

# Application of Reverse Time Migration to Complex Imaging Problems in the North Sea

## Применение обратной миграции во временной области для решения сложных задач, связанных с построением изображений в Северном море

Paul Farmer, Ian F. Jones

Пол Фармер, Йан Ф. Джоунз

Seismic time and depth migration is commonly carried out using either integral or conventional (one-way) wavefield extrapolation techniques. Although adequate in many cases, both methods have significant limitations that reduce imaging quality in some instances, especially in geophysically complex domains. In 2005 GXT introduced Reverse Time Migration, RTM, a depth migration technique that overcomes the limitations of these existing techniques. Since then it has been proven on dozens of projects spread throughout the world.

We start by discussing the issues affecting existing methods, and then go on to show how RTM addresses these limitations, illustrated using an example from the North Sea.

### Migration Technologies

Standard shot-based one-way wavefield extrapolation (WE) pre-Stack Depth Migration techniques image the subsurface by continuing the source and receiver wavefields for each shot downward in depth. An image is formed by cross correlating these two wavefields at each depth and each position, and the partial images formed for all shots are summed to form the final image. A key, limiting, assumption made is that the source and receiver wave fields only travel in one direction along the direction of extrapolation: forwards for the source wavefield, and backwards for the receiver or scattered wavefield. In practice, each of these wave-fields will generally travel both up and down if the velocity model is complex or exhibits strong velocity gradients. This produces turning (or diving) rays and multiples. In addition, approximations in the one-way WE techniques generally limit the allowed dips in the final image to less than 70 degrees. Steep dips and turning rays are usually imaged using Kirchhoff techniques, but these fail when either the source or receiver wavefields becomes sufficiently complex that multipathing occurs. The RTM migration technique handles these problems by using the two-way acoustic wave equation without approximations or assumptions. The source wavefield is propagated forward in time and the recorded receiver wavefield is propagated back in time, hence Reverse Time Migration, though note that it is a depth migration technique. Because RTM uses the exact acoustic wave equation it can image data through velocity structures of arbitrary complexity without error or dip

Для выполнения миграции во временной области или по глубине используют методы разведки как на основе комплексного, так и традиционного (одностороннего) волнового поля. Несмотря на то, что во многих случаях эти методы хорошо подходят для решения задач, они имеют ряд ограничений, иногда снижающих качество изображения, в частности, в сложных геологических областях. Компания GXT с 2005 года применяет технологию обратной миграции во временной области (RTM), представляющую собой метод глубинной миграции, который позволяет преодолеть ограничения обоих указанных выше методов. За прошедшее время данная технология успешно применялась на десятках проектов по всему миру.

Начнем с обсуждения параметров, оказывающих влияние на указанные методы, а затем продемонстрируем, каким образом технология RTM позволяет преодолеть конкретные ограничения, на примерах проведения исследований в Северном море.

### Технологии миграций

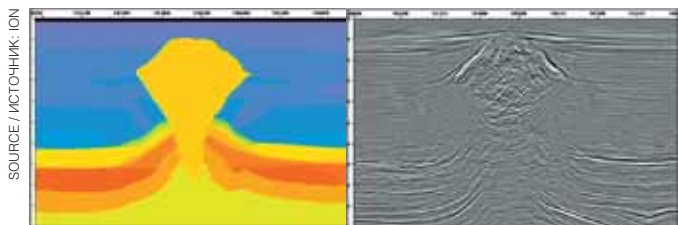
Стандартный метод глубинной миграции до суммирования, основанный на разведке волнового поля при прохождении взрывной волны в одном направлении, дает отображение глубинных горизонтов посредством продолжения волновых полей источника и приемника для каждого взрыва по глубине в направлении сверху вниз. Изображение создается путем взаимной корреляции этих двух волновых полей для каждой глубины и каждого положения, а частичные изображения для всех взрывов суммируются для получения окончательного изображения. Основное ограничивающее условие состоит в том, часто источник и приемник волновых полей перемещается только в одном направлении вдоль направления разведки: вперед для волнового поля источника и обратно для волнового поля приемника или рассеянного волнового поля. На практике каждое из этих волновых полей, как правило, перемещается и вверх, и вниз, если скоростная модель ложная или включает мощные скоростные компоненты. В результате возникают отклоняющиеся в сторону (или в глубину) траектории или многократные волны. Кроме того, аппроксимации при использовании методов разведки с помощью односторонних волновых полей, как правило, ограничивает допустимые погружения на окончательном изображении до угла менее 70 градусов. Крутые пог-

### AUTHORS' BIOS

Paul Farmer and Ian F. Jones, ION Geophysical.

