



SAINT-PETERSBURG
STATE UNIVERSITY
EST. 1724

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 RECONSTRUCTION

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

Гальперинские чтения - 2015, Москва, ЦГЭ

27-31 октября 2015 года



Содержание

- Мотивация
- Способы восстановления скоростных аномалий
 - Стандартная томография
 - Метод совместного обращения
 - Обобщение метода обращения полного волнового поля
- Моделирование волновых полей псевдоспектральным методом
- Алгоритм восстановления скоростных аномалий
- Результат восстановления скоростных аномалий
- Выводы



Мотивация

Сейсмический мониторинг используется для:

- Определения изменений свойств резервуара
- Характеристики процессов в резервуаре
- Оценки эффективности мер по стимуляции резервуара
- Контроля за распространением CO₂ в технологии улавливания и хранения углерода



Некоторые способы восстановления скоростных аномалий

- A) Томография на основе данных межскважинного мониторинга (“стандартная томография”)**
- B) Метод совместного обращения задержек времен первых вступлений и глубинных сдвигов на мигрированных изображениях (“метод совместного обращения”)**
- C) Обобщение метода обращения полного волнового поля для задач сейсмического мониторинга (“FWI”)**



Стандартная томография

Томография на основе данных межскважинного мониторинга (Spetzler и др., 2007)

- Пикируются времена прихода первых вступлений на опорных и повторных данных. Определяются временные сдвиги:

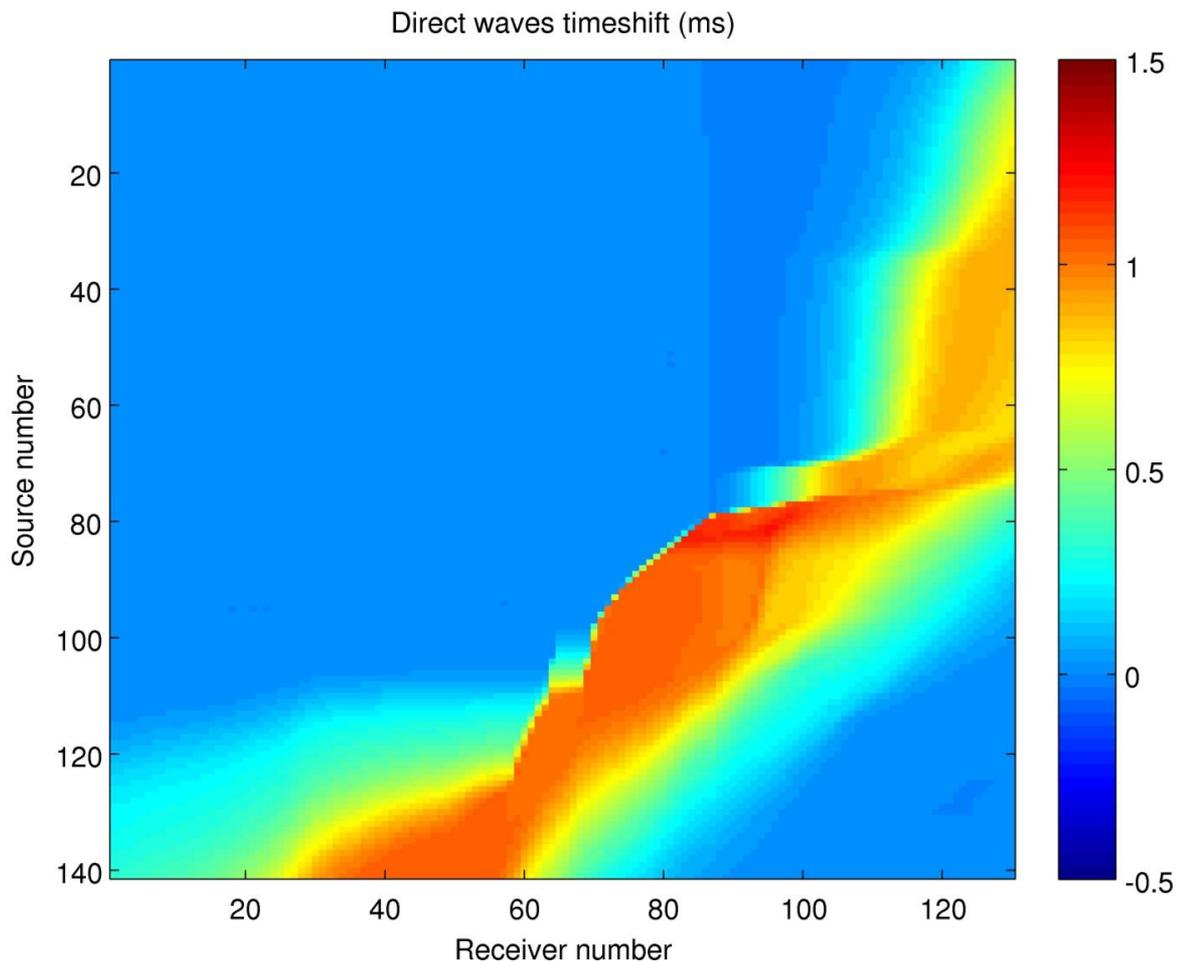
$$\Delta\tau = \tau_m - \tau_b$$

- Восстановление скоростной аномалии производится на основе обращения временных сдвигов:

$$\Delta\tau \rightarrow \delta v(x, z)$$

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.

