



Развитие отечественного ПО Prime: новый этап в промышленной обработке данных сейсморазведки

■ Анисимов Р.Г., Кунченко Д.С., Овчинников К.Р., Силаенков О.А., Шалашников А.В., ООО «Сейсмотек», г. Москва

Проект реализуется участником проекта «Сколково» при грантовой поддержке Фонда «Сколково».

Введение

Компания «Сейсмотек» занимается разработкой программного обеспечения (ПО) Prime, предназначенного для обработки сейсмических данных, а также выполняет сервисные работы на разрабатываемом ПО. Подобный прикладной формат работы определяет стратегию развития компании в направлении решения актуальных задач, постоянного развития и усовершенствования существующих программ и алгоритмов. Актуальное состояние ПО Prime описано в публикации [1].

Наша компания никогда не занималась копированием технологий, реализованных в западных системах обработки, а всегда развивалась самостоятельно в соответствии с продвигаемой нами концепцией «глубинной интерпретационной обработки», опирающейся на пластовую глубинно-скоростную модель среды. Это далеко не всегда находит понимание отечественных геофизиков, привыкших к работе в импортных аналогах программного обеспечения и, зачастую, придерживающихся концепции так называемой «временной обработки» (или обработки, основанной на модели средних скоростей). Однако стоит отметить, что последнее десятилетие западные компании также развивают свои продукты именно в направлении «глубинной обработки», которое стало основным, и принципиально отличается от «временной обработки».

Отечественный же рынок геофизики только в последние годы начал осознавать преимущества такого подхода и активно внедрять данную технологию.

Хотя промышленная обработка данных сейсморазведки довольно консервативна, можно констатировать, что в настоящее время она вступает в новый этап. Наряду с расширением использования «глубинной обработки» всё больше внимания уделяется вопросам сохранения динамических параметров сейсмических сигналов в ходе построения глубинных изображений среды. Эти задачи требуют более содержательных преобразований данных, опирающихся на все более адекватные модели реальных сред. Это означает, что в процесс обработки должны вовлекаться процедуры динамического моделирования волновых полей. При этом сами способы моделирования должны соответствовать решаемым задачам, быть достаточно быстрыми и технологичными. Сегодня обработка всё больше включает в себя процедуры, которые переплетаются с интерпретацией. Продвигаемые ранее подходы раздельной обработки и интерпретации данных, хоть и являются удобными с точки зрения выполнения работ, но постепенно отходят в прошлое. Для получения качественно новых результатов, необходимых для решения более тонких геологических задач, требуется тесная интеграция этих видов работ, что

предполагает разработку новых подходов к обработке и развитию имеющейся алгоритмической и программной баз. Программная статья, в которой изложена парадигма обработки, лежащая в основе концепции развития ПО Prime опубликована в 2021 году [2], в тезисах [3] описаны основные направления её развития. В данной статье мы попробуем подробнее развернуть эти положения.

Решение всех этих задач для дальнейшего и непрерывного развития отечественного ПО Prime требует значительных ресурсов. Стоит понимать, что имеет значение не только развитие само по себе, но также и его темп. При слишком медленном развитии может оказаться, что к моменту завершения такой работы её результат будет устаревшим на несколько лет. Единственным внешним источником финансирования развития, помимо собственных средств от предоставления сервисных услуг, до недавнего времени была компания Equinor (Statoil), однако в настоящее время эти связи утрачены. Программа импортозамещения, обсуждаемая с 2014 года, могла бы помочь ускорить развитие. Однако, насколько нам известно, на сегодняшний день нет действующих механизмов, применимых к нашей отрасли. Также отметим, что для быстрого и уверенного развития, помимо финансовых ресурсов, необходимо расширение тесного взаимодействия как с участниками отечественного геофизического рынка, так и с ключевыми заказчиками таких работ.

О «временной миграции» и глубинных построениях

Стандартные технические задания на обработку сейсмических данных включают в себя обязательный этап т.н. временной обработки, завершающейся временной миграцией. При этом глубинные

построения оказываются «довеском» к стандартному графу даже в тех случаях, когда глубинное изображение среды заявляется основным финальным результатом.

Временная обработка, исключая построение глубинно-скоростной модели (ГСМ) среды, широко применяется в практике отечественной сейсморазведки. Она имеет своих сторонников и практически всегда фигурирует в технических заданиях, формулируемых заказчиками. У этого есть причины. Такая обработка опирается на модель средних скоростей, которая долгое время служила основой для аппроксимации реальных сред. Недостатки такой модели очевидны и широко известны. Между тем считается, что полученные в результате временной обработки изображения среды обладают определенными достоинствами. Логика временной обработки (и временной миграции) состоит в описании временно-го поля набором годографов простой аналитической формы (обычно гиперболами в двумерном и гиперболоидами в трехмерном случае) и набором временных подвижек, ответственных за влияние верхней части разреза (ВЧР). Этот набор годографов должен обеспечить хорошее суммирование сейсмограмм, позволяя получить временные разрезы и кубы хорошего качества, которые долгое время являлись конечным результатом деятельности обработчика. Эти данные, подвергнутые временной миграции, являлись приближенным изображением среды. Пересчет в глубинный масштаб осуществлялся на основе весьма приближенных алгоритмов (например, по формулам Дикса) с привлечением скважинной информации. Этот краткий исторический экскурс необходим, поскольку и современная обработка во многом наследует те же тенденции. Не доверяя построен-

ной подобным образом глубинной модели, геофизики рассматривают сейсмику, по сути, как способ интерполяции данных между скважинами.

