

О1 СРАВНЕНИЕ МЕТОДОВ ВОССТАНОВЛЕНИЯ СКОРОСТНЫХ АНОМАЛИЙ ПО ДАННЫМ СЕЙСМИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА

И.В. Абакумов^{*}, Д.А. Киященко^{**}, Б.М. Каштан^{*}
(* *СПбГУ, Санкт-Петербург*, ** *Brunei Shell Petroleum*)

A COMPARISON OF METHODS OF TIME-LAPSE VELOCITY RE-CONSTRUCTION

I.V. Abakumov^{*}, D.A. Kiyashchenko^{**}, B.M. Kashtan^{*}
(* *SPbSU, St. Petersburg*, ** *Brunei Shell Petroleum*)

Аннотация. Целью межскважинного мониторинга является восстановление скоростных аномалий в межскважинном пространстве. Существует множество подходов к задаче восстановления скоростных аномалий. В данной работе мы сравниваем разрешающую способность и вычислительную сложность нескольких методов восстановления скоростных аномалий на примере реалистичных синтетических данных межскважинного мониторинга.

Abstract. The goal of the timelapse crosswell seismic is to reconstruct 4D velocity changes in the interwell space. There are various approaches to the problem of velocity anomalies reconstruction. In this paper we compare resolution and computational complexity of several approaches based on the example of synthetic timelapse crosswell data.

Метод. Стандартная томография на основе данных межскважинного мониторинга [9] предполагает пикирование времен первых вступлений на опорных и повторных данных и обращение разницы времен в скоростную аномалию среды. Недостатком такого метода является ограниченное латеральное разрешение вследствие специфической геометрии наблюдений. Траектория отраженных лучей проходит под значительным углом к горизонту, поэтому содержит информацию, позволяющую улучшить латеральное разрешение и получить дополнительные сведения о скоростной модели среды. В работе [1] предложен метод восстановления скоростных аномалий на основе совместного обращения задержек времен первых вступлений и глубинных сдвигов на мигрированных изображениях с использованием корреляционного подхода ("метод совместного обращения"). Такой метод не требует предварительного пикирования волн и потенциально позволяет учесть спектральные изменения импульсов сигналов. Использование отраженных волн, позволяет повысить пространственное разрешение восстанавливаемой аномалии [1].

В последние годы большой интерес вызывает восстановление скоростных аномалий с помощью метода обращения полного волнового поля (full waveform inversion, FWI). Обращение полного волнового поля позволяет максимально использовать зарегистрированную информацию и восстанавливать высоко разрешенные скоростные модели среды. Существует

множество вариантов обобщения метода FWI для задач сейсмического мониторинга [3, 8, 10]. Метод FWI является дорогим с вычислительной точки зрения, однако становится доступнее благодаря повышению производительности вычислительных систем.

В данной работе предложено сравнение перечисленных методов на примере реалистичного численного эксперимента. Описанный ниже численный эксперимент воспроизводит сейсмический мониторинг, проведенный на одном из месторождений в южном Омане. Скоростная аномалия в межскважинном пространстве в этом эксперименте ожидалась из-за нагнетания пара в резервуар для увеличения коэффициента извлечения нефти [4]. Скоростная модель представлена на Рис. 1. Резервуар в данном случае представлен относительно однородным образованием, однако он осложнен слоистой верхней частью разреза. Скоростная аномалия возникает в резервуаре в центре межскважинного пространства и частично распространяется на вышележащий слой (Рис. 2d). Сложный характер аномалии учитывает эффекты кратковременного нагнетания пара до опорной съемки и изменения скорости при деформации среды над резервуаром. Источники и приемники расположены в скважинах на глубине $\approx \pm 200$ м от верхней границы резервуара. Моделирование опорных и повторных данных было выполнено с помощью акустического конечно-разностного кода, позволяющего учесть диаграмму направленности пьезоэлектрических скважинных источников. В качестве функции источника использовался импульс Риккера с центральной частотой 500 Гц.