Панель временных сдвигов





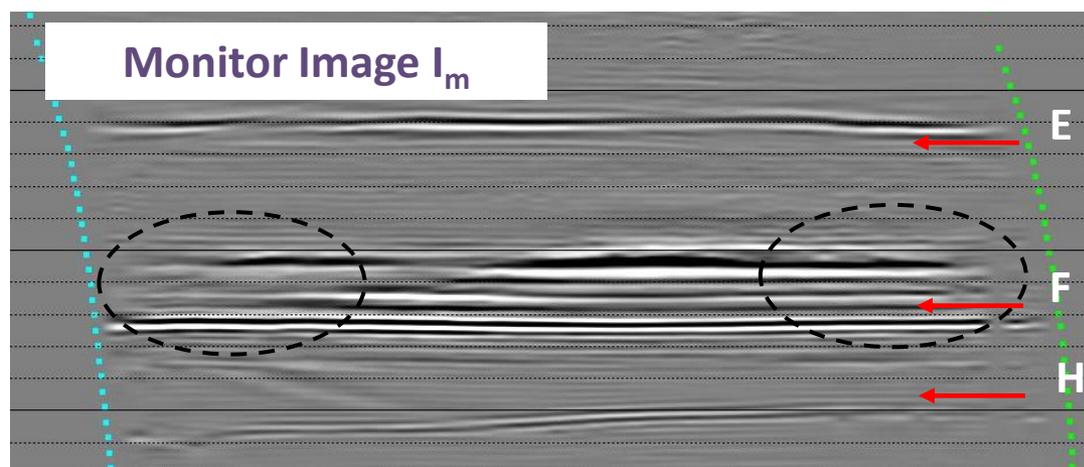
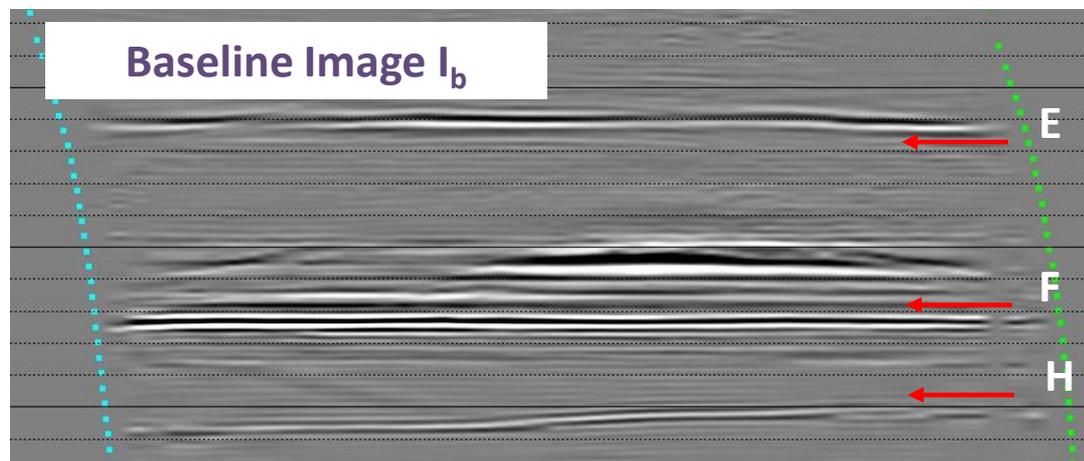
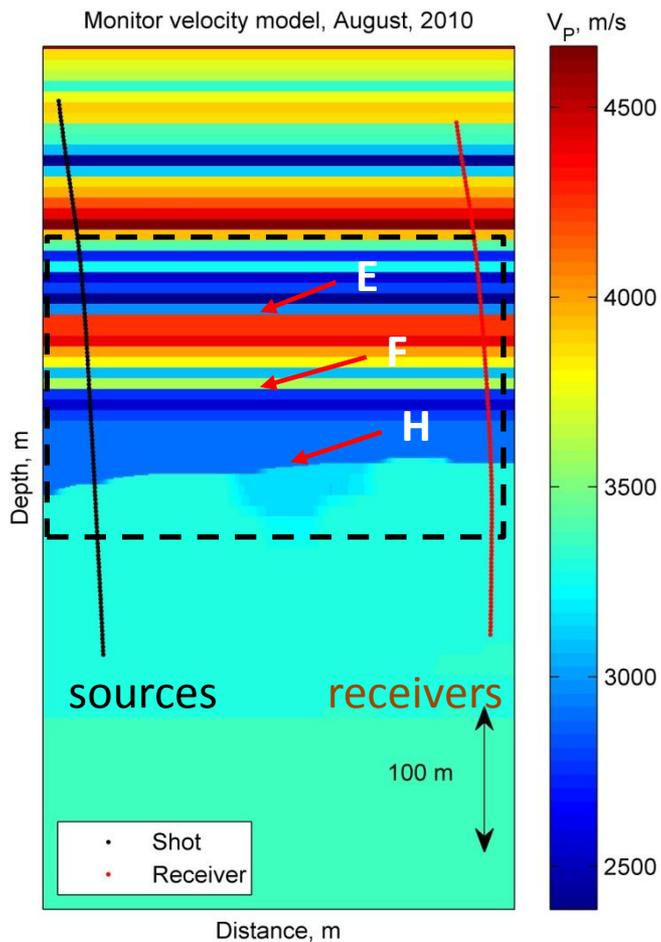
Метод совместного обращения