Помимо простоты и понятности базовых процедур такой обработки считается, что она позволяет получить изображения лучшего качества по ряду традиционно используемых параметров (отношение сигнал/помеха, прослеживаемость синфазностей, динамическая выразительность, разрешенность и т.п.). Так ли это? Очевидно, что нельзя привести модельный пример, подтверждающий этот тезис, поскольку нет такой неоднородной среды, в которой волны распространяются в соответствии с моделью средних скоростей. Если провести обработку синтетических сейсмограмм, опираясь на точно известную глубинно-скоростную модель, результат будет заведомо лучше, чем результат обработки в неадекватной модели. Значит, главная проблема заключается в том, что при так называемой глубинной обработке модели не бывают точными. А вот когда речь идёт о сопоставлении результатов обработки в двух неправильных моделях - уже нельзя однозначно сказать, какой из результатов будет лучше. И вот здесь, по-видимому, одна из главных причин востребованности обработки в модели средних скоростей.

Перечислим «достоинства» временной обработки:

- Бытует мнение, что задача построения модели средних скоростей отличается устойчивостью, поскольку избегает этапа решения некорректной обратной кинематической задачи сейсморазведки.

- Могут различаться критерии качества решения такой задачи, поскольку правильного решения, имеющего отношение к реальности, она не имеет, но, вооружившись тем или иным критерием качества,

всегда получают единственное решение. На самом деле и это неверно, если вспомнить о некорректности задачи определения статических поправок. Правда, следует признать, что хорошо сформулированных критериев качества в сейсморазведке немного, и на разных этапах обработки и интерпретации они различны. Причины устойчивости обработки в модели средних скоростей хорошо объясняются в работах академика С.В. Гольдина (например, [4]). Однако там же на стр.74 отмечается, что динамика сигнала при такой обработке может существенно искажаться. Вообще, нелишне отметить, что важнейшим достижением сейсморазведки в прошлом столетии С.В. Гольдин считал принципиальную возможность получения оценки истинного коэффициента отражения. В модели средних скоростей об этом речи быть не может, если среда выше отражающей границы неоднородна.

- Несомненным достоинством временной обработки является простота описания годографа отраженной волны. Малое число параметров, описывающих волновое поле, позволяет получать их устойчивые оценки по многочисленным, пусть и ненадежным, измерениям, обеспечивающим хорошую статистику. Добавление параметров, «обобщающих» модель на случай, например, анизотропии, несущественно ослабляют это замечательное свойство. Уязвимость подхода проявляется в тех случаях, когда истинный годограф далёк от гиперболического или описываемого какой-либо другой аналитической несложной функцией.

- Наконец, самое главное достоинство модели средних скоростей состоит в огромном опыте её использования поколениями квалифицированных геофизиков-обработчиков и геофизиков-интерпретаторов. Правильных моделей

сред, как известно, не бывает, и искусство геофизика состоит в значительной степени в том, чтобы отличить артефакты обработки от геологически обоснованных аномалий. Усложненные графы обработки, насыщенные новыми, пусть и эффективными процедурами, неизбежно порождают и новые незнакомые артефакты. Распознать их бывает непросто, и это подрывает доверие к современным тенденциям обработки.

Всё же, думается, самый упорный апологет применения методик, основанных на модели средних скоростей, вынужден признать, что для решения тонких динамических задач, да и для достаточно сложных структурных построений, временная обработка не пригодна. Здесь наступает глубокое противоречие между теорией и практикой. Обработка, ориентированная на модель средних скоростей, и глубинная обработка, опирающаяся на более приближенные к реальным средам модели – это совершенно разные обработки. В первом случае кинематические характеристики данных в процессе различных трансформаций приводятся к гиперболической форме, во втором случае необходимо сохранить кинематические и динамические особенности сигналов. В первом случае главным критерием качества становится временной разрез, во втором – глубинное изображение среды. Данные, подготовленные для временной обработки, часто бывают совершенно непригодными для глубинной обработки. Это, вероятно, часто приводит к неудачам в глубинных построениях, т.к. временная обработка обычно фигурирует на первых этапах технического задания, а какая-либо специальная обработка техническим заданием не предусмотрена.

Часто звучат возражения, что в условиях определённого региона глубинные построения неэффективны, а возможна и

целесообразна лишь временная обработка. Эти соображения кажутся надуманными. Если есть поле времен, значит возможна и его интерпретация. Если полученным временам верить нельзя, то никакая обработка не имеет смысла.

Следует признать, что сейсморазведка всё же обладает некоторыми «предсказательными» возможностями в глубинных построениях, а не сводится только к интерполяции скважинных измерений. Если скважин мало, то сейсмика – единственный инструмент, позволяющий более-менее достоверно экстраполировать скудную информацию, а если их много, то она же позволяет верифицировать эти далеко не всегда точные измерения. К тому же инструментальный глубинных построений постоянно развивается, и его развитие в значительной степени осложнено указанными выше причинами.

