

## **ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА ВОЛНОВОЙ ТОМОГРАФИИ ДЛЯ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ МАЛОГЛУБИННОЙ СЕЙСМОРАЗВЕДКИ**

*Глеб Станиславович Чернышов*

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, инженер, e-mail: ChernyshovGS@ipgg.sbras.ru

*Антон Альбертович Дучков*

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, кандидат физико-математических наук, зав. лабораторией, e-mail: DuchkovAA@ipgg.sbras.ru

*Александр Сергеевич Сердюков*

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник; Институт горного дела СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный пр., 54, младший научный сотрудник, e-mail: SerdyukovAS@ipgg.sbras.ru

Методы волновой томографии широко применяются в инженерной геофизике для определения скоростной модели сложных неоднородных сред. Преимущество данного метода перед лучевой томографией – в использовании волнового поля вместо времен первых вступлений, что, как считается, дает более надежный результат. Но такой подход требует гораздо больше вычислительных ресурсов. Для решения проблемы в работе предлагается метод, позволяющий вычислять волновые поля в узкой полосе после первых вступлений. Реализованный метод волновой томографии был применен к реальным данным в районе п. Ключи.

**Ключевые слова:** инженерная сейсмозондировка, волновая томография, волновые поля, конечно-разностные схемы.

## **APPLICATION OF WAVE-EQUATION TRAVELTIME INVERSION FOR NEAR SURFACE GEOPHYSICS STUDIES**

*Gleb S. Chernyshov*

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 3 Koptuyug Prospect, Engineer, e-mail: ChernyshovGS@ipgg.sbras.ru

*Anton A. Duchkov*

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 3 Koptuyug Prospect, Ph. D., Head of the laboratory, e-mail: DuchkovAA@ipgg.sbras.ru

*Aleksander S. Serdyukov*

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 3 Koptuyug Prospect, Ph. D., Researcher; Institute of Mining SB RAS, 630090, Russia, 54 Krasny Prospect, Junior Researcher, e-mail: SerdyukovAS@ipgg.sbras.ru

Methods full-wave inversion is widely used in near surface geotechnical studies. Recently, methods of full-wave tomography is used more often than travelttime inversion. But this approach requires much more computing resources to solve this problem we propose a method that calculates

the wave field in a narrow band after the first arrivals. Computation time and memory required to store the wave field, are significantly reduced. The algorithm was tested on real seismic data. Data were obtained in the village Kluchi.

**Key words:** engineering seismology, full-wave tomography, mesh scheme.

В работе рассматривается проблема построения скоростных разрезов сейсмических волн по данным малоглубинной сейсморазведки. Исследования проводятся на глубину порядка нескольких десятков метров. Для таких задач обычной ситуацией являются резкие перепады значения сейсмических скоростей с ростом глубины. Так, например, скорость продольных сейсмических волн в водонасыщенных дисперсных грунтах может более чем в два раза превосходить значения в обычном состоянии. Другой типичной ситуацией является контрастная граница между грунтами и скальными породами. В таких условиях наблюдаются преломленные волны. Распространенным является метод  $t_0'$  [1], в основе которого лежат предположения о горизонтально-однородном скоростном строении исследуемой среды. Заметим, что даже на равнинных участках местности со слоистой структурой среды могут возникать горизонтально-неоднородные скоростные аномалии. Из-за неравномерных внешних воздействий физико-механические свойства изначально однородного слоя грунта (например, влажность, плотность) могут существенно изменяться. Изменение свойств приводит к горизонтально-неоднородному скоростному строению. Традиционным методом исследования распределения скоростей сейсмических волн является лучевая томография [2]. Однако в последние годы все более популярными становятся методы так называемой сопряженной волновой томографии и волновой томографии [3], основанный на обратном продолжении волнового поля [4, 5]. Считается, что такой подход позволяет получать более надежные результаты, так как используются полные волновые поля, а не только времена их пробега [6]. В работе используется метод волновой томографии для уравнений акустики. Для каждого источника строятся так называемые ядра чувствительности (которые являются уточнением скоростной модели):

$$\gamma(\mathbf{x}) = \frac{1}{c^3(\mathbf{x})} \sum_s \int \dot{p}(\mathbf{x}, t; \mathbf{x}_s) \dot{p}'(\mathbf{x}, t, \mathbf{x}_s) dt, \quad (1)$$

где  $p(\mathbf{x}, t; \mathbf{x}_s)$  – давление, вычисленное для априорной скоростной модели  $c(\mathbf{x})$ , а  $p'(\mathbf{x}, t, \mathbf{x}_s)$  – давление для сопряженной задачи, вычисленное путем продолжения в обратном времени «псевдоневязок», которые играют роль импульсов в источниках  $\mathbf{x}_s$ .

