

Современный граф-обработки сейсморазведочных данных 3D: обзор.

■ Бекешко П.С., Готов А.А., Жуков С.Е., Пархоменко О.М., Шабакеев Д.Д.,
Лаптев Я.В., ООО «ГеоПрайм», г. Москва.

Аннотация: В статье приведен локальный срез графа обработки сейсморазведочных данных 3D, актуальный к концу 2025 и началу 2026 года. Проведена попытка сравнить на качественном и на количественном уровне основные изменения, которые произошли за последние 8 лет, и, что в большей или меньшей степени повлияло на эти изменения. Проиллюстрированы примеры успешных реализаций части современных подходов для обработки ретроспективных съемок 3D.

Введение

Для начала авторам статьи хотелось бы отметить, что в нефтегазовом сервисе существует положительная тенденция: выполнять переобработку данных каждые 5-7 лет, модифицируя граф-обработки. Причин этому огромное множество: от плохого качества первичной обработки пионерами отрасли или по причинам, которые не принято обсуждать публично, до неподходящего набора процедур в рамках конкретного региона и заканчивая ограниченными технологическими возможностями граф-обработки прошлых лет, о котором будет сказано ниже. Основными драйверами перманентной эволюции подходов обработки данных CRR является неустанная конкуренция между сервисными компаниями и растущими требованиями нефтегазовых компаний к качеству результирующего материала. Это побуждает сервисные компании копить опыт, находить новые пути реализации стандартных подходов, оптимизировать, усложнять, делать их более эффективными и внедрять новые алгоритмы и процедуры, что в свою очередь положительно сказывается на окончательные результаты. Безусловно, всё это происходит «с колёс», то есть в моменте выполнения проекта, что, в свою очередь, создает риски срыва сроков, повышение нагрузки на исполнителей и прочие возможные

последствия как для проекта, так и для сервисной компании.

Сравнение

Как было сказано выше, граф-обработки меняется перманентно и нет возможности провести однозначное сравнение «было-стало». По этой причине авторы работы приводят пример обобщённого графа-обработки 2018 года в сравнении с обобщённым графом 2025 года.

При оценке таблицы 1 можно увидеть закономерность в увеличении отдельных элементов каждого из этапов, что говорит об общем изменении объема вычислений, количества объектов, появляющихся в процессе работы, а также смещении большинства процедур в сторону увеличения пространственной размерности, т.е. перехода от 2D процедур к 3D, от 3D процедур к 5D.

Для большей наглядности предлагается оценить изменения граф-обработки не только на качественном уровне, но и на количественном. Фактически, существует несколько базовых показателей, которые можно использовать для сравнения: количество машинного времени (CPU/час), использованного в рамках выполнения проекта, и количество объема информации. Оценка первого тяжело интерпретируема по ряду причин: различия в качестве исходных данных, повышение эффективности вычис-

▼ Табл. 1. (Начало).

Обобщённый граф 2018 года	Обобщённый граф 2025 года
Загрузка данных Расчет априорных статических поправок по первым вступлениям: линейная инверсия, послойная томография, сеточная томография	Загрузка данных Расчет априорных статических поправок по первым вступлениям: линейная инверсия, послойная томография, сеточная томография по поверхностным волнам
Ослабление помех перед деконволюцией ОПВ или в сортировке кросс-спред: Случайные высокоамплитудные помехи (медианная фильтрация)	Ослабление помех перед деконволюцией в сортировке кросс-спред: Случайные высокоамплитудные помехи (медианная фильтрация)
Когерентные помехи: поверхностная волна, преломленные (FXY/SWAMI)	Когерентные помехи: поверхностная волна, преломленные (FXY/ SWAMI до пяти моделей)
Адаптивное вычитание моделей	Одновременное адаптивное вычитание нескольких моделей когерентных волн-помех Использование алгоритмов интерполяции с защитой от наложения зеркальных частот для моделирования когерентных помех
Поверхностно-согласованная деконволюция Ослабление помех после деконволюцией: Случайные высокоамплитудные помехи (медианная фильтрация)	Поверхностно-согласованная деконволюция + дополнительная подготовка данных Ослабление помех после деконволюцией: Случайные высокоамплитудные помехи (медианная фильтрация)
Когерентные помехи: поверхностная волна, преломленные (FXY/SWAMI)	Когерентные помехи: поверхностная волна, преломленные (FXY/ SWAMI)
Адаптивное вычитание моделей	Одновременное адаптивное вычитание нескольких моделей когерентных волн-помех
Случайные слабоамплитудные помехи (FXY-деконволюция)	Случайные слабоамплитудные помехи (5D преобразования)
Регуляризация 3D в классах удалений или OVT	Регуляризация 5D с уплотнением ЛПП и ЛПВ (+ ПП/ПВ) Поверхностно-согласованная деконволюция Частотно-зависимая поверхностно-согласованная коррекция амплитуд
Дополнительное шумоподавление:	Дополнительное шумоподавление:
Случайный шум	Случайный шум
Ослабление кратных волн (2D радон Преобразование)	Ослабление кратных через (3D SRME с дополнительной 5D интерполяцией) Ослабление кратных волн (3D радон преобразование)
Миграция временная или глубинная в классах удалений или OVT с сохранением информации об азимутах	Миграция временная или глубинная в OVT с сохранением информации об азимутах
Построение и уточнение глубинно-скоростных моделей	Построение и уточнение глубинно-скоростных моделей:
Послойная когерентная инверсия	FWI Высокоплотная томографии по отраженным волнам Глубинно-скоростные модели типа TTI, TOR
Обработка после миграции:	Обработка после миграции:
Остаточная кинематика	Остаточная кинематика

Остаточная азимутальная кинематика и оценка анизотропии	Остаточная азимутальная кинематика и оценка анизотропии
Ослабление фона кратных волн и когерентных помех	Ослабление фона кратных волн и когерентных помех (3D)
Остаточные фазовые сдвиги	Остаточные фазовые сдвиги (сдвиг в сторону более устойчивых алгоритмов)
Ослабление следов расстановки по кубу Пространственная балансировка АЧХ по кубу или частично-кратным кубам	Ослабление следов расстановки Пространственная балансировка АЧХ по кубу или частично-кратным кубам

▲ Табл. 1. (Окончание).

лительных алгоритмов, рост производительности и объема вычислительных мощностей может давать неоднозначный результат на уровне даже одинаковых этапов для 2018 и 2025 годов. Оценка же второго более показательна и, как следствие, влияет на первый показатель ввиду прямой зависимости. Ниже приведена сравнительная характеристика объема данных, создаваемых на проекте в 2018 и 2025 году за время производственных заданий, и не включающая различные тестовые реализации. Для удобства в таблице приведены множители в зависимости от исходного объема данных. Как итог подобной оценки можно сказать, что общий объем производственных заданий в 2018 году формировал 11 первоначальных объемов данных. В случае 2025 года, этот показатель вырос почти в 5 раз и составил 50 объемов.

Ключевые изменения и их причины

Большинству участников рынка обработки данных СРР тяжело осознано принимать необходимость всех происходящих изменений, так как существует некоторая потребность в статичном унифицированном графе обработки.

Все же авторам статьи хотелось бы помочь вовлеченным участникам рынка разобраться в первопричинах основных

изменений и положительных последствий от этих изменений. Для этого потребуется апеллировать к таблице 2.