Метод совместного обращения задержек времен первых вступлений и глубинных сдвигов на мигрированных изображениях (Abakumov и др., 2014)

- Информацию отраженных волн можно использовать для улучшения латерального разрешения
- Предпочтительнее использовать глубинные сдвиги на мигрированных изображениях
- Инверсия формулируется как задача нелинейной оптимизации
- Специальные целевые функции позволяют учесть спектральную разницу сигналов
- 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.

Сейсмические изображения

Глубинные сдвиги на сейсмических изображениях





Метод обращения полного волнового поля (FWI)

- Теория метода FWI была разработана в 1980-х
- FWI позволяет максимально использовать зарегистрированную информацию (“все типы волн”)
- FWI позволяет восстанавливать высоко разрешенные скоростные модели среды
- Метод FWI является дорогим с вычислительной точки зрения, однако становится доступнее благодаря повышению производительности вычислительных систем



Обобщения метода FWI для задач сейсмического мониторинга

- Double difference method (Watanabe et al., 2004; Denli and Huang, 2009)

- На первом шаге восстанавливается опорная скоростная модель, далее обращается разница волновых полей:

$$\Delta d = (d_{obs}^m - d_{obs}^b) - (d_{calc}^m - d_{calc}^b)$$

- Подавляет когерентный шум

- Parallel difference method (Plessix et al., 2010)

- Независимо обращаются опорные и повторные данные начиная с одинаковой исходной модели

- Не требует точного воспроизведения системы наблюдений

- Приводит к артефактам

- Sequential difference method

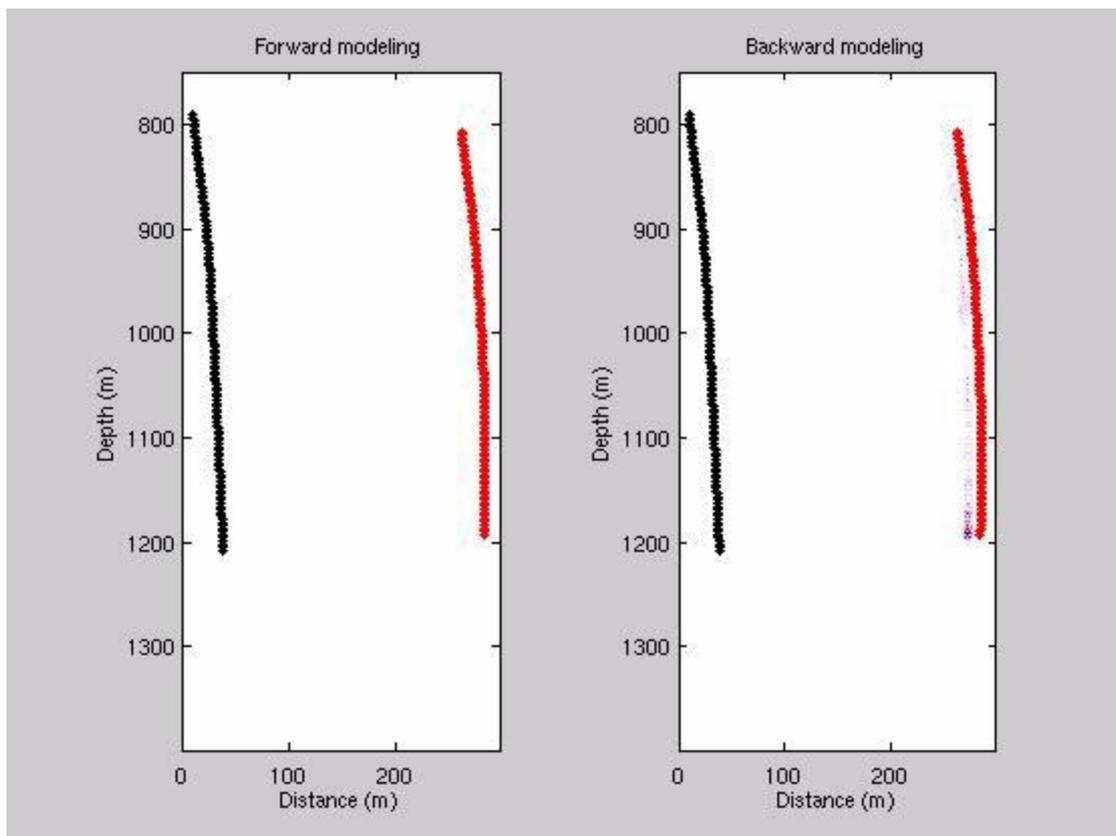
- Скоростная модель, полученная обращением опорных данных, является исходной для обращения повторных данных



Моделирование волновых полей псевдоспектральным методом

- Исходный EL2D код (Ekkehart Tessmer, University of Hamburg) написан на C, интегрирован в MATLAB с помощью технологии MEX
 - Код вычисляет волновые поля в упругой 2D среде с помощью псевдоспектрального (Фурье) метода*
 - Код имеет два режима моделирования:
 - Точечный источник
 - Моделирование с граничным условием в качестве источника
- *Kosloff, D., Reshef, M., & Loewenthal, D. (1984). Elastic wave calculations by the Fourier method. Bulletin of the Seismological Society of America, 74(3), 875-891.