Таким образом, стандартный подход к сопряженной волновой томографии состоит из следующих вычислительных шагов:

– решить прямую задачу, т. е. найти поле  $p(\mathbf{x}, t; \mathbf{x}_s)$  от источника и сохранить его на каждом временном шаге;

- найти временные «псевдосвязки» путем кросс-корреляции наблюдаемых и синтетических сейсмограмм и решить сопряженную задачу, т. е. построить обратное по времени продолжение данных из точек приемников  $p'(x, t, x_s)$ ;
- уточнить скоростную модель (построить «ядра чувствительности», sensitivity kernels) путем перемножения прямого и сопряженного полей на каждом шаге по времени.

Обычно из-за недостатка памяти для хранения рассчитанного поля на практике используют алгоритм сопряженной волновой томографии, который требует три решения прямой задачи: расчет волнового поля от источника и сохранение граничных условий, расчет в обращенном времени поля приемников и поля источников из граничных условий.

Новый подход к волновой томографии состоит в быстром расчете «прямого» и «обращенного» полей оконным методом. Он был протестирован на синтетических моделях, которые имитируют системы наблюдений, используемые для следующих приложений:

- задачи межштрекового и межскважинного просвечивания (геофизический мониторинг разработки твердых полезных ископаемых и месторождений углеводородов соответственно);
- изучение верхней части разреза по данным рефрагированных волн первых вступлений;
- уточнение скоростной модели по данным пассивного сейсмического мониторинга, куда входят задачи классической томографии очаговой сейсмологии и более новые задачи микросейсмического мониторинга гидроразрыва пласта.

Для обработки реальных данных был выбран объект в районе п. Ключи, Новосибирская область. Наблюдения проводились по профилю протяженностью 252 м, с шагом по пунктам приема – 6 м, по пунктам возбуждения – 18 м. В качестве источника использовалась кувалда массой 5 кг.

Для данного профиля была построена скоростная модель, полученная на основе метода  $t0'$ . После сглаживания слоистая модель использовалась в качестве начальной скоростной модели для волновой томографии. Разрез скоростей продольных волн показан на рис. 1.

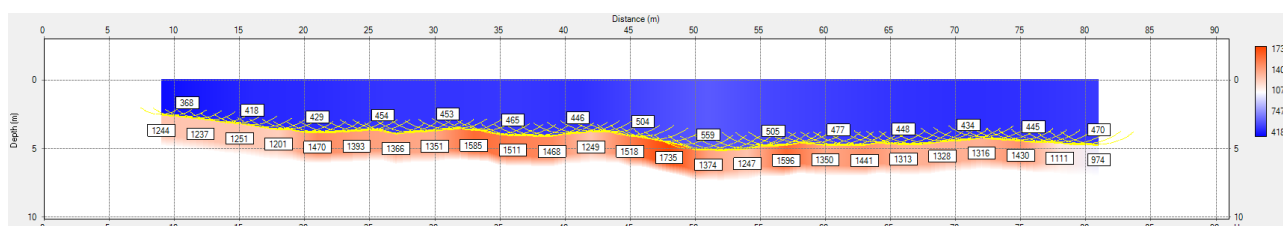


Рис. 1. Разрез скоростей продольных волн по профилю в районе п. Ключи

Предварительная обработка сейсмических данных включала определение времен первых вступлений для всех сейсмограмм общей точки взрыва (применение автоматических алгоритмов определения времен первых вступлений с последующим контролем и редактированием). Далее фиксировалось временное окно волновой формы первых вступлений. Вне временного окна первых вступлений амплитуда трасс полагалась равной нулю (со сглаживанием на краях окна). Для оценки формы импульса для каждой сейсмограммы использовалось усреднение по всем приемникам. Пример сейсмограммы до и после предварительной обработки показан на рис. 2.