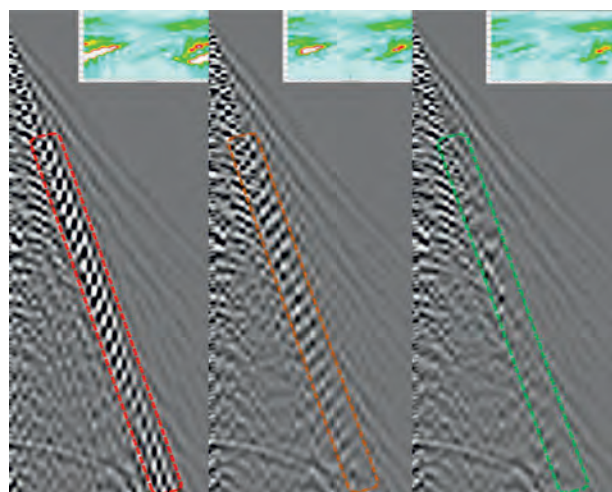
Ослабление когерентных помех

Можно видеть, что на этапе моделирования когерентных волн-помех произошло увеличение объема данных в 2.5 раза. Это связано с общей концепцией, которая стала доступной благодаря тому, что появилась возможность моделировать преломленные и поверхностные волны [12] на основе реального пространственного положения ПП и ПВ и латерально-переменных кинематических характеристик с последующим одновременным адаптивным вычитанием всех рассчитанных моделей. Стоит отметить, что поверхностные волны имеют несколько особенностей: модальность, наличие регулярной и рассеянной составляющих. Последняя особенность в ряде случаев может создавать сложные формы поведения волновой картины в сейсмической записи [13] и не может быть аккуратно ослаблена стандартными процедурами фильтрации (FK, FX, Radon), требуя независимого процесса моделирования. Как итог, в руках геофизика-обработчика появляются несколько моделей когерентных помех и инструмент для их одновременного адаптивного вычитания.

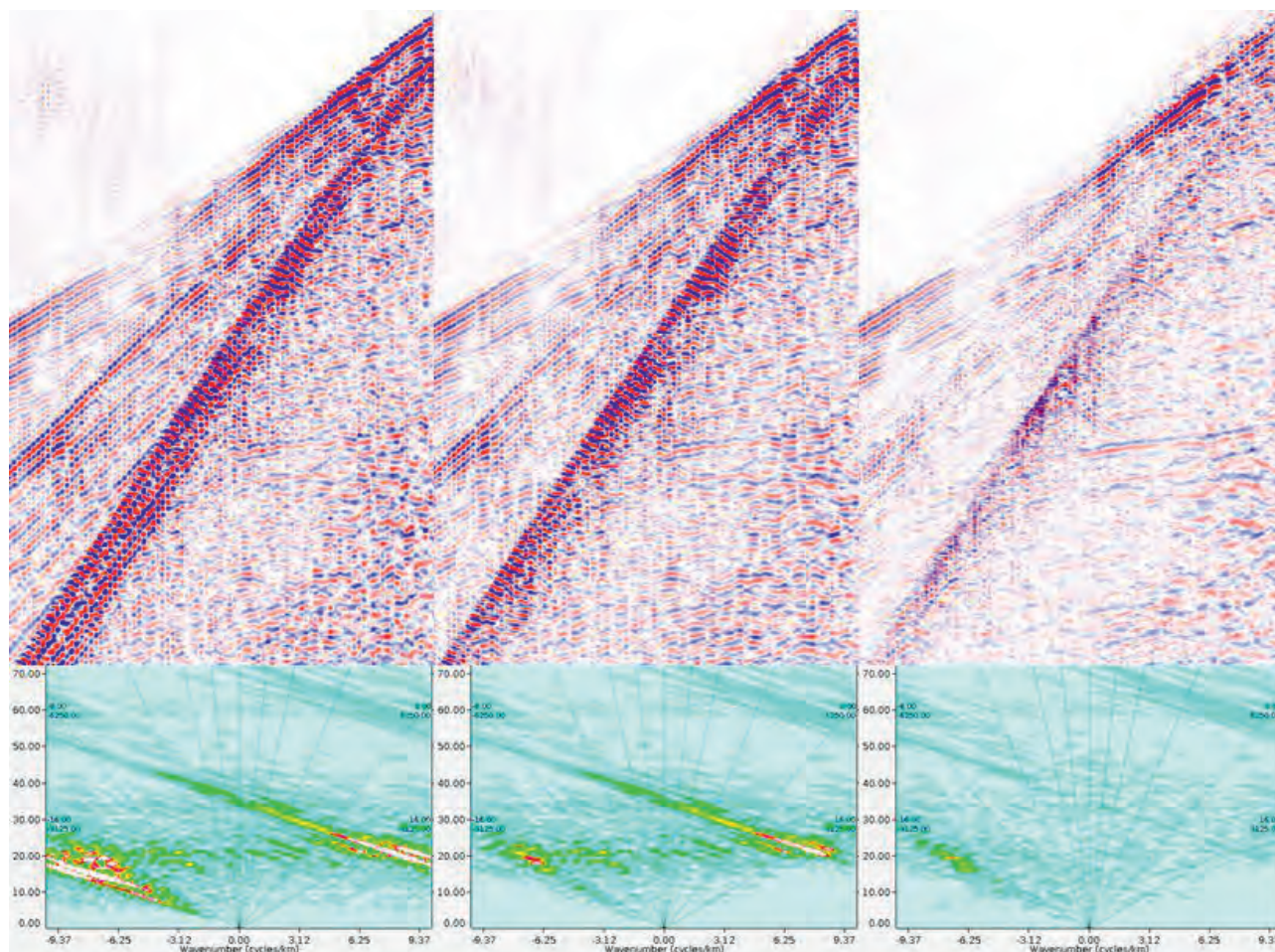
Этап	Объем проекта на 2018	Объем проекта на 2025
Исходный набор	1х	1х
Моделирование когерентных помех	1х	2.5х
Если необходима интерполяция для ослабления шумов		1х
Ослабление случайных помех	1х	1х
Деконволюция	1х	1х
Шумоподавление после деконволюции	2х	2х
Подготовка данных к регуляризации	1х	1х
Регуляризация	0.7х -- 3D	4х/8х/16х -- 5D
Подготовка данных к 3D SRME		10х
Модель после 3D SRME		4х
Результат вычитания 3D SRME		4х
Подготовка данных к миграции	0.7	4х
Миграция и построение глубинно-скоростной модели	2.1	4х + 13ТВ (для целей уточнения ГСМ)
Обработка после миграции	1.4	12х
Итог	11.2х	50.5х/22х

▲ Табл. 2.

▼ Рис. 1. Пример моделирования и вычитания поверхностной волны с помощью FX-преобразования (в центре) и с помощью моделирования на основе фазовых скоростей (справа). Исходная сейсмограмма ОПВ (слева).



В ряде случаев у когерентных волн-помех существует вероятность возникновения пространственного наложения зеркальных частот в силу редкого шага по ПП и ПВ. Для этого требуется предварительная 3D-интерполяция данных в сейсмограммах для целей уплотнения шага между ПП и ПВ, при этом требуется учитывать все особенности волнового поля и выбирать корректный алгоритм интерполяции. Всего их два: первый основан на Фурье-преобразовании, второй — на Радон-преобразовании [8]. Первый простой и быстрый, но имеет ограничение по своим возможностям. Второй простой и медленный, но разрешает любой пространственный алиасинг.



