

## Усовершенствованные методы 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>, 2014

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

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

Поступила 2 сентября 2013 г.

*Представлено членом редколлегии В. Н. Пулипенко*

Запропонована стаття є першою у серії оглядових праць щодо використання сучасних методів міграції побудови сейсмічних зображень у районах з інтенсивною соляною тектонікою. Проаналізовано різноманітні типи пасток вуглеводнів, пов'язаних із соляними куполами у Дніпровсько-Донецькій западині. Подано класифікацію методів побудови сейсмічних зображень. На прикладах з інших седиментаційних басейнів показано переваги міграції до підсумовування, урахування багатопроменевого поширення сейсмічної енергії та використання обмінних хвиль під час побудови зображень приштокових об'єктів.

**Ключові слова:** соляна тектоніка, приштокові пастки, сейсмічні зображення, сейсмічна міграція, обмінні хвилі.

**Введение.** Соленосные осадочные бассейны распределены по всему миру, что демонстрируется на рис. 1 [Farmer et al., 2009]. Многие крупные месторождения углеводородов в этих бассейнах часто связаны с соляными структурами, создавшими благоприятные условия для миграции, накопления и сохранения продукции.

Одним из таких бассейнов является расположенная на территории Украины Днепровско-Донецкая впадина (ДДВ), которая по данным Геологической службы США [Burianuk, 2003] занимает 45-е место среди 96 геологических провинций, содержащих практически все известные мировые запасы углеводородов.

Основная масса соли в ДДВ отложилась на позднедевонской рифтовой стадии развития бассейна. В течение последующего пострифтового этапа развития бассейна соль была приведена в движение, что наиболее ярко проявилось в образовании диапиров, проникающих в вышележащие осадки и иногда достигающих дневной поверхности. Скорость образования диапиров зависела от времени. Периоды наиболее активного роста и деформации соли хорошо кор-

релируются с интенсивными региональными тектоническими событиями. Согласно [Stovba, Stephenson, 2003], основная пострифтовая структурная реактивация соли была вызвана растягивающими тектоническими деформациями в начале поздневизейского, середине серпуховского и начале пермского периодов. Затем сжимающие напряжения в позднем мелу и раннем палеогене ускорили темпы роста диапиров или сильно деформировали некоторые из них.

Соляная тектоника внесла значительный вклад в структуру многих участков ДДВ на протяже-



Рис. 1. Осадочные бассейны мира с интенсивной соляной тектоникой (обозначены белым цветом).

нии всей истории ее геологического развития. В результате около половины всех положительных структур бассейна связаны с соляными куполами. Наиболее развитые соляные тела наблюдаются в центральной осевой части бассейна, начиная от подушек и заканчивая сложными грибовидными диапирами высотой 10—15 км [Чирвинская, Соллогуб, 1980].

Соляная тектоника породила разнообразные тектонические, структурные, стратиграфические и комбинированные ловушечные условия для углеводородов. Поэтому в районах с развитой соляной тектоникой в ДДВ основными объектами нефте- и газопоисковых работ традиционно считаются приштоковые зоны.

Среди интересующих геологов объектов в первую очередь следует назвать ловушки, у которых решающим элементом экранирования углеводородов по восстанию служит контакт осадочных пород с отрицательно наклоненными (нависающими) стенками штоков. При этом в качестве боковых экранов могут служить конседиментационные оперяющие (например, радиальные) тектонические нарушения или заливообразные формы стенок штоков.

Один из таких объектов связан с Бакейским диапиром, расположенным в центральной осевой части ДДВ. На рис. 2 показан сейсмический разрез этого диапира, проходящий через скв. 1 и 2. В первой из них наблюдаются промышленные притоки газа из верхневизейского песчаного коллектора, а вторая встретила обводненный песчаник. Тщательный анализ позволил сделать вывод, что скв. 1 вскрыла ловушку, экранированную по восстанию соляным навесом и одним из радиальных нарушений [Tarkina et al., 2012]. Между двумя скважинами на рис. 2 видно глубоко проникающее постседиментационное нарушение, имеющее в плане кольцеобразную форму. Наиболее вероятно, что оно является одним из каналов вертикальной миграции углеводородов из материнских пород, залегающих в системе синклиналей, окружающих шток. Поэтому данное нарушение могло, с одной стороны, способствовать проникновению газа в приштоковую ловушку, вскрытую скв. 1, а с другой — препятствовать накоплению продукции в районе скв. 2.

Наиболее эффективными экранами в подобных случаях могут служить нависающие нижнепермские соляные карнизы (козырьки). Пример такого объекта показан на рис. 3, где демонстрируется геологический разрез Чутовского газоконденсатного месторождения, сформированного заливообразной формой соли в юж-

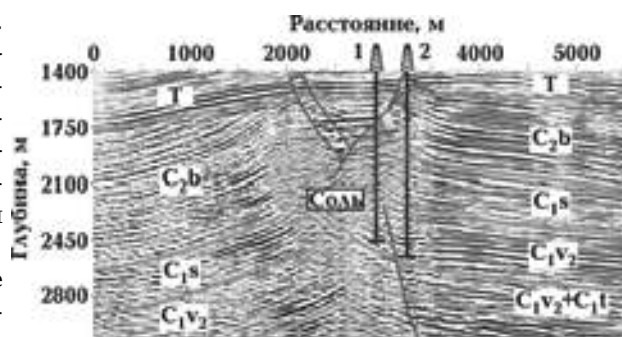


Рис. 2. Сейсмический разрез через Бакейский шток в ДДВ, полученный в результате глубинной преломки миграции Кирхгофа.

ной части Чутовско-Розпашновского штока в ДДВ [Розробка ..., 2003]. На этом месторождении продуктивными являются отложения  $P_1$  и  $C_3$ , а также приштоковые блоки, образованные башкирскими отложениями  $C_2b$ . Если наклон нижнепермских отложений вблизи штока достигает  $60\text{—}80^\circ$ , то башкирские отложения залегают еще круче ( $70\text{—}90^\circ$ ), поскольку они оторваны и приподняты вертикальным движением соли.

Ловушки в осадочных породах, окружающих штоки в ДДВ, могут также быть связаны с нарушениями, порожденными движением соли или

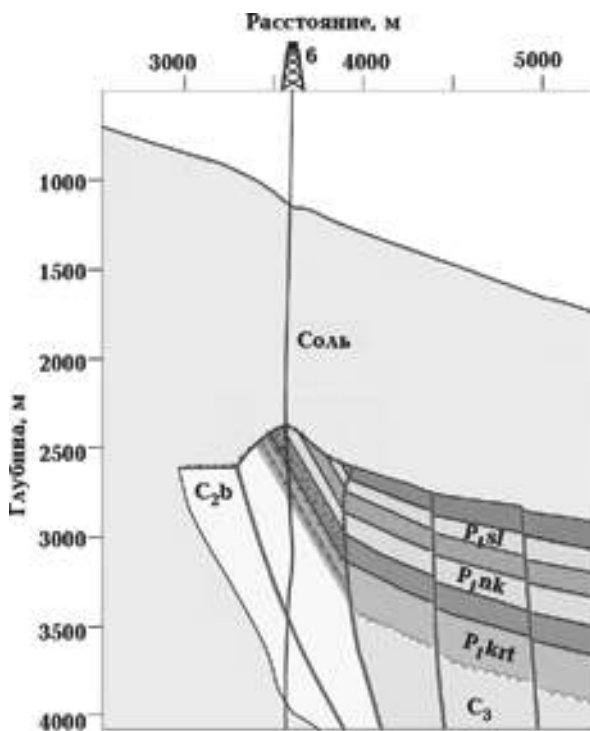


Рис. 3. Геологический разрез через Чутовское месторождение в ДДВ.

другими тектоническими механизмами, и с выклиниваниями, относящимися к границам несогласия. Сюда же надо отнести структуры над соляными штоками и подушками.

Кроме того, среди интересующих геологов объектов следует назвать глубоко проникающие тектонические нарушения, поскольку они могут служить каналами для вертикальной и латеральной миграции углеводородов из окружающих соляные штоки грабенев. Одно из таких нарушений продемонстрировано выше на рис. 2. Без детального исследования таких нарушений невозможно создать надежную модель перетекания углеводородов между различными резервуарами.

Помимо перечисленных объектов следует отметить, что ряд штоков в ДДВ сопровождается специфическими аккумулятивными телами в славянской свите, частично или полностью перекрытыми нижнепермскими соляными козырьками [Комплексна ..., 2012]. Эти тела сложены преимущественно карбонатными породами и обладают хорошими коллекторскими свойствами. На рис. 4 представлен один из таких объектов, связанный с Крестищенским штоком.

**Постановка задачи.** Разбуривание подсольных ловушек углеводородов сталкивается с множеством технических проблем и высокой стоимостью работ. Это обстоятельство выдвигает повышенные требования к точности прогнозирования формы и пространственного положения таких объектов, поскольку основной проблемой при их изучении является точность, правильность траекторий скважин. Особенно негативные результаты могут породить погреш-

ности в оценке латерального расположения границ соли, а значит, и целевых объектов — ловушек углеводородов. Только наличие надежной и детальной информации о структуре соляного тела и подстилающих (прилегающих) осадочных пород может обеспечить успешность поискового, разведочного и эксплуатационного бурения.

Детальное определение структуры соли и связанных с ней ловушек углеводородов, необходимое для успешного бурения, невозможно без применения самых совершенных методов построения сейсмических изображений (миграции). Основные препятствия на пути получения адекватных изображений ловушек углеводородов порождаются как самой солью, так и породами, формирующими ловушку. Дело в том, что соль акустически сильно отличается от окружающих осадков и часто имеет сложную структуру. Это приводит к значительному преломлению сейсмических лучей на границе соли и сложному их поведению в соляных телах и их окрестностях. Чем сложнее конфигурация соли, тем тяжелее учесть этот эффект. В результате структурные и динамические особенности под- и присолевых границ могут быть сильно искажены. Ситуация еще больше усложняется тем, что приштоковые блоки могут быть сильно деформированы, наклонены и даже оторваны в результате вертикального движения соли, что продемонстрировано выше на рис. 3 на примере Чутовского месторождения. Таким образом, речь может идти об объектах, достаточно сложных в структурном отношении и часто сравнительно небольших по размерам в плане.