Алгоритм восстановления скоростных аномалий. Математически восстановление скоростных аномалий эквивалентно задаче численной оптимизации нелинейного функционала. Для решения этой задачи используется квазиньютоновский метод оптимизации. Класс квазиньютоновских методов требует знания производной функционала. Значение матрицы Гёссе оценивается приближенно исходя из изменений градиента. Вычисление градиента основано на методе сопряженных задач - численном методе вычисления градиента функции или оператора для задач численной оптимизации [7]. Преимущество метода сопряженных задач состоит в том, что его вычислительная сложность эквивалентна решению прямой задачи, не зависимо от количества параметров функционала. Решение сопряженного уравнения для уравнения эйконала было предложено в работе [6]. Решение сопряженного уравнения для волнового уравнения обсуждается в работе [5]. Для приближенной оценки матрицы Гёссе использовался метод Бройдена-Флетчера-Гольдфарба-Шанно с ограниченным использованием памяти (L-BFGS-B) [2]. L-BFGS-B метод итеративно восстанавливает аномалию, пока не удовлетворен критерий сходимости решения.

Результаты восстановления скоростных аномалий. В данном эксперименте нас интересует сравнение методов восстановления скоростных аномалий, поэтому все тесты были сделаны применительно к данным без

добавления шума. Для начала попытаемся восстановить аномалию, используя только информацию о задержках времен первых вступлений с помощью стандартной томографии. Как видно из Рис. 2а, этот метод не дает возможности получить хорошо разрешенную по латерали аномалию и приводит к возникновению артефактов, направленных от аномалии к скважинам с источниками и приемниками. Также отметим определенные проблемы с восстановлением верхней части аномалии. Затем восстановим скоростные аномалии с помощью совместного обращения задержек времен первых вступлений и глубинных сдвигов на мигрированных изображениях. Результат (Рис. 2b) характеризует улучшенное латеральное разрешение аномалии (ослабили артефакты вблизи скважин), а также корректное отображение верхней части аномалии. Таким образом, подход дает лучший результат, чем традиционная томография на первых вступлениях. Наконец метод обращения полного волнового поля позволяет довольно точно восстановить скоростную аномалию (Рис. 2с). Сравнение восстановленных скоростных аномалий с правильным значением вдоль нескольких разрезов показано на Рис. 3.

Теперь сравним вычислительную сложность методов. Выполнение стандартной томографии на персональном компьютере требует порядка четверти часа. Совместное обращение времен первых вступлений и глубинных сдвигов выполняется примерно за два часа. Восстановление аномалий с помощью метода FWI на этом же компьютере занимает около двух дней. Таким образом, алгоритм совместного обращения [1] является компромиссом между точностью восстановления аномалии и вычислительной сложностью метода.

Заключение. В данной работе мы сравнили три метода восстановления скоростных аномалий: стандартную томографию, метод совместного обращения задержек времен первых вступлений и глубинных сдвигов на мигрированных изображениях, и метод, использующий обращение полного волнового поля (FWI). Наиболее точно удастся восстановить аномалию с помощью метода FWI. Если учесть вычислительную сложность, метод совместного обращения оказывается привлекательным т.к. позволяет с приемлемыми временными затратами восстановить аномалию с улучшенным пространственным разрешением.

Благодарности. Авторы благодарны Shell International E&P за финансовую поддержку проекта (грант CRDF RUG1-30027-ST-12).

Литература:

1. Abakumov I., Kiyashchenko D. A., Kashtan B. M. Time-lapse Anomalies Reconstruction via Joint Inversion of Direct Waves and Reflection Images //76th EAGE Conference and Exhibition 2014. – 2014.