▲ Рис. 2. Пример использования интерполяции перед моделированием и вычитанием когерентных волн-помех. Исходные — слева, результат ослабления без предварительной интерполяции — центр, с интерполяцией справа. Внизу соответствующие FK-спектры.

В итоге подход для решения этой задачи сводится к следующей последовательности: интерполяция, моделирование когерентной помехи с заданными параметрами, адаптация модели, удаление интерполированных трасс и вычитание итоговой модели из исходных данных (рисунок 2).

Деконволюция

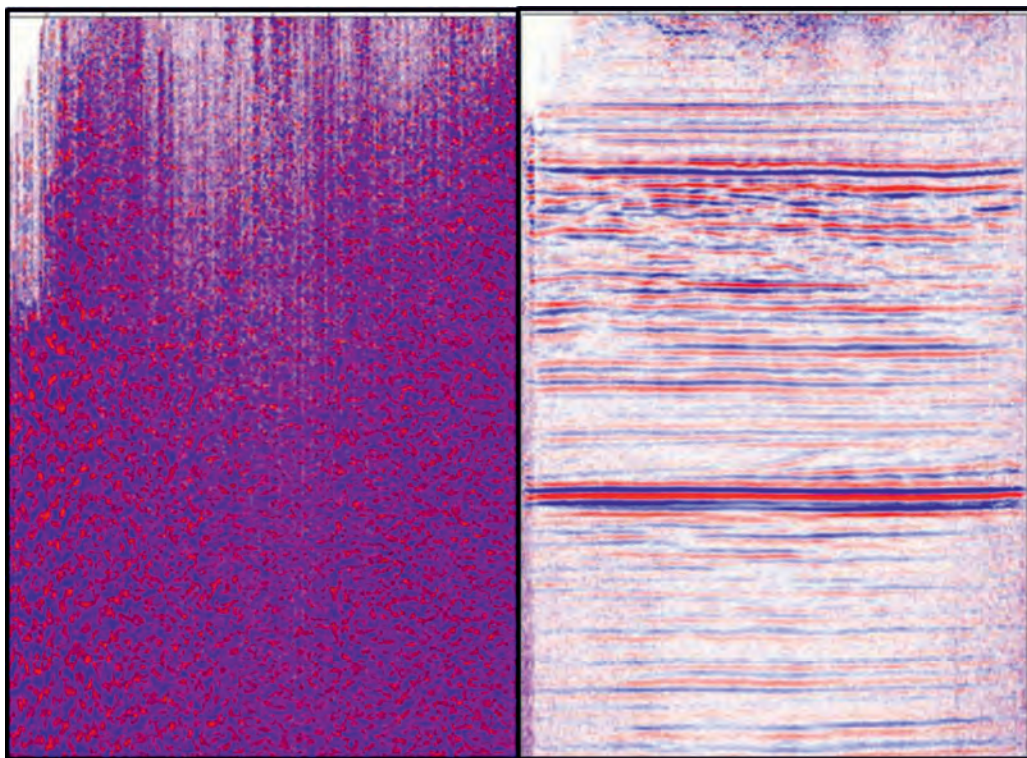
На этапе деконволюции принципиально ничего не поменялось, кроме ряда устоявшихся подходов:

- Выполнение более агрессивного ослабления помех для расчёта операторов деконволюции. Например, с использованием пятимерного ослабления шумовой составляющей.
- Учёт фазового и амплитудного погло-

щения частотного состава средой (Q-компенсация) для стабилизации формы импульса с увеличением времени.

- Уменьшение количества тестов для подбора оптимальных параметров деконволюции до: перебора интервала предсказания и уровня белого шума. Остальные параметры почти не влияют на финальный результат, если заранее выбраны исходя из логических умозаключений участниками проекта на основании существующей фактуры.

- Развитие модельной работы с импульсом, для которого требуется учёт различных инструментальных факторов (отклика сейсмоприемника и сейсмической станции), а также априорная информация об отношении сигнал/шум, фоновом значении поглощения и необходи-



▲ Рис. 3. Пример возможности извлечения полезного сигнала из данных низкого качества с использованием современных алгоритмов ослабления помех. Сечение куба во временной области до ослабления помех (слева) и после (справа).

мым детерминистическом извлечении импульса на основании скважинной информации для контроля его формы.

- Повсеместное внедрение подхода ввода и последующего вывода операторов деконволюции для целей более аккуратного решения задач расширения частотного состава сейсмического импульса на поздних этапах, где данные имеют более высокие пространственные значения отношения сигнал/шум на всех частотах.

Регуляризация

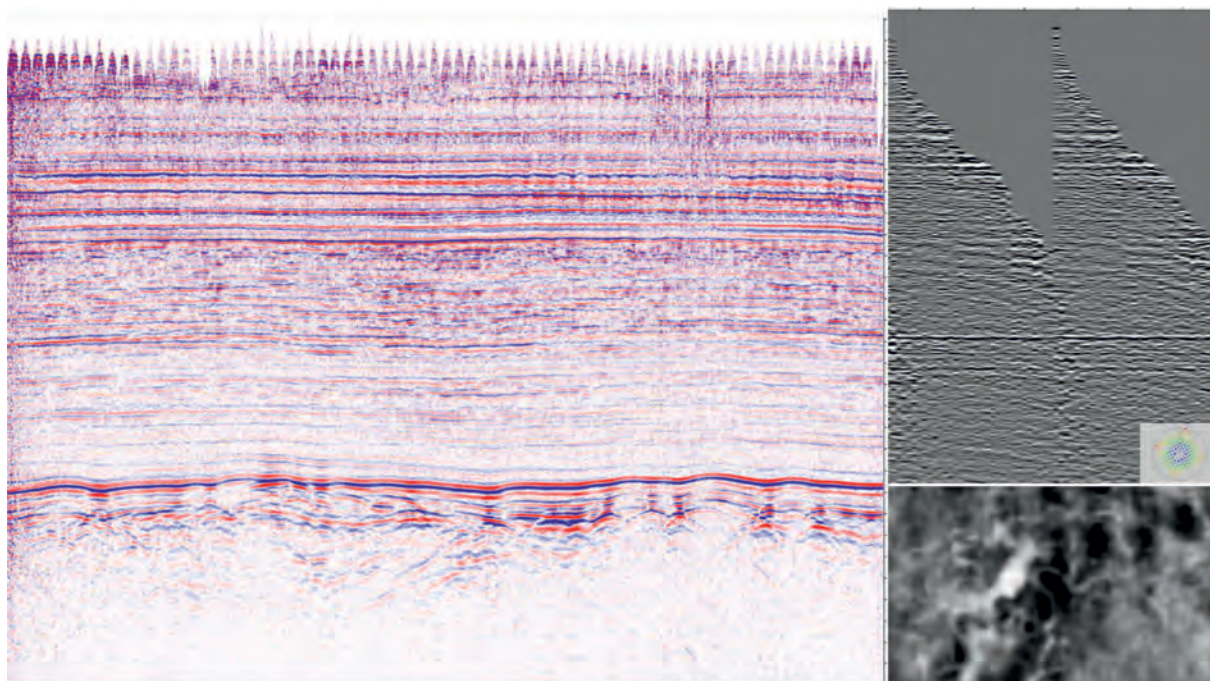
Следующим важным этапом, положительно влияющим на конечный результат, является 5D-регуляризация, после которой наблюдается существенное увеличение объема данных. Благодаря развитию алгоритмической базы и расширению возможностей последующей обработки, данная процедура получила широкое распространение во