Следует подчеркнуть, что основными источниками погрешностей в локализации и изображении целевого объекта могут быть, во-первых, несовершенство процедуры миграции, во-вторых, существенное отличие используемой скоростной модели от ее реального прототипа и, в-третьих, несовершенство системы полевых наблюдений и дополнительной обработки сейсмических данных. Поэтому настоящая статья, состоящая из этой и нескольких последующих публикаций, посвящена анализу влияния перечисленных факторов на эффективность построения сейсмических изображений и сопровождается примерами из различных бассейнов и приштоковых зон. Выводы, сделанные в результате такого анализа, позволят сформулировать рекомендации по эффективному применению процедур миграции в условиях ДДВ.

Необходимо отметить, что осадочные бассейны, примеры из которых мы демонстрируем, значительно различаются историей геологичес-

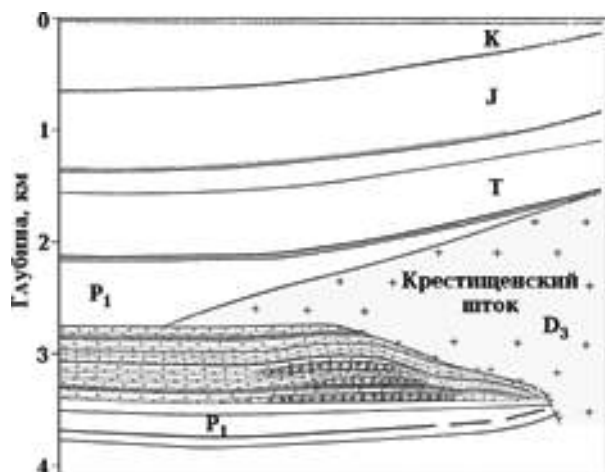


Рис. 4. Геологический разрез через Южно-Крестищенское аккумулятивное тело, перекрытое соляным навесом Крестищенского штока в ДДВ.

кого развития и современным строением от ДДВ. Но это не является препятствием для решения поставленной задачи, поскольку мы демонстрируем сейсмические изображения приштоковых объектов, имеющих структурные аналоги в ДДВ.

**Классификация методов миграции.** Современные методы построения сейсмических изображений характеризуются большим раз-

нообразием. С классификацией этих методов и анализом их возможностей в разных по сложности строения средах можно ознакомиться в работах [Козлов, 2006; Sava, Hill, 2009; Левянт и др., 2010; Leveille et al., 2011 и др.]. В качестве примера приведем табл. 1, демонстрирующую немного расширенную схему классификации из работы [Козлов, 2006].

**Т а б л и ц а 1. Классификация методов миграции по Е.А. Козлову [Козлов, 2006], дополненная учетом анизотропии сейсмических скоростей**

Признак классификации	Классы
По характеру входных данных	До суммирования После суммирования
По системе координат пространства реализации	Пространство—время: $(\mathbf{x}, t)$ , где $\mathbf{x} = (x, z)$ или $(x, y, z)$ Пространство—временная частота: $(\mathbf{x}, \omega)$ Пространственные частоты—время: $(\mathbf{k}_x, t)$ , где $\mathbf{k}_x = (k_x, k_z)$ или $(k_x, k_y, k_z)$ Полностью частотная область: $(\mathbf{k}_x, \omega)$
По мерности пространства	2D 3D
По типу аппроксимации скоростного разреза	Аппроксимация средой со средней скоростью (без учета искривления лучей). Термин — «временная» миграция. Аппроксимация средой с истинной (среднеинтервальной) скоростью. Учитываются искривления лучей. Термин — «глубинная» миграция
По способу сортировки входных данных	Общая точка отражения Общий угол падения—отражения Общее удаление источник—приемник («общий офсет») Общая точка возбуждения Общий азимут
По организации вычислений	Нерекурсивная («непосредственная») Рекурсивная
По алгоритму	Интегральные решения волнового уравнения: <ul style="list-style-type: none"> <li>• «миграция по Кирхгофу», пространство <math>(\mathbf{x}, t)</math>, и ее разновидности: миграция в пространстве <math>(\mathbf{x}, \omega)</math> и миграция по общему углу падения—отражения;</li> <li>• «миграция по Столту» (F-K migration), пространство <math>(\mathbf{k}_x, \omega)</math>.</li> </ul> Конечно-разностные решения волнового уравнения (в. у.): <ul style="list-style-type: none"> <li>• подвижная система координат, аппроксимация в. у. по Клэрбоуту;</li> <li>• способ фазового сдвига (phase shift — PS) и его разновидности — способ фазового сдвига с коррекцией (phase shift plus correction — PSPC) и с интерполяцией (phase shift plus interpolation — PSPI), в том числе с «регуляризацией данных» по общему пункту возбуждения или азимуту;</li> <li>• миграция в обращенном времени (reverse time migration — RTM)</li> </ul>
По учету анизотропии скоростей	Изотропная скоростная модель Анизотропная скоростная модель <ul style="list-style-type: none"> <li>• с вертикальной осью симметрии (VTI — модель);</li> <li>• с наклонной осью симметрии TTI — модель)</li> </ul>

**Т а б л и ц а 2. Возможности современных методов миграции отображать геометрию и сохранять динамические характеристики отражений в различных по степени сложности средах**

Свойства	Классический Кирхгоф		По методике «продолжения поля» по глубине (одностороннее волновое уравнение WEM)	CSFW полно-волновая (двустороннее уравнение RTM)	Угловая SRAM**
	Временной	Глубинный			
Простое строение среды (пологое залегание, плавное изменение скоростей)					
Отображение геометрии среды	–	+	+	++	++
Сохранение динамических характеристик*	+	+-	–	–	+
Сложно построенные среды					
Отображение геометрии среды		+-	+	+	++
Сохранение динамических характеристик*		–	–	–	–+

*Примечание.* Значки ++, +, +-, – соответствуют оценкам возможностей миграции: “высокая”, “удовлетворительная”, “неустойчивая” и “неудовлетворительная”.

\* Оценивается по характеру сейсмограмм AVO.

\*\* На базе весьма ограниченного объема применения.

В табл. 2, позаимствованной из работы [Левянт и др., 2010], содержатся оценки того, как четыре наиболее распространенных в настоящее время метода миграции позволяют отображать геометрию и сохранять динамические характеристики отражений в зависимости от степени сложности среды.

**Преимущества более совершенных методов миграции. Миграция до и после суммирования.** На начальных этапах развития методов получения сейсмического изображения стояла задача убедить интерпретаторов в преимуществах глубинной миграции по исходным сейсмограммам (до суммирования — престек) над ее временным аналогом, выполненным после суммирования (постстек). Это демонстрируется на рис. 5 [Albertin et al., 2001], где видно, что миграция после суммирования, выполненная по сейсмическим материалам из Мексиканского залива, явно не справляется с задачей получения “правильного” изображения в сложных тектонических условиях, когда геологический

разрез сильно осложнен присутствием акустически контрастного соляного навеса. После применения более совершенной престек глубинной миграции зона “тени” под соляным навесом была ликвидирована и изображение приобрело значительно более геологически осмысленный характер. Теперь нижняя кромка соляного тела и сильнодеформированные подсолевые отражающие границы демонстрируют структуру, принципиально отличающуюся от той, которую можно было “угадать” на постстек временном изображении. В частности, значительно более выразительно смотрятся крутонаклонные границы.

Еще один пример преимущества глубинной престек миграции над ее постстек временным аналогом приведен на рис. 6 [Albertin et al., 2001]. В левой части этого рисунка после применения более совершенного метода миграции тоже кардинально изменилось изображение как подошвы соляного навеса, так и дислоцированной толщи в зоне тени под ним. Еще большую важ-

ность имеет то, что в правой части рисунка форма отражений после временной миграции не порождает ни малейшего подозрения о присутствии соли. Глубинная престек миграция успешно восстановила конфигурацию этого сложного соляного тела, имеющего форму песочных часов.

Аналогичные результаты демонстрируются в работе [Сыдыков, Соколовский, 2000] на примере одного из штоков в Прикаспийской впадине. Здесь показано, что стенки соляного тела, обладающие отрицательным наклоном под козырьком, и прилегающие крутонаклонные границы появляются на изображении только после глубинной престек миграции.

Среди работ, подтверждающих преимущества престек миграции над постстек аналогом в условиях Украины, следует назвать [Войциц-

кий и др., 2007; Tiarkina et al., 2008, 2012; Мерцый и др., 2010].

**Учет множества путей распространения сейсмической энергии.** При построении изоб-

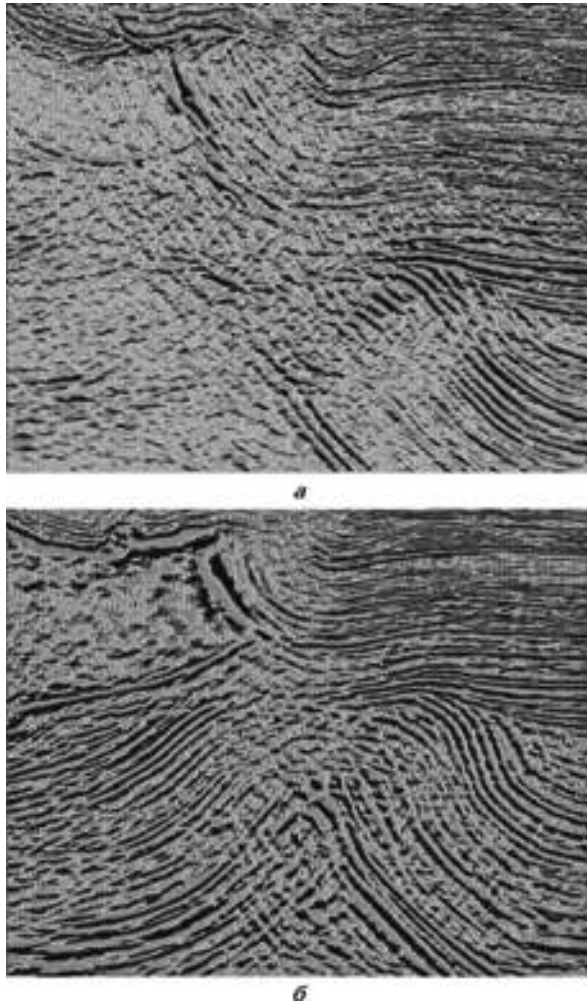


Рис. 5. Результаты постстек временной (а) и престек глубинной (б) миграции материалов из Мексиканского залива.