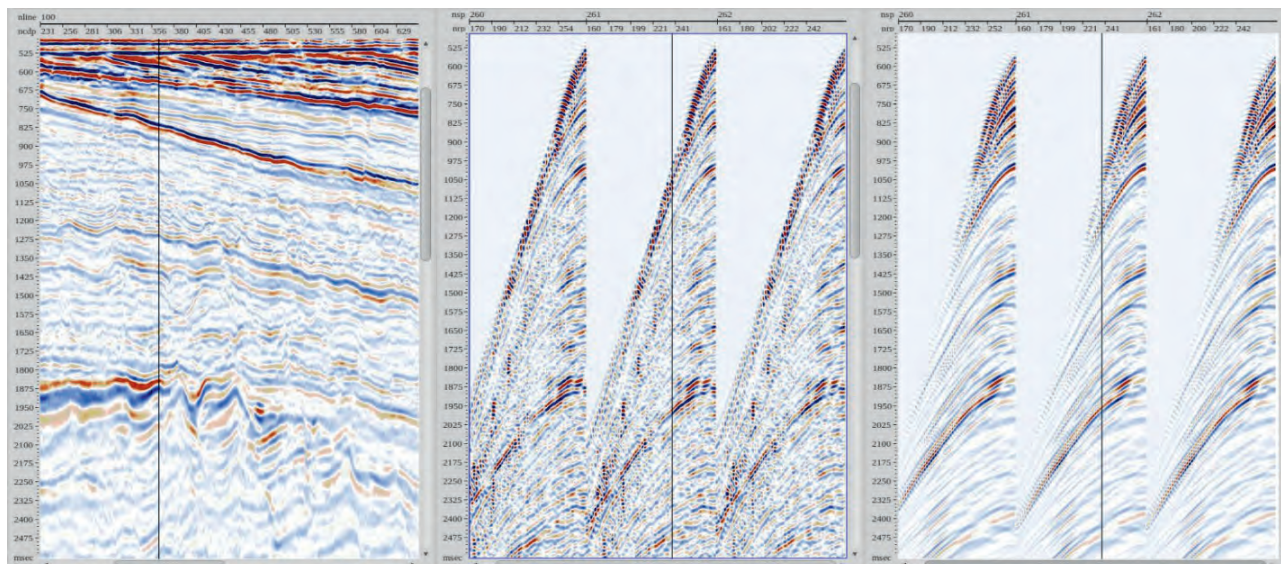
Таким образом, обработка, нацеленная на построение глубинных изображений среды, требует специального графа, который не перечеркивает достижения традиционных технологий, но учитывает современные представления о подготовке данных к глубинной миграции.

Обобщённый граф обработки

Приведём шаги обобщённого графа обработки сейсмических данных на концептуальном уровне.

1. Стандартная предобработка данных

Включает применение шумоподавления и коррекцию за поверхностные условия. Особенностью этого этапа для целей глубинной обработки является минимизация искажений, вносимых в кинематические характеристики полезных сигналов. При этом допускаются искажения и некоторые потери в динамических характеристиках сигналов, поскольку далее будет выполнена сиг-



▲ Рис. 1. Результат глубинной миграции (слева), фрагмент реальной сейсмограммы ОПВ (в центре) и синтетическая сейсмограмма, смоделированная методом демиграции (справа).

нальная обработка с опорой на ГСМ. Для подавления регулярных помех предпочтение отдаётся их моделированию и последующему адаптивному вычитанию. При этом важно отметить, что и этот «стандартный» этап обработки содержит в себе алгоритмы, требующие развития.

2. Построение глубинно-скоростной модели среды

На данном этапе выполняется построение предварительной глубинно-скоростной модели среды. Из-за недостаточной сигнальной обработки глубинные изображения на данном этапе могут иметь не самое высокое качество, но, тем не менее, многие вопросы определения скоростных параметров среды могут быть решены вполне удовлетворительно. Поэтому ГСМ на данном этапе может быть очень близкой к финальной.

Отметим, что построение глубинно-скоростной модели является ядром в системе Prime, а в качестве ГСМ используется обобщённая пластовая модель среды [5,6,7,8]. Она представляет собой пластовую модель с возможностью расширенной параметризации слоёв и специальными алгоритмами её построе-

ния [9,10]. Зачастую пластовая модель воспринимается как менее общая, чем принятое во многих системах сеточное описание, что совсем неверно. На самом деле, обобщённая пластовая модель – это гибридное описание среды, в которой отдельные пласты могут использовать в том числе и сеточное описание.

3. Обращенное миграционное преобразование (демиграция)

Демиграция – это способ моделирования волнового поля на основе построенной ГСМ и глубинного мигрированного изображения, полученного миграцией исходных данных в этой ГСМ. Поле, как правило, рассчитывается на геометрию исходных данных [11]. Так как миграция сама по себе является мощным фильтром, подавляющим большое количество помех, то смоделированное таким способом сейсмическое поле будет существенно чище исходного.

4. Новый этап предобработки и последующей обработки, включающий в себя коррекцию высокочастотной статики, подавление разного рода помех, регуляризацию и т.п.

Имея построенную предварительную

ГСМ и результат моделирования сейсмического поля в этой модели при помощи демиграции, сигнальная обработка может быть выполнена заново с опорой на эту информацию. Такой подход в ряде случаев может значительно улучшать качество сигнальной обработки, так как в него не закладываются базовые ограничения модели средних скоростей, которые используются в «стандартной» сигнальной обработке. Иными словами, форма годографов отражённых волн не предполагается гиперболической, а определяется лишь сложностью построенной ГСМ, что позволяет аккуратнее обходиться с сигнальной компонентой сейсмического поля. Это одно из ключевых мест обсуждения графа.

На данном этапе могут быть применены различные алгоритмы шумоподавления, в том числе возможно моделирование и вычитание всех видов кратных волн, оценка и учёт частотно-зависимого поглощения. На практике также часто применяется способ выделения и моделирования поля помех с последующей их миграцией и вычитанием в мигрированной области.

5. Уточнение ГСМ (при необходимости) и дополнительная обработка

После сигнальной переобработки данных с опорой на ГСМ последняя может быть при необходимости уточнена.

6. Миграция, атрибутивная миграция и постмиграционная обработка [12,13]

На этом этапе производится наиболее сильное подавление регулярных помех, поскольку можно надежнее отделить их от полезных сигналов. Также выполняются процедуры коррекции формы сигнала с контролем сохранения динамики, компенсация искажений динамики с использованием специально рассчитанного результата миграции синтетического поля [10], подавление «шумов расстановки», получение востребованных атрибутов.