2. Byrd R. H. [и др.] A limited memory algorithm for bound constrained optimization //SIAM Journal on Scientific Computing. – 1995. – Т. 16. – №. 5. – С. 1190-1208.
3. Denli H. [и др.] Double-difference elastic waveform tomography in the time domain //2009 SEG Annual Meeting. – Society of Exploration Geophysicists, 2009.
4. Kiyashchenko D. [и др.] Time-lapse down-hole seismic surveys for deep EOR target monitoring in South Oman //2011 SEG Annual Meeting. – Society of Exploration Geophysicists, 2011.
5. Lailly P. The seismic inverse problem as a sequence of before stack migrations //Conference on inverse scattering: theory and application. – Society for Industrial and Applied Mathematics, Philadelphia, PA, 1983. – С. 206-220.
6. Leung S. [и др.] An adjoint state method for three-dimensional transmission travelttime tomography using first-arrivals //Communications in Mathematical Sciences. – 2006. – Т. 4. – №. 1. – С. 249-266.
7. Plessix R. E. A review of the adjoint-state method for computing the gradient of a functional with geophysical applications //Geophysical Journal International. – 2006. – Т. 167. – №. 2. – С. 495-503.
8. Plessix R. E. [и др.] Some 3D applications of full waveform inversion //72nd EAGE Conference & Exhibition-Workshops and Fieldtrips. – 2010.
9. Spetzler J., Šijačić D., Wolf K. H. Application of a linear finite-frequency theory to time-lapse crosswell tomography in ultrasonic and numerical experiments //Geophysics. – 2007. – Т. 72. – №. 6. – С. O19-O27.
10. Watanabe T. [и др.] Differential waveform tomography for time-lapse crosswell seismic data with application to gas hydrate production monitoring //2004 SEG Annual Meeting. – Society of Exploration Geophysicists, 2004.

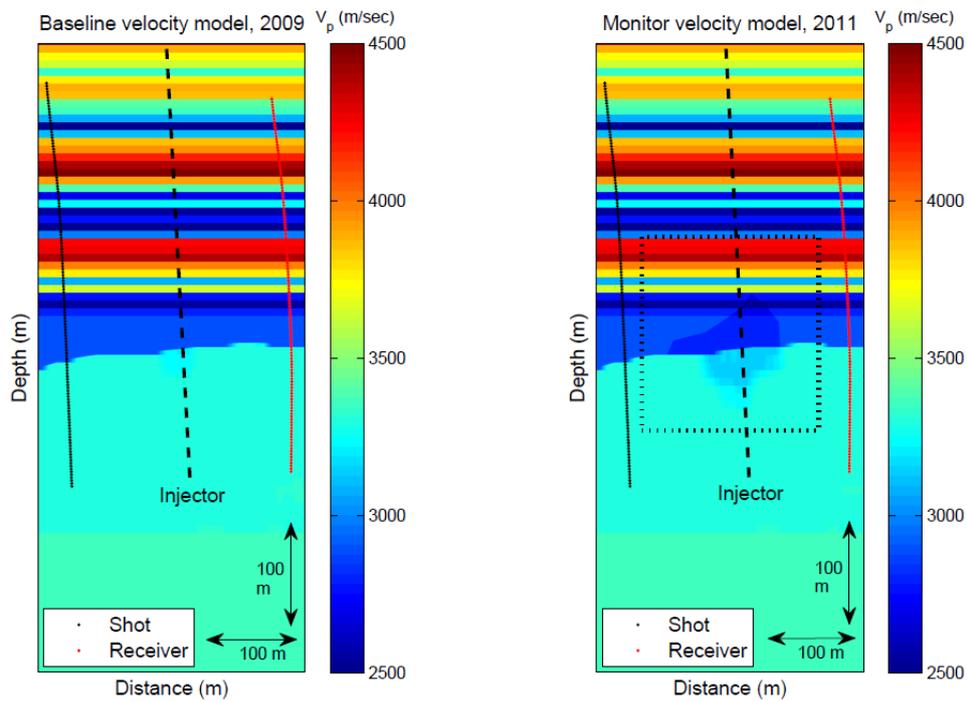


Рисунок 1. Опорная (слева) и повторная (справа) скоростные модели. Источники и приемники расположены в скважинах. Скоростная аномалия расположена в резервуаре и частично затрагивает вышележащие слои. Пунктиром показано приблизительное положение скважины, из которой осуществляется нагнетание пара в резервуар.