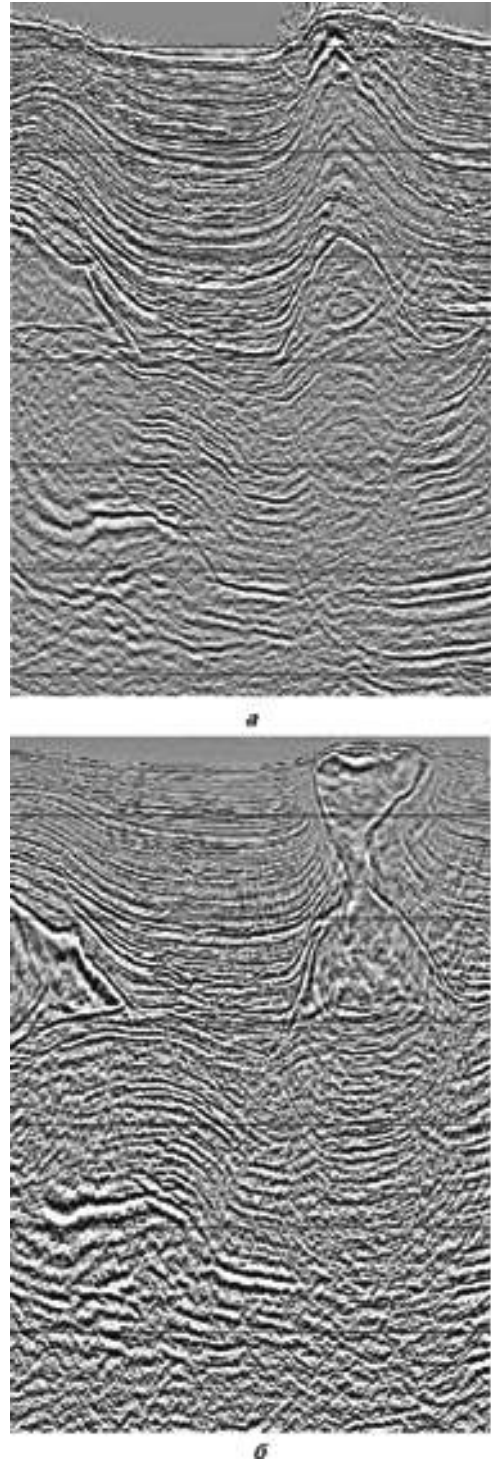


Рис. 6. Результаты постстек временной (а) и престек глубинной (б) миграции материалов из Мексиканского залива.

ражений под соляными навесами и вблизи соляных штоков серьезное препятствие создает многолучевая схема распространения сейсмической энергии от источника к приемнику через интересующую нас зону (multipathing) [Hill et al., 1991; Legott et al., 2004; Sekulic, Sepulveda, 2004]. Это связано с резким акустическим контрастом на границе осадочных пород и соли, а также со сложным строением соляных тел.

На рис. 7 показан модельный разрез из центрального грабена в Северном море, пересекающий соляной шток. На разрез наложен результат трассирования лучей [Legott et al., 2004]. Рисунок демонстрирует значительные пространственные вариации плотности и конфигурации лучей, т. е. фокусировку и расфокусировку сейсмических волн. В частности, наблюдается сложная схема распространения лучей под соляным навесом, ближайшим к пункту возбуждения, и две зоны тени за дальней стороной диапира.

Классическая миграция Кирхгофа базируется на однолучевой схеме и поэтому обычно недостаточно эффективна в условиях интенсивной соляной тектоники. Это, однако, не исключает возможности учета нескольких траекторий распространения сейсмических волн этом алгоритме. Пример работы одного из усовершенствованных вариантов миграции Кирхгофа

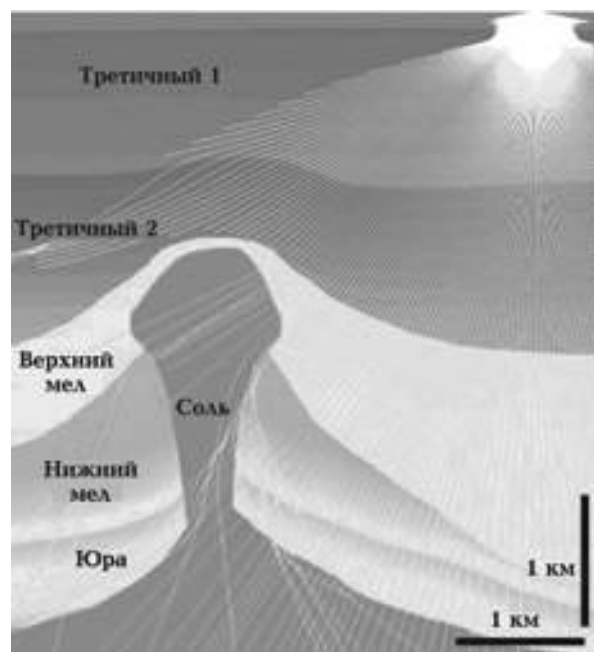


Рис. 7. Модель разреза в центральном грабене Северного моря, содержащая соляной шток. Результат трассирования лучей обозначен белыми линиями.

фа можно видеть на рис. 8 [Sekulic, Sepulveda, 2004]. Здесь показано, что учет рефрагированных (turning) волн позволил успешно построить изображение субвертикальной стенки одного из соляных штоков в Мексиканском заливе. Однако при этом следует отметить, что такая технология требует системы наблюдений с достаточно большим удалением источник — приемник и, что самое главное, значительно вертикального градиента скорости в окружающих осадках, необходимого для образования рефрагированных волн.

Если в среде несколько путей распространения сейсмической энергии, необходимо выполнить селекцию варианта, наиболее подходящего для изображения интересующих нас границ. Обычно выбирают траектории, обладающие минимальным временем пробега или максимальной расчетной энергией [Legott et al., 2004]. Согласно [Sekulic, Sepulveda, 2004], первым критерием целесообразно воспользоваться для изображения отражающих границ под солевыми козырьками с наклонным основанием, а вторым — границ, примыкающих к крутонаклоненным стенкам штоков.

В работе [Marmalyevskyy et al., 2005] предлагается универсальный оператор миграции, позволяющий автоматически выбрать тип волн, наиболее подходящий для изображения конкретного участка отражающей границы. Этот подход направлен на решение проблем многолучевого распространения сейсмических волн и плохого "освещения" ими некоторых участков разреза в сложных тектонических условиях. В зависимости от выбранного критерия, миграция может использовать следующие операторы: максимальных значений энергии, дивергенции, ротора, вертикальной составляющей вектора смещения и т. д. В этой статье на модельном материале показано, как использование оператора максимума дивергенции позволяет получить лучшее изображение под сложной надвиговой структурой, а использование упругого оператора максимума вертикальной составляющей вектора смещения обеспечивает лучшее изображение рифа, который залегает под наклонной тонкослоистой толщей, состоящей из акустически контрастных пластов. Акустический аналог этого оператора дает значительно менее качественное изображение рифа. Авторы этой работы объясняют данное явление путем моделирования с использованием канадского пакета Tesseral-2D.

При построении алгоритмов миграции Кирхгофа в сложных тектонических условиях час-

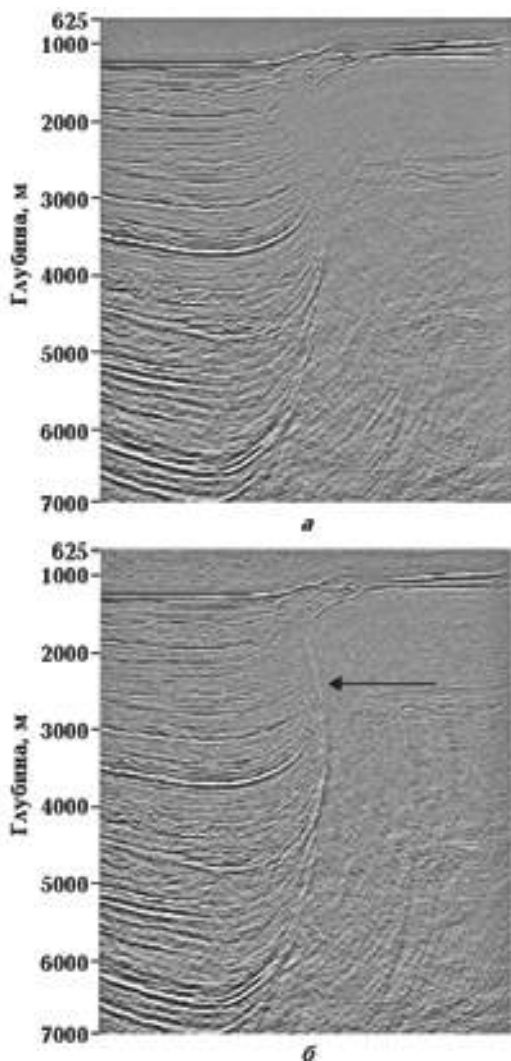


Рис. 8. Изображения соляного штока в Мексиканском заливе, полученные с помощью преломленной миграции Кирхгофа без учета (а) и с учетом (б) рефракционированных волн. Стрелка указывает на улучшенное изображение стенки штока после учета рефракции.

то используется высокочастотное приближение, позволяющее перейти от волнового уравнения к системе из двух уравнений, эйконала и переноса [Legott et al., 2004]. Эти уравнения определяют время пробега волны и перемещение энергии по волне соответственно. Без решения уравнения переноса могут возникнуть неприемлемые искажения динамики изображения. Однако совместное решение двух указанных уравнений приводит к вычислительным затратам, превышающим затраты на прямое решение волнового уравнения. Поэтому во многих ситуациях более эффективно работает миграция на основе волнового уравнения (wave equ-

ation migration — WEM). Этот тип миграции не предполагает высокочастотного приближения и при построении изображения использует энергию, распространяющуюся по всем возможным траекториям к отражателю и от него.

Рис. 9 демонстрирует преимущество WEM над однолучевой миграцией Кирхгофа при изображении отражающих границ под соляным козырьком в Мексиканском заливе [Sekulic, Sepulveda, 2004]. После WEM появились изображения отражающих границ, крутовоздымающихся к нижней кромке соли и невидимых после миграции Кирхгофа.

