

Обработка унаследованных съемок 3D для целей 4D-сейсмомониторинга сухопутного газового месторождения

- Соколовский Р.А., ООО «Газпром добыча Надым», г. Надым
- Казанин Р.А., Литвачук А.В., Богданов Е.Д., АО «МАГЭ», г. Москва
- Жуков А.П., Коротков И.П., ООО «Спецгеофизика», г. Москва

Аннотация: В большинстве случаев, когда речь заходит о 4D-проектах, подразумевается обработка специальным образом спроектированных и отработанных съемок, где параметры наблюдений между базой и монитором в высокой степени согласованы. И в подавляющем большинстве случаев речь идет о морской сейсморазведке. Однако исторически 4D берет свое начало именно с суши - с первых экспериментов на площадях, где по какой-то причине (обычно на этапе доразведки) была повторно выполнена 3D-съемка. В подобных работах, в силу отсутствия наработанных подходов и должной алгоритмической базы, обычно выполнялась увязка отдельных 3D-кубов с помощью простых процедур кросс-эквализации с последующей попыткой нахождения 4D-отклика в разностном волновом поле. В практике 4D сейсморазведки такого рода съемки принято называть «унаследованными». В текущей статье речь пойдет о современном переосмыслении указанной задачи – показаны результаты обработки двух независимых 3D-съемок с целью получения информации о процессах разработки газовой залежи. Выполнению обработки предшествовала стадия петрофизического и сейсмогеологического моделирования, результаты которого показали принципиальную возможность обнаружения эффектов от разработки сейсморазведкой для указанного месторождения и опубликованы в предыдущей статье.

Ключевые слова: 4D сейсморазведка, сейсмомониторинг на суше, 4D-обработка, унаследованные съемки

Исходные данные

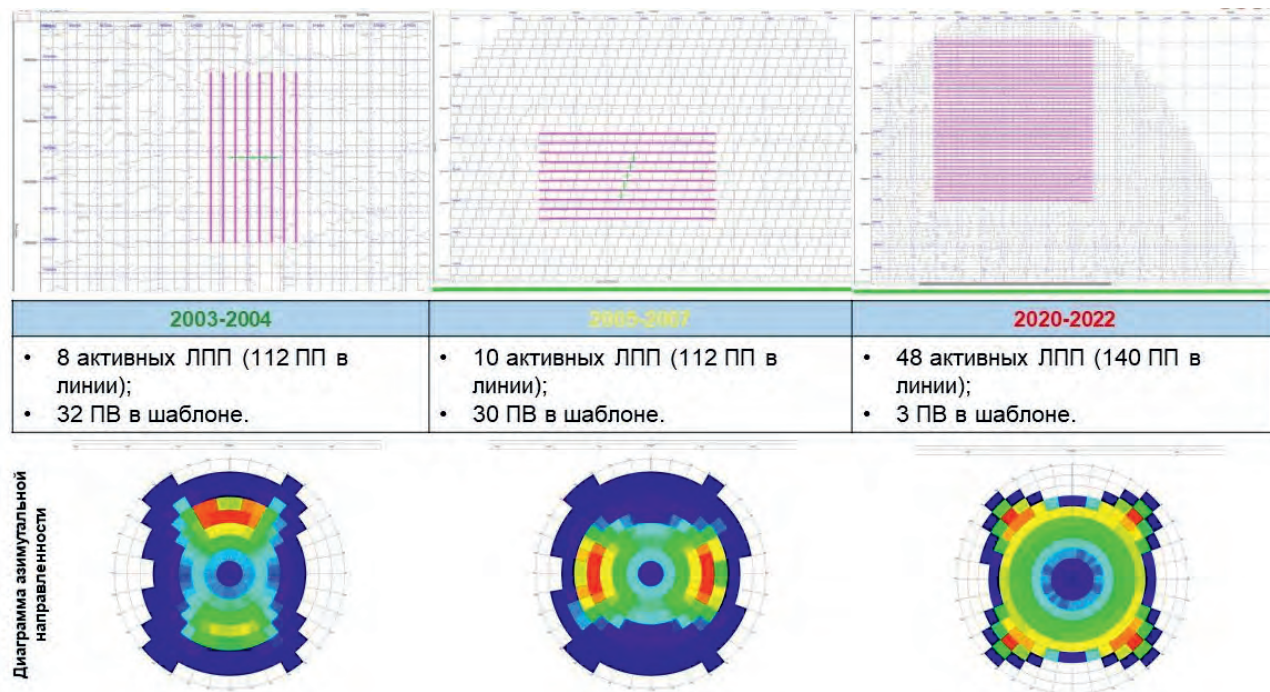
В работу поступили две съемки, первая из которых стала базой, а повторная – монитором. Задача обработки состояла в попытке получения сейсмических кубов такого уровня согласованности, при котором разница между кубами 3D (4D-разница) позволила бы получить информацию о процессах разработки за период между выполнением сейсмических наблюдений.