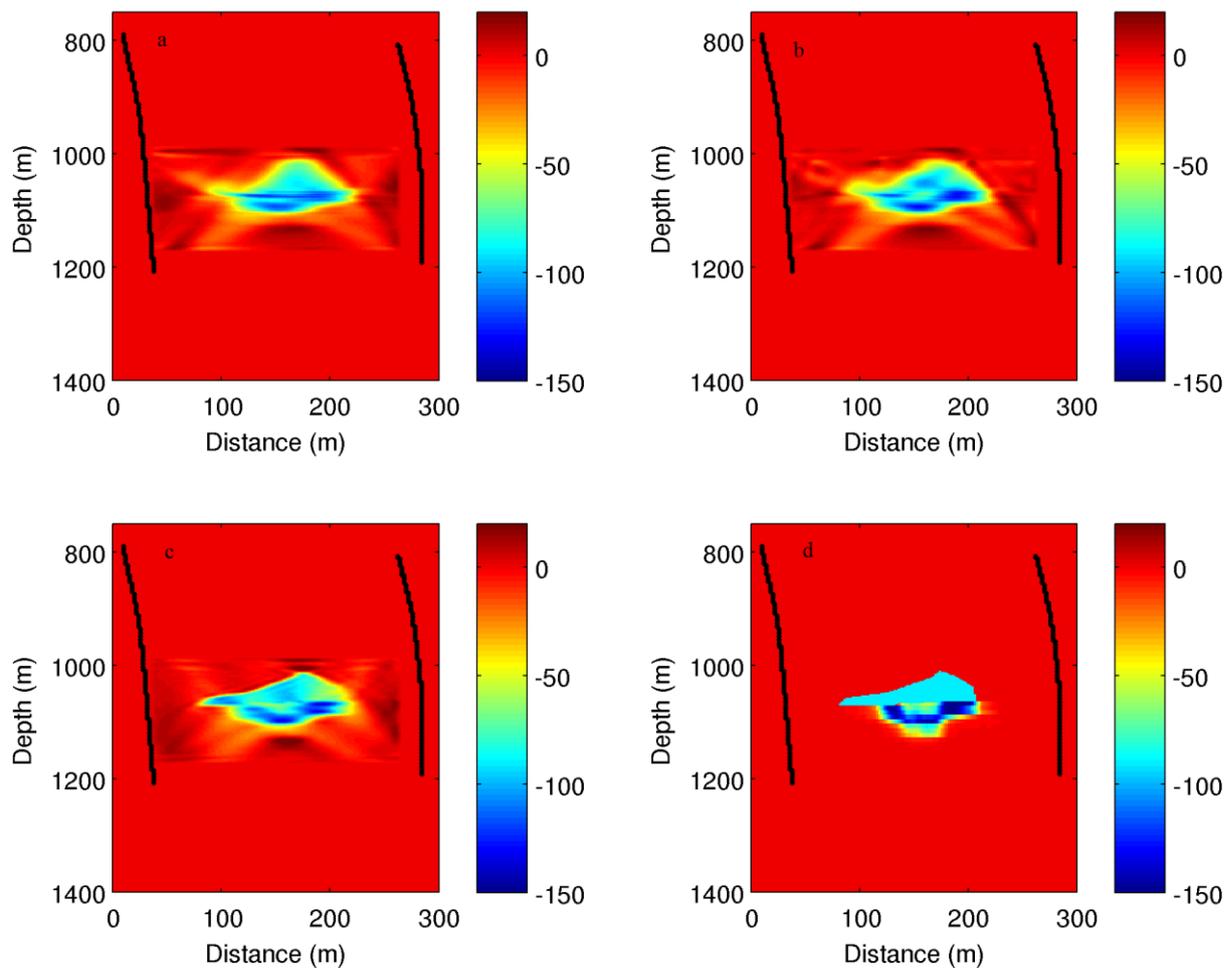


Рисунок 2. Результат восстановления скоростных аномалий: (а) – с помощью стандартной томографии, (б) – с помощью совместного обращения, (с) – с помощью метода FWI и (d) – правильное значение скоростной аномалии