### ОБ АВТОРАХ

Пол Фармер и Йан Ф. Джоунз, компания ION Geophysical.



● Fig. 1. "Final" production 3D migration velocity field. ● Fig. 2. 3D Kirchhoff PreSDM.  
 ● Рис. 1. «Конечное» отображение 3D поля миграционных скоростей. ● Рис. 2. 3D Метод Кирхгофа.

limitations, and even has the potential to image multiples when the multiple generators are present in the model.

Commercial Status

The RTM technique is computationally very demanding, and as such was considered economically impracticable. However, the recent step-change advances in computing power have made it commercially viable and GXT have been to the fore in applying it on a large number of projects in the Gulf of Mexico, West Africa, and the North Sea. This has initially been with towed streamer data, but it is equally applicable to multi or wide azimuth streamer data, as well as OBC scenarios. GXT also have considerable experience in using RTM for VSP imaging. RTM has the potential to migrate all multiples, however practice has shown that multiples are perhaps more effectively handled before RTM application, and GXT have found that employing their proprietary 3D SRME anti-multiple tools has had a significant effect on imaging quality.

3D Field Data Example

We now illustrate the effectiveness of anisotropic 3D RTM on a classic "mushroom-shaped" salt dome typical of the North Sea. A "final" 3D model was available from a prior WE migration, as was the migration result, Fig. 1 and 2 respectively show the velocity-depth model and Kirchhoff preSDM result for a selected crestal line, where the deeper (sub-chalk) targets are not adequately imaged, due in part to multipathing issues.

Forward modelling was applied to predict expected outcomes, specifically 2D ray tracing through a model of a crestal line from this salt body. The aim was to ascertain what classes of energy illuminate the steep salt flank events. Fig. 3 shows the ray trace results for PP events passing through the top salt,



● Fig. 3. PP ray paths through top salt. ● Рис. 3. Траектории PP в вершине соляного купола.  
 ● Fig. 4. PSSP ray paths through top salt. ● Рис. 4. Траектории PSSP в вершине соляного купола.  
 ● Fig. 5. Double-bounce (prism wave) ray-paths. ● Рис. 5. Траектории двукратного отражения (призматические волны).

ружения и боковые отклонения волн обычно представляются по методу Кирхгофа, однако они не прослеживаются в случаях, когда волновые поля источника или приемника становятся достаточно сложными и происходит прохождение волн по многим направлениям. Применение технологии RTM позволяет решить указанные задачи путем использования уравнения для полной акустической волны без аппроксимаций и допущений. Волновое поле источника распространяется вперед во времени, а регистрируемое волновое поле приемника распространяется в обратном направлении во времени, то есть происходит обратная миграция во временной области, хотя при этом следует помнить, что, по сути, это метод глубинной миграции. Так как технология RTM основана на точном уравнении акустической волны, она может представлять информацию об изображении через скоростные структуры произвольной сложности без ограничения ошибки или погружения, и даже предоставляет возможность отображать многократные волны, если в модели представлены генераторы многократных волн.

Положение на рынке

Технология RTM требует больших расчетов и потому считается экономически неоправданной. Однако последние достижения в компьютерной области делают ее доступной в практическом применении, и GXT готова использовать данную технологию на ряде крупных проектов в Мексиканском заливе, Западной Африке и в Северном море. Первоначально она применялась при обработке данных, полученных с помощью буксируемой косы, однако, она вполне применима к данным, полученным с помощью косы с широким или многократным азимутом, как, например, с технологией OBC. GXT имеет также немалый опыт применения технологии RTM для исследований ВСП. Технология RTM имеет потенциал для миграции всех многократных волн, однако практика показала, что с многократными волнами, вероятно, более эффективно работали до применения RTM, при этом GXT пришла к выводу, что применение инструментов 3D SRME собственной разработки для избавления от многократных волн позволяет значительно повысить качество изображения.

Пример обработки полевых данных 3D

Теперь приведем пример эффективного использования анизотропной технологии 3D RTM при разведке солевого купола, имеющего форму гриба типичного для Северного моря. «Конечная» трехмерная модель была получена по предварительной миграции волнового поля, и представляла собой результаты миграции. На рис. 1 и 2, соответственно, представлены глубинно-скоростная модель и результат предварительной обработки по Кирхгофу для выбранной линии антиклинали, где глубокие горизонты (ниже мела) не отображены адекватно, в том числе, и по причине многонаправленности.