Безусловно, это концептуальное описание графа, но из него видно, что моделирование волнового поля и обработка с опорой на ГСМ становятся его основой. Отметим, что для каждого конкретного проекта граф необходимо уточнять для решения поставленных геологических задач.

Основные направления развития системы

1. Развитие пользовательского интерфейса

- Планируется добавить возможность создания макросов или «супермодулей»

Под супермодулем понимается возможность средствами программного интерфейса объединить несколько модулей в один, при этом самостоятельно определить конечный список параметров для настройки. Сам процесс создания макросов можно сравнить с зего-кодингом, т.е. созданием новых программных инструментов без непосредственного написания кода.

При разработке Prime авторы старались создавать относительно небольшое количество универсальных модулей, предназначенных для решения широкого круга задач. Комбинация таких модулей в графе требует глубокого понимания их назначения и всех параметров. Наличие образцов с небольшим числом варьируемых параметров существенно облегчит процесс обработки.

Более того, такие возможности на программном уровне практически уже реализованы, но создание библиотеки таких макросов – это большая и плановая работа геофизиков по аккумуляции накопленного опыта и методических решений. Их набор будет постоянно расширяться, обрастать инструкциями и примерами, в его создании смогут участ-

воваты сторонние пользователи.

- *Понижение порога входа для пользователя*

Необходимо сделать Prime более удобным для пользователя, создать более дружелюбный интерфейс, обеспечить его наглядность и простоту.

- *Расширение функционала менеджера запуска заданий*

Это позволит обработчикам запускать задания «каскадом» при выполнении заданных условий, что сократит время выполнения рутинных работ.

2. Интерактивный инструмент динамического моделирования

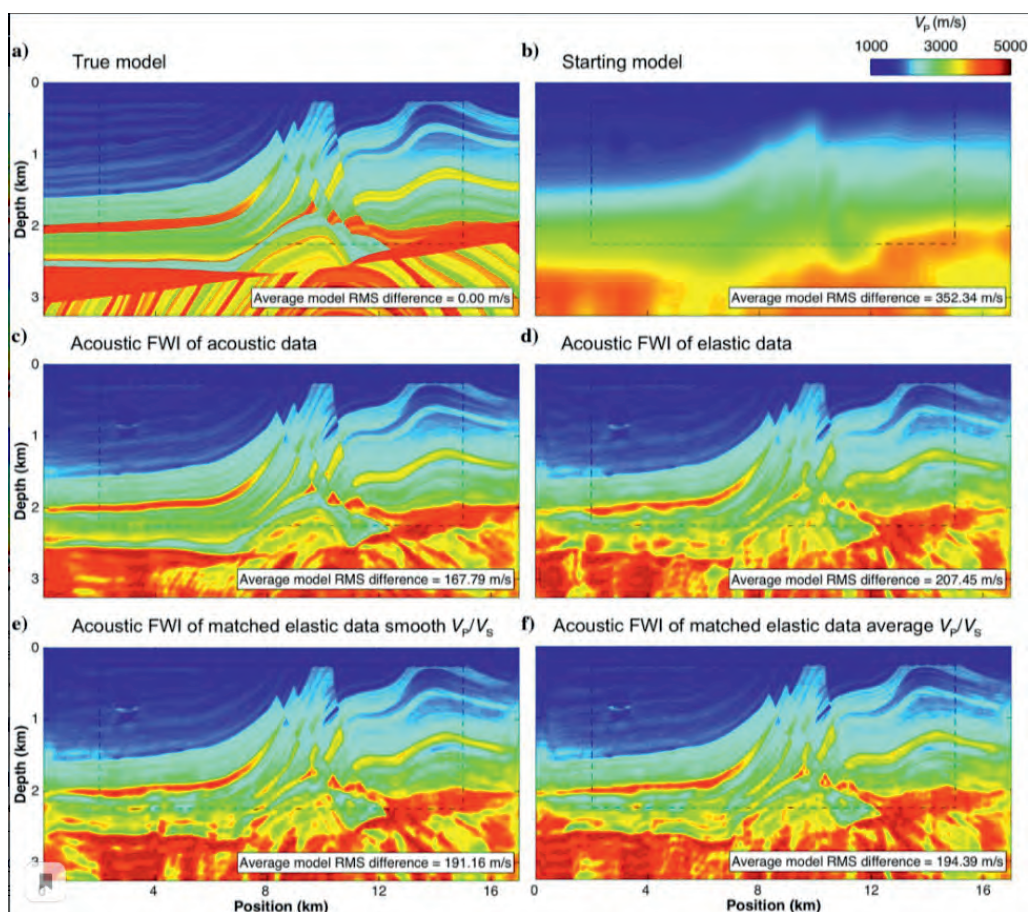
Общая тенденция развития систем обработки состоит во все большей конвергенции их с интерпретационными пакетами. Задачи интерпретации требуют более содержательных преобразований данных, опирающихся на всё более адекватные модели реальных сред. Это означает, что в процесс обработки дол-

жны вовлекаться процедуры динамического моделирования волновых полей. При этом сами способы моделирования должны соответствовать решаемым задачам, быть достаточно быстрыми и технологичными. В системе Prime развит конструктор трансформации волновых полей, позволяющий решать многие востребованные в обработке и интерпретации задачи моделирования. Сделать этот инструмент удобным для пользователя – одна из насущных задач развития системы. Сейчас этот пакет используется для сервиса и лишь отдельные опции передаются пользователям.