Базовая съемка отрабатывалась в сезонах 2002-2007 гг. со взрывным источником, характеристики которого (вес заряда, глубина погружения) менялись каждый сезон. В ряде случаев для обработки эксклюзивных зон использовался поверхностный электродинамический источник. После сезона 2004 г. произош-

ла смена методики наблюдений – азимут линий ПВ и ПП был изменен на 90 градусов, а тип системы наблюдения из центральной симметричной изменился на симметрично-асимметричную (Рис. 1). Кратность съемки в разные сезоны составила 28 и 35 соответственно.

Мониторинговая съемка отработана в сезонах 2020-2022 гг. и представляет собой современные широкоазимутальные наблюдения с вибрационным источником (Рис. 1). Кратность съемки составила 336.

Основополагающим принципом успешности 4D-сейсмомониторинга является высокое соответствие геометрии наблюдений и условий возбуждения и приема базы и монитора [1]. Очевидно, что рассматриваемые в работе съемки с



▲ Рис. 1. Параметры единичного шаблона регистрации.

точки зрения 4D являются полностью некондиционными.

Глобальный матчинг съемок и 4D-обработка

Процесс 4D-обработки отличается от стандартной обработки 3D. 3D-обработка направлена на получение лучшего сейсмического изображения, тогда как обработка 4D – на минимизацию различий между съемками, не связанных с процессами эксплуатации месторождения. Процесс постепенного сведения (матчинга) базовой и мониторинговой съемок сопровождается количественными оценками через атрибуты 4D контроля качества (4DKK).

В рассматриваемом случае процесс 4DKK на этапе сигнальной обработки становился практически невыполнимым ввиду существенных различий в исходных данных, не позволяющих однозначно отличить эффекты, связанные с процессами обработки, в поле атрибутов контроля качества.

В этих условиях было принято решение выполнить экспресс-обработку с

целью получения наборов данных, пригодных для выполнения *глобального матчинга*.

В ходе глобального матчинга на основе результатов экспресс-обработки были выполнены базовые процедуры увязки данных. Динамические характеристики увязаны путем согласования уровня амплитуд и приведения формы импульса к единому виду. Выполнена увязка статического решения, а также первичная синхронизация геометрии наблюдений (Рис. 2).

В результате проброса данных шаблоны съемок стали в значительной мере соответствовать друг другу, а кратность мониторинговой съемки изменилась с 336 до 84, что приближает значение к кратности базовой съемки (35). В качестве референса во всех случаях выступали данные базовых наблюдений.

Полученные по результатам матчинга поправки и операторы были применены к исходным сейсмическим данным, что позволило существенно сблизить наборы и перейти к совместной 4D-обработке (Рис. 3).

