

## Адекватная скоростная модель — основа эффективного построения сейсмических изображений при картировании ловушек углеводородов, связанных с соляными куполами

© А. Н. Тяпкина<sup>1</sup>, Ю. К. Тяпкин<sup>2</sup>, А. И. Окрепкий<sup>1</sup>, 2015

<sup>1</sup>Концерн Надра, Киев, Украина

<sup>2</sup>Науканафтогаз, НАК Нафтогаз Украины, Киев, Украина

Поступила 25 декабря 2013 г.

*Представлено членом редколлегии В. Н. Пилипенко*

Ця стаття є другою у серії оглядових робіт з використання сучасних методів міграції для отримання сейсмічних зображень в районах з інтенсивною соляною тектонікою. Показано важливість підбору адекватної швидкісної моделі для ефективної побудови сейсмічного зображення і подальшого картування пасток вуглеводнів, пов'язаних з соляними куполами. Для вирішення цього завдання успішно використано променеву томографію, сканування часових затримок зображення і повнохвильову інверсію. Відзначено важливість правильної оцінки та врахування анізотропії швидкостей в процесі побудови сейсмічних зображень, що продемонстровано на реальних сейсмічних матеріалах, отриманих у районах з інтенсивним галокінезом.

**Ключові слова:** приштокові пастки, сейсмічні зображення, сейсмічна міграція, глибинно-швидкісна модель, полярна анізотропія швидкості, азимутальна анізотропія швидкості.

**Введение.** Эта статья — вторая в серии обзорных работ по использованию современных методов миграции при построении сейсмических изображений для картирования ловушек углеводородов в районах с интенсивной соляной тектоникой. В первой статье [Тяпкина и др., 2014] были проанализированы разнообразные типы ловушек углеводородов, связанных с соляными куполами в Днепровско-Донецкой впадине. Кроме того, была дана классификация методов построения сейсмических изображений. На примерах из других седиментационных бассейнов были показаны преимущества миграции до суммирования, учета многолучевого распространения сейсмической энергии и использования обменных волн при построении изображений приштоковых объектов.

Данная статья демонстрирует важность выбора максимально реалистичной глубинно-скоростной модели среды для успешного построения сейсмических изображений. Особое внимание в ней уделено анизотропии сейсмических скоростей, без адекватного описания и уче-

та которой невозможно получить правильные сейсмические изображения в сложных тектонических условиях приштоковых зон.

**Подбор адекватной глубинно-скоростной модели.** Одним из основных условий успешного построения сейсмических изображений является правильно подобранная глубинно-скоростная модель. Однако соляные тела создают множество серьезных проблем на пути решения данной проблемы. Это связано с большим контрастом скорости на границе между солью и окружающими осадочными породами, а также со сложной формой поверхности соляных тел. Помимо изначально сложной конфигурации, поверхность соли может быть дополнительно усложнена процессами растворения и провалами. В результате на поверхности соли происходят сильные процессы преломления и рассеяния сейсмических волн, часто приводящие к слабой "освещенности" подстилающих соль границ. В свою очередь, скорости вокруг соляных диапиров могут быть подвержены значительным изменениям под воз-

действием процессов "всплывания" соли, образования тектонических нарушений и трещин, а также разнообразных химических реакций с участием соли и сопровождающих ее минералов [Leveille et al., 2011].

Перечисленные особенности являются причиной большого разнообразия технологических схем построения глубинно-скоростной модели в условиях интенсивной соляной тектоники. В качестве примера приведем перечень процедур, применяемых в процессе подбора скорости в Мексиканском заливе [Jones, 2008; Leveille et al., 2011].

1. Миграция в осадочных породах, перекрывающих и окружающих соль, со скоростью, определенной с помощью традиционных томографических методов.
2. Трассировка верхней границы соли (в том числе — навесов).
3. Распространение глубинно-скоростной модели под верхнюю границу соли в пределах ее флангов путем задания скорости в соли. При этом скорость в соли не обязательно должна быть постоянной, а может учитывать влияние включений, определенных в результате использования технологии "нечистой соли" (dirty salt) [Haugen et al., 2008].
4. Миграция с этой уточненной скоростной моделью. Иногда для более качественного изображения нижней кромки соли лучше использовать волны, испытавшие двойной обмен (PSSP) на верхней границе соляного тела [Stewart et al., 2003].
5. Трассировка основания и нависающих стенок соли.
6. Уточнение геометрии модели с включением соляного тела.
7. Миграция с новой скоростной моделью.
8. Повторение шагов 5—7 для всех нависающих участков соляного тела, если имеет место несколько таких объектов, напоминающих своим видом "новогоднюю елку".
9. Введение скорости в подсолевых осадочных породах.
10. Уточнение скорости в подсолевых осадках.

Необходимо отметить, что последний этап в данном перечне — самый сложный и ответственный за успешную реализацию всей технологии в целом.

Наиболее широко распространенной процедурой уточнения скорости под солью в настоящее время является лучевая томография [Woodward et al., 2008]. Результат применения этого метода представлен на рис. 1 [Wang et al., 2008; Leveille et al., 2011]. Использование томографии привело к понижению скорости не-

посредственно под соляным телом (более светлый фон изображения) и ее повышению на несколько большей глубине (более темный фон изображения). Это повышение хорошо согласуется с присутствием карбонатов в этой части разреза. Изображение подсолевой толщи с уточненной скоростью кардинально изменило свою структуру, а также качество фокусировки и прослеживаемости отражений.

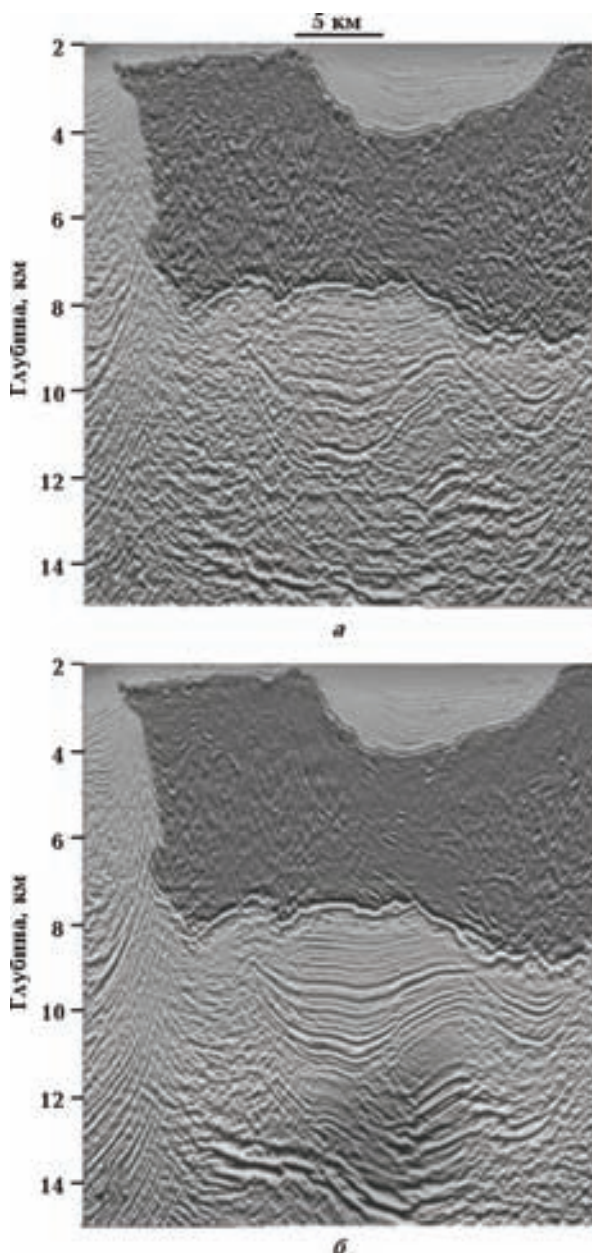


Рис. 1. Сейсмические изображения, полученные в Мексиканском заливе после применения миграции одностороннего волнового уравнения до (а) и после (б) уточнения скорости под солью с помощью лучевой томографии.

Классическая лучевая томография, несмотря на свою популярность, может оказаться неэффективной, когда невозможно надежно оценить остаточные кинематические сдвиги. Именно с такой ситуацией исследователям часто приходится сталкиваться при изучении подсолевых отложений. Здесь вследствие резкого преломления и рассеяния на вышележащей соли сейсмические волны могут резко снизить угловой диапазон своего распространения и, тем самым, породить плохое "освещение" границ и связанное с этим низкое отношение сигнал-помеха. В этом случае могут себя лучше зарекомендовать более грубые подходы, например методы сканирования возмущений скорости [Leveille et al., 2011].

Хотя во многих случаях такие методы демонстрируют достаточно высокую эффективность, компьютерные затраты на переборы скоростей остаются достаточно высокими из-за необходимости многократно повторять процедуру миграции. Для устранения этого недостатка был предложен и адаптирован к миграции в обратном времени метод уточнения скорости под солью, основанный на сканировании временных задержек изображения [Wang et al., 2009]. При таком подходе расчет взаимной корреляции результатов продолжения поля от источников и приемников выполняется не только при нулевой, но и при других временных задержках. В результате получается множество сканированных изображений при выполнении одной процедуры миграции, что сопровождается относительно небольшими дополнительными временными затратами. По этой причине обычно перебирается достаточно большое количество (до 21) временных задержек [Leveille et al., 2011].

На рис. 2 показаны сейсмические изображения, полученные с помощью миграции в обратном времени с различными временными задержками [Leveille et al., 2011]. Анализ этих изображений позволяет сделать вывод, что отражающие границы под соляным навесом наиболее уверенно прослеживаются при отрицательной задержке (-100 мс).

Еще один пример, демонстрирующий эффективность уточнения скорости в подсолевых отложениях с помощью сканирования временных задержек изображения, представлен на рис. 3 [Ma et al., 2011]. Здесь видно, что с уточненной скоростью удалось получить значительно более геологически интерпретируемое изображение под соляным козырьком.