Одним из вариантов миграции по Кирхгофу, снижающим остроту проблемы многолучевого распространения сейсмических волн, является способ гауссовых пучков (Gaussian beam migration). В рамках такого подхода положительный эффект достигается за счет высокоточного трассирования сейсмических лучей с учетом динамики. Несмотря на то, что этот тип миграции давно появился в обработке [Hill, 1990, 2001; Hill et al., 1991; Gray et al., 2002], он продолжает активно развиваться [Gray, 2005; Zhu et al., 2007; Gray, Bleistein, 2009; Bleistein, Gray,

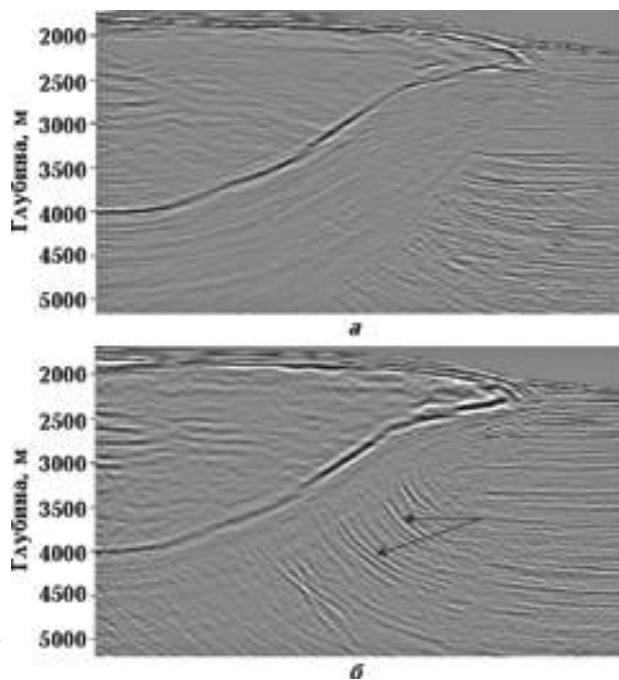


Рис. 9. Изображения отражающих границ под соляным козырьком в Мексиканском заливе, полученные с помощью однолучевой миграции Кирхгофа (а) и миграции на основе волнового уравнения (б). Стрелки указывают на улучшенное изображение подсолевых отражений.



2010; Popov et al., 2010; Li et al., 2011] и широко используется на практике, например при изучении подсолевых отложений в Мексиканском заливе [Neal et al., 2009; Cogan et al., 2011]. Способ предусматривает локальное разложение полей источников и приемников на лучевые трубки, и в пределах каждой такой трубки поле продолжается независимо от полей в соседних трубках. Трубки могут перекрываться, что частично решает проблему множества путей распространения сейсмических волн.

Эффективность миграции на основе гауссовых пучков демонстрируется на рис. 10 [Cogan et al., 2011]. Здесь видно, что этот способ, в сравнении с традиционной однолучевой миграцией Кирхгофа, позволяет получить значительно более четкое изображение стенок штоков, особенно при их отрицательном наклоне.

В классической глубинной миграции, основанной на интеграле Кирхгофа, расчет времен пробега и амплитуд волн для всех возможных пар точек внутри среды и на поверхности наблюдения, которые могут быть началом и концом лучей, выполняется исходя из реальной геометрии возбуждения и приема [Козлов, 2006]. Недостатком такого подхода является неравномерность "освещения" отражающих и рассеивающих точек в сложных средах, поскольку одна точка может пересекаться многими лучами, а другая — малым их количеством. Это искажает динамику изображения, затрудняет учет многолучевого распространения энергии и создает серьезные проблемы для дальнейшего AVO-анализа.

Одним из современных методов миграции, предназначенным ослабить эти недостатки, является угловая миграция CRAM (common reflection-angle migration), также получившая название "миграция по общему углу отражения" [Левянт и др., 2010]. Она демонстрирует максимальную эффективность с полноазимутальными 3D данными и используется для лучшего изображения крутопадающих стенок и навесов соляных штоков, крутонаклоненных границ вблизи стенок соли и для повышения горизонтальной разрешенности изображения [Winbow, 2009].

Преимущество миграции CRAM над миграцией Кирхгофа убедительно показано в работе [Winbow, 2009] на многочисленных сейсмических изображениях из Западной Африки, содержащих соляные штоки. Один пример из этой работы демонстрируется на рис. 11. Здесь видно, что более прогрессивная технология CRAM повышает горизонтальную разрешенность и

прослеживаемость отражений. Кроме того, она лучше позиционирует стенки штоков с отрицательными наклонами и улучшает изображение нижезалегающих границ, которые особенно круто воздымаются и резко прерываются возле границ соляных тел. Очевидные преимущества CRAM над миграцией Кирхгофа демонстрируются также в работе [Winbow et al., 2007] на материалах из Мексиканского залива.

Большой интерес обработчиков и интерпретаторов сейсмической информации привлекает миграция в обратном времени (reverse time

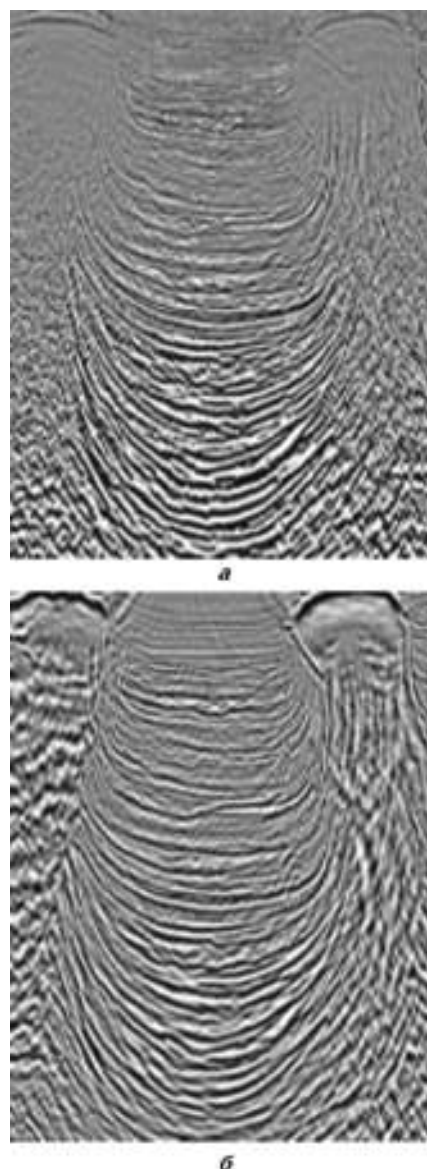


Рис. 10. Сейсмические изображения после классической миграции Кирхгофа (а) и гауссовых пучков (б), полученные по материалам из Мексиканского залива.

migration — RTM). Теоретические основы метода были заложены еще в начале 80-х годов прошлого столетия [Loewenthal, Mufti, 1983; Kos-

loff, Baysal, 1983; Baysal et al., 1983]. В настоящее время этот вид миграции активно развивается [Zhang, Zhang, 2009; Kim et al., 2011; Xu et al., 2011; Zhang et al., 2011; Liu et al., 2011] и широко используется на практике, в частности при изучении перспективных объектов, связанных со сложными соляными структурами [Buur, Kühnel, 2008; Farmer et al., 2009; Ma et al., 2011; Menyoli et al., 2011; Swanston et al., 2011]. Сопоставление RTM с другими методами миграции в условиях Мексиканского залива позволило сделать следующие выводы [Swanston et al., 2011]:

- 1) миграция на основе гауссовых пучков обеспечивает высокую разрешенность изображений над солью и внутри нее, но качество изображения недостаточно у кия или ножек штока;
- 2) миграция на основе волнового уравнения обычно позволяет получить хорошее изображение, но неправильно позиционирует очень крутые наклоны возле стенок штока;
- 3) миграция в обратном времени дает значительно лучшее изображение как самого соляного тела, так и подсолевых отложений.

Чем вызвано преимущество RTM над другими методами? Дело в том, что все рассмотренные алгоритмы миграции базируются на одностороннем волновом уравнении. Это исключает изменение направления распространения волн в процессе продолжения поля как от источников, так и от приемников. В отличие от этих методов RTM базируется на полном двустороннем волновом уравнении, что позволяет в процессе построения сейсмических изображений эффективно использовать более сложные схемы распространения сейсмических волн при продолжении поля от источников и приемников. Среди множества типов волн, успешно используемых RTM, следует отметить кратные, дуплексные, которые в англоязычной литературе называются призматическими (prism waves) или волнами двойного отскока (double-bounce waves), а также рефрагированные (turning waves) [Jones, 2013].

Таким образом, в процессе построения сейсмических изображений RTM использует весь набор волн, так или иначе "освещающих" интересные нас объекты. Тем самым успешно решается проблема множества путей распространения сейсмической энергии и снимаются все ограничения на наклон отражающих границ. Кроме того, вследствие своей более сложной технологической схемы, RTM эффективней учитывает резкие вариации скорости по латерали. В результате этот тип миграции лучше