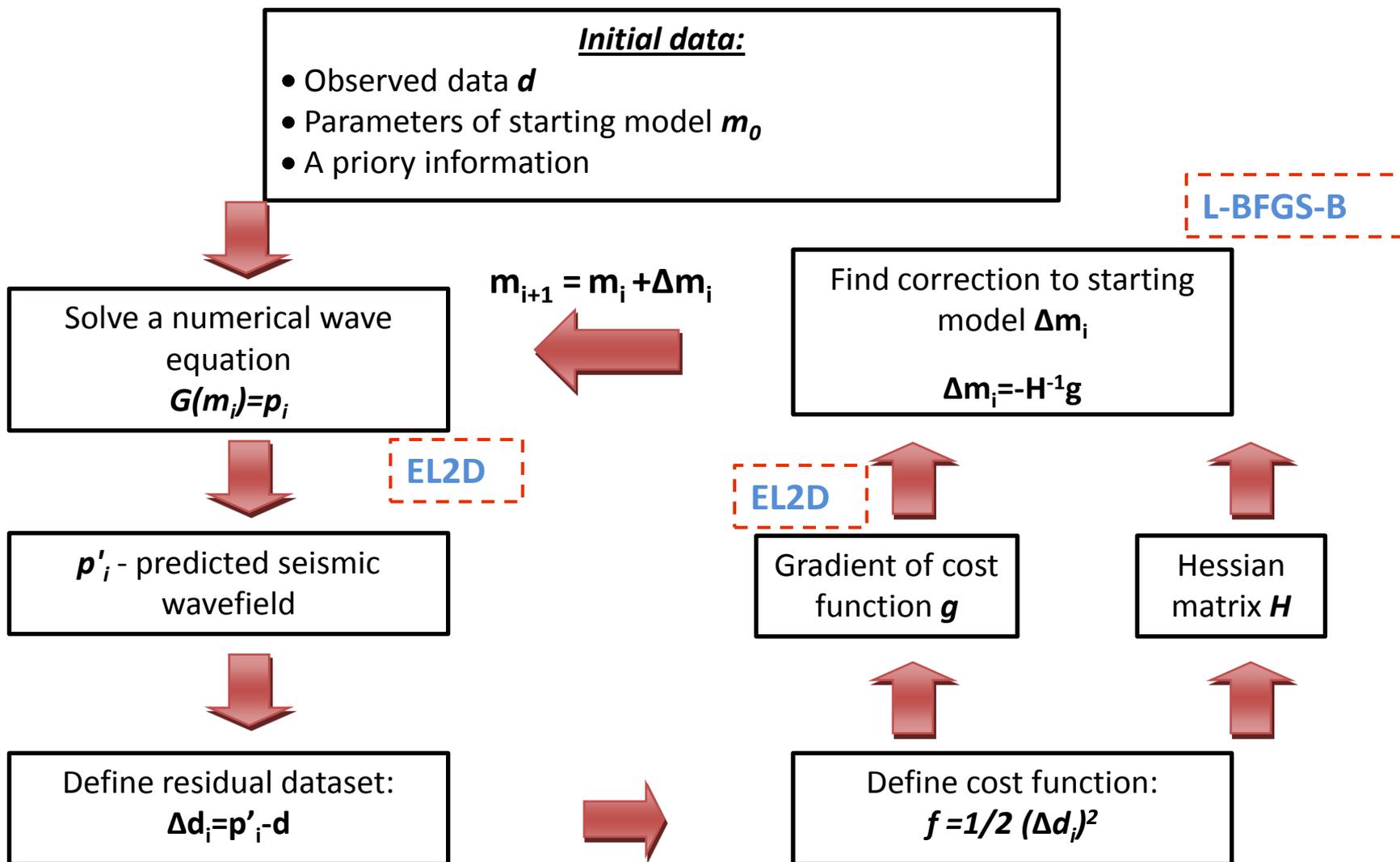
Моделирование волновых полей псевдоспектральным методом