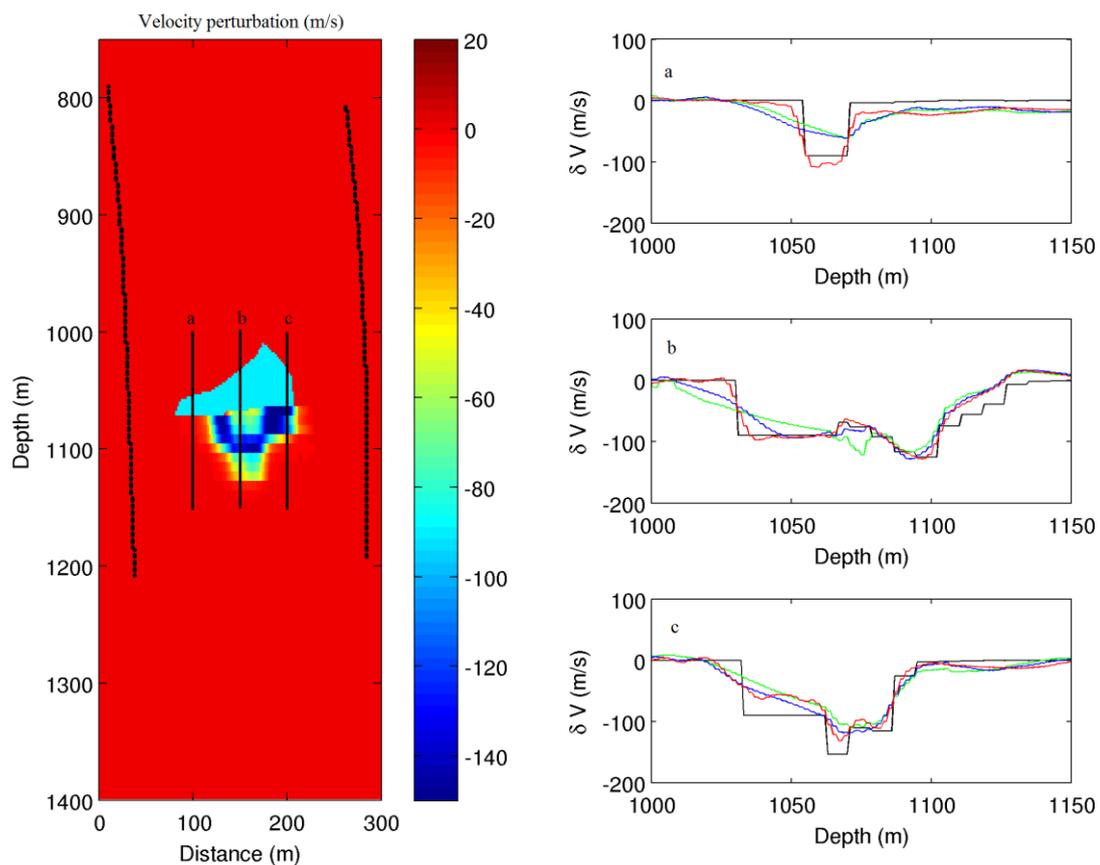


Рисунок 3. Результат восстановления скоростных аномалий. На графиках справа черным показано правильное значение скоростной аномалии, зеленым результат стандартной томографии, синим результат совместного обращения, красным значения аномалии, восстановленной с помощью метода FWI.