Помимо рассмотренного случая плохой "освещенности" границ и низкого отношения сиг-

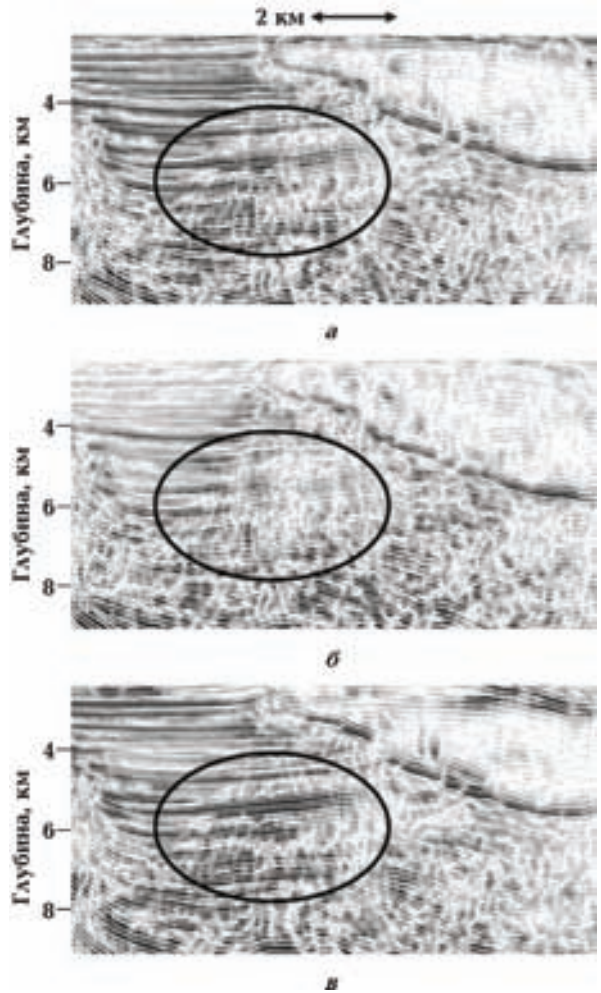


Рис. 2. Результаты миграции в обратном времени в Мексиканском заливе при различных временных задержках изображения: 0 мс (а), 100 мс (б) и -100 мс (в).

нал-помеха лучевая томография может быть неэффективной при резких вариациях скорости в пространстве, меньших по размеру одной зоны Френеля [Woodward et al., 2008]. В этой ситуации могут успешней себя проявить методы, лишенные упомянутого недостатка лучевых аналогов, например полноволновая инверсия [Vigh et al., 2011]. Хотя этот метод весьма сложный из-за нелинейности и неоднозначности решения, использование широкоазимутальных 3D наблюдений, приобретающих в последнее время все большую популярность, позволяет в значительной степени устранить это препятствие. Преимущество сейсмического изображения, полученного в Мексиканском заливе после уточнения скорости с помощью полноволновой инверсии, показано на рис. 4 [Vigh

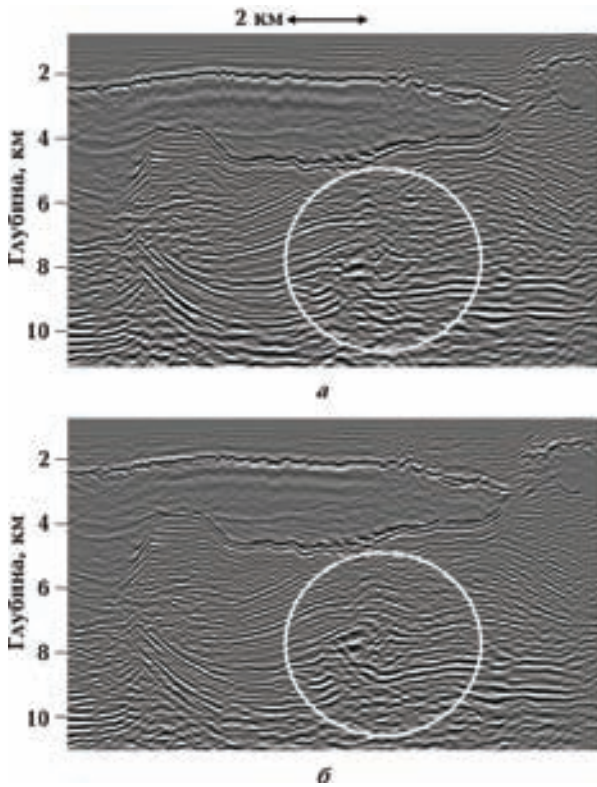


Рис. 3. Результаты миграции в обратном времени в Мексиканском заливе до (а) и после (б) уточнения скорости под солью с помощью сканирования временных задержек изображения.

et al., 2011]. Оно проявилось, в частности, в улучшении изображения южного фланга межсолевого “минибассейна” и подсолевой толщи.

Мы продемонстрировали важность подбора адекватной глубинно-скоростной модели для успешного построения сейсмических изображений только на примерах из Мексиканского залива. Поэтому целесообразно подчеркнуть, что каждый соленосный бассейн характеризуется своими особенностями. Различия в истории геологического развития и современном строении бассейнов требуют индивидуального подхода к методике подбора глубинно-скоростной модели. В качестве примера можно привести различие последовательности операций, выполняемых при построении скоростной модели в Мексиканском заливе и в бассейне Сантос, Бразилия [Huang et al., 2010].

**Учет анизотропии скоростей сейсмических волн.** Одним из важнейших свойств реальной геологической среды является анизотропия скорости (зависимость этой характеристики от угла распространения) сейсмических волн. Это явление связано с множеством при-

чин [Jones et al., 2003; Grechka, 2009], из которых две можно считать основными. Первая — упорядоченная (циклическая) тонкая слоистость, эффект от которой может быть дополнительно усилен в случае преимущественно глинистого характера разреза, поскольку глины сами по себе существенно анизотропны. Этому случаю соответствует полярная анизотропия, проявляющаяся в зависимости скорости от угла распространения волны относительно нормали к напластованию. Вторая причина — упорядоченная (периодическая в пространстве) трещи-

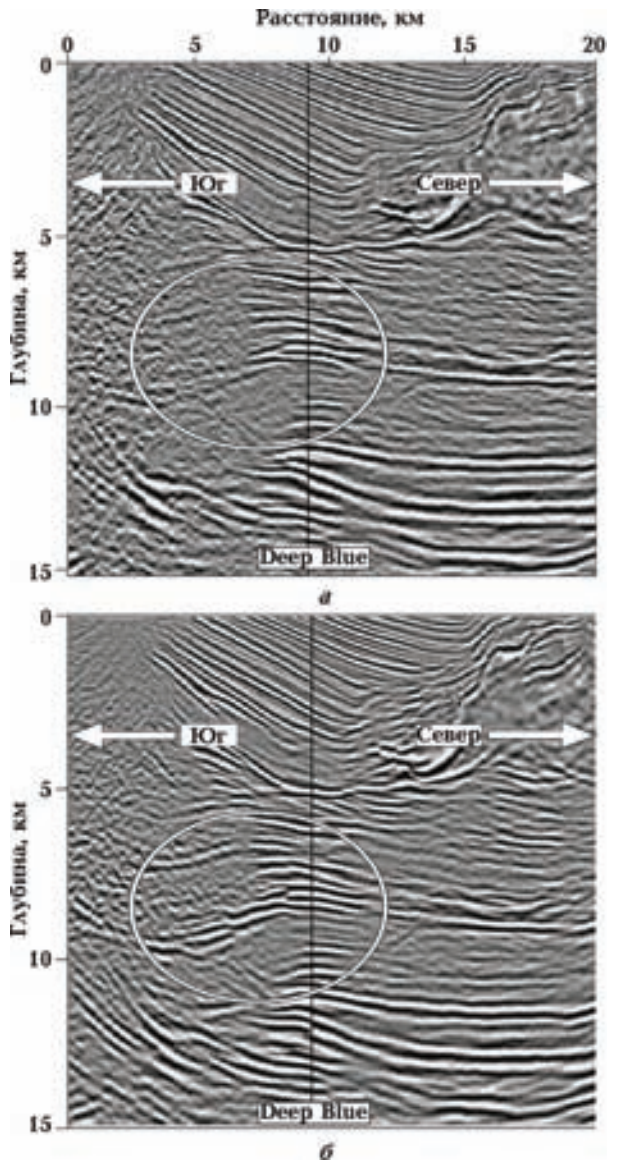


Рис. 4. Сейсмические изображения, полученные в Мексиканском заливе после уточнения скорости с помощью лучевой томографии (а) и полноволновой инверсии (б).

новатость, которая обычно наблюдается перпендикулярно напластованию. В этом случае возникает азимутальная анизотропия, проявляющаяся в зависимости скорости от азимута распространения волны относительно направления простирания системы трещин.

Важность учета анизотропии сейсмических скоростей уверенно осознается и убедительно демонстрируется геофизиками на многочисленных модельных и реальных материалах. Так, например, в интервью, данном журналу *The Leading Edge* (США) в октябре 2006 г., ведущие специалисты в области сейсмической анизотропии профессор Илья Цванкин (университет Colorado School of Mines, США) и доктор Владимир Гречка (компания Marathon, США) отметили, что все проекты глубинной 3D миграции в такой ведущей мировой компании, как Exxon-Mobil, уже выполняются исключительно с использованием анизотропных скоростных моделей.

**Полярная анизотропия.** Какие негативные последствия может породить игнорирование анизотропии скорости при построении сейсмических изображений? Продемонстрируем это на примере полярной анизотропии, порождаемой упорядоченной тонкой слоистостью.

1. Рассмотрим сначала горизонтальное залегание осадочной толщи. Такая среда успешно представляется трансверсально изотропной моделью с вертикальной осью симметрии (vertical transverse isotropy, VTI), анизотропия сейсмических скоростей в которой описывается двумя параметрами Томсена  $\delta$  и  $\epsilon$  [Thomsen, 1986; Grechka, 2009]. В этом случае скорость изотропной миграции, которая обычно получается из анализа скоростей суммирования (миграции), из-за влияния анизотропии отличается от вертикальной скорости или скорости, измеренной по данным сейсмического каротажа (checkshot velocity). По этой же причине скорость изотропной миграции отличается от скорости акустического каротажа, хотя это может быть вызвано и другими причинами.