- Точечный источник

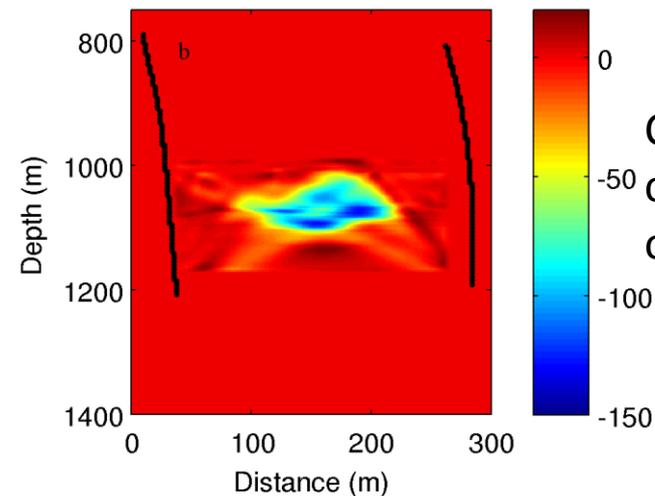
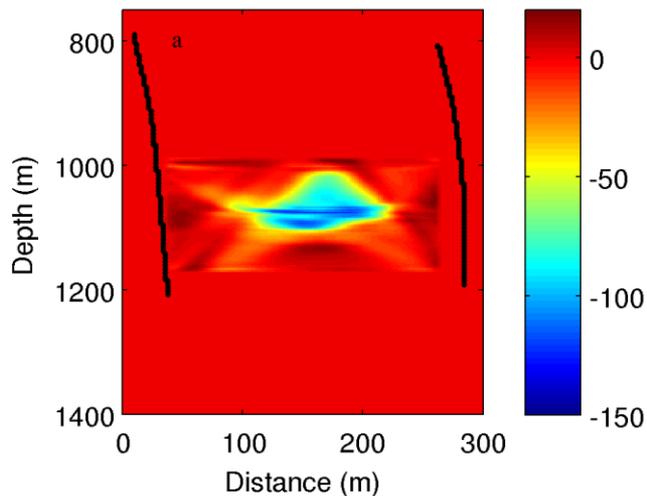
- Моделирование с граничным условием в качестве источника

Алгоритм восстановления скоростных аномалий



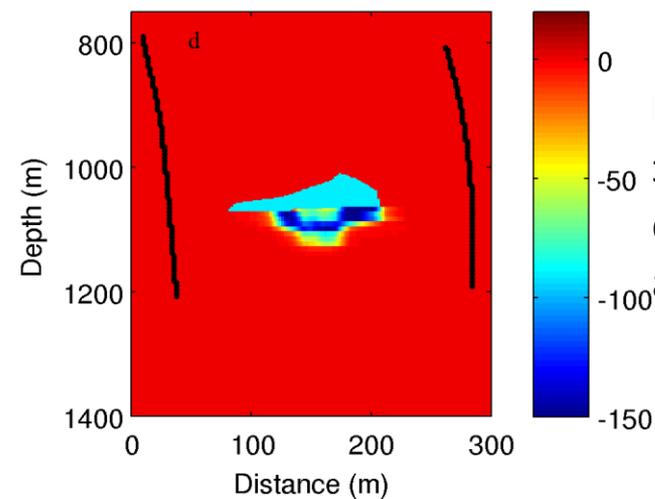
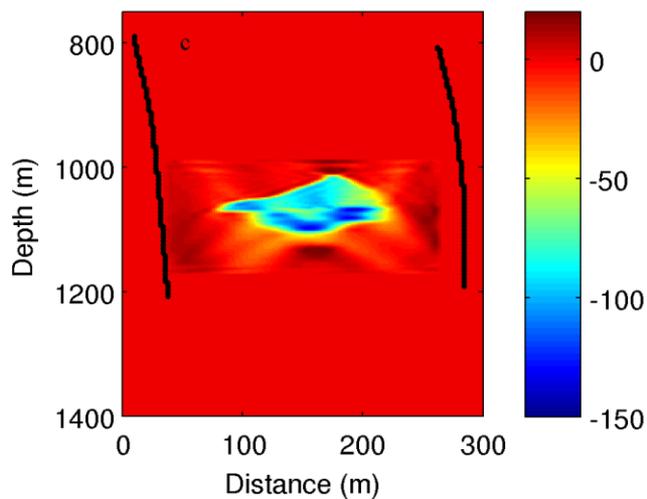
Результаты восстановления скоростных аномалий