3. Комплекс инверсионных преобразований

Популярным и перспективным направлением в обработке и интерпретации является т.н. FWI-способ идентификации модели среды, опирающийся на отображение результата решения обратной задачи в исходное волновое поле с точ-

► **Рис. 2.**
Пример акустической полноволновой инверсии в упругой среде [15].



ностью до оговариваемых ограничений (в разных алгоритмах эти ограничения отличаются). Общим для всех подходов является итеративное решение обратных и прямых задач.

Поскольку в Prime реализован собственный алгоритм волнового моделирования, сочетающий в себе способ послойного пересчёта полей и моделирование на основе интеграла Кирхгофа, то перспективной представляется разработка схемы FWI на основе такого алгоритма. Первые опыты по использованию схемы обращенного миграционного преобразования для расчёта эталона в задаче коррекции высокочастотной статики свидетельствуют об эффективности такого подхода.

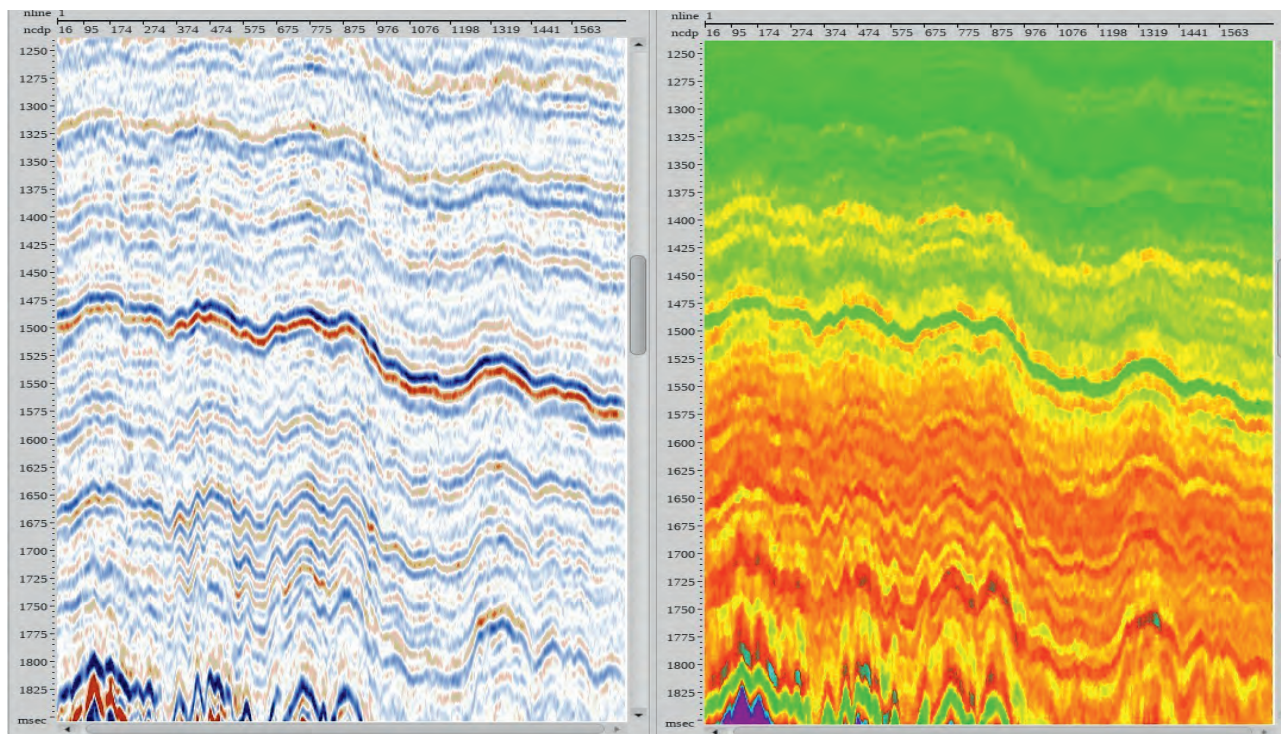
Результат полноволновой инверсии (FWI), если его удастся достичь, – это и есть полное решение задачи сейсморазведки: восстановление по сейсмическим данным упругих параметров реальной среды. В этом смысле задача по постановке идентична тому комплексу алгоритмов инверсий, которые применяют по финальным результатам обработки – набору изображений среды в различных атрибутах. Комплекс программ инверсий обычно относят к интерпретационному этапу сейсморазведки. Отличие FWI в том, что решение контролируется моделированием волнового поля. В рамках данной задачи от полученного модельного поля требуется хорошее отображение в зарегистрированные реальные данные. При этом хорошее отображение требуется не только по кинематическим параметрам, как при классическом построении ГСМ, и не только на опорных горизонтах, но и по форме и амплитудам всех зарегистрированных колебаний, очищенных от регулярных и случайных помех. Таким образом, FWI заключается в итерационном подборе параметров среды с решением

прямой задачи для каждого набора параметров, получаемого на очередной итерации. Окончанием процесса решения является хорошее, в смысле некоторого критерия, совпадение модельных и реальных данных.

Существует много разных алгоритмов и программ FWI, которые отличаются выбранными критериями качества отображения оцененных параметров среды в реальные данные, способами решения прямой задачи, способами получения изображений среды (миграции). Обычно для реализации FWI используются сеточная параметризация среды и конечно-разностные алгоритмы решения прямой задачи и миграции. В системе Prime используется обобщённая пластовая модель среды, в которой каждый пласт (слой) описывается набором параметров. Для миграционных преобразований и моделирования волновых полей используются интегральные методы. Для решения прямой задачи разработан эффективный алгоритм обращенного миграционного преобразования. Эта техника применима и для реализации FWI в различных модификациях.