всех сервисных компаниях. Ключевые плюсы использования 5D-регуляризации при обработке 3D-данных:

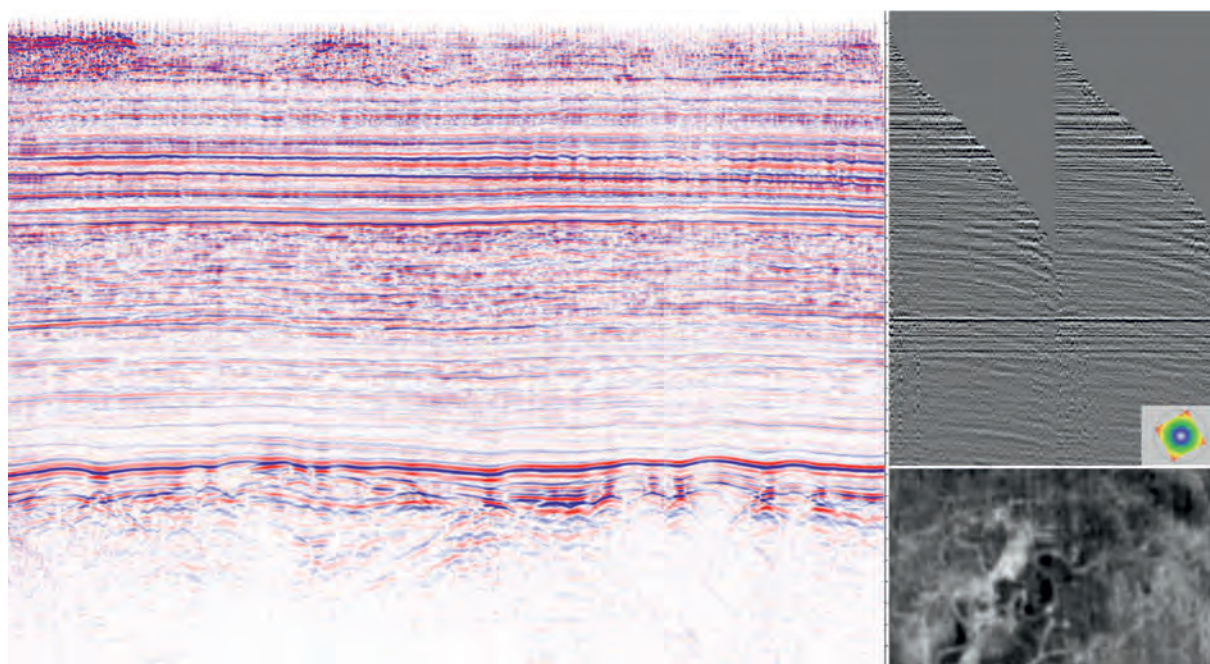
- 1) Более естественная размерность для площадных систем наблюдений, так как они имеют пять пространственных координат: X_s , Y_s , X_r , Y_r , Время.

- 2) Возможность перехода с исходной системы наблюдения на уплотнённую с сохранением исходного распределения азимутальности. Это может быть уплотнение ПП и/или ПВ, ЛПВ и/или ЛПП. Создание радиальных систем наблюдения, где существует регулярное распределение азимутов и удалений в рамках одной сейсмограммы ОСТ.

- 3) Использование внешних весовых функций для защиты данных от потери латеральных особенностей волнового поля в процессе уплотнения ПП и ПВ, что дает уменьшение пространственного бина и позволяет сохранить [7]: разломы, шнурковые тела и стенки русел рек.



▲ Рис. 4. Вертикальное сечение куба, сейсмограммы ОСТ и горизонтальное сечение куба до 5D-регуляризации.



▲ Рис. 5. Вертикальное сечение куба, сейсмограммы ОСТ и горизонтальное сечение после 5D-регуляризации.

4) Ослабление случайного шума благодаря восстановлению только регулярной составляющей волнового поля из пятимерного пространства, где случайный шум имеет более высокое случайное распределение и не формирует выраженных составляющих образов, как когерентный сигнал.

Среди сервисных компаний до сих пор существуют небольшие противоречия в подходах к регуляризации, но они больше носят творческий характер, и, в большинстве случаев, все сходится на необходимости использовать только 5D-регуляризацию, с помощью алгоритмов с защитой от пространственного наложе-

ния зеркальных частот и спектральных утечек [10].

Моделирование и вычитание кратных волн

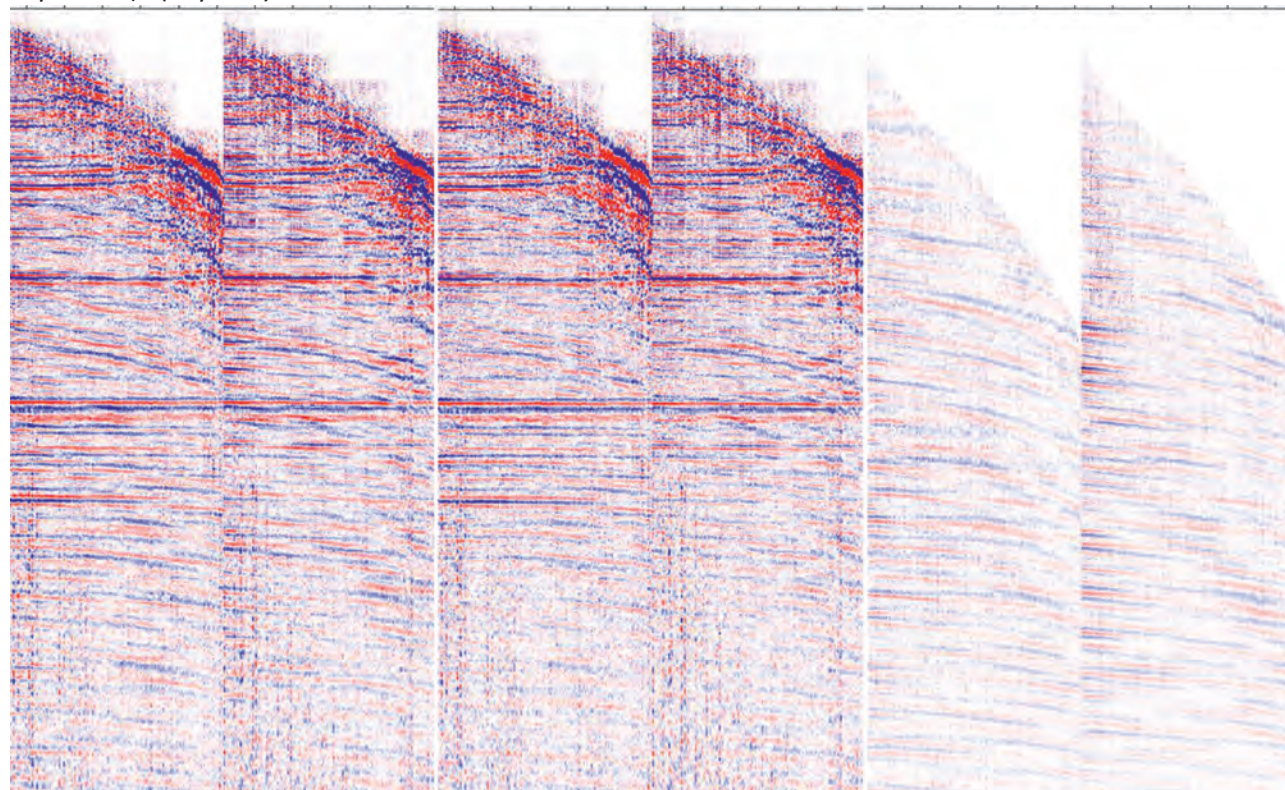
В ряде регионов обработки и интерпретаторы сталкиваются со сложными распределениями динамических характеристик волнового поля в интервалах основного интереса: юрские отложения, доюрский комплекс, ачимовские залежи. Несколько лет назад стало однозначно понятно, что это обусловлено наличием кратных волн различного типа: от свободной поверхности, внутрикратных и различных ревербераций [2], которые могут искажать распределение амплитуд в зависимости от удаления и сильно изменять волновую картину на кубах ближних и средних углов падения. Для решения этой задачи в наземной обработке стали привлекать 3D алгоритмы моделирования кратных и внутрикратных волн-помех, которые получили широкое распростра-