Рис. 5 позволяет сопоставить скорости акустического каротажа в двух скважинах с соответствующими скоростями изотропной и анизотропной миграций сейсмических данных при морских исследованиях в Нигерии [Fruehn et al., 2007]. На этой площади целевой песчаный резервуар перекрыт глинистой толщей с ярко выраженной анизотропией скорости. В результате в пределах глинистого интервала наблюдается систематический сдвиг ( $\approx 10\%$ ) между скоростями изотропной миграции и акустического каротажа. Введение анизотропии позволи-

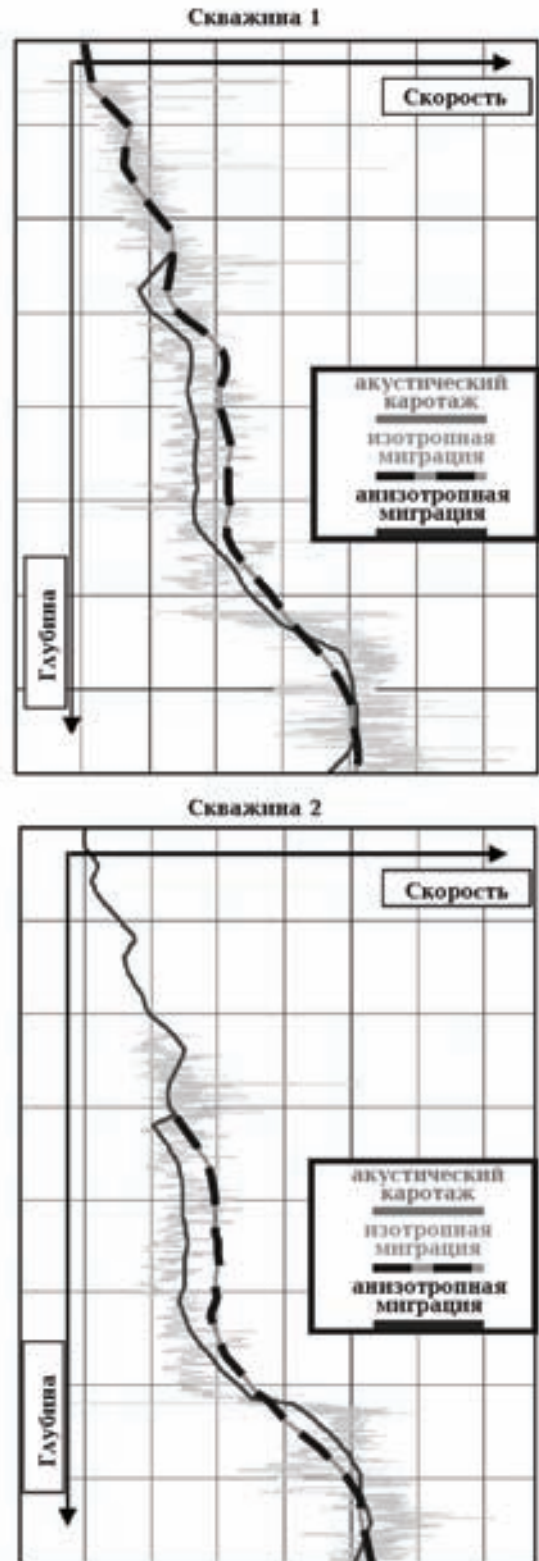


Рис. 5. Сопоставление скорости акустического каротажа в двух скважинах с соответствующими скоростями изотропной и анизотропной миграций сейсмических данных при морских исследованиях в Нигерии.

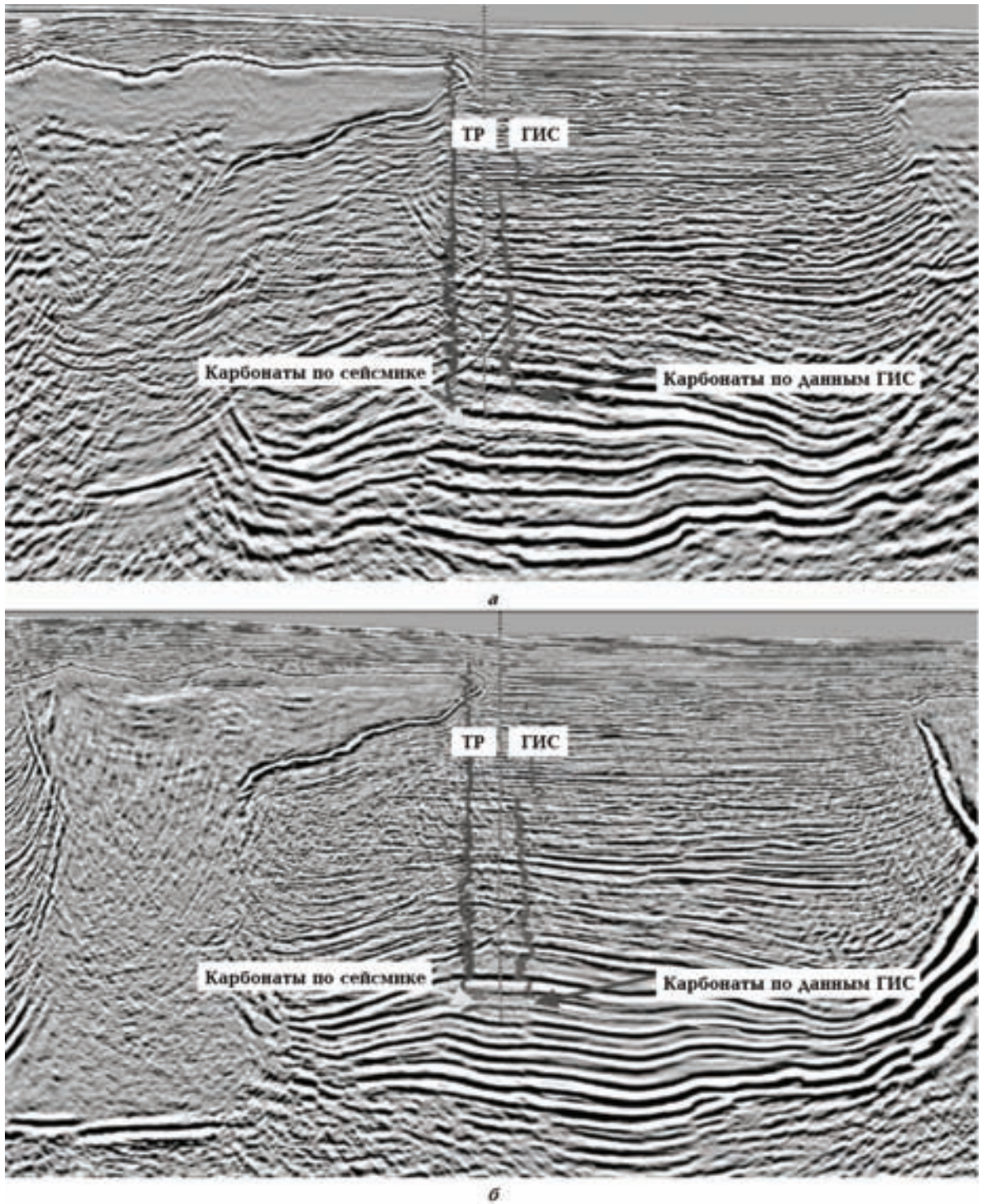


Рис. 6. Сейсмические изображения соляных штоков и окружающих осадочных пород в Прикаспийской впадине без учета (а) и с учетом (б) анизотропии скоростей. Для сравнения на изображение наложены одна из сейсмических трасс (ТР) и каротажная кривая (ГИС).

ло привести вертикальную скорость миграции в хорошее соответствие с данными акустического каротажа.

В результате отмеченного различия между истинной вертикальной скоростью и скоростью изотропной миграции изображения горизонтальной скорости миграции

зонтов могут занимать неправильное положение по глубине [Vestrum, 2002]. Обычно они изображаются глубже своего истинного положения, поскольку скорость суммирования часто превышает истинную вертикальную скорость [Grechka, 2009].

Этот эффект убедительно демонстрирует рис. 6 на материалах из Прикаспийской впадины [Банников и др., 2009]. На рисунке видно ощутимое различие в глубинном положении целевых карбонатных отложений в межкупольном пространстве на результатах изотропной миграции и каротажной диаграмме. Учет анизотропии скоростей позволил успешно устранить этот недостаток сейсмического изображения.

Однако неправильное позиционирование горизонтов при субвертикальной оси симметрии анизотропии является значительно менее серьезной проблемой, чем искажения, вызванные существенным наклоном этой оси. (Заметим, что такая ситуация порождается наклонным залеганием толщи и хорошо описывается трансверсально изотропной моделью с наклонной осью симметрии (tilted transverse isotropy, ТТИ) и теми же параметрами Томсена.) Дело в том, что при вертикальном направлении оси искомый объект фактически может быть встречен на меньшей глубине, что будет просто приятной нежиз-

данностью для разведчиков недр. При наклонной оси картина усложняется, и изображение искомого объекта может быть дополнительно значительно смещено по латерали относительно истинного положения. В этом случае поисковая или разведочная скважина может просто промахнуться.

Возникновение значительных латеральных и вертикальных смещений сейсмических изображений объектов относительно их истинного положения при игнорировании анизотропии с наклонной осью симметрии демонстрируется во многих работах (например, [Vestrum et al., 1999; Isaac, Lawton, 1999, 2002; Isaac, Lines, 2002; Vestrum, Vermeulen, 2004; Мармалевский та ін., 2005; Zhang, Zhang, 2008]) с использованием физического и математического моделирования.

На рис. 7 изображена глубинно-скоростная модель, использованная для оценки влияния анизотропии сейсмических скоростей с наклонной осью симметрии на изображение Тарасовского соляного штока и окружающих его осадков в Днепровско-Донецкой впадине [Мармалевский та ін., 2005]. Скорость в соли и перекрывающей осадочной толще предполагается анизотропной и описывается параметрами Томсена, представленными на рисунке. Эти пара-

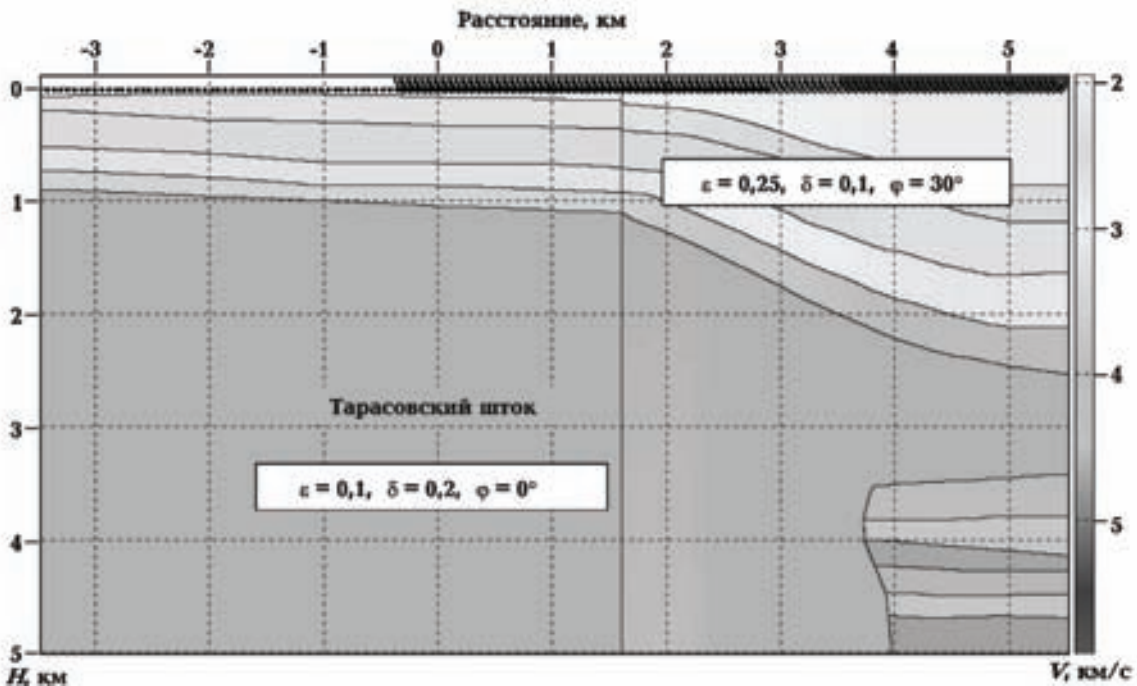


Рис. 7. Анизотропная глубинно-скоростная модель вдоль разреза, пересекающего Тарасовский шток в Днепровско-Донецкой впадине.