Для прогнозирования ожидаемых результатов применялось моделирование волн в исходном направлении, в частности двухмерное отслеживание траекторий при прохождении через модель антиклинальной линии от указанного соляного тела. Это делалось для выявления классов энергии, которые отображают крутизну крыльев антиклинали. На рис. 3 представлены результаты отслеживания траектории продольной волны, проходящей через вершину солевого купола и отображающей его крылья. На рис. 4 представлены траектории волн для вступлений СП-ПВ, а на рис. 5 – траектории для двукратных отражений (или призматических волн), которые отражаются как от крыльев соляного купола, так и от плоских прилегающих структур. Энергия, отображающая крылья соляного купола, является подчиненной по отношению к вступлениям двукратных отражений. С помощью конечной трехмерной глубинно-скоростной модели, полученной по традиционной технологии (рис. 1), далее проводится RTM с ограничением частоты миграции до 17 Гц. Результаты

and illuminating the salt flanks. Fig. 4 shows the ray paths for the PS-SP arrivals, while Fig. 5 shows ray paths for double bounces (or prism waves) that reflect off both the salt flanks and the flat lying adjacent events. The energy illuminating the salt flank is dominated by double bounce arrivals. Using our conventionally-derived final 3D velocity-depth model (Fig. 1) we ran an RTM, limiting the migration frequency to 17Hz. The results of the RTM clearly indicated the inadequacies of the conventional model, and we proceeded to refine the model based on iterative RTM model update. Fig. 6 and 7 show respectively a one-way wave extrapolation preSDM and corresponding RTM for a crestal line (using the "final" model from the prior project). It should be noted that there are some differences in the precise processing sequence of these results, however, these differences have no impact on the conclusions drawn here.

We can see from the RTM that we have very steep salt flank arrivals, possibly from an upturned chalk interface. Ray trace studies concluded that these steep events probably result from double-bounce illumination. The original salt interpretation in this model, based on WE results, looks to be incorrect near the edges of the salt, especially on the right hand side. The RTM result indicates that the salt is probably a bit less wide, with near-verti-

RTM четко продемонстрировали несоответствия традиционной модели, поэтому мы продолжили совершенствование модели на базе уточнения итеративной модели RTM. На рис. 6 и 7, соответственно, представлены результаты разведки с помощью глубинной миграции до суммирования для односторонней волны и соответствующие результаты RTM для линии антиклинали (с применением «конечной» модели по предыдущему проекту). Следует отметить, что точная последовательность обработки этих результатов имеет некоторые различия, которые, однако, не влияют на полученные здесь выводы.

Результаты RTM показывают наличие вступлений очень крутых крыльев соляного купола, возможно от опрокинутой поверхности контакта с мелом. Исследования траекторий показывают, что эти крутые образования имеют место, вероятно, в результате двукратного отражения. Первоначальная интерпретация соляного тела в данной модели на основе данных исследования волнового поля представляются неверными вблизи краев соляного тела, особенно по правой его стороне. Результаты RTM показывают, что соляное тело несколько менее широкое с почти отвесными краями под слегка нависающим краем. Более того, результаты RTM показывают, что окружающие плоские горизонты, вероятно, резко опрокидываются в зоне примыкания к соляному телу, а не «сглаживают» модель в

## ION and LARGEO Announce Geophysical Alliance

ION and LARGEO, a Moscow-based seismic data processing company, have formed an alliance to provide advanced imaging services for seismic data acquired in the Russian market.

### Launch and "Buzz" in St. Petersburg

The official signing took place at ION's booth during the EAGE's Bi-annual Trade Show and Technical Conference in St. Petersburg on April 8, 2008. The alliance ceremony was represented by key officials from both companies and the agreement was signed onsite by LARGEO General Director, Andrei Elistratov and ION CEO, Bob Peebler.

After the proceedings, customers and guests were treated to a champagne reception and details of the partnership were explained by ION host, Jean Januard, Vice President, Russia and CIS countries. Immediately following the briefing by Januard, there was plenty of opportunity for informal discussions between ION and LARGEO personnel, as well as many other conference guests who attended the event, whilst sipping champagne and enjoying great hospitality.