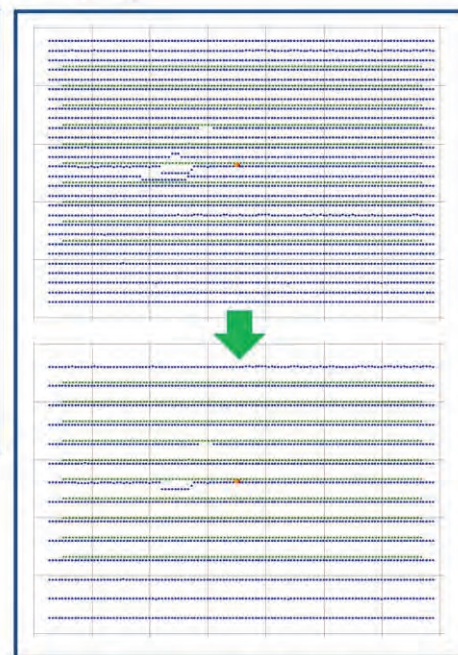
Базовая 2005-2007	Мониторинговая 2020-2022 исходная	Мониторинговая 2020-2022 после согласования геометрии
10 активных ЛПП (112 ПП в линии) - расстояние м/у ЛПП 300 м - Номинальная кратность 35	48 активных ЛПП (140 ПП в линии) - расстояние м/у ЛПП 150 м - Номинальная кратность 336	14 активных ЛПП (120 ПП в линии) - расстояние м/у ЛПП 300 м - Номинальная кратность 84

1. Ограничение удалений:



- ПВ мониторинговая съемка
- ПП мониторинговая съемка
- ПВ базовая съемка
- ПП базовая съемка

2. Проброс ЛПП:

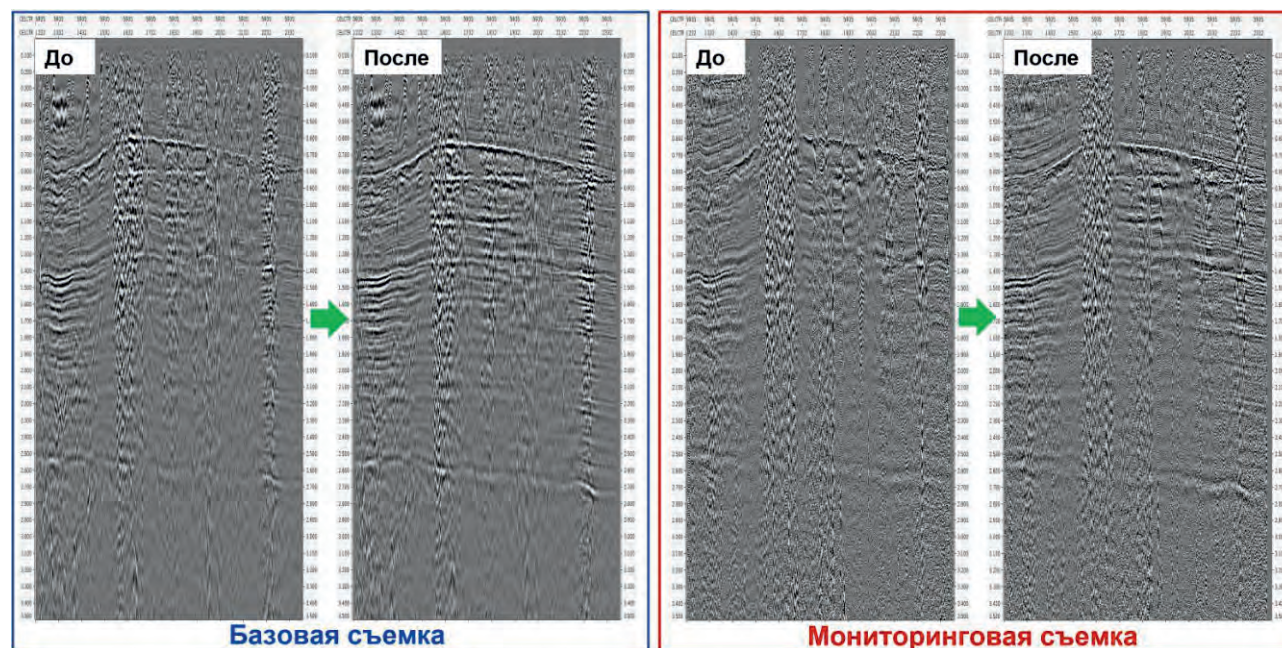


▲ Рис. 2. Схема приведения геометрии наблюдений при глобальном матчинге.

В ходе 4D-обработки выполнена последовательность процедур стандартной обработки для сухопутных съемок 3D – подавление высокоамплитудных случайных шумов, подавление повер-

хностной волны, подавление промышленных шумов (только для мониторинговой съемки), линейных помех, поверхностно-согласованная коррекция амплитуд, остаточное шумоподавление

▼ Рис. 3. Результаты глобального матчинга.