Полноволновая инверсия, как и любая инверсия, существенно опирается на априорную информацию. Это прежде всего информация о т.н. «низкочастотной» составляющей куба импедансов. Для получения этой информации необходимо использовать скважинные данные и целесообразно привлекать предварительно отстроенную ГСМ. Это точно такая же информация, которая необходима для классических инверсионных алгоритмов.

Кроме того, в ходе FWI необходимо пересчитывать обработанные данные в скоростные параметры среды. Это также одна из главных задач традиционных инверсий. Стало быть, развитие FWI неразрывно связано с развитием в систе-



▲ Рис. 3. Результаты миграции (слева) и динамической инверсии (справа).

ме Prime пакета традиционных инверсионных преобразований. Поэтому создание такого комплекса программ – один из важных этапов проекта.

Существует и представляется перспективной группа методов FWI, которая не опирается на амплитуды отражений, а только на форму записей. В этом случае анализируют только подвижки сигналов между модельным полем и реальными данными. В этом случае подход к инверсии смыкается с томографическими алгоритмами решения кинематических задач. Это направление также представляется актуальным.

Таким образом, развитие технологий FWI необходимо начинать с создания комплекса программ традиционных инверсионных преобразований. Конечно, в отрасли реализовано множество алгоритмов инверсий. Однако ценность собственной разработки в ПО Prime, помимо авторских решений, позволяющих повысить качество такого рода преобразований, заключается в укоренённости этой, по сути, интерпретационной

задачи, в системе обработки. Успешность решения обратных задач во многом определяется качеством идущих на вход данных. Совмещение в одном пакете этапов инверсии и подготовки данных для инверсии должно привести к существенному приросту качества и достоверности результатов.

Целесообразно развивать два направления:

а) Получение оценок скоростных параметров на каждой итерации и, возможно, параметров анизотропии по промежуточным результатам миграции в модели, полученной на предыдущей итерации. При этом оценки параметров необходимо получать в технике традиционной инверсии амплитуд.

б) Получение детальных оценок скоростных параметров по корреляциям модельных и реальных данных.

Миграционные преобразования и моделирование волновых полей осуществляются интегральными методами в рамках обобщенной пластовой модели среды. Построение каркасной модели

ГСМ остается важным этапом для построения детальной модели среды. ГСМ, согласованная со скважинными данными, служит для создания набора ограничений для решений FWI и задания их "низкочастотной" составляющей.

4. Совместная томография (Joint tomography)

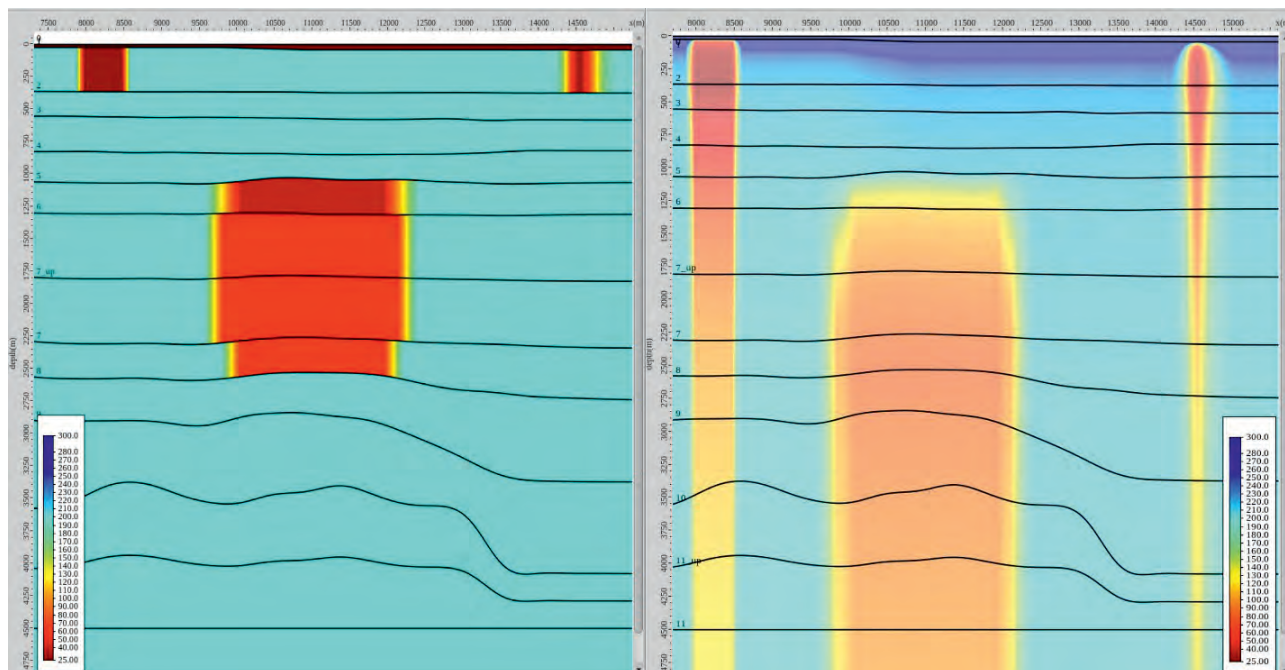
Как видно из предыдущего пункта, в планах речь идёт об инверсиях по отраженным волнам. Между тем, популярная в настоящее время технология FWI осуществляется для уточнения модели ВЧР по преломленным волнам. Мы полагаем, что возможности томографии ещё далеко не исчерпаны. Корректного сравнения технологий нам неизвестно, поэтому приоритетным считаем развитие томографических алгоритмов построения модели ВЧР.