### Local Capabilities, International Expertise

The alliance, known as LARGEO-ION, combines the technological strengths of ION's GX Technology (GXT) Imaging Solutions group with the local market knowledge and extensive regional processing experience of LARGEO to bring best-in-class imaging services to E&P firms operating in Russia.

LARGEO was established in 2004 and since its inception, has rapidly gained a presence in the highly competitive Russian market. The company's client base includes Rosneft, LUKOIL, Sibneft, RITEK, YUKOS, ONGC, Shell, Gaitner Petroleum and other Russian and foreign oil and gas companies. The company's key strategies focus on technical excellence and response service, which contribute to LARGEO's success in tackling the most complex imaging projects in Russia.

## Компании ION и LARGEO объявили о создании альянса

ION и LARGEO, российская компания по обработке сейсмических данных, объединились для оказания высококачественных услуг по обработке и интерпретации сейсмических данных, полученных на российском рынке.

### Подписание соглашения и «фуршет» в Санкт-Петербурге

Официальное подписание договора состоялось на выставочном стенде компании ION во время ежегодной торгово-промышленной выставки и технической конференции в Санкт-Петербурге 8 апреля 2008 года. На церемонии создания альянса присутствовали руководители обеих компаний, а соглашение было подписано генеральным директором LARGEO Андреем Елистратовым и генеральным директором компании ION Бобом Пиблером.

После процедуры подписания соглашения всем присутствующим было предложено шампанское, а выполняющий обязанности хозяина стенда ION вице-президент компании по России и странам СНГ Жан Жанюар разъяснил всем присутствующим цели и задачи партнерства. После окончания брифинга многочисленные гости церемонии и присутствующие на ней представители компаний ION и LARGEO с удовольствием воспользовались прекрасной возможностью для общения и неформальных бесед в непринужденной обстановке за бокалами шампанского.

### Местные возможности, международный опыт

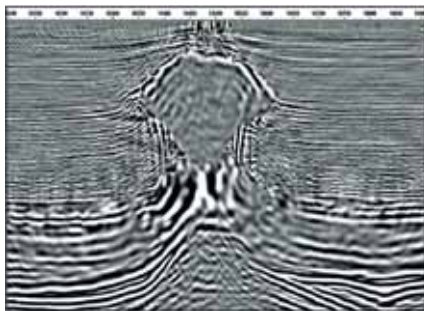
Новый альянс, получивший название LARGEO-ION, соединил в себе технологическую мощь группы ION GX Technology (GXT) Imaging Solutions со знанием местного рынка и большим опытом региональной обработки геолого-геофизических данных компании LARGEO для предоставления высококачественных услуг по получению глубинных изображений недр действующим в России компаниям нефтегазовой отрасли.

Компания LARGEO была основана в 2004 году и быстро завоевала лидирующее положение на высококонкурентном российском рынке. Клиентами компании являются «Роснефть», «ЛУКОЙЛ», «Сибнефть», «РИТЭК», «ЮКОС», ONGC, Shell, Gaitner Petroleum и другие российские и зарубежные нефтегазодобывающие компании.

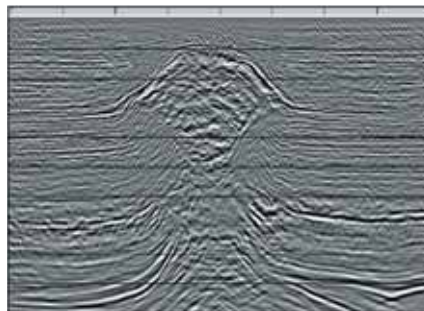
Стратегия компании ориентирована, в первую очередь, на высокое качество выполнения работ и применение новейших технологий обработки данных, что является составной частью успеха LARGEO в работе над наиболее сложными российскими проектами, включающими получение глубинных изображений недр.

cal edges below a slight overhang. Furthermore, the RTM result indicates that the surrounding flat horizons probably turn-up sharply to abut the salt, rather than “rolling-through” the model with a gentle anticlinal slope, as previously modelled.

SOURCE / ИСТОЧНИК: ION



● Fig. 6. 3D One-Way WEM.  
● Рис. 6. 3D Одностороннее волновое поле.



● Fig. 7. 3D Two-Way RTM.  
● Рис. 7. 3D Полная RTM.

виде пологого крыла антиклинали, как это представлялось ранее в модели.