в различных сортировках и т.д. Подходы к подавлению однотипных помех для базовой и мониторинговой съемок выбирались, где это было возможно, едиными. После каждого этапа обработки выполнялся 4DKK, в ходе которого оценивался набор базовых атрибутов сходимости наборов (NRMS, Predictability, Cross Correlation, Hilbert Static / Phase). Указанные атрибуты имеют разную чувствительность к изменению сейсмической записи в процессе обработки (шум, временной/фазовый сдвиг, амплитуда) и их комплексная оценка позволяет более точно охарактеризовать подобие сейсмических съемок. Оценки атрибутов выполнялись в нескольких окнах. В случае, если по результатам контроля качества оценки сходимости ухудшались, процедура возвращалась на дополнительное тестирование и корректировалась.

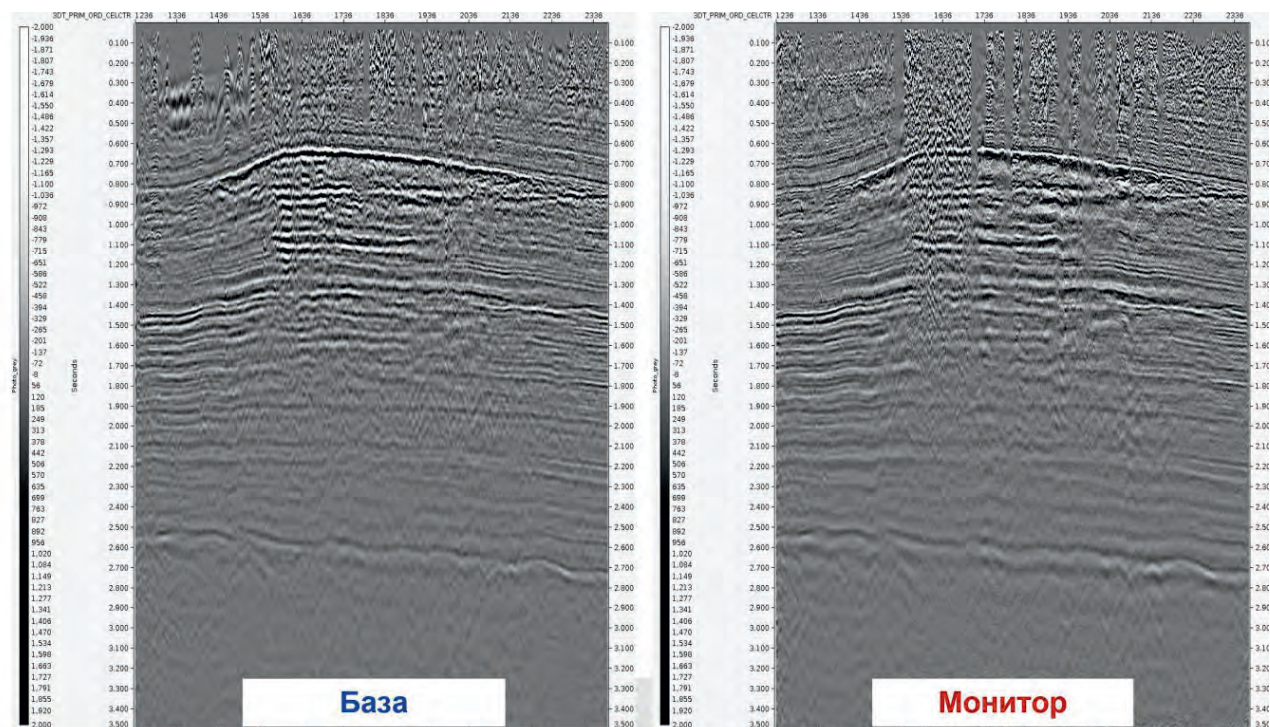
Локальный матчинг съемок

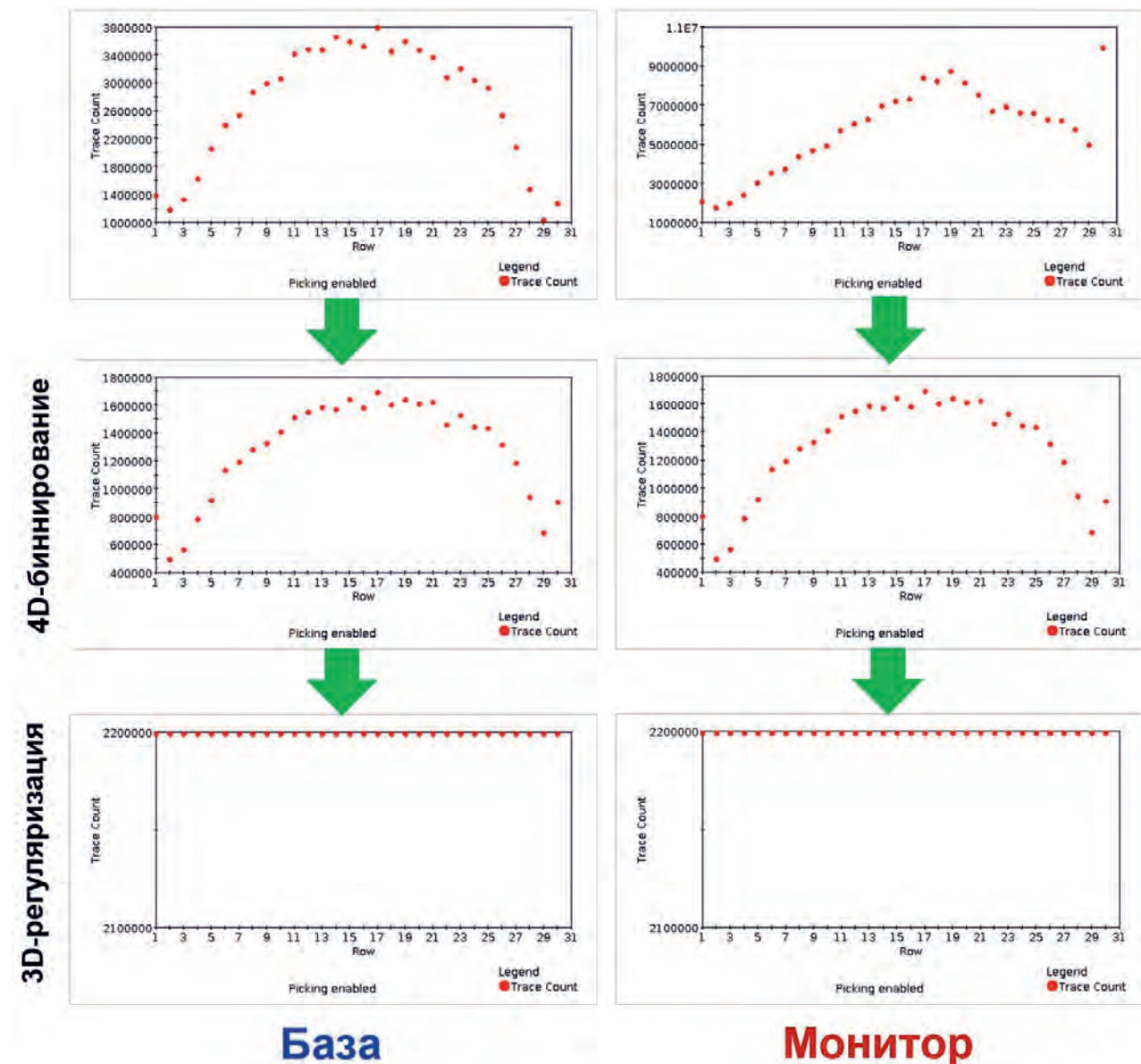
Полученные по результатам совместной 4D-обработки сейсмические данные (Рис. 4) хоть и находились в высокой

степени согласованности, тем не менее содержали существенные с точки зрения 4D-сейсморазведки отличия, требующие компенсации на этапе локального матчинга.