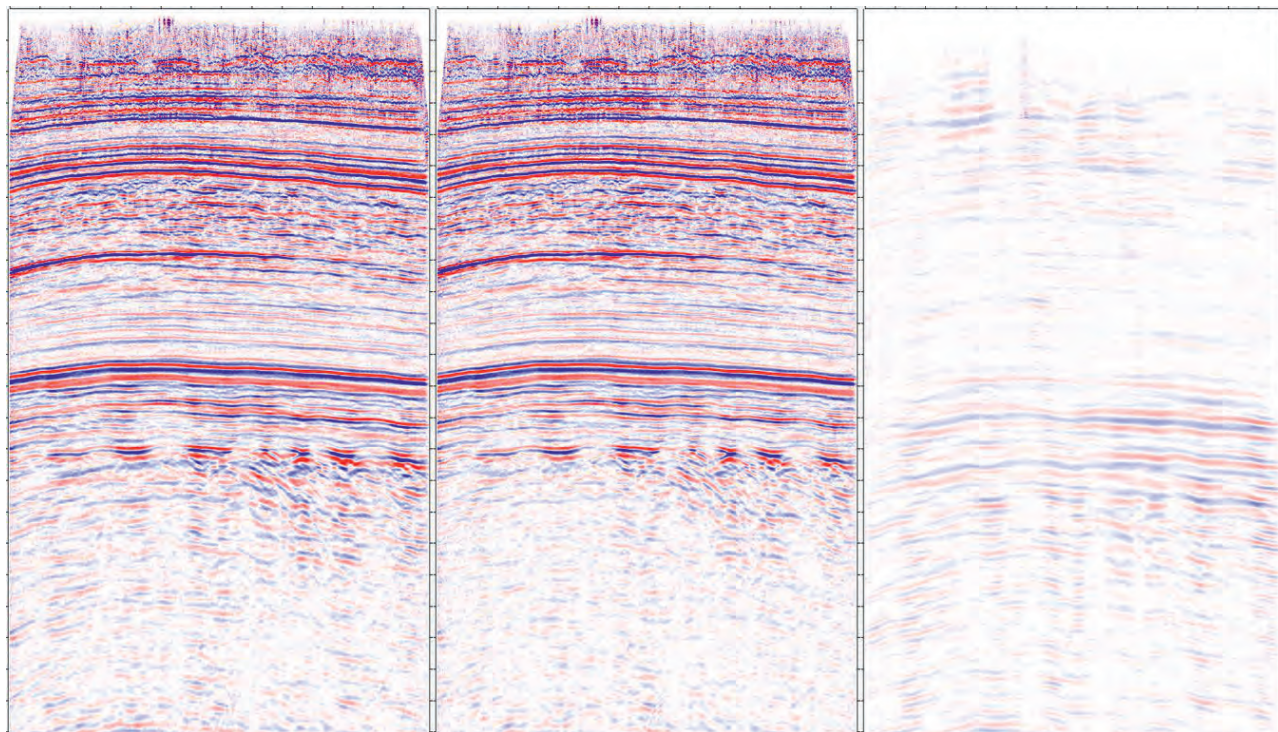
нение в обработке морских данных благодаря их исходной высокой плотности. В последующем алгоритмы SRME (Surface-related multiples illumination) и IMP (interbed multiples prediction) [1, 2] были адаптированы под наземные съемки и позволили получать хорошие результаты только при условии высокой плотности исходных данных, что не достижимо в рамках ретро съемок и слабо достижимо в случае современных съемок с большим шагом между линиями ПП и ПВ, но с внедрением 5D-регуляризации эту проблему удалось успешно решить [9]. Благодаря совместно накопленному опыту большинства геофизиков-обработчиков, удалось однозначно определить многие причины динамических искажений существующих проблем в рамках целевых интервалов.

Построение и уточнение глубинно-скоростных моделей

Здесь стоит отметить, что изменения в

▼ Рис. 6. Сейсмограммы до вычитания кратных волн (слева), после вычитания (центр), разница (справа).