### Выводы

Сложные структуры, такие как соляные купола, выявляются многочисленными траекториями волн, которые не могут быть представлены с помощью традиционных

### Conclusions

Complex bodies such as salt domes are illuminated by many wave paths that cannot be imaged by conventional one-way wave equation techniques. Significant improvement can be achieved both in the model building and final migration by employing the two-way Reverse Time Migration technique. The combination of model building and migration is the key to successful imaging. Iterative application of RTM can be used to delineate salt geometries in areas where both Kirchhoff and one-way wave equation methods fail. ●

методов для односторонних волн. Значительные улучшения могут быть достигнуты как в отношении построения модели, так и конечной миграции при использовании технологии полной обратной миграции во временной области. Сочетание построения модели и миграции – решение проблем построения качественного изображения. Итеративное применение технологии RTM может оказаться эффективным при построении геометрии соляных тел на участках, где ни уравнение Кирхгофа, ни одностороннее волновое уравнение не дают результатов. ●

The LARGE-ION Imaging Center will be staffed mainly by LARGE-ION geophysicists who have been trained by GX Technology at other geophysical service centers around the world.

“We believe our collective processing experience, advanced technology, market knowledge and personnel will allow LARGE-ION to deliver the highest quality seismic imaging with reduced turnaround time. The opening of this Russian processing center marks a key milestone in the global expansion of GXT’s data processing services,” stated Nick Bernitsas, Senior Vice President of ION GXT Imaging Solutions.

#### A Logical Union

Russia is the world’s second largest oil producer and the largest holder of proven natural gas reserves. The Russian market attract vast numbers of E&P participants with keen interest from major national and international oil and gas companies.

Strategically located in Moscow, the center will deliver a wide range of advanced seismic data processing services with an initial focus on data acquired in the marine environment.

Imaging services will use the latest Linux-based server hardware and will include:

- Pre-stack depth and time migration;
- Reverse time migration (RTM);
- Azimuthal velocity analysis;
- Full-wave imaging;
- AVO and inversion;
- Velocity modelling;
- Data conditioning.

“The alliance between our two companies will create one of the most powerful seismic data processing centers in Russia. We believe LARGE-ION will be capable of delivering the highest quality seismic images and will allow our E&P customers to rapidly take advantage of the latest data processing innovations such as reverse time migration and full-wave imaging,” stated Alexander Yakovlev, LARGE-ION General Manager.

В центре обработки данных LARGE-ION будут работать, в основном, специалисты компании LARGE-ION, прошедшие обучение в компании GX Technology и других геофизических центрах мира. «Мы убеждены, что совместный опыт обработки, революционная технология, знание рынка и высококвалифицированный персонал позволят Центру LARGE-ION оказывать первоклассные услуги по обработке данных и получению глубинных изображений среды, сократив при этом сроки выполнения этих работ. Открытие Российского вычислительного центра стало важной вехой на пути глобального расширения услуг GXT по обработке сейсмических данных», – заявил Ник Берницас, вице-президент ION GXT Imaging Solutions.

#### Логический союз

Россия является вторым по величине мировым производителем нефти и обладает наибольшими в мире доказанными запасами природного газа. Российский рынок привлекателен как для основных российских и международных нефтегазовых компаний, так и для большого числа компаний-участников сервисного рынка, включающего разведку и добычу углеводородов.

Находящийся в Москве Вычислительный центр будет оказывать широкий спектр высококачественных услуг по обработке данных сейсморазведки, на начальном этапе сосредоточившись на обработке морских данных. Инфраструктура Центра, полностью оснащенная самыми современными программными и аппаратными средствами на базе Linux, позволит оказывать широкий спектр услуг по получению глубинных изображений среды, включая:

- временную и глубинную миграцию до суммирования;
- обращенную полноволновую миграцию во временной области;
- азимутальный анализ скоростей;
- многоволновую съемку;
- AVO-анализ и инверсию;
- построение скоростной модели;
- преобразование данных.

«Альянс наших компаний позволит создать один из крупнейших центров обработки сейсмических данных в России. Мы уверены, что LARGE-ION сможет выполнять высококачественные глубинные сейсмические построения и позволит нашим клиентам из нефтегазовой отрасли быстро воспользоваться последними инновационными решениями в сфере обработки данных, такими как обращенная миграция во временной области и многоволновая съемка», – отметил Александр Яковлев, генеральный менеджер LARGE-ION.