плотности пород-коллекторов. Изменения в пористости зависят от свойств горной породы. Так, несцементированные пески, имея высокую начальную пористость, могут демонстрировать значительное сокращение порового объема с ростом эффективного давления. Как правило, такие изменения пористости являются необратимыми при последующим снижении эффективного давления. Снижение порового давления приводит к меньшим изменениям пористости в консолидированных песчаниках, при этом процесс может быть обратимым. В случае, если пластовое давление поддерживается с помощью закачки, можно ожидать локализованные изменения эффективного стресса вблизи добывающих и нагнетательных скважин.

Изменение свойств и типа флюида являются неотъемлемой частью процесса разработки. Замещение углеводородов в пласте на воду происходит как в случае закачки воды с целью поддержания пластового давления, так и в случае подъема контактов ВНК и ГВК. В случае разработки нефтяных залежей с газовой шапкой замещение нефти газом может происходить в результате расширения газовой шапки. Также следует ожидать изменение типа флюида в пласте при разгазировании нефти в результате падения порового давления.

Свойства флюида обычно весьма чувствительны к изменению давления. Особенно это касается легкой нефти и газа. Изменение пластового давления может влиять на вязкость нефти как значительно, так и менее значительно, в зависимости от состава нефти. Однако, если при снижении давления газ выделяется из раствора, акустические свойства среды, а именно сейсмические скорости, меняются существенным образом. При этом влияние изменения пластового давления на вязкость пластовой воды незначительно.

Температура коллектора во время разработки, как правило, остается неизменной. Однако закачка холодной воды в коллектор может приводить к локальному снижению температуры коллектора.

Охлаждение коллектора также влияет на свойства пород и флюида (вязкость воды). Охлаждение может влиять на распределение напряжений в интервале коллектора, что также сказывается на сейсмических скоростях и может привести к открытию трещин.

Микросейсмические события и индуцированные трещины могут возникать во время добычи из-за снижения температуры, уплотнения или расширения горных пород. Направленность трещиноватости контролируется локальным полем напряженности.

Данные процессы приводят к изменению сейсмических скоростей, а также влияют на анизотропию в коллекторе, которую можно зафиксировать на сейсмических данных.

Анализ 4D-данных позволяет судить о процессах в пласте, описанных выше. В результате недропользователь получает необходимую информацию, которая участвует в принятии решений по управлению разработкой месторождений углеводородов.