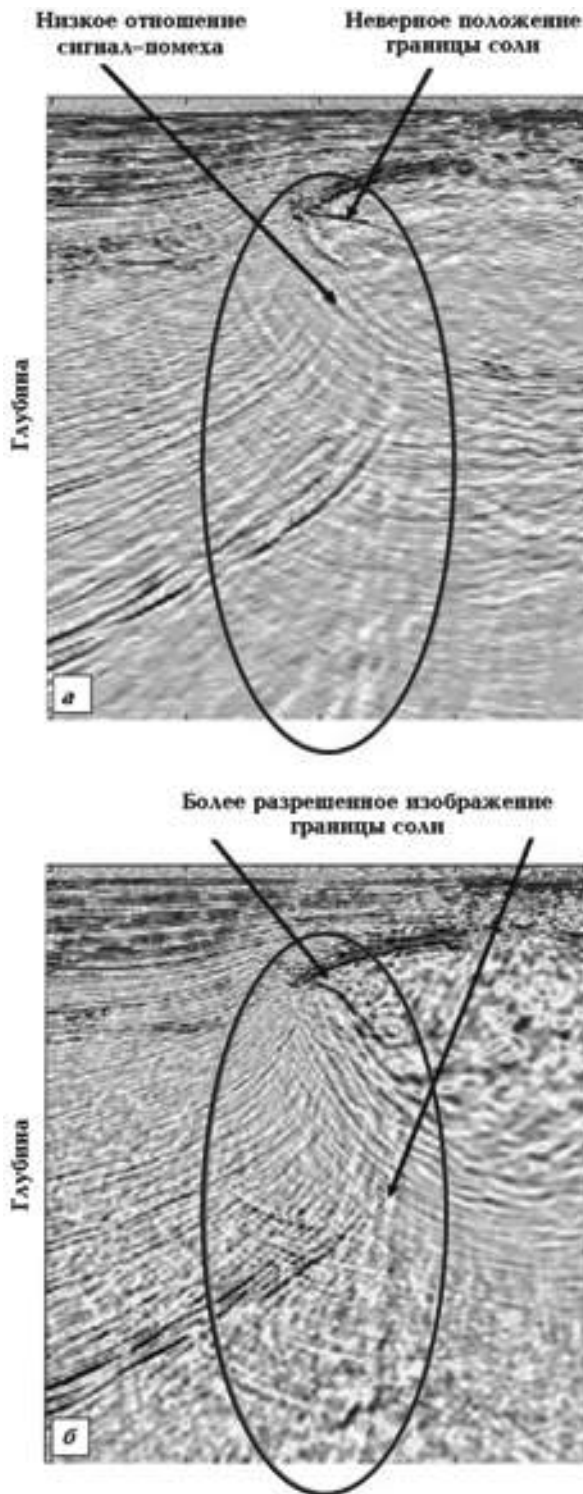
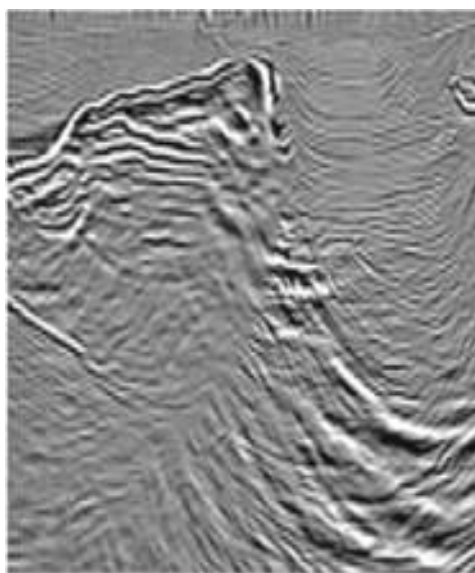
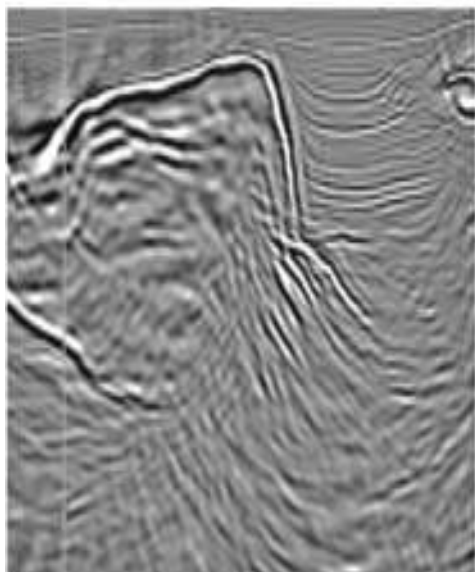


Рис. 11. Результаты миграции Кирхгофа (а) и SRM (б) над одним из соляных штоков в Западной Африке.



а



б

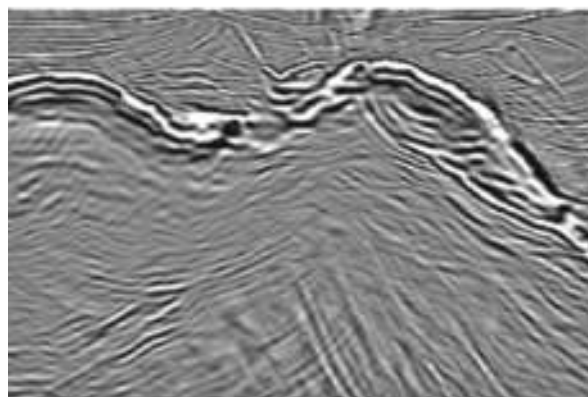
Рис. 12. Результаты WEM (а) и RTM (б) глубоководных материалов из Западной Африки.

позиционирует и фокусирует изображения крутонаклоненных границ, особенно залегающих под сильнодеформированной перекрывающей толщей, и сохраняет их амплитуды. Поэтому миграция в обратном времени все более широко и эффективно применяется в сложных тектонических условиях, в частности при изучении осадочных бассейнов, интенсивно дислоцированных галокинезом.

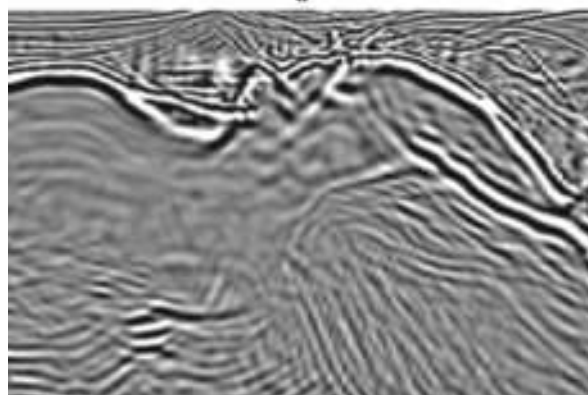
Примером более эффективной работы RTM служит рис. 12, который позволяет сопоставить этот тип миграции с WEM на глубоководных материалах из Западной Африки [Leveille et

al., 2011]. WEM, основанная на одностороннем волновом уравнении, не позволила получить изображение крутонаклоненного правого фланга соляного тела. Это легко объясняется тем фактом, что волны, однократно отраженные от крутопадающих границ, не возвращаются на дневную поверхность. В результате плохой фокусировки энергия таких отражений "размазывается" по изображению и формирует так называемый шум миграции. В свою очередь RTM, основанная на двустороннем волновом уравнении, успешно справилась с задачей изображения этого фланга благодаря правильному использованию двукратноотраженных (дуплексных) волн.

Еще один пример более эффективной работы RTM демонстрируется на рис. 13, который позволяет сопоставить этот тип миграции с WEM на материалах из Мексиканского залива [Farmer et al., 2009]. Он показывает, что после RTM значительно лучше прослеживается нижняя кромка соляного навеса и крутонаклоненные подсольевые границы.



а



б

Рис. 13. Результаты WEM (а) и RTM (б) материалов из Мексиканского залива.

Преимущество RTM над миграцией Кирхгофа, все еще широко используемой при обработке сейсмических материалов из Мексиканского залива, демонстрирует рис. 14 [Ma et al., 2011]. Здесь также отчетливо видно, что после миграции в обратном времени подошвенная часть соляного навеса, имеющая отрицательный наклон, и отражающие границы под этим навесом прослеживаются гораздо увереннее, чем после миграции Кирхгофа.

Рис. 15 позволяет сравнить эффективность WEM и RTM на месторождении Tahiti в Мексиканском заливе [Swanston et al., 2011]. Первый вид миграции формирует сильные непрерывные изображения отражающих границ, которые прерываются возле предполагаемого кия штюка. Второй тип миграции также порождает непрерывные изображения границ, но вблизи соляного тела они угасают в регулярных помехах, пересекающих почти под прямым углом эти изображения. На обоих разрезах черными линиями нанесены четыре горизонта, проинтерпретированные по результатам разведочного бурения и RTM. На рис. 15, а отчетливо видно, что они все больше и больше отклоня-

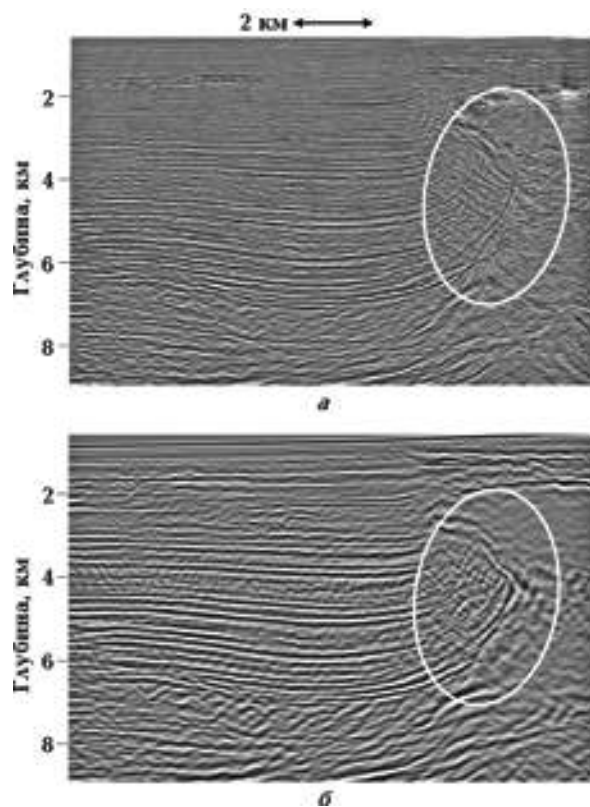


Рис. 14. Результаты миграции Кирхгофа (а) и RTM (б) материалов из Мексиканского залива.