метры получены в результате обработки материалов азимутального трехкомпонентного ВСП в одной из скважин на площади. Перекрывающие соль осадки в правой части разреза характеризуются наклонной осью симметрии анизотропии ( $\varphi = 30^\circ$ ), а сама соль — вертикальной осью ( $\varphi = 0^\circ$ ).

Представленная на рис. 7 модель послужила основой для конечно-разностного расчета синтетических сейсмограмм с помощью канадского пакета Tesserai-2D, которые затем использовались для получения сейсмических изображений с учетом и без учета анизотропии скоростей (рис. 8) [Мармалевский та ін., 2005]. В случае изотропной миграции использовались вертикальные скорости в соответствующих пластах. Сейсмическое изображение на рис. 8, построенное с учетом анизотропии, почти полностью соответствует модели. В то же время изображение, игнорирующее анизотропию, характеризуется большими искажениями относительно модели как по вертикали, так и по латерали. Ложные смещения границ особенно сильны под соляным козырьком, что весьма критично для успешных поисков и разведки ловушек углеводородов, экранированных такими частями соляных тел [Тяпкина и др., 2014].

2. Рассмотрим простейший случай вертикальной оси симметрии анизотропии и предположим, что используется правильная вертикальная скорость, позволяющая выполнить правильное позиционирование объектов. Однако даже в такой ситуации изображение может быть плохо сфокусировано, поскольку вертикальная скорость отличается от скорости суммирования и поэтому суммирование сигналов осуществляется несинфазно [Grechka, 2009]. В результате понижается отношение сигнал-помеха и изображение теряет разрешенность, становясь более "размытым".

Синтетические примеры, демонстрирующие "размазывание" изображений из-за плохой фокусировки, вызванной игнорированием анизотропии с наклонной осью симметрии, приведены в работе [Vestrum, Vermeulen, 2004].

Результат более синфазного суммирования сигналов при получении сейсмического изображения демонстрируется на рис. 9, где отчетливо видна улучшенная фокусировка крутонаклоненных отражающих границ и стенки соляного штока после анизотропной миграции [Gray et al., 2006]. Причина такого результата становится понятной после сопоставления приведенных на этом же рисунке наборов трасс общего изображения в угловой области (angle doma-

in common image gathers), полученных без учета и с учетом анизотропии скоростей. После изотропной миграции видно типичное поведение

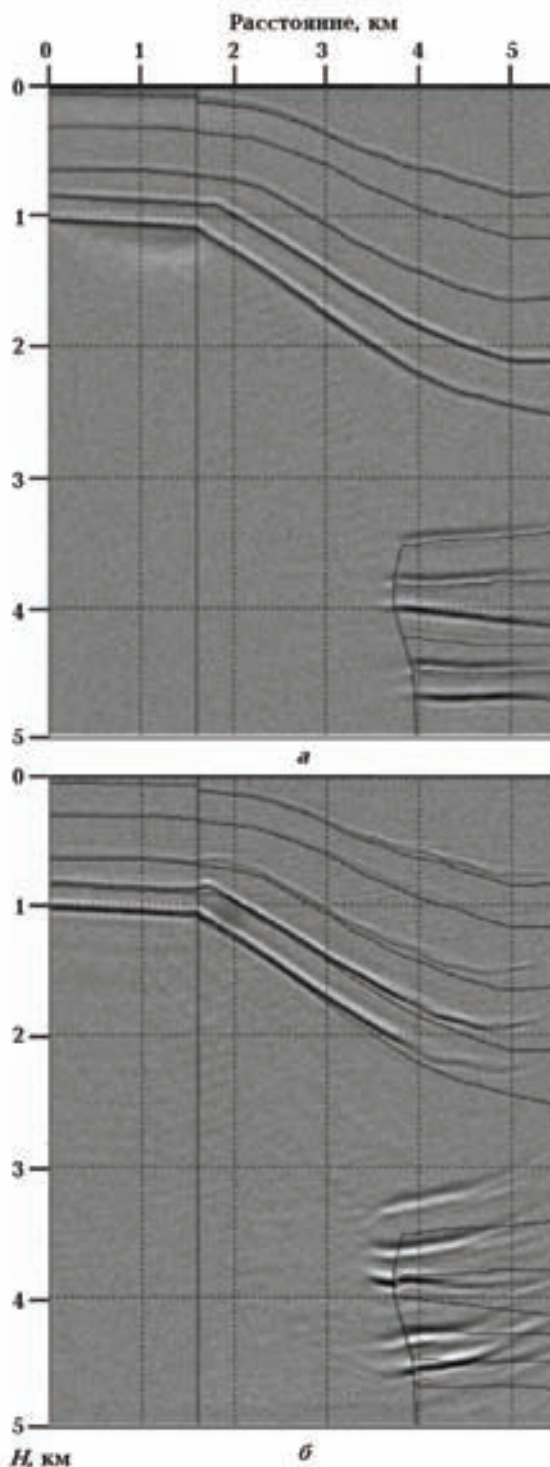


Рис. 8. Сейсмические изображения, полученные с учетом (а) и без учета (б) анизотропии скоростей по синтетическим данным, соответствующим модели, изображенной на рис. 7.



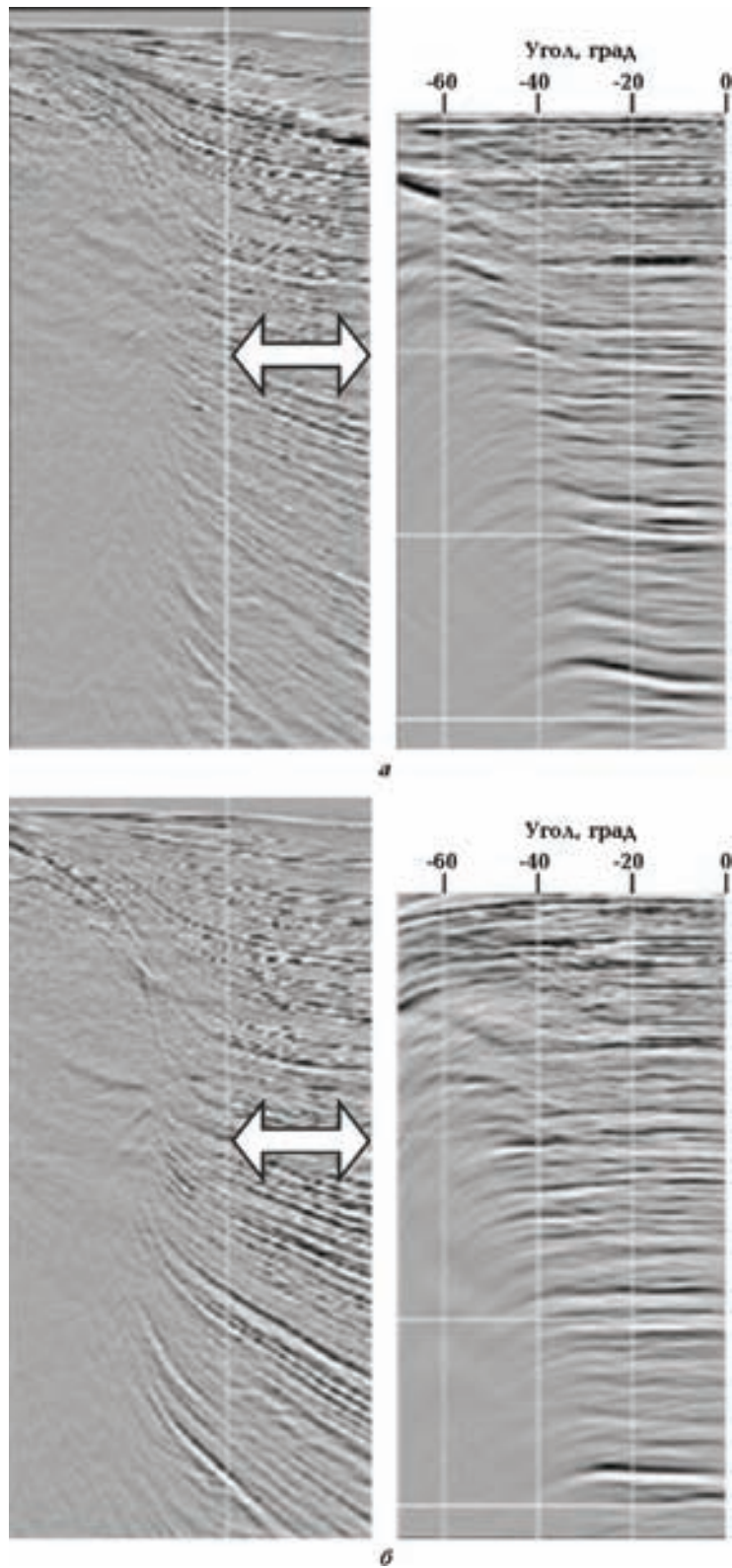


Рис. 9. Сейсмические изображения одной из приштоковых зон, полученные в результате изотропной (а) и анизотропной (б) миграции на основе одно-стороннего волнового уравнения. Слева приведены окончательные сейсмические изображения, а справа — наборы трасс общего изображения в угловой области для точки профиля, обозначенной белой вертикальной линией.

набора трасс общего изображения, напоминающее хоккейную клюшку, в то время как результат анизотропной миграции демонстрирует значительно более выровненные во времени отражения.