С помощью
стандартной
томографии



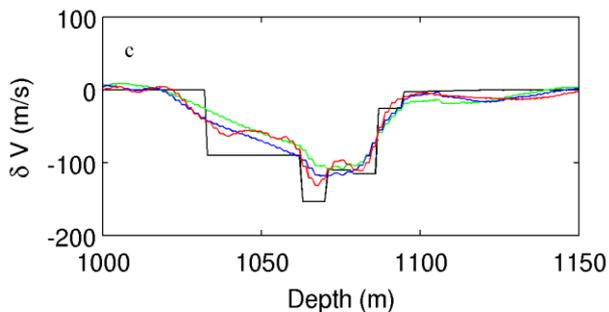
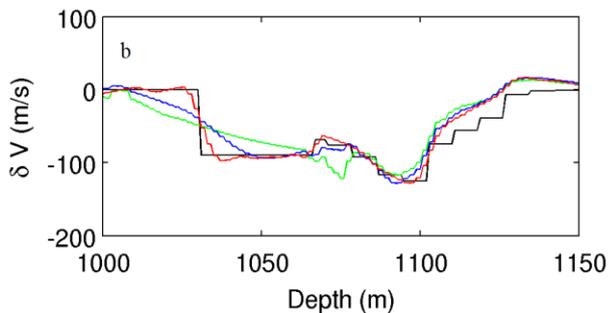
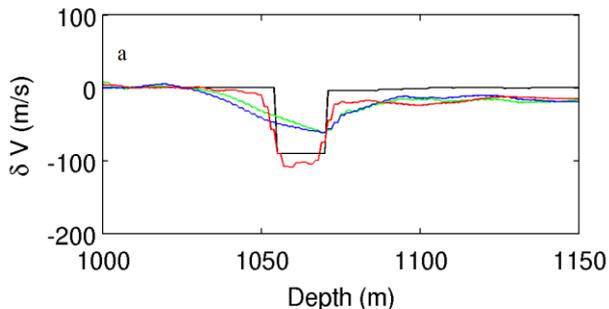
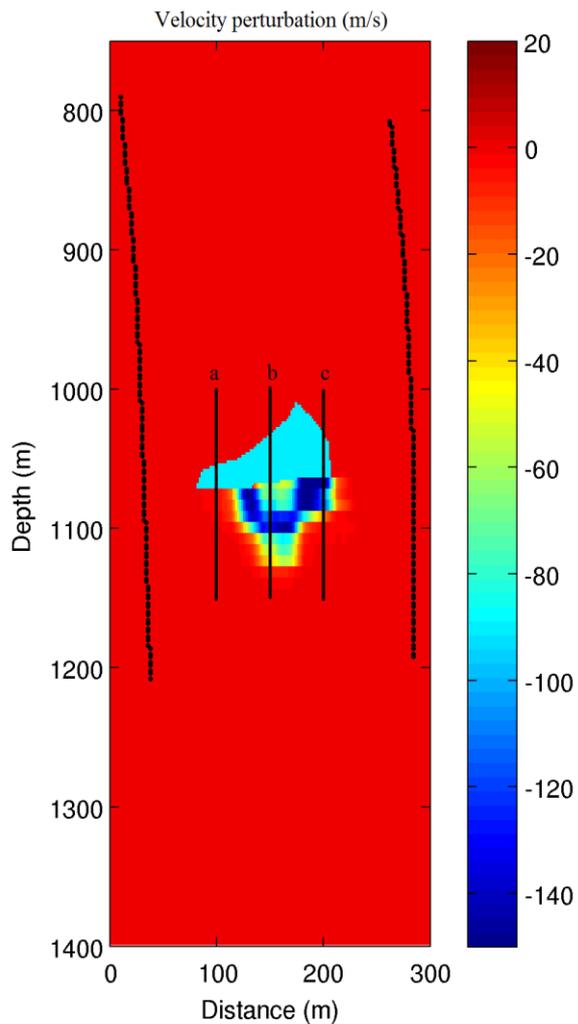
С помощью
совместного
обращения

С помощью
метода FWI



Правильное
значение
скоростной
аномалии

Результаты восстановления скоростных аномалий



правильное значение
скоростной аномалии

результат стандартной
томографии

результат метода
совместного
обращения

значения аномалии,
восстановленной с
помощью метода FWI



Вычислительная сложность методов

Метод	Процессорное время
Стандартная томография	$\approx 1/4$ часа
Метод совместного обращения	≈ 2 часа
Метод обращение полного волнового поля	≈ 48 часов

- Метод совместного обращения является компромиссом между точностью восстановления аномалии и вычислительной сложностью метода



Выводы

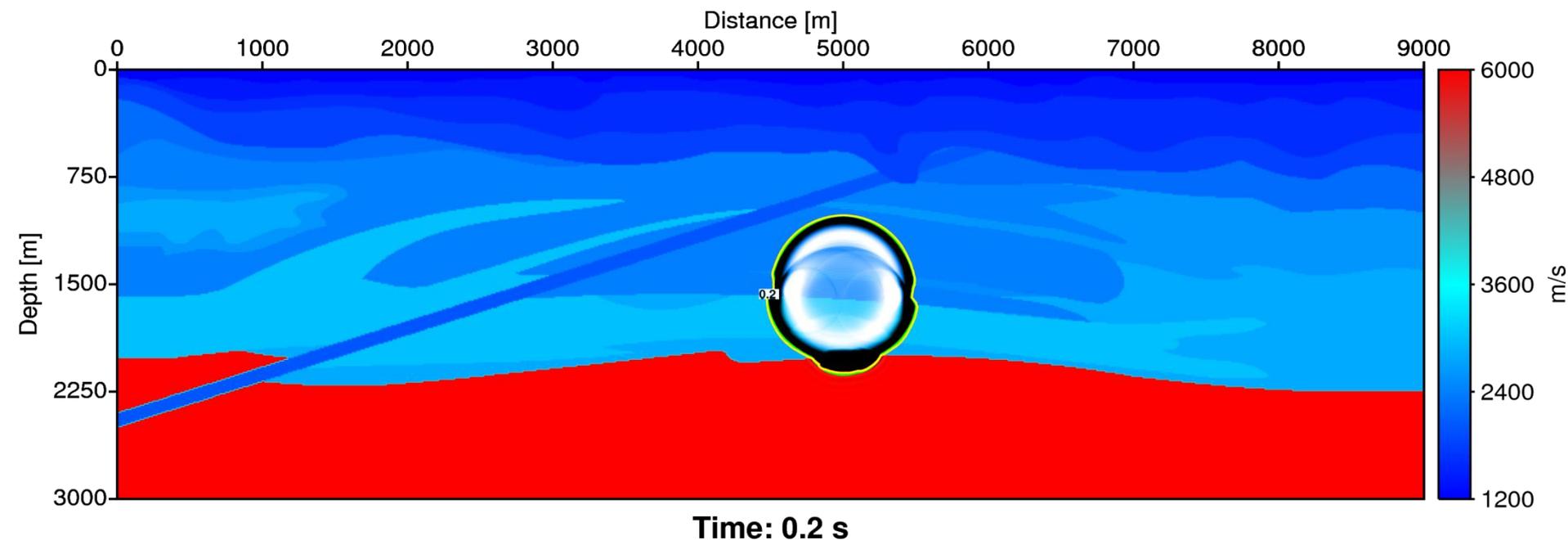
- В данной работе мы сравнили три метода восстановления скоростных аномалий: стандартную томографию, метод совместного обращения и метод, использующий обращение полного волнового поля (FWI)
- Наиболее точно удастся восстановить аномалию с помощью метода FWI
- Если учесть вычислительную сложность, метод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