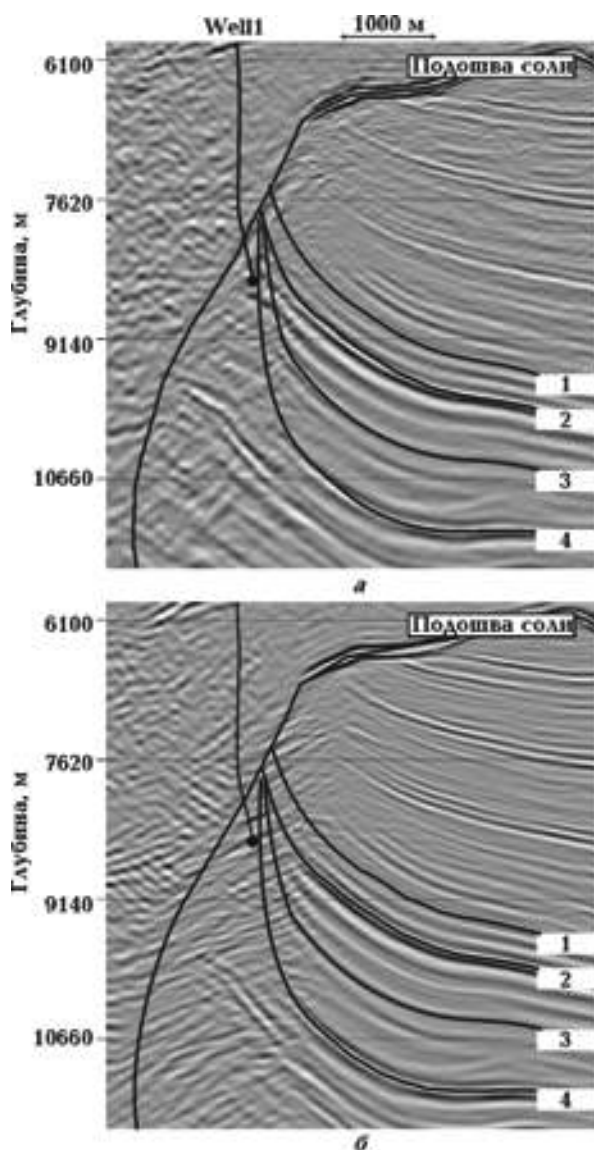


Рис. 15. Сравнение результатов WEM (а) и RTM (б) на месторождении Tahiti в Мексиканском заливе.

ются от результатов WEM по мере приближения к границам штюка.

Интенсивные регулярные волны-помехи, искажающие крутонаклоненные отражения вблизи стенок штюков после RTM (см. рис. 15, б), могут быть связаны с плохим "освещением" этих зон и порождаться пунктами возбуждения, вносящими относительно малый или практически нулевой вклад в построение изображения. В работе [Menyoli et al., 2011] предлагается специальная методика оценки влияния каждого пункта возбуждения на "освещение" перспективной зоны. В результате появляется возможность задействовать в построение изображе-

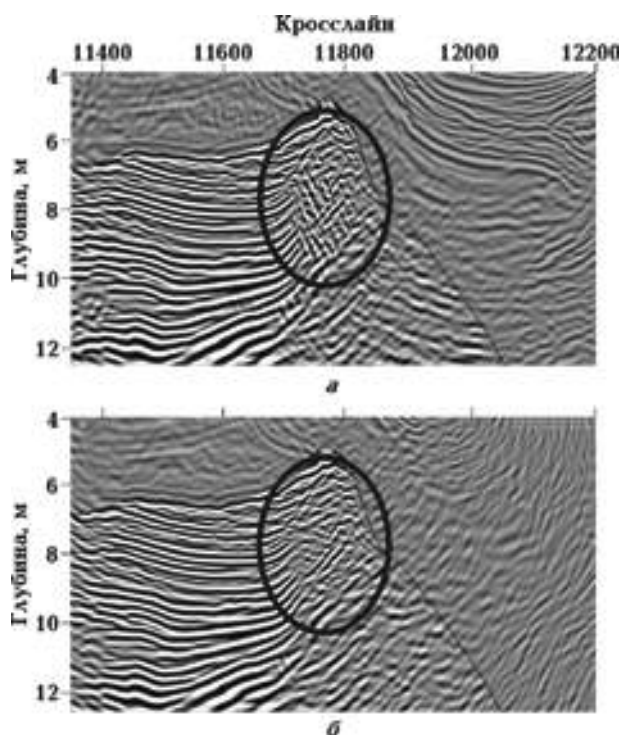


Рис. 16. Результаты RTM широкоазимутальных сейсмических данных вдоль одного из инлайнов в Мексиканском заливе, полученные с использованием всех пунктов возбуждения (а) и пунктов возбуждения, обеспечивающих максимальное "освещение" (б). Темным цветом обозначена соль, а овалом обведена целевая область.

ния только те пункты, которые делают максимальный вклад в этот процесс. Такой прием повышает прослеживаемость изображений и позволяет надежнее определять параметры приштоковых ловушек углеводородов. В этом процессе используется 2D или 3D моделирование, которое учитывает структуру и скоростные свойства перекрывающей толщи, параметры системы наблюдения, отражающую способность и наклоны границ, интересующих исследователей.

Эффективность такого подхода подтверждает рис. 16. Он позволяет сопоставить сейсмические изображения вдоль одного из инлайнов в Мексиканском заливе, полученные по широкоазимутальным данным с помощью RTM с использованием всех пунктов возбуждения (рис. 16, а) и пунктов возбуждения, обеспечивающих максимальное "освещение" (рис. 16, б).

На рис. 16, а, как и на рис. 15, б, отчетливо видны регулярные волны-помехи, почти перпендикулярные основному тренду подсолевой структуры в зоне примыкания к соляному телу. Такие конфликтующие волны могут быть неверно проинтерпретированы как нарушения

или перевернутые соляной тектоникой пласты. Кроме того, эти помехи искажают амплитудную информацию о глубинном изображении. То, что такие волны порождаются пунктами возбуждения, вносящими относительно малый или практически нулевой вклад в энергию изображения подсолевых структур, подтверж-

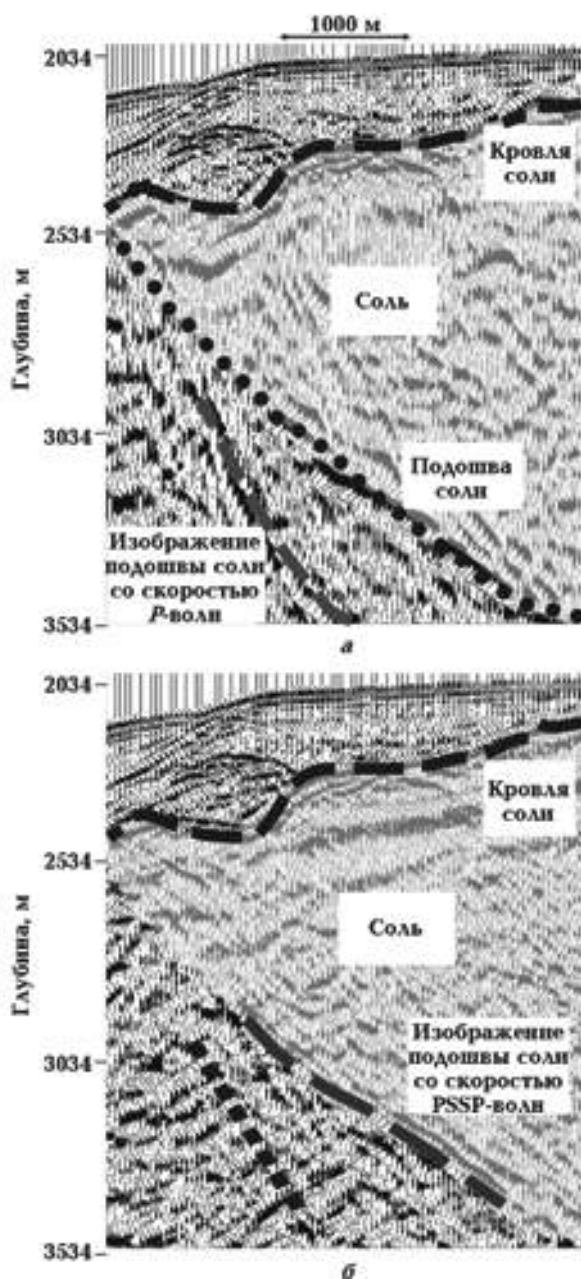


Рис. 17. Изображения соляного козырька и примыкающих к нему отражающих границ в Мексиканском заливе, полученные с использованием скоростей  $P$ -волн (а) и  $S$ -волн (б) в соли. Второй вариант скоростной модели учитывает двойной обмен моды на верхней границе соли при распространении волн от источника в среде и затем к приемнику.

дает рис. 16, б. Он демонстрирует изображение, полученное с участием только наиболее важных пунктов возбуждения, составляющих 30 % от общего количества. В этом случае конфликтующие волны практически не появляются и протяженность изображения отражающих границ значительно улучшается. После применения такого приема становится легче интерпретировать изображение отражений, круто прилегающих к стенкам соли, лучше определять границы экранов по поднятию и уверенней изучать взаимодействие соли и осадков.

**Использование обменных волн.** Помимо многолучевой схемы распространения сейсмических волн необходимо помнить об обмене моды на границах и в благоприятных условиях использовать это явление при построении сейсмических изображений. Рис. 17 [Stewart et al., 2003] показывает как эффект двойного обмена (PSSP) на верхней границе соляного козырька позволяет получить более качественное изображение нижней кромки соли и примыкающих к ней крутозалегающих осадочных пород.

Рис. 18 позволяет сопоставить сейсмические изображения, полученные с помощью продольных и обменных волн вдоль профиля, пересекающего месторождение Emilio в Адриатическом море (Италия) [Loinger et al., 2002]. Продуктивным на этом месторождении является мощный трещиноватый карбонатный резервуар. Рисунок демонстрирует более высокое качество изображения целевых карбонатных горизонтов с помощью обменных волн, чем с помощью продольных волн.

Следующая статья из данного цикла будет посвящена необходимости детального подбора скоростной модели среды и учета анизотропии для эффективного построения сейсмических изображений в районах с интенсивной соляной тектоникой.