Существует несколько основных типов томографий, каждый из которых применяют по отдельности для решения специализированных задач. Так томографию по преломленным волнам используют для построения модели верхней части разреза, а томографию по отражённым волнам применяют для основной части разреза. Такой подход упрощает применение технологий, однако может приводить к построению менее надёжных моделей. Разные типы волн по-разному освещают среду и данные о них не используются комплексно, что может приводить к проблемам со структурными построениями и снижению качества дальнейших прогнозов. Для решения этой проблемы требуется комплексный подход, который позволит использовать различные типы исходных данных. В качестве такого подхода планируется разработка и развитие метода совместной томографии, использующего данные о преломленных и отражённых волнах одновременно.

5. Оценивание параметров и учёт частотно-зависимого поглощения

Задачу принципиально можно разделить на два этапа, каждый из которых подразумевает наличие специализированных программ. Во-первых, для оценивания параметра добротности, а, во-вторых, коррекции поглощения.

Традиционно оценивание параметра Q производится по обработанным сейсмограммам до миграции или по суммарным разрезам. Для получения достоверных оценок зависимости амплитуд от угла падения/отражения необходимо получать значения добротности по сейсмограммам. Различают фоновое поглощение, которое предполагается мало меняющимся по времени и пространству и поглощение, относящееся к глубинным пластам, требующее более детальных оценок. Не будем здесь останавливаться на способах оценивания параметра Q . В системе реализованы три алгоритма, каждый из которых обладает определенными достоинствами. Однако исследования в этой области продолжаются. Оценивать возможно только параметр Q -эффективного, т.е. интегрального параметра, характеризующего частотно-зависимое поглощение в зависимости от времени прихода отраженной волны. Между тем, физические неупругие свойства среды описывает Q -пластовое, которое «привязано» к глубинным и пространственным координатам. Задача пересчёта Q -эффективного в Q -пластовое – это задача Q -томографии. Такая программа также реализована в системе, но получение достоверных и устойчивых оценок Q -пластового остаётся задачей, требующей методических исследований как на модельных, так и на реальных материалах. Необходимо научиться использовать априорную информацию, скважинные данные, развивать алгоритмические решения, чтобы преодолеть



▲ Рис. 4. Схематичное представление различных классов параметров добротности: Q-пластовое (слева) и Q-эффективное (справа).

сложности, обусловленные некорректностью задачи.

Следующая задача в области Q-обработки — это применение полученных оценок Q. Если фоновое поглощение предполагает последующее применение Q-деконволюции, то корректная компенсация Q-пластового на глубинных изображениях среды — это совсем другая задача. Очевидное использование параметра в ходе миграционного преобразования известно своей неустойчивостью в высоких частотах. Есть альтернативные решения, требующие опробования и изучения, но наиболее перспективной на данный момент представляется методика, основанная на атрибутной миграции [12]. Намеченная концепция Q-обработки описана в [14].

6. Развитие сигнальной обработки с опорой на GCM

Основным направлением развития системы в области т.н. «сигнальной обработки» мы считаем создание алгоритмов и программ, использующих предварительно построенную глубинно-

скоростную модель среды. Это кинематические фильтры, рассчитанные на основе годографов отраженных волн в заданной GCM, способы регуляризации волновых полей, моделирование разного рода помех и их адаптивное вычитание.

Близкое, более затратное по вычислительным ресурсам, но очень перспективное направление связано с широким внедрением способов моделирования волновых полей на основе обращенного миграционного преобразования. Этот способ упомянут выше в связи с разработкой методики FWI, но не менее важными представляются возможности процедуры для разделения сигналов и помех, различных способов интерполяции и регуляризации данных. В самом деле, сочетание прямого и обращенного миграционного преобразования — это очень мощная процедура фильтрации и выделения сигнала на фоне помех, причём данные можно получать на любой заданной геометрии наблюдений, т.е. процедура обладает важными интер-

поляционными свойствами, которыми необходимо научиться пользоваться.

7. Развитие инструментов с использованием искусственного интеллекта (ИИ)

Нельзя не коснуться и популярной нынче темы использования искусственного интеллекта. Машинное обучение находит широкое применение в интерпретации, но в обработке его применение пока весьма ограничено. Очевидно применение такой техники для выполнения рутинных работ с контролем результатов геофизиком. Среди таких задач можно выделить следующие:

- Корреляция сейсмических атрибутов (спектров скоростей, первых вступлений, горизонтов, разломов, и т.д.);
- Контроль качества полевых материалов;
- Коррекция параметров обработки.

Однако наиболее интересно использование искусственного интеллекта для обучения его на модельных полях в самых разных приложениях. Постановки задач здесь довольно прозрачны. Требуется создание рабочей группы для их выполнения.

Всё описанное выше не исключает задач совершенствования вполне традиционного инструментария обработки. Всё больше внимания уделяется моделированию и подавлению т.н. «внутренних кратных» волн-помех, по-прежнему актуальны проблемы выделения (моделирования) поверхностных волн. Важными становятся специфические алгоритмы обработки морских донных наблюдений, задачи т.н. «деблендинга» и многие другие задачи, возникающие в практике. И здесь возникают очевидные сложности: заказчик требует наличия подобных процедур у сервисной компании, а, не

имея соответствующего заказа, их развивать невозможно. Такая трудноразрешимая проблема и должна решаться в контексте программы «импортозамещения».

Конечно, перечисленные направления не могут охватить весь спектр предстоящих работ. В планы развития системы нельзя не включить создание подробной документации, учебных курсов и т.п. Необходимо сделать систему более открытой с тем, чтобы сторонние разработчики могли бы встраивать в неё свои наработки. Работы в этом направлении ведутся и будут продолжаться.