На этой стадии были устранены локальные амплитудные различия съемок, выполнена окончательная увязка импульса, устранены неучтенные ранее статические сдвиги. Полное приведение геометрии съемок выполнено с помощью 4D-бинирования, основной задачей которого является повышение сходимости съемок путем выбора наиболее схожих из повторяющихся трасс. Повторяющимися являются трассы, которые имеют одинаковый диапазон удалений, близкий угол и находятся в одном бине. Критерием схожести выбран атрибут NRMS, оценивающийся в окне выше целевого интервала (не затронутого разработкой) для каждой повторяющейся трассы. Процедура выполняется по каждой панели удаления съемок, приводя их к общему виду по количеству трасс для обеих съемок.

▼ Рис. 4. Результаты совместной обработки 4D.





▲ Рис. 5. Распределение трасс по панелям удалений после 4D-бинирования и 3D-регуляризации данных.

После 4D-бинирования в каждом бине каждой панели удалений остается только по одной трассе из базовой и мониторинговой съемки, наиболее подходящие по атрибуту схожести. Если в одной из съемок в панели удалений отсутствует трасса в бине, то все трассы выбрасываются также и для другой съемки из данного офсетного бина. Процедура 4D-бинирования привела данные обеих съемок к общей конфигурации, при этом выбрав наиболее схожие общие трассы, тем самым данные были подготовлены к регуляризации (Рис. 5).

Регуляризация 3D выполнена по панелям общих удалений (COV). Панели общих удалений, выбраны с шагом 100 м (первая панель 0-300 м, последняя - 3100 м). 3D регуляризация интерполирует пропущенные в бинах трассы, вследствие этого кратность суммирования приводится к номинальной. Также в пределах бина координаты средних точек всех трасс приводятся к координатам общих средних точек суммарного куба базовой съемки. По регуляризованным данным выполнена временная миграция до суммирования (PreSTM).