**Выводы.** Надежное картирование различных типов ловушек углеводородов в ДДВ, связанных с соляными куполами, невозможно без применения современных методов получения сейсмических изображений. Эти методы харак-

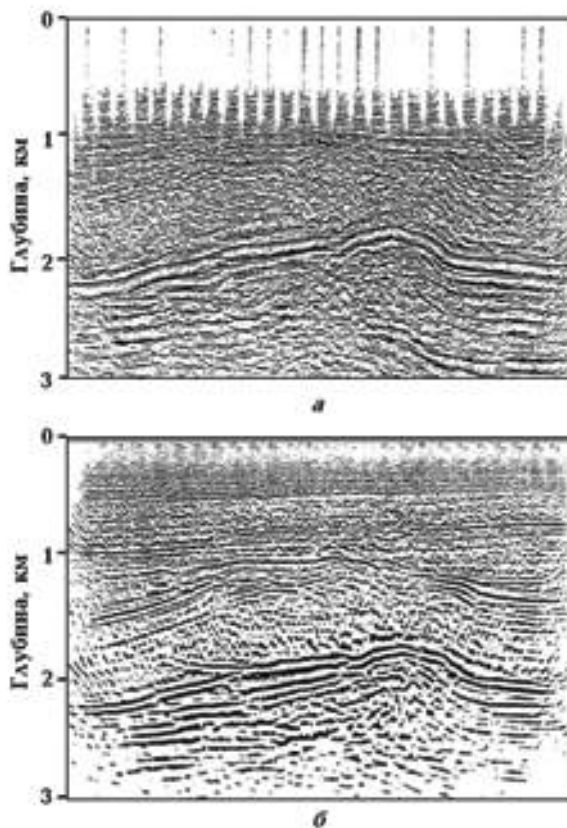


Рис. 18. Сейсмические изображения, полученные с  $P$ -волнами (а) и  $PS$ -волнами (б) на месторождении Emilio в Адриатическом море, Италия. Оба изображения представлены во временном масштабе  $P$ -волн.

теризуются большим разнообразием и разной эффективностью в условиях сложной соляной тектоники. Наиболее популярные из них используют исходные сейсмические записи и позволяют успешно учесть множество траекторий и обмен моды при распространении сейсмических волн в районах соляных штоков. Это подтверждается примерами из различных соленосных бассейнов мира.

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

## Список литературы

Войцицкий З. Я., Сидоренко Г. Д., Пархоменко Т. В., Тяпкина А. Н., Хома Р. С. Применение процедур миграции сейсмических записей с учетом современных тенденций развития сейсмичес-

кого метода разведки. *Геоинформатика*. 2007. № 4. С. 23—30.

Козлов Е. А. Модели среды в разведочной сейсмологии. Тверь: Изд-во ГЕРС, 2006. 480 с.

- Комплексна програма освоєння вуглеводневих ресурсів пермських і кам'яновугільних карбонатних комплексів східного нафтогазонасного регіону: (Остаточний звіт) / ДП Наука-нафтогаз; Науковий керівник С.Г. Вакарчук. — Київ, 2012. — 627 с.
- Левянт В.Б., Хромова И.Ю., Козлов Е.А, Керусов И.Н., Кащеев Д.Е., Колесов В.В., Мармалевский Н.Я. Методические рекомендации по использованию данных сейсморазведки для подсчета запасов углеводородов в условиях карбонатных пород с пористостью трещинно-кавернового типа. Москва: ЦГЕ, 2010. 250 с.
- Мерцый В.В., Маковенко Д.В., Симаченко М.В., Ренкас Ю.Л., Лесной Г.Д. Применение прелестек миграции в условиях солянокупольных структур Украины. Современные методы сейсморазведки при поисках месторождений нефти и газа в условиях сложнопостроенных структур (Сейсмо-2010): Материалы I Междунар. научн.-практ. конф. Феодосия: УкрГГРИ, 2010.
- Розробка методики виділення та простеження малоамплітудних субвертикальних розривних порушень на основі міграційних перетворень дуплексних хвиль: (Остаточний звіт). Український державний геологорозвідувальний інститут; Відповідальний виконавець Н.Я. Мармалевський. — № ДР 0102U002763. — Київ, 2003. — 234 с.
- Сыдыков К.Ж., Соколовский С.Г. Особенности технологии глубинной миграции сейсмических данных в Прикаспийской впадине. *Геофизика*. 2000. № 2. С. 16—21.
- Чирвинская М.В., Соллогуб В.Б. Глубинная структура Днепровско-Донецкого авлакогена по геофизическим данным. Киев: Наук. думка, 1980. 180 с.
- Albertin U., Woodward M., Kapoor J., Chang W., Charles S., Nichols D., Kitchenside P., Mao W., 2001. Depth imaging examples and methodology in the Gulf of Mexico. *The Leading Edge* 20 (5), 498—513.
- Baysal E., Kosloff D.D., Sherwood J.W.C., 1983. Reverse time migration. *Geophysics* 48 (11), 1514—1524.
- Bleistein N., Gray S.H., 2010. Amplitude calculations for 3-D Gaussian-beam migration using complex-valued traveltimes. 80<sup>th</sup> SEG Meeting: Expand. Abstr. P. 3349—3353.
- Buur J., Kühnel T., 2008. Salt interpretation enabled by reverse-time migration. *Geophysics* 73 (5), VE211—VE216.
- Burianyuk M., 2003. Petroleum geophysics in Ukraine. *The Leading Edge* 22 (5), 430—433.
- Cogan M., Zdraveva O., Kairzhanova T., Schoemann M., 2011. A wide-azimuth TTI model-building and imaging case study from the central Gulf of Mexico. 81<sup>st</sup> SEG Meeting: Expand. Abstr. 4056—4060.
- Jones I., 2013. A practical review of migration issues and solutions. 1<sup>st</sup> EAGE West Africa Workshop: Extend. Abstr.
- Farmer P., Zhou Z.Z., Jones D., 2009. The role of reverse time migration in imaging and model estimation. *The Leading Edge* 28 (4), 436—441.
- Gray S.H., Nottfors C., Bleistein N., 2002. Imaging using multi-arrivals: Gaussian-beams or multi-arrival Kirchhoff? 72<sup>nd</sup> SEG Meeting: Expand. Abstr. 1117—1120.
- Gray S.H., 2005. Gaussian-beam migration of common-shot records. *Geophysics* 70 (4), S71—S77.
- Gray S.H., Bleistein N., 2009. True-amplitude Gaussian-beam migration. *Geophysics* 74 (2), S11—S23.
- Hill N.R., 1990. Gaussian-beam migration. *Geophysics* 55 (11), 1416—1428.
- Hill N.R., Watson T.H., Hassler M.H., Sisemore L.K., 1991. Salt-flank imaging using Gaussian beam migration. 61<sup>st</sup> SEG Meeting: Expand. Abstr. 1178—1180.
- Hill N.R., 2001. Prestack Gaussian-beam depth migration. *Geophysics* 66 (4), 1240—1250.
- Kim Y., Min D.-J., Shin C., 2011. Frequency-domain reverse-time migration with source estimation. *Geophysics* 76 (2), S41—S49.
- Kosloff D.D., Baysal E., 1983. Migration with the full acoustic wave equation. *Geophysics* 48 (6), 677—687.
- Leggott R., Cowley J., Williams R.G., 2004. The case for applying wave equation depth migration in the North Sea. *First Break* 22 (8), 75—80.

- 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.
- Li S., Fomel S., Vladimirsky A., 2011. Improving wave-equation fidelity of Gaussian-beams by solving the complex eikonal equation. 81<sup>st</sup> SEG Meeting: Expand. Abstr. P. 3829—3834.
- Liu Y., Chang X., Jin D., He R., Sun H., Zheng Y., 2011. Reverse time migration of multiples for subsalt imaging. *Geophysics* 76 (5), WB209—WB216.
- Loewenthal D., Mufti I.R., 1983. Reversed time migration in spatial frequency domain. *Geophysics* 48 (5), 627—635.
- Loinger E., Gaiser J.E., Lucini A., Prestori M., Walters R., 2002. 3D/4C Emilio-azimuth processing for anisotropy analysis. 64<sup>th</sup> EAGE Conference: Extend. Abstr. 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.
- Marmalyevskyy N., Roganov Y., Kostyukevych A., Gazarian Z., Eпов K., 2005. Elastic maximum-energy and maximum-divergence Kirchhoff migration. 67<sup>th</sup> EAGE Conference: Extend. Abstr. Paper P017.
- Menyoli E., Shengwen J., Xu S., Graber S., 2011. Visibility analysis for optimal imaging of target areas and its application for a Gulf of Mexico deepwater data set. *Geophysics* 76 (5), WB119—WB126.
- Neal S.L., Hill N.R., Wang Y., 2009. Anisotropic velocity modeling and prestack Gaussian-beam depth migration with applications in the deepwater Gulf of Mexico. *The Leading Edge* 28 (9), 1111—1119.
- Popov M.M., Semtchenok N.M., Popov P.M., Verdel A.R., 2010. Depth migration by the Gaussian-beam summation method. *Geophysics* 75 (2), S81—S93.
- Sava P., Hill S.J., 2009. Overview and classification of wavefield seismic imaging methods. *The Leading Edge* 28 (2), 170—183.
- Sekulic D., Sepulveda H., 2004. Complimentary application of prestack depth Kirchhoff and Wave Equation migration methods toward final images in the Gulf of Mexico. 74<sup>th</sup> SEG Meeting: Expand. Abstr. P. 214—2143.
- Stewart R.R., Gaiser J.E., Brown R.J., Lawton D.C., 2003. Converted-wave seismic exploration: Applications. *Geophysics* 68 (1), 40—57.
- Stovba S.M., Stephenson R.A., 2003. Style and timing of salt tectonics in the Dnieper-Donets Basin (Ukraine): implications for triggering and driving mechanisms of salt movement in sedimentary basins. *Marine and Petroleum Geology* 19 (10), 1169—1189.
- 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.
- Tiapkina O.M., Voitsytski Z.Y., Sydorenko G.D., Parhomenko T.V., 2008. Imaging and mapping of hydrocarbon traps in areas of complex salt tectonics in Ukraine — Case studies. 70<sup>th</sup> EAGE Conference: Extend. Abstr. Paper P076.
- Tiapkina O.M., Okrepkyj O.I., Kolisnichenko V.G., 2012. Seismic imaging and interpretation of salt — trapped prospects in the Dnieper-Donets Basin, Ukraine — Case studies. 74<sup>th</sup> EAGE Conference: Extend. Abstr. Paper B039.
- Winbow G., Clee T., Rainwater M., 2007. Multipath imaging into common-reflection-angle volumes at a GOM site. *The Leading Edge* 26 (11), 1430—1433.
- Winbow G., 2009. CRAM and Kirchhoff images of a west Africa salt structure. *The Leading Edge* 28 (2), 146—155.
- Xu S., Zhang Y., Tang B., 2011. 3D angle gathers from reverse time migration. *Geophysics* 76 (2), S77—S92.
- Zhang Y., Zhang G., 2009. One-step extrapolation method for reverse time migration. *Geophysics* 74 (4), A29—A33.
- Zhang Y., Zhang H., Zhang G., 2011. A stable TTI reverse time migration and its implementation. *Geophysics* 76 (3), WA3—WA11.
- Zhu T., Gray S.H., Wang D., 2007. Prestack Gaussian-beam depth migration in anisotropic media. *Geophysics* 72 (3), S133—S138.