Благодарности

- Авторы благодарны Shell E&P (CRDF грант UG1-30027-ST-12) и СПбГУ (грант 11.38.217.2014) за поддержку этой работы
- Спасибо за внимание!

Fast sweeping method

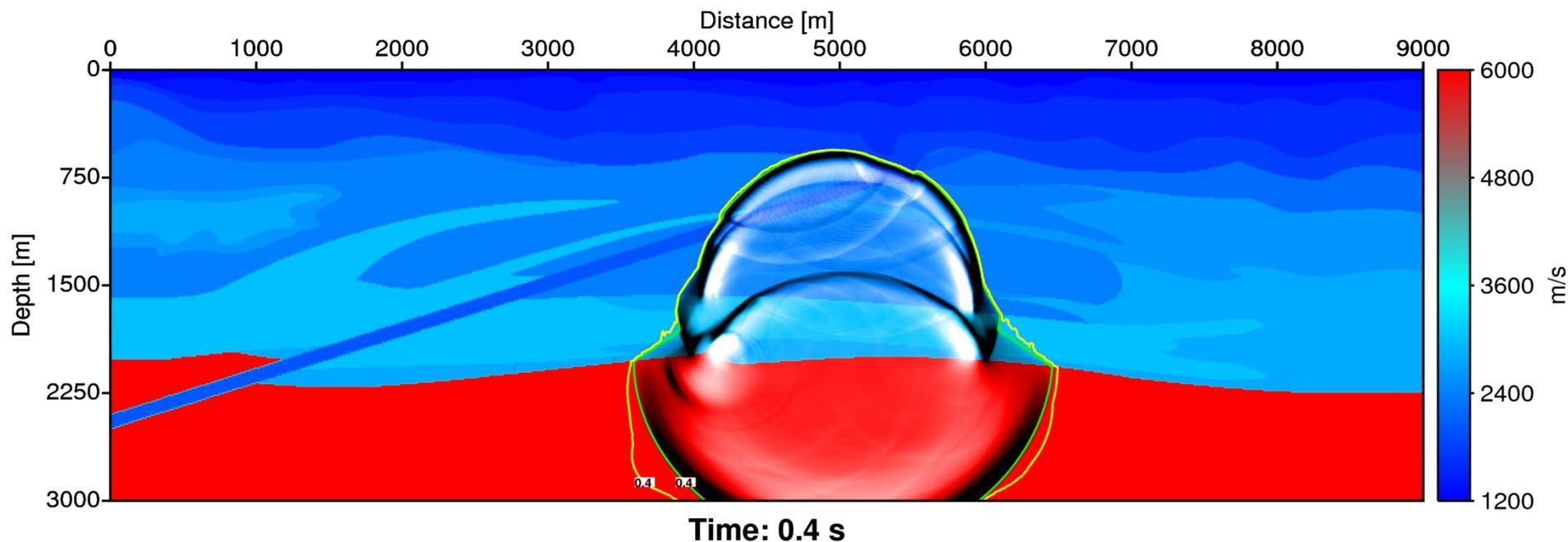


Green – Fast sweeping method

Yellow – Conventional finite-difference eikonal solver

Grayscale – solution of wave equation

Fast sweeping method

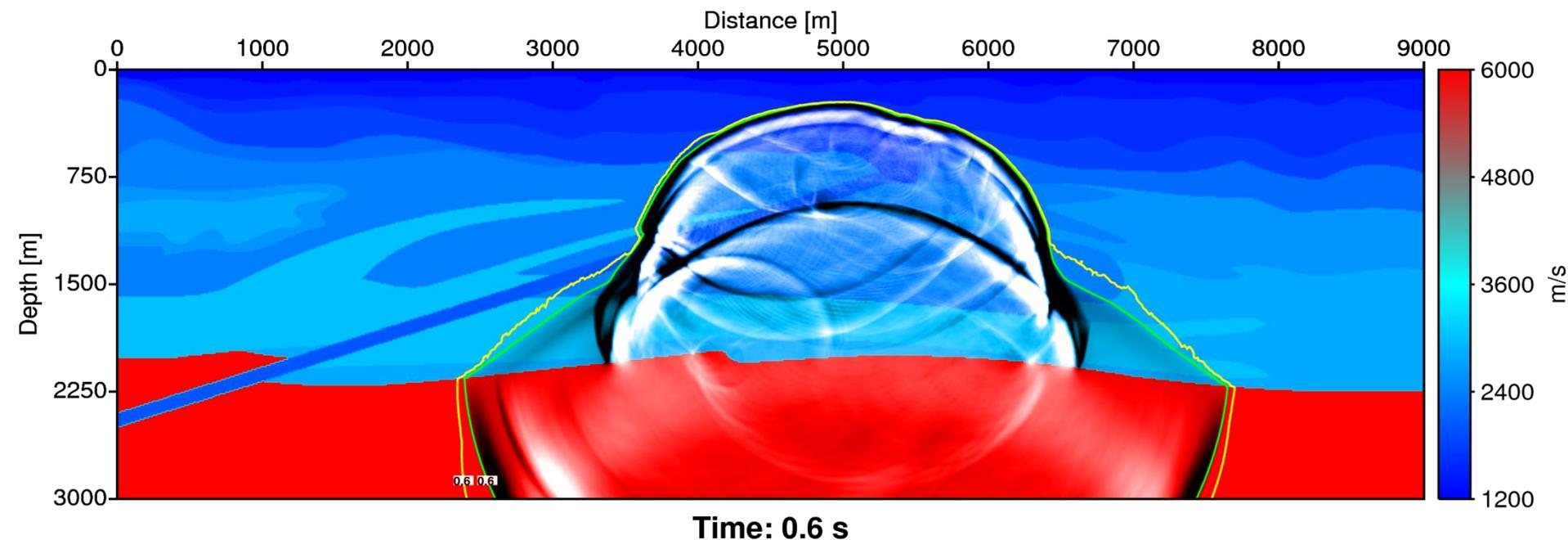


Green – Fast sweeping method