Другим примером, демонстрирующим повышение отношения сигнал-помеха и разрешенности сейсмического изображения после учета анизотропии скоростей, может служить уже представленный рис. 6. Здесь видно, как в результате анизотропной миграции кардинально улучшилось изображение отражающих границ в приштоковых и межштоковых областях.

3. Волновые фронты традиционных *P*-волн под влиянием анизотропии могут отклоняться не только от сферы, но и от эллипсоида. Это означает, что изотропная миграция в принципе не может адекватно изобразить различные наклоны на одном и том же разрезе, поскольку изображение этих наклонов требует различные изотропные скорости. Поскольку на разрезах обычно присутствуют конфликтные наклоны (например, пересечения отражений и нарушений, выклинивания горизонтов, перерывы отражений у границ соляных тел и т. д.), их изображения могут оказаться смещенными относительно друг друга. В результате это может привести к неправильной интерпретации сейсмических данных [Grechka, 2009].

Примером, подтверждающим преимущество анизотропной миграции в таких случаях, может служить тот же рис. 6. Здесь видно, что учет анизотропии скоростей привел к значительному упрощению изображения приштоковых зон, сделав их более геологически интерпретируемыми, а также позволил получить значительно более выразительные изображения границ штоков.

Поскольку полярная анизотропия сейсмических скоростей порождается упорядоченной тонкой слоистостью, наклон оси симметрии анизотропии в процессе миграции должен соответствовать наклону отражающих границ. Использование анизотропных моделей с вертикальной осью симметрии при существенно наклонном залегании слоев может значительно понизить эффективность процедур построения сейсмических изображений [Huang, Yu, 2009; Bowling et al., 2010; Epili et al., 2011; Ma et al., 2011; Reta-Tang et al., 2011; Swanston et al., 2011; Zhang et al., 2011; Zhou et al., 2011]. Это демонстрируется на рис. 10, где видно, что в результате миграции с неадекватной моделью скоростной анизотропии, предполагающей вертикальную ось симметрии, под соляным козырьком возника-

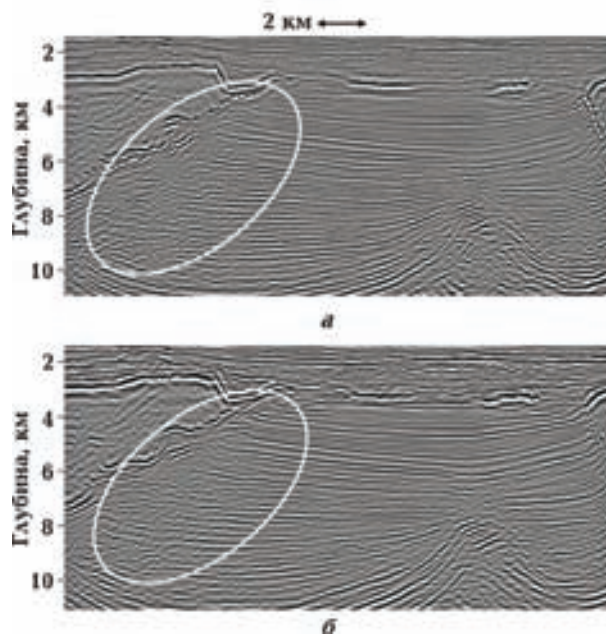


Рис. 10. Сейсмические изображения, полученные в Мексиканском заливе после применения миграции в обратном времени с VTI (а) и TTI (б) моделью скоростной анизотропии.

ет зона тени [Ma et al., 2011]. Согласование направления оси анизотропии с наклоном отражающих границ позволило успешно устранить этот недостаток и значительно четче изобразить отражающие границы под козырьком и их перерывы возле кромки соли.

Преимущество TTI над VTI моделью при наклонном залегании осадочной толщи показано также на рис. 11 [Zhang et al., 2011]. В этом случае использование более реалистичной модели анизотропии сейсмических скоростей позволило повысить качество изображения крутонаклоненной стенки соляного штока и отражающих границ под межштоковым "минибассейном".

Однако даже более совершенная TTI модель в некоторых случаях является недостаточно адекватной для эффективного описания анизотропии сейсмических скоростей и построения сейсмических изображений в приштоковых зонах. В таких ситуациях она требует дальнейшего усложнения и усовершенствования.

**Сочетание полярной и азимутальной анизотропии.** В последнее время в связи с возрастающим использованием широко- или даже полноазимутальных 3D наблюдений при изучении приштоковых зон появилась необходимость учета не только полярной, но и азимутальной анизотропии скоростей. Ее причину

связывают с упорядоченной системой радиальных субвертикальных трещин и разломов, порождаемых во вмещающих породах ростом соляных диапиров. В пользу такого механизма возникновения азимутальной анизотропии скорости говорят следующие факты. Во-первых, волны с относительно повышенной скоростью, почти нечувствительные к влиянию упорядоченной трещиноватости, как правило, распространяются нормально к границам соли и параллельно радиальным нарушениям сплошности пород [Dewey et al., 2006; Shen et al., 2012; Thomas et al., 2012; He et al., 2013; Wu et al., 2013]. В свою очередь волны с относительно низкой скоростью, чувствительные к присутствию трещин, распространяются параллельно флангам соли и перпендикулярно нарушениям. Во-вторых, степень азимутальной анизотропии, харак-

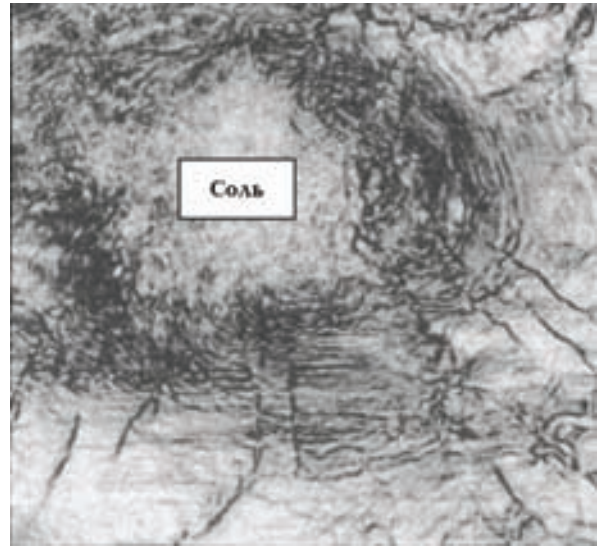


Рис. 12. Горизонтальный срез куба когерентности сейсмического изображения, демонстрирующий соляной шток и окружающие его радиальные нарушения.

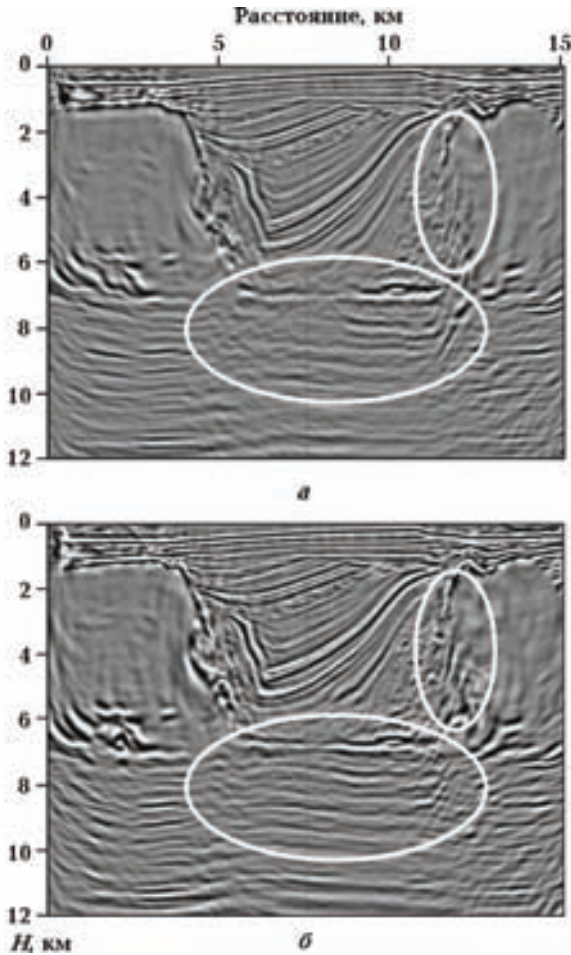


Рис. 11. Сейсмические изображения, полученные в Мексиканском заливе после применения миграции в обратном времени с VTI (а) и TTI (б) моделью скоростной анизотропии.

теризующаяся относительной разницей скоростей "быстрых" и "медленных" волн, возрастает по мере приближения к границам соляного тела [Shen et al., 2012].

Рис. 12 демонстрирует множество радиальных нарушений вокруг соляного штока, хорошо видимых на горизонтальном срезе куба когерентности сейсмического изображения [Gersztenkorn, Marfurt, 1999]. Как правило, вблизи соляного тела они ортогональны контуру диапира. По мере удаления от границы соли некоторые нарушения сильно искривляются, значительно отклоняясь от первоначально радиального направления. Такое поведение нарушений вокруг соляных штоков отмечается и на других площадях [Thomas et al., 2012; He et al., 2013].

Напомним, что однородная среда, нарушенная системой упорядоченных вертикальных трещин, успешно представляется трансверсально изотропной моделью с горизонтальной осью симметрии (horizontal transverse isotropy, HTI) и соответствующими параметрами Томсена [Thomsen, 1995]. В свою очередь, свойственным окрестностям соляных штоков сочетание тонкой слоистости осадочной толщи с упорядоченной системой вертикальных трещин, параллельных падению пород, порождает более сложную анизотропию скоростей, хорошо описываемую орторомбической моделью [Grechka, 2009]. Пространственная ориентация трех плоскостей сим-

метрии такой анизотропии определяется азимутом падения и наклоном осадочных пород.

Орторомбическая модель описывается большим количеством параметров, чем сумма параметров соответствующих НТИ и ТТИ моделей. Поэтому оценка параметров наклонной орторомбической (tilted orthorhombic, T-ORT) глубинно-скоростной модели является серьезной и трудоемкой задачей [Birdus et al., 2012], которая не всегда решается устойчиво [Jenner, 2012]. Однако без ее успешного решения изображения крутонаклоненных стенок штоков и прилегающих границ, а также разломов в окрестности штоков, могут быть сильно искажены. Это же относится к привязке сейсмических изображений к скважинам. Продемонстрируем преимущество орторомбической модели анизотропии на следующих примерах.