# Advanced methods for seismic imaging when mapping hydrocarbon traps associated with salt domes

© A. N. Tiapkina, Yu. K. Tyapkin, A. I. Okrepkiy, 2014

This paper is the first in a series of tutorials on the usage of modern migration methods for seismic imaging in areas of intense salt tectonics. In the paper, various types of hydrocarbon traps associated with salt domes in the Dnieper-Donets depression have been analyzed. Moreover, classification of methods for seismic imaging has been given. With examples from other sedimentary basins, the benefits of pre-stack migration, a consideration of multipathing of seismic energy and the usage of converted waves in imaging of near stock objects have been shown.

**Key words:** salt tectonics, near stock traps, seismic images, seismic migration, converted waves.

## References

- Voitsytski Z. Ya., Sydorenko G. D., Parhomenko T. V., Tiapkina A. N., Khoma R. S., 2007. Application of Seismic Data Migration According to Current Trends in the Development of Seismic Exploration Method. *Geoinformatika* (4), 23—30 (in Russian).
- Kozlov E. A., 2006. Medium Models in Prospecting Seismology. Tver: GERS Publ., 480 p. (in Russian).
- Complex Program of Developing Hydrocarbon Resources in Permian and Carboniferous Carbonate Rocks of the Eastern Oil-and-Gas-Bearing Region: (Final report), 2012. SE Naukanaftogaz. Scientific head S. G. Vakarchuk. Kiev, 627 p. (in Ukrainian).
- Levyant V. B., Khromova I. Yu., Kozlov E. A., Kerusov I. N., Kashcheyev D. E., Kolesov V. V., Marmalyevskyy N. Ya., 2010. Guidelines on the Use of Seismic Data to Assess Hydrocarbon Reserves in Carbonate Rocks with Fracture-Cavern Porosity. Moscow: CGE, Russia, 250 p. (in Russian).
- Mershchiy V. V., Makovenko D. V., Simachenko M. V., Renkas Yu. L., Lesnoy G. D., 2010. Application of Prestack Migration in the Conditions of Salt Dome Structures of Ukraine. *Modern seismic methods when searching for oil and gas fields in complex structures (Seismo-2010): Proceedings of the 1<sup>st</sup> Int. sci. and pract. conf.* Feodosiya: UkrGGRI (in Russian).
- Development of Methods for Identifying and Mapping Subtle Subvertical Faults with Migration of Duplex Waves: (Final report), 2003. Ukrainian State Geological Prospecting Institute; Responsible executor N. Ya. Marmalyevskyy. № SR 0102U002763. Kiev, 234 p. (in Ukrainian).
- Sydykov K. Zh., Sokolovskiy S. G., 2000. Some Peculiarities of Depth Migration of Seismic Data in the Precaspian Basin. *Geofizika* (2), 16—21 (in Russian).
- Chirvinskaya M. V., Sollogub V. B., 1980. Deep Structure of the Dnieper-Donets Aulacogen from Geophysical Data. Kiev: Naukova Dumka, 180 p. (in Russian).
- Albertin U., Woodward M., Kapoor J., Chang W., Charles S., Nichols D., Kitchenside P., Mao W., 2001. Depth imaging examples and methodology in the Gulf of Mexico. *The Leading Edge* 20 (5), 498—513.
- Baysal E., Kosloff D. D., Sherwood J. W. C., 1983. Reverse time migration. *Geophysics* 48 (11), 1514—1524.
- Bleistein N., Gray S. H., 2010. Amplitude calculations for 3-D Gaussian-beam migration using complex-valued traveltimes. 80<sup>th</sup> SEG Meeting: Expand. Abstr. P. 3349—3353.
- Buur J., Kühnel T., 2008. Salt interpretation enabled by reverse-time migration. *Geophysics* 73 (5), VE211—VE216.
- Buriyank M., 2003. Petroleum geophysics in Ukraine. *The Leading Edge* 22 (5), 430—433.
- Cogan M., Zdraveva O., Kairzhanova T., Schoemann M., 2011. A wide-azimuth TTI model-building and imaging case study from the central

- Gulf of Mexico. 81<sup>st</sup> SEG Meeting: Expand. Abstr. 4056—4060.
- Jones I., 2013. A practical review of migration issues and solutions. 1<sup>st</sup> EAGE West Africa Workshop: Extend. Abstr.
- Farmer P., Zhou Z.Z., Jones D., 2009. The role of reverse time migration in imaging and model estimation. *The Leading Edge* 28 (4), 436—441.
- Gray S.H., Nottfors C., Bleistein N., 2002. Imaging using multi-arrivals: Gaussian-beams or multi-arrival Kirchhoff? 72<sup>nd</sup> SEG Meeting: Expand. Abstr. 1117—1120.
- Gray S.H., 2005. Gaussian-beam migration of common-shot records. *Geophysics* 70 (4), S71—S77.
- Gray S.H., Bleistein N., 2009. True-amplitude Gaussian-beam migration. *Geophysics* 74 (2), S11—S23.
- Hill N.R., 1990. Gaussian-beam migration. *Geophysics* 55 (11), 1416—1428.
- Hill N.R., Watson T.H., Hassler M.H., Sisemore L.K., 1991. Salt-flank imaging using Gaussian beam migration. 61<sup>st</sup> SEG Meeting: Expand. Abstr. 1178—1180.
- Hill N.R., 2001. Prestack Gaussian-beam depth migration. *Geophysics* 66 (4), 1240—1250.
- Kim Y., Min D.-J., Shin C., 2011. Frequency-domain reverse-time migration with source estimation. *Geophysics* 76 (2), S41—S49.
- Kosloff D.D., Baysal E., 1983. Migration with the full acoustic wave equation. *Geophysics* 48 (6), 677—687.
- Leggott R., Cowley J., Williams R.G., 2004. The case for applying wave equation depth migration in the North Sea. *First Break* 22 (8), 75—80.
- 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.
- Li S., Fomel S., Vladimirsky A., 2011. Improving wave-equation fidelity of Gaussian-beams by solving the complex eikonal equation. 81<sup>st</sup> SEG Meeting: Expand. Abstr. P. 3829—3834.
- Liu Y., Chang X., Jin D., He R., Sun H., Zheng Y., 2011. Reverse time migration of multiples for subsalt imaging. *Geophysics* 76 (5), WB209—WB216.
- Loewenthal D., Mufti I.R., 1983. Reversed time migration in spatial frequency domain. *Geophysics* 48 (5), 627—635.
- Loinger E., Gaiser J.E., Lucini A., Prestori M., Walters R., 2002. 3D/4C Emilio-azimuth processing for anisotropy analysis. 64<sup>th</sup> EAGE Conference: Extend. Abstr. 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.
- Marmalyevskyy N., Roganov Y., Kostyukevych A., Gazarian Z., Epov K., 2005. Elastic maximum-energy and maximum-divergence Kirchhoff migration. 67<sup>th</sup> EAGE Conference: Extend. Abstr. Paper P017.
- Menyoli E., Shengwen J., Xu S., Graber S., 2011. Visibility analysis for optimal imaging of target areas and its application for a Gulf of Mexico deep-water data set. *Geophysics* 76 (5), WB119—WB126.
- Neal S.L., Hill N.R., Wang Y., 2009. Anisotropic velocity modeling and prestack Gaussian-beam depth migration with applications in the deepwater Gulf of Mexico. *The Leading Edge* 28 (9), 1111—1119.
- Popov M.M., Semtchenok N.M., Popov P.M., Verdel A.R., 2010. Depth migration by the Gaussian-beam summation method. *Geophysics* 75 (2), S81—S93.
- Sava P., Hill S.J., 2009. Overview and classification of wavefield seismic imaging methods. *The Leading Edge* 28 (2), 170—183.
- Sekulic D., Sepulveda H., 2004. Complimentary application of prestack depth Kirchhoff and Wave Equation migration methods toward final images in the Gulf of Mexico. 74<sup>th</sup> SEG Meeting: Expand. Abstr. P. 214—2143.
- Stewart R.R., Gaiser J.E., Brown R.J., Lawton D.C., 2003. Converted-wave seismic exploration: Applications. *Geophysics* 68 (1), 40—57.
- Stovba S.M., Stephenson R.A., 2003. Style and timing of salt tectonics in the Dnieper-Donets Basin (Ukraine): implications for triggering and driving mechanisms of salt movement in sedimentary basins. *Marine and Petroleum Geology* 19 (10), 1169—1189.
- 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.
- Tiapkina O.M., Voitsytski Z.Y., Sydorenko G.D., Parhomenko T.V., 2008. Imaging and mapping of hydrocarbon traps in areas of complex salt tectonics in Ukraine — Case studies. 70<sup>th</sup> EAGE Conference: Extend. Abstr. Paper P076.
- Tiapkina O.M., Okrepkyj O.I., Kolisnichenko V.G., 2012. Seismic imaging and interpretation of

- salt — trapped prospects in the Dnieper-Donets Basin, Ukraine — Case studies. *74<sup>th</sup> EAGE Conference: Extend. Abstr.* Paper B039.
- Winbow G., Clee T., Rainwater M., 2007. Multipath imaging into common-reflection-angle volumes at a GOM site. *The Leading Edge* 26 (11), 1430—1433.
- Winbow G., 2009. CRAM and Kirchhoff images of a west Africa salt structure. *The Leading Edge* 28 (2), 146—155.
- Xu S., Zhang Y., Tang B., 2011. 3D angle gathers from reverse time migration. *Geophysics* 76 (2), S77—S92.
- Zhang Y., Zhang G., 2009. One-step extrapolation method for reverse time migration. *Geophysics* 74 (4), A29—A33.
- Zhang Y., Zhang H., Zhang G., 2011. A stable TTI reverse time migration and its implementation. *Geophysics* 76 (3), WA3—WA11.
- Zhu T., Gray S.H., Wang D., 2007. Prestack Gaussian-beam depth migration in anisotropic media. *Geophysics* 72 (3), S133—S138.