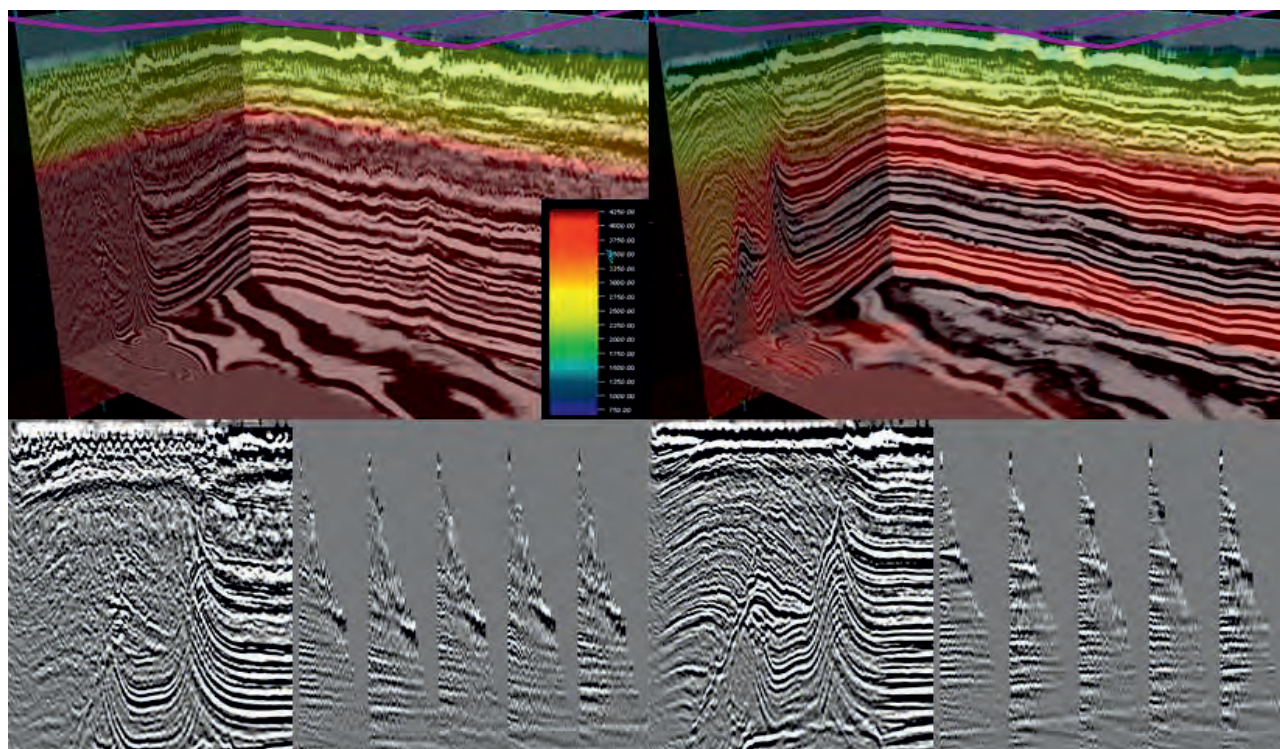


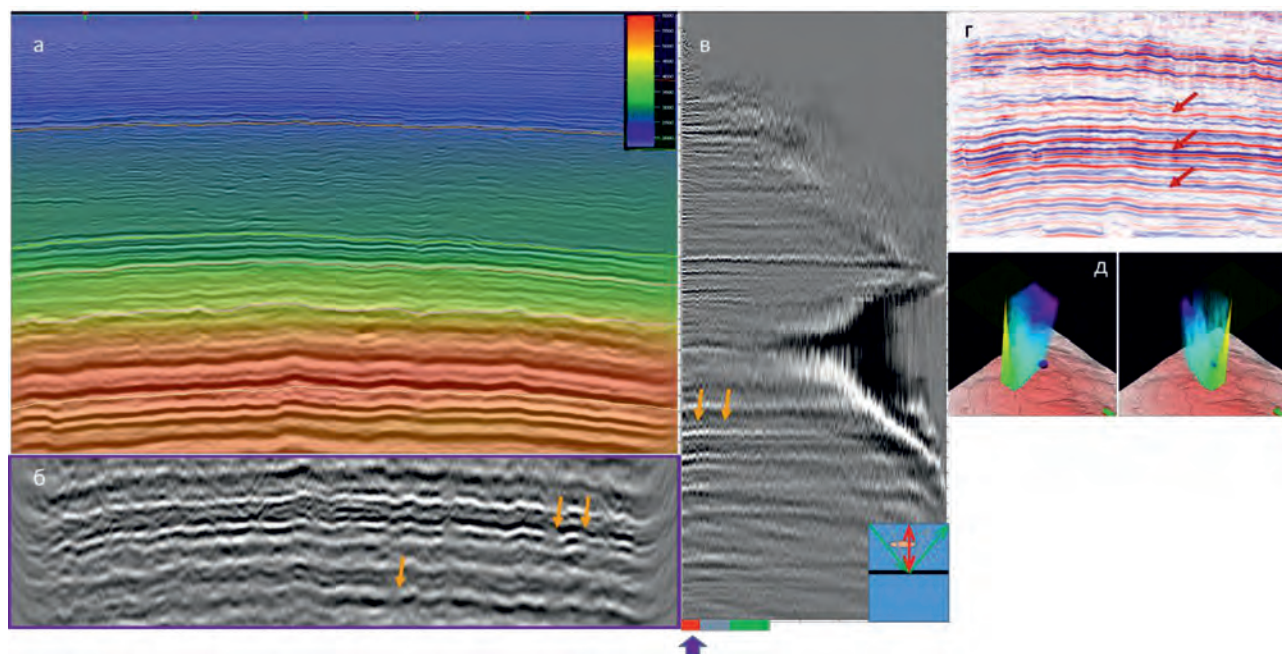
▲ Рис. 7. Вертикальные сечения временного куба до вычитания кратных волн (слева), после вычитания (центр), разница (справа).

повышении устойчивости алгоритмов, развитии мощности вычислительных ресурсов, переход на графические вычисления и общему накопленному опыту дали существенный скачок в

качестве получаемых итоговых скоростных моделей. Среди наиболее ресурсоёмких и успешных подходов к уточнению ГСМ остаются: высокоплотная сеточная томография, FWI на преломленных

▼ Рис. 8. Вертикальные сечения глубинного куба с наложенной ГСМ и сейсмограмм ОТО с начальной ГСМ (слева), после уточнения с помощью FWI по преломленным волнам (справа).



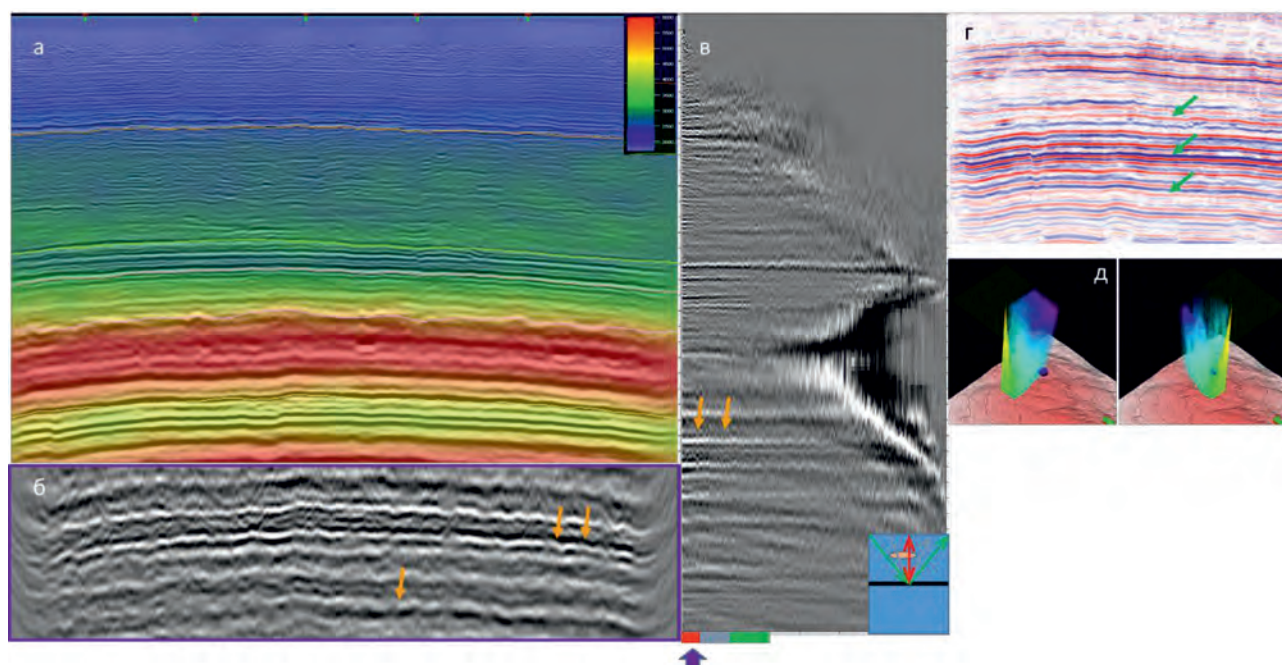


▲ Рис. 9. Результат глубинной миграции с гладкой моделью. Разрез в глубине с наложенной ГСМ (а), фрагмент ближнего удаления (б), сейсмограмма ОТО (в), фрагмент разреза во временной области (г), схематичный пример пространственных лучевых траекторий с учетом азимута (д).