Yellow – Conventional finite-difference eikonal solver

Grayscale – solution of wave equation

Fast sweeping method

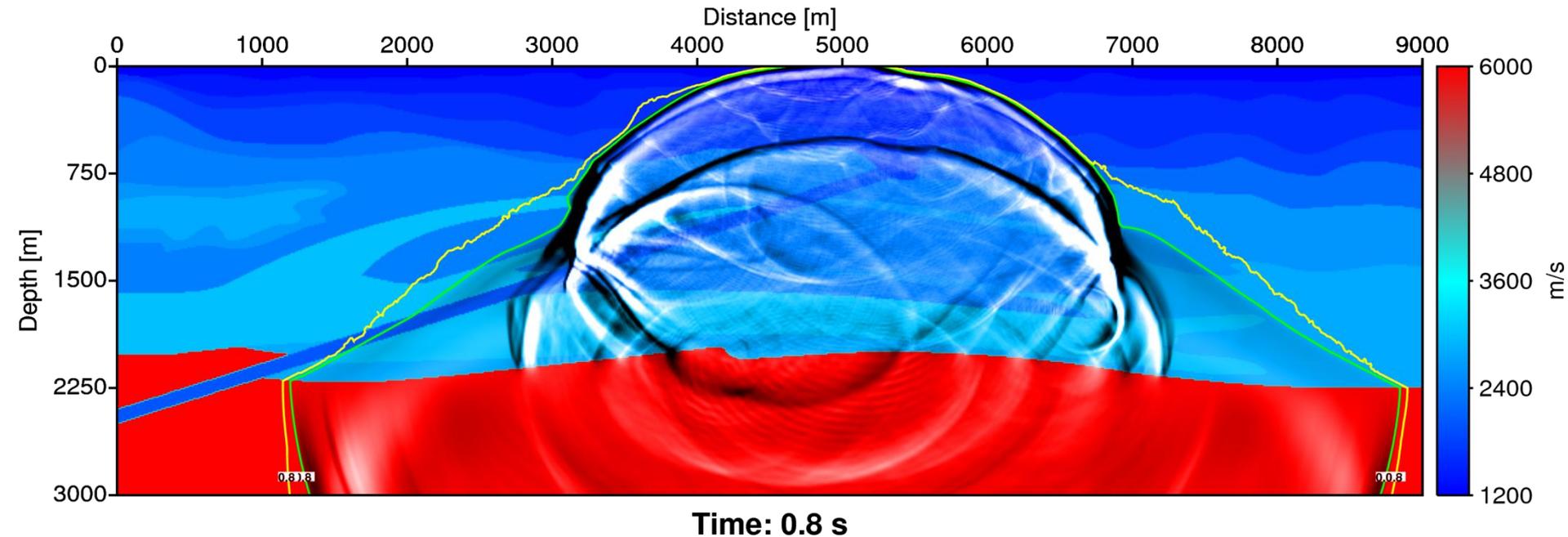


Green – Fast sweeping method

Yellow – Conventional finite-difference eikonal solver

Grayscale – solution of wave equation

Fast sweeping method



Green – Fast sweeping method

Yellow – Conventional finite-difference eikonal solver

Grayscale – solution of wave equation