Рис. 13 позволяет сопоставить изображения кровли одного из соляных тел в Мексиканском заливе, полученные с использованием скоростных моделей ТТИ и T-ORT [Thomas et al., 2012]. После миграции с орторомбической моделью

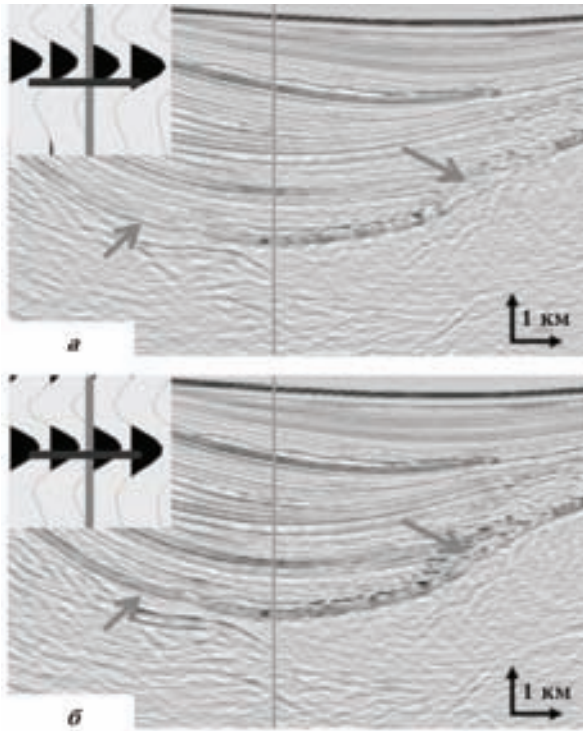


Рис. 13. Сейсмические изображения, полученные со скоростными моделями ТТИ (а) и T-ORT (б) в Мексиканском заливе. Траектория скважины обозначена вертикальной линией. Отклонения обоих изображений от маркера кровли соли в скважине (горизонтальная линия) показаны в увеличенном масштабе. Они равны 20 и 8 м после миграций с моделями ТТИ и T-ORT соответственно.

изображение кровли соли становится более резким, а также лучше прослеживается на склонах и под нарушенной разломами зоной. После миграций с моделями ТТИ и T-ORT ошибки привязки изображений к скважине составляют 20 и 8 м соответственно. Это свидетельствует о лучшем соответствии наклонной орторомбической модели реальному поведению скорости в перекрывающих соль осадках.

На этой же площади обе рассмотренные модели скоростной анизотропии использовались при построении изображений подсолевых и межсолевых отражающих границ [Thomas et al., 2012]. Результаты миграции в обратном времени для двух типов анизотропии представлены на рис. 14 в двух ортогональных направлениях. Благодаря использованию более реалистичной орторомбической модели анизотропии скоростей удалось достичь лучшей фокусировки и прослеживаемости отражающих границ как под соляным козырьком, так и в межсолевом пространстве, интенсивно нарушенном разломами.

Еще один пример, позволяющий сопоставить эффективность использования ТТИ и T-ORT моделей скоростной анизотропии при построении сейсмических изображений на другом участке в Мексиканском заливе, демонстрирует рис. 15 [Wu et al., 2013]. Как и в предыдущем случае, миграция в обратном времени с более реалистичной орторомбической моделью скоростной анизотропии позволила значительно улучшить качество сейсмического изображения в целом. В частности, это проявилось в

- лучшей фокусировке и прослеживаемости верхней границы соляного козырька, особенно при крутых наклонах;
- упрощении структуры нижней границы соляного козырька (она стала более монотонной);
- лучшей фокусировке и прослеживаемости подсолевых отражающих границ.

В заключение следует также отметить специфическое влияние системы упорядоченных трещин на сейсмические изображения, полученные с помощью обменных (PS) волн. Эти волны все более широко используются на практике, поскольку они позволяют решать важные задачи, с которыми "чистые" P-волны справиться не могут [Stewart et al., 2003]. Если S-волна, образованная в результате обмена на границе, проникает в зону упорядоченной трещиноватости и вектор ее поляризации не параллелен и не перпендикулярен плоскости трещин, она расщепляется на две составляющие

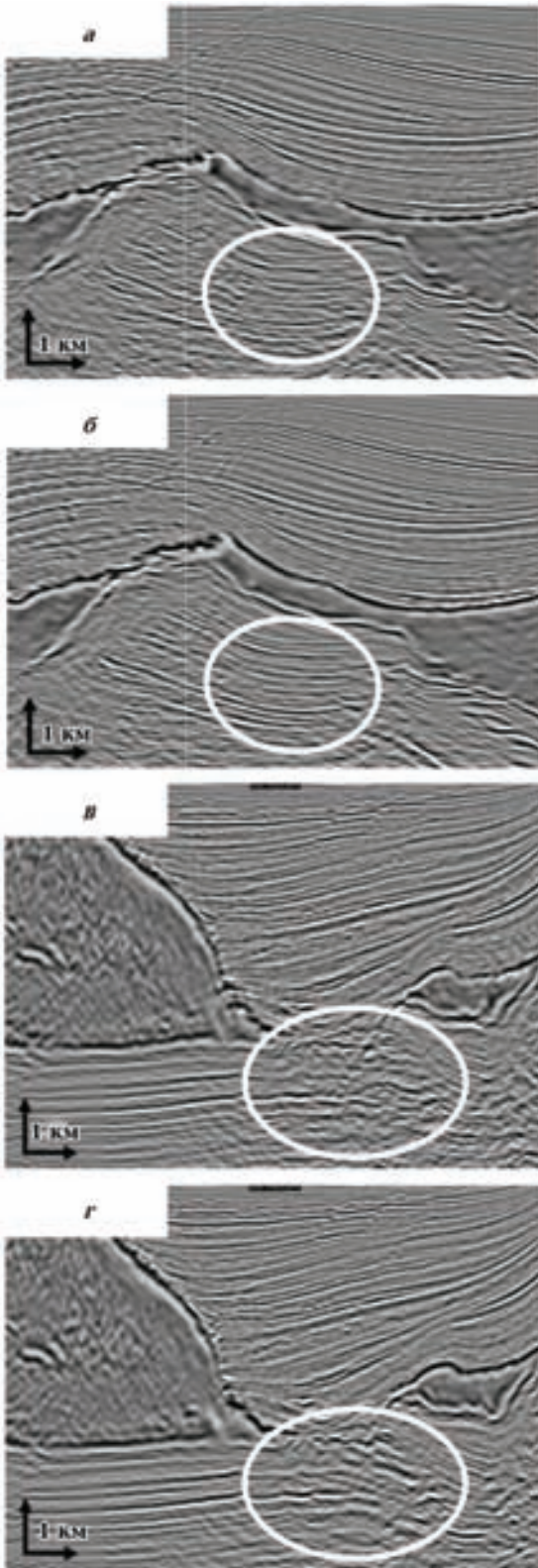


Рис. 14. Результаты миграции в обратном времени в Мексиканском заливе в направлении инлайн со скоростными моделями ТП1 (а) и Т-ОРТ (б) и в направлении кросслайн со скоростными моделями ТП1 (в) и Т-ОРТ (г). Соль обозначена более темным цветом.

— быструю и медленную [Martin, Davis, 1987]. При этом быстрая волна поляризована в плоскости, параллельной трещинам, а медленная — перпендикулярно ей. Поскольку быстрая  $S$ -волна почти нечувствительна к присутствию трещин, целесообразно использовать ее, а не радиальную компоненту для построения сейсмических изображений с помощью  $PS$ -волн. Такой подход устраняет искажающее влияние азимутальной зависимости скорости в каждой точке [Loinger et al., 2002] и тем самым дополнительно снижает пространственные вариации скоростной модели. Изображения на быстрой  $PS$ -волне в результате лучшей фокусировки ха-

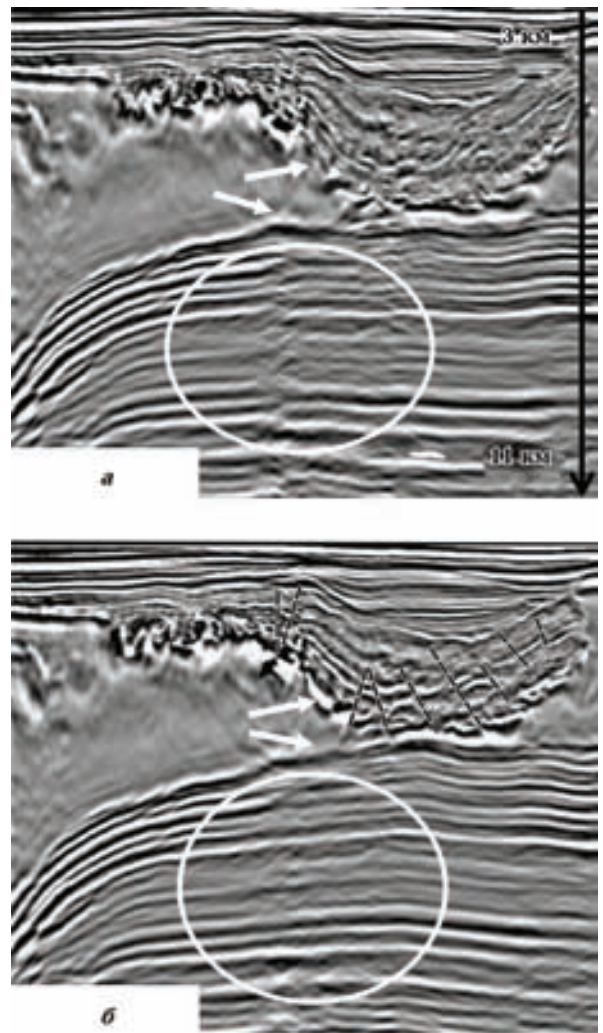


Рис. 15. Сейсмические изображения, полученные со скоростными моделями ТП1 (а) и Т-ОРТ (б) в Мексиканском заливе. Черными пунктирными линиями обозначены тектонические нарушения, а стрелками и эллипсом — места улучшения изображения после миграции с Т-ОРТ скоростной моделью.

рактируются более высоким разрешением и отношением сигнал-помеха [Granger, Bonnot, 2001; Statilo et al., 2012]. Кроме того, при таком подходе снижаются пространственные вариации амплитуд отражений, зависящие от ориентации системы наблюдения относительно направления простирания трещин [Mueller, 1992; Grechka, 2009].