Планы, подобные изложенному выше, регулярно докладывались на различных совещаниях с 2014 года. Менялось их содержание по мере выполнения различных пунктов, поскольку система, конечно, развивалась в независимости от отсутствия партнеров. Однако некоторые работы растянулись по означенным выше причинам. При благоприятных обстоятельствах реализация намеченного могла бы быть выполнена за три/четыре года при условии расширения коллектива разработчиков. При этом выполнение промежуточных этапов имело бы самостоятельную ценность, т.к. результаты немедленно были бы востребованы в обработке.

Заключение

В настоящее время у системы Prime всё больше пользователей. Много внимания уделяется их технической поддержке, проводятся курсы обучения. Хотелось бы, однако, ещё раз отметить, что, несмотря на то, что система позволяет реализовать выполнение любого стандартного графа обработки, она нацелена на решение задач получения глубинных изображений среды и развивается

прежде всего в направлениях, связанных с решением этих задач. Такие же тенденции наблюдаются и в развитии наиболее востребованных и популярных зарубежных систем. Для обеспечения возможности развития необходимо, чтобы заказчики работ по обработке сейсмических данных учитывали актуальность обсуждаемой здесь парадигмы.

Литература

1. Анисимов Р.Г., Давлетханов Р.Т., Кунченко Д.С., Овчинников К.Р. ПО Prime (Прайм) – интерпретационная обработка данных сейсморазведки // Приборы и системы разведочной геофизики. 2023. № 3. С. 30-40
2. Анисимов Р.Г., Мосяков Д.Е., Шалашников А.В., Фиников Д.Б. Повышение эффективности обработки больших объёмов сейсмических данных // Геология нефти и газа. 2021. № 3. С. 95–109. DOI: 10.31087/0016-7894-2021-3-95-109
3. Овчинников К.Р., Фиников Д.Б. Концепция развития отечественной системы обработки данных сейсморазведки «Prime». // II-ая Международная научно-практическая конференция ГК АО "Башнефтегеофизика" "Геология и геофизика 2022: наука, производство, инновации", Уфа, 13-14 октября 2022 года
4. Гольдин С.В., Теория интерпретации в сейсморазведке и сейсмологии: избранные труды / С. В. Гольдин; науч. ред. М. И. Эпов; Российская акад. наук, Сибирское отделение, Ин-т нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука. - Новосибирск: ИНГГ СО РАН, 2011
5. Анисимов Р.Г., Давлетханов Р.Т. Некоторые технологические приёмы, используемые при построении пластовой глубинно-скоростной модели среды. // Геофизика, №1, 2017, с. 02-07
6. Анисимов Р.Г., Лангман С.Л., Фиников Д.Б. Возможности расширения класса пластовых моделей при решении обратной кинематической задачи. Часть 1. Реконструкция пласта. Вставка горизонта. // Технологии сейсморазведки, №2, 2015, с. 69-76
7. Анисимов Р.Г., Лангман С.Л., Фиников Д.Б. Возможности расширения класса пластовых моделей при решении обратной кинематической задачи. Часть 2. Реконструкция пласта в модели анизотропии. // Технологии сейсморазведки, №3, 2015, с. 37-47
8. Анисимов Р.Г., Лангман С.Л., Фиников Д.Б. Возможности расширения класса пластовых моделей при решении обратной кинематической задачи. Часть 3. Пласт с вертикальным градиентом скорости. // Технологии сейсморазведки, №4, 2015, с. 33-43
9. Глоговский В.М., Мешбей В.И., Цейтлин М.И., Лангман С.Л. Кинематико-динамическое преобразование сейсмической записи для определения скоростного и глубинного строения среды. В кн. Сборник докладов второго научного семинара стран-членов СЭВ по нефтяной геофизике, Том I Сейсморазведка, 1982, стр. 327-331
10. Лангман С.Л., Силаенков О.А. Кинематико-динамическое преобразование - инструмент параметризации волнового поля // Конференция «Геомодель-2011», Геленджик, 11-15 сентября 2011г.
11. Овчинников К.Р., Силаенков О.А., Фиников Д.Б., Шалашников А.В. Как и зачем моделировать волновые поля в сейсморазведке // Актуальные проблемы нефтегазовой отрасли. Сборник докладов. – М.: ЗАО «Издательство «НЕФТЯНОЕ ХОЗЯЙСТВО», 2022. – С. 117-137.

12. Фиников Д.Б., Шалашников А.В. Атрибутная миграция для построения угловых и азимутальных разверток сейсмических изображений// Геофизика, №3, 2019, С. 16-22

13. Шалашников А.В. Signal enhancement - между обработкой и интерпретацией//Конференция "Гео-Евразия-2020", Москва, 03-06 февраля 2020г.

14. Анисимов Р.Г., Овчинников К.Р., Фиников Д.Б., Шалашников А.В. Анализ и коррекция эффектов частотно-зависимого поглощения в обработке данных сейсморазведки//Конференция «Сейсмика в Сибири и за её пределами», 14-17 ноября 2023г., Красноярск

15. Agudo Ò. С. et al. Acoustic full-waveform inversion in an elastic world //Geophysics. – 2018. – Т. 83. – №. 3. – С. R257-R271.

Подробнее об авторах



Анисимов
Руслан Гурьевич

Ведущий программист,
ООО «Сейсмотек».



Кунченко
Даниил Сергеевич

Геофизик,
ООО «Сейсмотек».



Овчинников
Кирилл Радиславович

Ведущий геофизик,
ООО «Сейсмотек».



Силаенков
Олег Александрович

Главный геофизик,
ООО «Сейсмотек».



Шалашников
Андрей Владимирович

Ведущий программист,
ООО «Сейсмотек».