волнах и FWI на отраженных волнах. У каждого подхода есть положительные и отрицательные стороны. В ряде случаев начинать работу по построению ГСМ с FWI на отраженных волнах при неточной

начальной модели и/или отсутствии скважинной информации выглядит весьма безрассудно или неэкономично, так как стоимость процедуры в рамках проекта весьма высока, а отсутствие

▼ Рис. 10. Результат глубинной миграции с уточненной ГСМ с помощью высокоплотной томографии. Разрез в глубине с наложенной ГСМ (а), фрагмент ближнего удаления (б), сейсмограмма ОТО (в), фрагмент разреза во временной области (г), схематичный пример пространственных лучевых траекторий с учетом азимута (д).



возможности верификации результата ставит под сомнение всю работу. Поэтому целесообразнее использовать комбинацию FWI со стандартной/высокоплотной сеточной томографией с учетом азимута. Использование азимутальности данных в рамках уточнения моделей позволяет повысить детальность итоговой ГСМ и лучше локализовать скоростные аномалии в пространстве, что сильно зависит от исходной плотности системы наблюдения и шага между линиями ПП и ПВ.

Еще одним положительным изменением становится то, что в рамках стандартных работ начинают использоваться анизотропные модели типа: TTI, TOR, что в ряде регионов является необходимым условием для получения качественного результата [3, 4, 5].

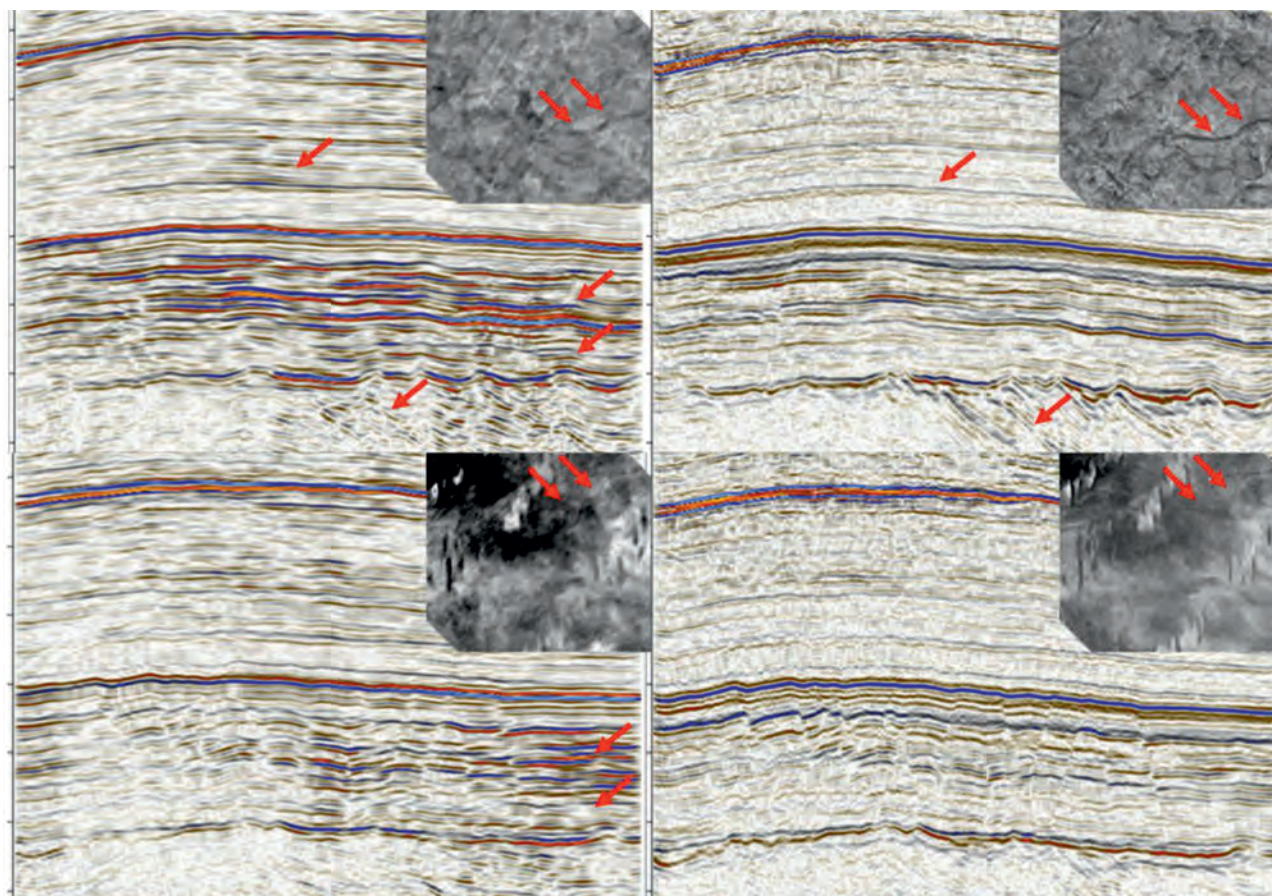
Миграция

В рамках миграции используются различные алгоритмы, направленные на успешное решение поставленных геологических задач. Ключевым и неизменным остаётся алгоритм на основе интеграла Кирхгоффа. Важно, что для 3D данных в большинстве случаев миграция выполняется в сортировке OVT (Offset Vector Tile) [11], что даёт ряд преимуществ для оценки изменения амплитуд от удаления и азимута на этапе интерпретации, а также последующей обработки после миграции, так как сейсмограммы общей точки отражения являются трёхмерными (Удаление, Азимут, Время).

Обработка после миграции

Общая последовательность почти не претерпела существенных изменений:

- ▼ Рис. 11. Результат сравнения результатов обработки (слева) и переобработки с современным графом (справа). Иллюстрация эффекта на все ключевые интервалы геологического интереса на уровне вертикальных и горизонтальных сечений.



ослабление оставшихся когерентных помех (линейных и нелинейных), уточнение азимутальной кинематики, коррекция остаточных фазовых сдвигов, ослабление случайного некогерентного шума. Изменились подходы, алгоритмы и реализации благодаря повышенной плотности данных:

1) Для решения задач ослабления когерентных волн-помех используются 3D Radon преобразование или 2D, но с предварительным разбиением на азимутальные сектора

2) Для решения остаточной азимутальной кинематики используются более стабильные алгоритмы для оценки временных сдвигов на больших углах отражения

3) Реализация этапа коррекции остаточных фазовых сдвигов стала работать не только для каждой трассы, но и в

непрерывных пространственно-временных окнах, нелинейно накапливая поправки для выравнивания, что позволяет получать более точное решение, чем оценки, основанные на корреляционных сдвигах.