**Выводы.** Надежное картирование различных типов ловушек углеводородов, связанных с соляными телами, невозможно без построения адекватных сейсмических изображений. Успех этой операции зависит, в частности, от правильного подбора скоростной модели. Наиболее распространенным методом построения скоростной модели в настоящее время является лучевая томография. Однако в условиях плохой "освещенности" границ и низкого отношения сигнал-помеха в подсолевой толще иногда лучше работают методы, основанные на сканировании скоростей и временных задержек изображения, а при резких скоростных вариациях, связанных с присутствием соли, — методы, основанные на полноволновой инверсии.

Важную роль при построении сейсмических изображений играет оценка и учет анизотропии скоростей. Игнорирование или неправильный учет этого феномена порождает

- ложные вертикальные и горизонтальные сдвиги изображения объектов относительно их истинного положения;
- плохую фокусировку изображения, приводящую к его "размазыванию" по вертикали и горизонтали;
- ложные взаимные сдвиги отражений с различными наклонами.

Для описания и последующего учета анизотропии, порожденной упорядоченной тонкой слоистостью, в настоящее время наиболее широко используется трансверсально изотропная модель с наклонной осью симметрии, соответствующей наклону осадочной толщи. Однако специфическая трещиноватость пород, окружающих соляные диапиры, послужила причиной дальнейшего усовершенствования и усложнения модели скоростной анизотропии. В результате на практике в последнее время все более широко стала применяться модель с орторомбической симметрией. Это продемонстрировано на реальных сейсмических материалах, полученных в районах, осложненных интенсивной соляной тектоникой.

*Авторы выражают глубокую благодарность Н.Я. Мармалевскому и Ю.В. Роганову за консультации и полезные советы, способствовавшие повышению качества данной статьи.*

## Список литературы

- Банников Г.А., Беннион П., Гейгер Л., Увайтсайг У., Ху В., Ли Ж., Ланди А., Чанг И. Анизотропная глубинная миграция с использованием томографии для оптимизации скоростной модели: *Материалы II Международ. геолого-геофиз. конф. и выставки "Тюмень-2009"*. Тюмень, 2009.
- Мармалевский Н.Я., Роганов Ю.В., Горняк З.В., Мерцуй В.В., Костюкевич А.С., Газарян З.И. Ідеї Ю.В. Тимошина та нові дифракційні перетворення. *Збірник наукових праць УкрДГРІ*. 2005. №3. С. 43—63.
- Тяпкина А.Н., Тяпкин Ю.К., Окрепкий А.И. Усовершенствованные методы построения сейсмических изображений при картировании ловушек углеводородов, связанных с соляными куполами. *Геофиз. журн.* 2014. Т. 36. № 3. С. 57—74.
- Birdus S., Sun J., Sun W., Xie Y., Gazzoli M., Andreolli M., Ursulic A., 2012. Multi-azimuth PSDM processing in the presence of orthorhombic anisotropy — A case history offshore North West Australia. 82<sup>nd</sup> SEG Meeting: Expanded Abstracts. 1—5.
- Bowling J., Ji S., Lin D., Chergotis D., Nolte B., Yanchak D., 2010. Mad Dog TTI RTM: better than expected. 80<sup>th</sup> SEG Meeting: Expanded Abstracts. 3113—3116.
- Dewey F., Van der Meulen M., Whitfield P., 2006. Using dual-azimuth data to image below salt domes. *First Break* 24(6), 55—59.
- Epile D., Cloudy G., Cai J., Zhang Q., Camp R., Lopez-Mora S., 2011. Improved subsalt imaging using TTI anisotropy and reverse time migration scans. 81<sup>st</sup> SEG Meeting: Expanded Abstracts. 243—247.
- Fruehn J.K., Arnaud J., Cha G., Akinmusire T., 2007. Anisotropic 3D PreSDM offshore Nigeria. 69<sup>th</sup> EAGE Conference: Expanded Abstracts. Paper CO42.
- Gersztenkorn A., Marfurt K.J., 1999. Eigenstructure-based coherence computations as an aid to 3D-structural and stratigraphic mapping. *Geophysics* 64(5), 1468—1479.
- Granger P.-I., Bonnot J.-M., 2001. C-wave resolution enhancement through birefringence com-

- pensation at the Valhall field. 63<sup>rd</sup> EAGE Conference: Expanded Abstracts. Paper P118.
- Gray S., Trad D., Biondi B., Lines L., 2006. Towards wave-equation imaging and velocity estimation. *CSEG Recorder* (Special Edition), 47—53.
- Grechka V., 2009. Applications of seismic anisotropy in the oil and gas industry. Houten: EAGE Publ., 171 p.
- Haugen J.A., Arntsen B., Mispel J., 2008. Modeling of dirty salt. 78 SEG Meeting: Expanded Abstracts. 2127—2131.
- He Y., Gersztenkorn A., Hilburn G., Yang S., Wang B., 2013. Orthorhombic PSDM processing, a case history in Mississippi Canyon, Gulf of Mexico. 83<sup>rd</sup> SEG Meeting: Expanded Abstracts. P. 3799—3803.
- Huang T., Yu B., 2009. Unlocking the potential of WAZ data at the Tonga Discovery with TTI reverse time migration. 79<sup>th</sup> SEG Meeting: Expanded Abstracts. 532—536.
- Huang Y., Lin D., Bai B., Roby S., Ricardez C., 2010. Challenges in presalt depth imaging of the deep-water Santos Basin, Brazil. *The Leading Edge* 29 (7), 820—825.
- Isaac J.H., Lawton D.C., 1999. Image mispositioning due to dipping TI media: A physical seismic modeling study. *Geophysics* 64 (4), 1230—1238.
- Isaac J.H., Lawton D.C., 2002. Image mispositioning in Foothills seismic data due to a dipping transversely isotropic overburden: Implications from physical seismic modeling studies. *CSEG Recorder* (3), 34—38.
- Isaac J.H., Lines L.R., 2002. Where's the reef? *CSEG Recorder* (3), 30—32.
- Jenner E., 2012. Combining VTI and HTI anisotropy in prestack time migration: Workflow and data examples. *The Leading Edge* 31 (7), 732—739.
- Jones I.F., Bridson M.L., Bernitsas N., 2003. Anisotropic ambiguities in TI media. *First Break* 21 (4), 31—37.
- Jones I.F., 2008. A modeling study of pre-processing considerations for reverse-time migration. *Geophysics* 73 (6), T99—T106.
- Leveille J.P., Jones I.F., Zhou Z.-Z., Wang B., Liu F., 2011. Subsalt imaging for exploration, production, and development: A review. *Geophysics* 76 (5), WB3—WB20.
- Loinger E., Gaiser J.E., Lucini A., Prestori M., Walters R., 2002. 3D/4C Emilio-azimuth processing for anisotropy analysis. 64 EAGE Conference: Expanded Abstracts. Paper F-23.
- Ma X., Wang B., Reta-Tang C., Whiteside W., Li Z., 2011. Enhanced prestack depth imaging of wide-azimuth data from the Gulf of Mexico: A case history. *Geophysics* 76 (5), WB79—WB86.
- Martin M.A., Davis T.L., 1987. Shear-wave birefringence: A new tool for evaluating fractured reservoirs. *The Leading Edge* 6 (1), 22—28.
- Mueller M.C., 1992. Using shear waves to predict lateral variability in vertical fracture intensity. *The Leading Edge* 11 (2), 29—35.
- Reta-Tang C., Simmons J., Whiteside W., Cai J., Camp R., He Y., 2011. A case study: improved subsalt imaging through TTI model building and imaging of a WAZ survey in the Gulf of Mexico. 81<sup>st</sup> SEG Meeting: Expanded Abstracts. 3943—3947.
- Shatilo A.P., Bansal R., Hefti J., Rochette C., 2012. Piceance 3C 3D survey — processing of converted-wave data in an area with azimuthal anisotropy. 74<sup>th</sup> EAGE Conference: Expanded Abstracts. Paper AO39.
- Shen H., Chen G., Li T., 2012. Salt emplacement-induced azimuthal anisotropy in Garden Banks, Gulf of Mexico. 82<sup>nd</sup> SEG Meeting: Expanded Abstracts. 1—5.
- Stewart R.R., Gaiser J.E., Brown R.J., Lawton D.C., 2003. Converted-wave seismic exploration: Applications. *Geophysics* 68 (1), 40—57.
- Swanston A.M., Mathias M.D., Barker C.A., 2011. Wide-azimuth TTI imaging at Tahiti: Reducing structural uncertainty of a major deepwater subsalt field. *Geophysics* 76 (5), WB67—WB78.
- Thomas M., Mothi S., McGill P., 2012. Improving subsalt images using tilted-orthorhombic RTM in Green Canyon, Gulf of Mexico. 82<sup>nd</sup> SEG Meeting: Expanded Abstracts. 1—5.
- Thomsen L., 1995. Elastic anisotropy due to aligned cracks in porous rock. *Geophys. Prosp.* 43 (6), 805—829.
- Thomsen L., 1986. Weak elastic anisotropy. *Geophysics* 51 (10), 1954—1966.
- Vestrum R., 2002. 2D and 3D anisotropic depth migration case histories. *CSEG Recorder* (5), 31—32.
- Vestrum R.W., Lawton D.C., Schmid R., 1999. Imaging structures below dipping TI media. *Geophysics* 64 (4), 1239—1246.
- Vestrum R., Vermeulen P., 2004. Sideslip and smear beneath dipping transversely isotropic strata. 74<sup>th</sup> SEG Meeting: Expanded Abstracts. 175—178.

- Vigh D., Kapoor J., Moldoveanu N., Li H., 2011. Breakthrough acquisition and technologies for subsalt imaging. *Geophysics* 76 (5), WB41—WB51.
- Wang B., Kim Y., Mason C., Zeng X., 2008. Advances in velocity model-building technology for subsalt imaging. *Geophysics* 73 (5), VE173—VE181.
- Wang B., Mason C., Guo M., Yoon K., Cai J., Ji J., Li Z., 2009. Subsalt velocity update and composite imaging using reverse-time migration based delayed-imaging-time scan. *Geophysics* 74 (6), WCA159—WCA167.
- Woodward M., Nichols D., Zdraveva O., Whitfield P., Johns T., 2008. A decade of tomography. *Geophysics* 73 (5), VE5—VE11.
- Wu Q., Li Y., Li Z., 2013. Improved subsalt imaging of full azimuth data with tilted orthorhombic PSDM. 83<sup>rd</sup> SEG Meeting: Expanded Abstracts. 3810—3814.
- Zhang H., Zhang Y., 2008. Reverse time migration in 3D heterogeneous TTI media. 78<sup>th</sup> SEG Meeting: Expanded Abstracts. 2196—2200.
- Zhang Y., Zhang H., Zhang G., 2011. A stable TTI reverse time migration and its implementation. *Geophysics* 76 (3), WA3—WA11.
- Zhou Z.-Z., Howard M., Mifflin C., 2011. Use of RTM full 3D subsurface angle gathers for subsalt velocity update and image optimization: Case study at Shenzi field. *Geophysics* 76 (5), WB27—WB39.