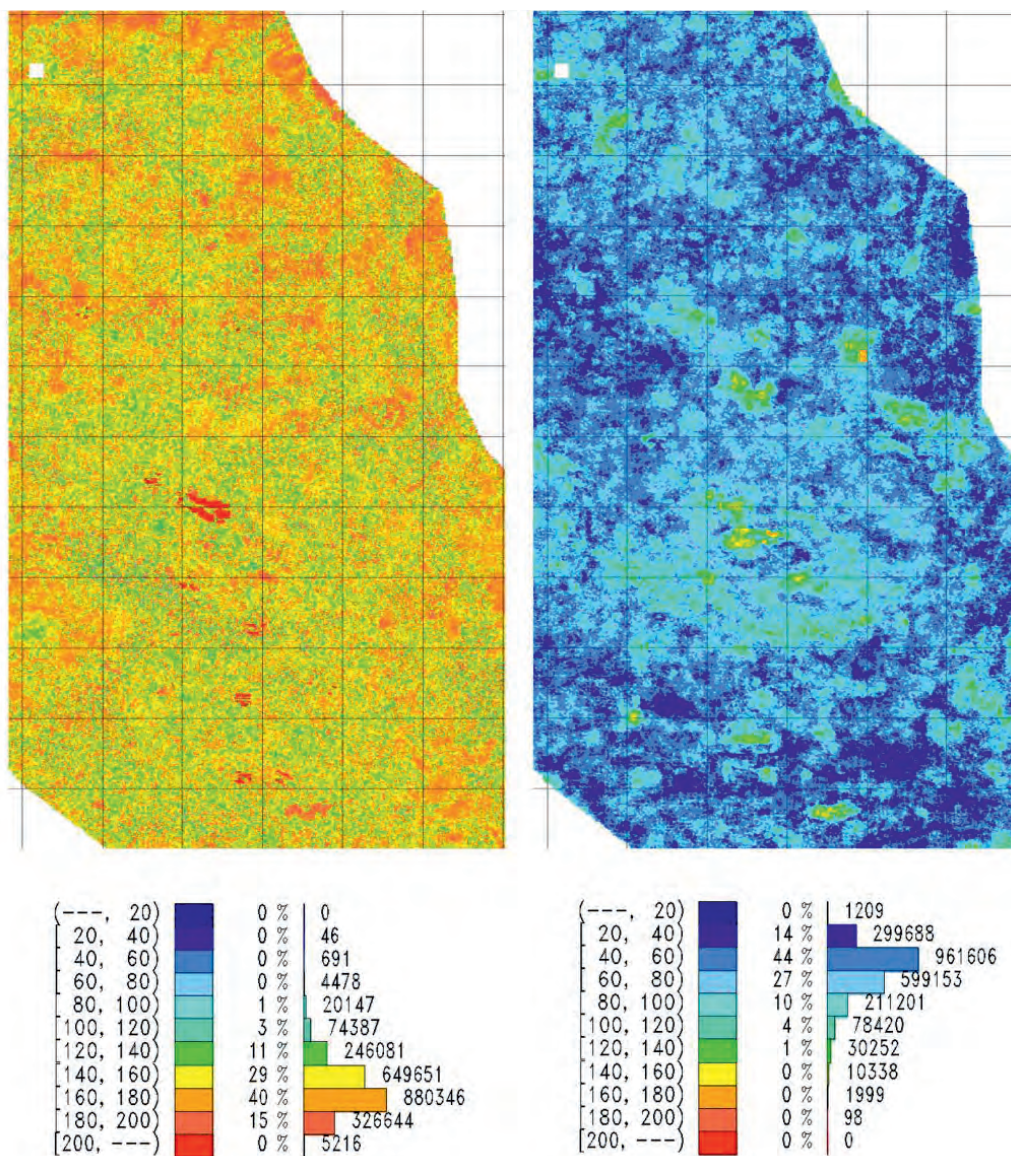
Некоторые результаты

Качество полученных 4D-данных оценивается мерой сходимости двух съемок в интервале разреза, незатронутом разработкой и в целевой зоне. Ранее уже упоминалось, что основным параметром оценки повторяемости сейсмических данных является атрибут NRMS. Этот параметр показывает, насколько точно мониторинговая съёмка соответствует базовой. При полном совпадении сейсмических данных параметр NRMS стремится к нулевому значению. Высокие значения NRMS говорят о серьезном несоответствии данных.

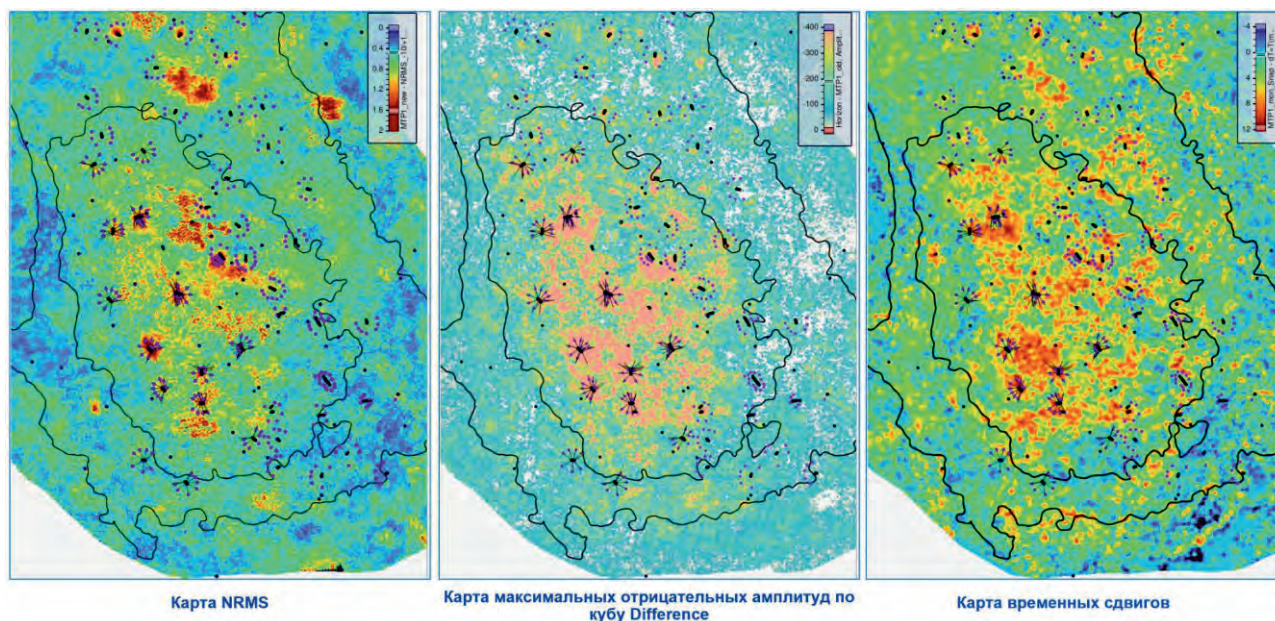
Для рассматриваемых в статье съемок исходные фоновые значения NRMS составили 160-180%, и в ходе 4D-обработки были понижены до 40-60% (Рис. 6), что с одной стороны, по меркам морских 4D-проектов, является все еще недостаточным уровнем соответствия [1], однако по опыту аналогичных сухопутных работ – пригодным уровнем для обнаружения отклика залежи на процессы разработки в схожих условиях [2].