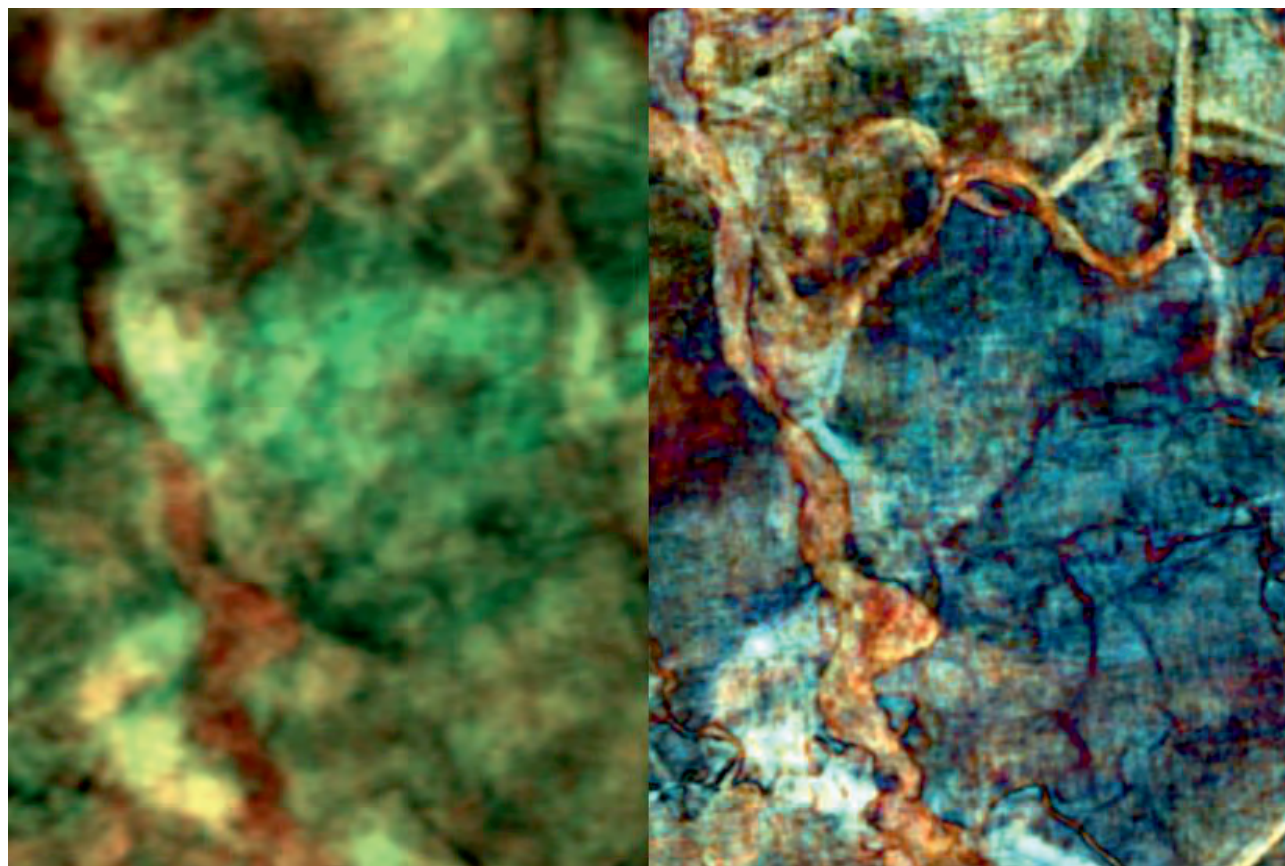
4) Ослабление остаточного случайного шума проводится на основании трёхмерности выборки данных, что дает минимизацию влияния на атрибуты записи полезного сигнала.

Добавилось ослабление следов расстановки по данным до суммирования, что позволяет обеспечить отсутствие этого эффекта во всех последующих результатах обработки — угловые и азимутально-угловые суммы.

Выводы

Современный граф обработки позволяет решать множество существующих и

▼ *Рис. 12. Результат сравнения результатов обработки 2018 г. (слева) и переобработки с современным графом 2025 г. (справа). Иллюстрация эффекта на уровне и горизонтальных сечений в рамках спектральной декомпозиции..*



понятных проблем сейсморазведки в различных регионах, повысить и сохранить пространственную разрешённость и подчеркнуть динамические детали записи благодаря аккуратной работе с данными. Совместная работа обработчика и интерпретатора с привлечением скважинной информации, безусловно, даёт положительный эффект, особенно в моменты принятия решения при наличии хорошего качества данных и достаточной полноты последних.

Авторы работы хотели бы не только осветить существующие подходы в рамках проектов по обработке данных СРР, но и напомнить недропользователям о том, что все эти изменения не только положительно влияют на результат, но и негативно влияют на сроки исполнения, не давая сервисным компаниям и самим недропользователям в процессе принятия решения права на ошибку. Так или иначе, мы замкнуты в рамках неоднозначного тройного множества: быстро, дешево, хорошо.

Впереди нас ждёт еще большое множество новых алгоритмов, подходов, решений и будущих открытий.

Литература

1. Е.М. Чуб, А.А. Глотов, М.С. Воложанин, П.С. Бекешко, Е.А. Кучканов, Т.И. Кучканова. Пример использования трехмерного предсказания внутрикратных волн по данным 3D сейсморазведки в Волгоградском регионе. Санкт-Петербург 2022.
2. Berkhout, A. J. and D. KJ. Verschuur. 1997. Estimation of multiple scattering by iterative inversion, Part I: theoretical consideration. *Geophysics*, Vol. 62, No. 5, P. 1586-1595.
3. П.С. Бекешко, Е.М. Чуб, Я.В. Лаптев. А.Н. Сладковский, А.В. Бурлаков, А.М. Сазыкин, Е.А. Кучканов. Использование Full Waveform Inversion для решения

задачи уточнения глубинно-скоростной модели по преломленным волнам. Санкт-Петербург 2023.

4. И.В. Григоренко, О.А. Гробушкина, А.Е. Королев Е.М. Российская, К.В. Баранов, А.Р. Яппарова. Особенности построения глубинно-скоростной модели в зоне интенсивной складчатости Иракского Курдистана. Успешный опыт применения азимутальной томографии. «ПроГР-Ресс'23» Сочи, 2023 г.

5. С.О. Суслов, П.С. Бекешко, Я.В. Лаптев. Повышение качества сейсмических изображений сложнопостроенных сред с помощью создания орторомбическо-анизотропной глубинно-скоростной модели на примере бортовой зоны Прикаспийской впадины. Геомодель 2019, Геленджик.

6. Dave Hale. Dynamic warping of seismic images Hale 2013

7. Michel Schonewille, Zhimei Yan, Martin Bayly and Richard Bisley — Matching pursuit Fourier interpolation using priors derived from a second data set

8. Michel Schonewille, Debra Dishberger and Deepak Kapadia — Comparison of 3D time-domain Radon and matching-pursuit Fourier interpolation

9. A. Poole, P. Bilsby, M. Giles, G. Morgan. Wide Azimuth Acquisition with Radial Domain Interpolation for Fluvial Morphology Interpretation

10. Sheng Xu, Yu Zhang, and Gilles Lambaré. Antileakage Fourier transform for seismic data regularization in higher dimensions

11. Gijs J. O. Vermeer. 3D Seismic Survey Design Second Edition

12. Laake, A., Strobbia, C., and Cutts, A., Integrated Approach to 3D near surface characterization in desert regions. *First Break*, 26(11):109-112, 2008.

13. O.O. Adamovich and Y.V. Laptev. 3D Seismic Data Processing Technology for Near Surface Effects Compensation Using Surface Waves Frequency Dispersion Curves, 2015.