## Adequate velocity model as a basis for effective seismic imaging when mapping hydrocarbon traps associated with salt domes

© O. M. Тiapkina, Y. K. Tyapkin, O. I. Okrepkyj, 2015

This paper is the second one in a series of tutorials on the usage of modern migration methods for seismic imaging in areas of intense salt tectonics. In the paper, it is shown the importance of building an adequate velocity model for effective seismic imaging and subsequent mapping of hydrocarbon traps associated with salt domes. To solve this problem, ray-based tomography, delayed imaging time scans and full waveform inversion are successfully used. Moreover, the paper shows the importance of evaluating properly and taking into account velocity anisotropy when making seismic images. This is demonstrated with real seismic data obtained in areas of heavy halokinesis.

**Key words:** salt dome traps, seismic images, seismic migration, deep-velocity model, polar velocity anisotropy, azimuthal velocity anisotropy.

### References

- Bannikov G.A., Bennion P., Geiger L., Whiteside W., Xu W., Li Z., Lundy A., Chang I., 2009. Anisotropic Prestack Depth Migration with Tomography for Velocity Optimization. *Proc. of the II Int. Geological and Geophysical Conf. and Exhibition "Tyumen-2009"* (in Russian).
- Marmalyevskiy N. Ya., Roganov Yu. V., Gornyak Z. V., Mershchiy V. V., Kostyukevich A. S., Gazaryan Z. I., 2005. Yu. V. Timoshin's ideas and new diffraction transforms. *Zbirnyk naukovykh prats UkrDGR* (3), 43—63 (in Ukrainian).
- Tiapkina A. N., Tyapkin Yu. K., Okrepkyj A. I., 2014. Advanced methods for seismic imaging when mapping hydrocarbon traps associated with salt domes. *Geofizicheskiy zhurnal* 36(3), 57—74 (in Russian).
- Birdus S., Sun J., Sun W., Xie Y., Gazzoli M., Andreolli M., Ursulic A., 2012. Multi-azimuth PSDM processing in the presence of orthorhombic anisotropy — A case history offshore North West Australia. 82<sup>nd</sup> SEG Meeting: Expanded Abstracts. 1—5.
- Bowling J., Ji S., Lin D., Chergotis D., Nolte B., Yan-chak D., 2010. Mad Dog TTI RTM: better than expected. 80<sup>th</sup> SEG Meeting: Expanded Abstracts. 3113—3116.



- Dewey F., Van der Meulen M., Whitfield P., 2006. Using dual-azimuth data to image below salt domes. *First Break* 24(6), 55—59.
- Epili D., Cloudy G., Cai J., Zhang Q., Camp R., Lopez-Mora S., 2011. Improved subsalt imaging using TTI anisotropy and reverse time migration scans. 81<sup>st</sup> SEG Meeting: Expanded Abstracts. 243—247.
- Fruehn J.K., Arnaud J., Cha G., Akinmusire T., 2007. Anisotropic 3D PreSDM offshore Nigeria. 69<sup>th</sup> EAGE Conference: Expanded Abstracts. Paper CO42.
- Gersztenkorn A., Marfurt K.J., 1999. Eigenstructure-based coherence computations as an aid to 3D-structural and stratigraphic mapping. *Geophysics* 64(5), 1468—1479.
- Granger P.-I., Bonnot J.-M., 2001. C-wave resolution enhancement through birefringence compensation at the Valhall field. 63<sup>rd</sup> EAGE Conference: Expanded Abstracts. Paper P118.
- Gray S., Trad D., Biondi B., Lines L., 2006. Towards wave-equation imaging and velocity estimation. *CSEG Recorder* (Special Edition), 47—53.
- Grechka V., 2009. Applications of seismic anisotropy in the oil and gas industry. Houten: EAGE Publ., 171 p.
- Haugen J.A., Arntsen B., Mispel J., 2008. Modeling of dirty salt. 78 SEG Meeting: Expanded Abstracts. 2127—2131. †
- He Y., Gersztenkorn A., Hilburn G., Yang S., Wang B., 2013. Orthorhombic PSDM processing, a case history in Mississippi Canyon, Gulf of Mexico. 83<sup>rd</sup> SEG Meeting: Expanded Abstracts. P. 3799—3803.
- Huang T., Yu B., 2009. Unlocking the potential of WAZ data at the Tonga Discovery with TTI reverse time migration. 79<sup>th</sup> SEG Meeting: Expanded Abstracts. 532—536.
- Huang Y., Lin D., Bai B., Roby S., Ricardez C., 2010. Challenges in presalt depth imaging of the deepwater Santos Basin, Brazil. *The Leading Edge* 29(7), 820—825.
- Isaac J.H., Lawton D.C., 1999. Image mispositioning due to dipping TI media: A physical seismic modeling study. *Geophysics* 64(4), 1230—1238.
- Isaac J.H., Lawton D.C., 2002. Image mispositioning in Foothills seismic data due to a dipping transversely isotropic overburden: Implications from physical seismic modeling studies. *CSEG Recorder* (3), 34—38.
- Isaac J.H., Lines L.R., 2002. Where's the reef? *CSEG Recorder* (3), 30—32.
- Jenner E., 2012. Combining VTI and HTI anisotropy in prestack time migration: Workflow and data examples. *The Leading Edge* 31(7), 732—739.
- Jones I.F., Bridson M.L., Bernitsas N., 2003. Anisotropic ambiguities in TI media. *First Break* 21(4), 31—37.
- Jones I.F., 2008. A modeling study of pre-processing considerations for reverse-time migration. *Geophysics* 73(6), T99—T106.
- Leveille J.P., Jones I.F., Zhou Z.-Z., Wang B., Liu F., 2011. Subsalt imaging for exploration, production, and development: A review. *Geophysics* 76(5), WB3—WB20.
- Loinger E., Gaiser J.E., Lucini A., Prestori M., Walters R., 2002. 3D/4C Emilio-azimuth processing for anisotropy analysis. 64 EAGE Conference: Expanded Abstracts. Paper F-23.
- Ma X., Wang B., Reta-Tang C., Whiteside W., Li Z., 2011. Enhanced prestack depth imaging of wide-azimuth data from the Gulf of Mexico: A case history. *Geophysics* 76(5), WB79—WB86.
- Martin M.A., Davis T.L., 1987. Shear-wave birefringence: A new tool for evaluating fractured reservoirs. *The Leading Edge* 6(1), 22—28.
- Mueller M.C., 1992. Using shear waves to predict lateral variability in vertical fracture intensity. *The Leading Edge* 11(2), 29—35.
- Reta-Tang C., Simmons J., Whiteside W., Cai J., Camp R., He Y., 2011. A case study: improved subsalt imaging through TTI model building and imaging of a WAZ survey in the Gulf of Mexico. 81<sup>st</sup> SEG Meeting: Expanded Abstracts. 3943—3947.
- Shatilo A.P., Bansal R., Hefti J., Rochette C., 2012. Piceance 3C 3D survey — processing of converted-wave data in an area with azimuthal anisotropy. 74<sup>th</sup> EAGE Conference: Expanded Abstracts. Paper AO39.
- Shen H., Chen G., Li T., 2012. Salt emplacement-induced azimuthal anisotropy in Garden Banks, Gulf of Mexico. 82<sup>nd</sup> SEG Meeting: Expanded Abstracts. 1—5.
- Stewart R.R., Gaiser J.E., Brown R.J., Lawton D.C., 2003. Converted-wave seismic exploration: Applications. *Geophysics* 68(1), 40—57.
- Swanston A.M., Mathias M.D., Barker C.A., 2011. Wide-azimuth TTI imaging at Tahiti: Reducing structural uncertainty of a major deepwater subsalt field. *Geophysics* 76(5), WB67—WB78.
- Thomas M., Mothi S., McGill P., 2012. Improving subsalt images using tilted-orthorhombic RTM in

- Green Canyon, Gulf of Mexico. 82<sup>nd</sup> SEG Meeting: Expanded Abstracts. 1—5.
- Thomsen L., 1995. Elastic anisotropy due to aligned cracks in porous rock. *Geophys. Prosp.* 43(6), 805—829.
- Thomsen L., 1986. Weak elastic anisotropy. *Geophysics* 51(10), 1954—1966.
- Vestrum R., 2002. 2D and 3D anisotropic depth migration case histories. *CSEG Recorder* (5), 31—32.
- Vestrum R. W., Lawton D. C., Schmid R., 1999. Imaging structures below dipping TI media. *Geophysics* 64(4), 1239—1246.
- Vestrum R., Vermeulen P., 2004. Sideslip and smear beneath dipping transversely isotropic strata. 74<sup>th</sup> SEG Meeting: Expanded Abstracts. 175—178.
- Vigh D., Kapoor J., Moldoveanu N., Li H., 2011. Breakthrough acquisition and technologies for subsalt imaging. *Geophysics* 76(5), WB41—WB51.
- Wang B., Kim Y., Mason C., Zeng X., 2008. Advances in velocity model-building technology for subsalt imaging. *Geophysics* 73(5), VE173—VE181.
- Wang B., Mason C., Guo M., Yoon K., Cai J., Ji J., Li Z., 2009. Subsalt velocity update and composite imaging using reverse-time migration based delayed-imaging-time scan. *Geophysics* 74(6), WCA159—WCA167.
- Woodward M., Nichols D., Zdraveva O., Whitfield P., Johns T., 2008. A decade of tomography. *Geophysics* 73(5), VE5—VE11.
- Wu Q., Li Y., Li Z., 2013. Improved subsalt imaging of full azimuth data with tilted orthorhombic PSDM. 83<sup>rd</sup> SEG Meeting: Expanded Abstracts. 3810—3814.
- Zhang H., Zhang Y., 2008. Reverse time migration in 3D heterogeneous TTI media. 78<sup>th</sup> SEG Meeting: Expanded Abstracts. 2196—2200.
- Zhang Y., Zhang H., Zhang G., 2011. A stable TTI reverse time migration and its implementation. *Geophysics* 76(3), WA3—WA11.
- Zhou Z.-Z., Howard M., Mifflin C., 2011. Use of RTM full 3D subsurface angle gathers for subsalt velocity update and image optimization: Case study at Shenzhi field. *Geophysics* 76(5), WB27—WB39.