Выработка запасов газовой залежи приводит к падению давления и изменению упругих свойств (увеличению объемной плотности и скорости), что может

▼ Рис. 5. Карта NRMS в целевом интервале исходная (слева) и после 4D-обработки (справа).



и запуска



▲ Рис. 7. Карты некоторых 4D-атрибутов для целевого интервала.

повлиять на характеристики волнового поля. На обнаружение 4D эффекта влияет в первую очередь величина изменений физических свойств горных пород под воздействием разработки.

В ходе детального анализа полученных кубов и итогового разностного куба был определен ряд наиболее информативных атрибутов, четко коррелирующийся с информацией о разработке (Рис. 7). Однозначно определяется зона максимальной исторической накопленной добычи, а наиболее яркие аномалии атрибутов приурочены к положению эксплуатационного бурения. При этом в точках расположения разведочного фонда наблюдаются фоновые значения, без локализации аномалий атрибутов.

Полученные по результатам обработки 4D-сигналы показывают изменение импеданса в пласте. Т.к. изменение импеданса может быть связано с различными процессами, проходящими в пласте, это приводит к возникновению неопределенности в интерпретации. Для разрешения неоднозначности в обязательном порядке требуется привлекать к анализу промысловые данные, а также данные ГИС и ПГИ, которые в указанную

работу не были вовлечены в полном объеме.

Для верификации проявленных в целевом интервале разреза аномалии выполнена их заверка путем сопоставления с картами, полученными по верхнему (незатронутому процессами разработки) интервалу. Отдельные подобные аномалии были исключены из интерпретации.

Заключение

Несмотря на исходную сложность задачи, в ходе обработки удалось получить уверенный и интерпретируемый 4D-отклик, характеризующий изменения в пласте, вызванные процессами разработки залежи. Данная работа показывает высокий потенциал 4D не только для морских месторождений, но и для суши, где, несмотря на существенно меньшие затраты на бурение наблюдательных скважин, сейсморазведка может стать дополнительным инструментом для контроля за разработкой и решения сложных геологических задач. Показана возможность получать результаты 4D на основе унаследованных съемок 3D, которых на текущий момент в Россий-

ской Федерации накоплено достаточное количество. При этом можно однозначно утверждать, что в случае постановки специальных 4D-работ, качество получаемого 4D-отклика будет существенно выше.

Принято считать, что основным фактором, мешающим получить успешный результат на суше, является вопрос сложности и изменчивости верхней части разреза (ВЧР). Однако важно понимать, что именно для сухопутных месторождений возможно выполнить мониторинговую съемку практически со 100% геометрической повторяемостью базы, что может позволить нивелировать базовые проблемы с ВЧР.

Полученные в работе результаты могут быть существенно улучшены за счет дальнейшего развития графа обработки и усложнения подходов к матчингу наблюдений. Важным инструментом к улучшению результата может стать использование более прогрессивных алгоритмов регуляризации и переход к миграции в глубинной области.

Литература

1. Методические рекомендации по проведению сейсмических исследований 4D с использованием донных систем на шельфовых месторождениях РФ, ПАО «Газпром», ООО «Газпром недра», ООО «Газпром ВНИИГАЗ», АО «МАГЭ» и др., Москва, Санкт-Петербург, 2025 г.
2. Tickle J., Angio S., Hoeber H., Cooper S., Hagedorn S. Land 4D: Revealing time-lapse signal through joint processing // 82nd EAGE Annual Conference & Exhibition, Amsterdam, 8–11 December 2020. – Houten: EAGE, 2020.