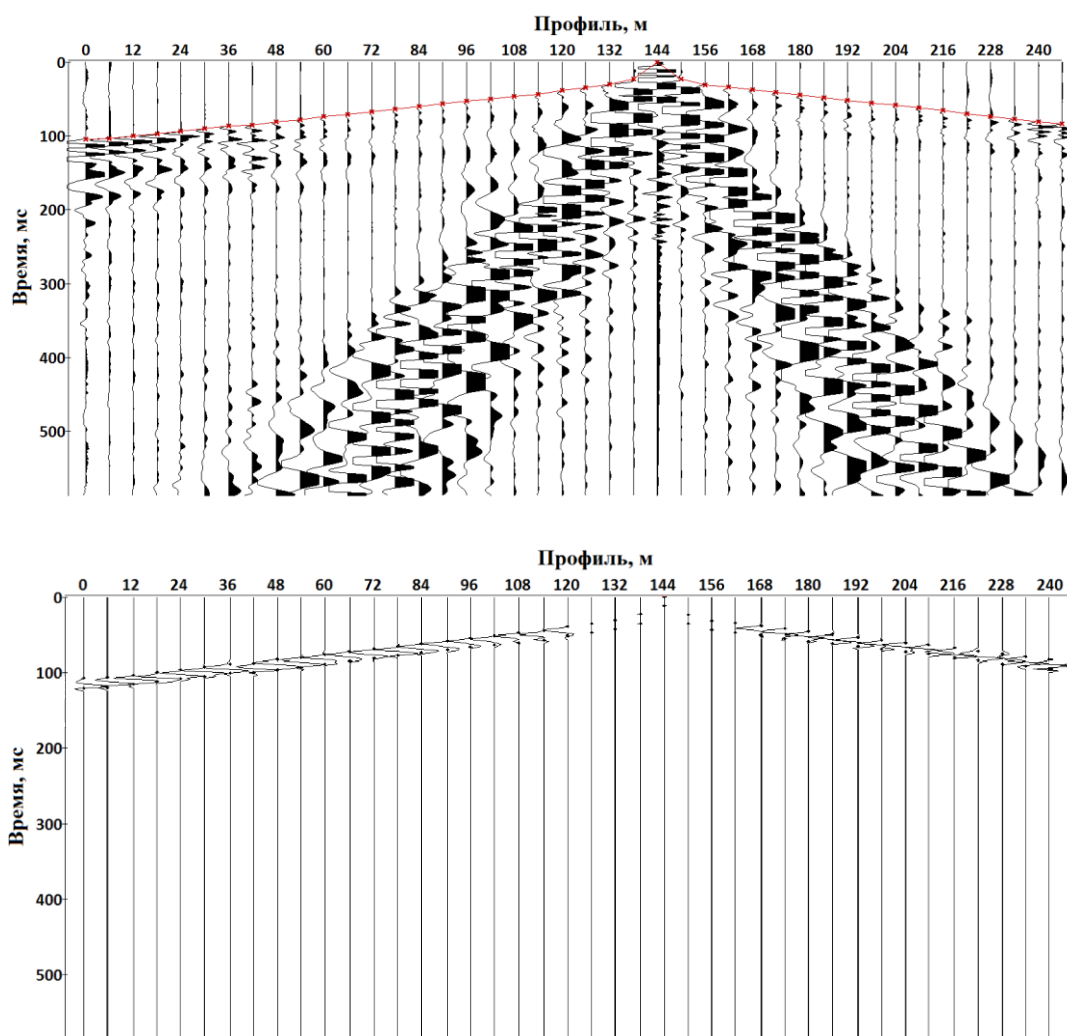


Рис. 2. Пример сейсмограммы до (вверху) и после (внизу) предварительной обработки

Обработка 14 сейсмограмм общей точки взрыва методом волновой томографии позволила построить уточненную модель скоростей продольных волн, на которой хорошо видна высокоскоростная аномалия (до 200 м/с). Окончательная скоростная модель для профиля показана на рис. 3.

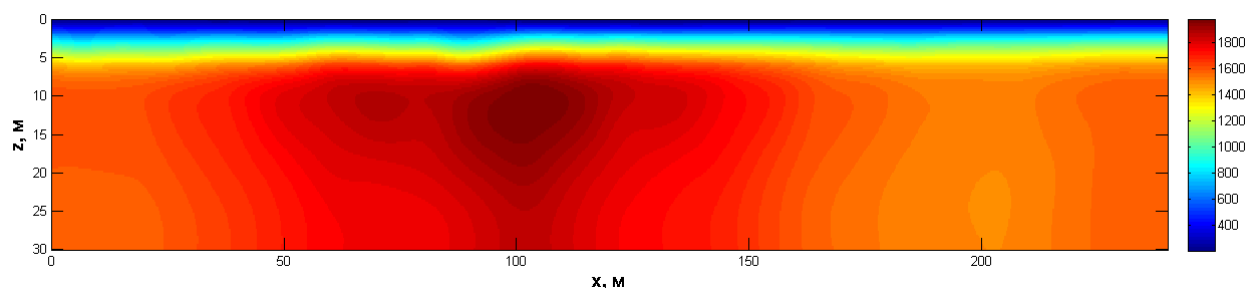


Рис. 3. Скоростная модель для продольных волн по результатам волновой томографии

*Работа поддержана грантом Президента РФ для молодых кандидатов наук № МК-7778.2016.5.*

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Метод преломленных волн / А.М. Епинатьева, Г.М. Голошубин, А.П. Литвин и др. – М.: Недра, 1990. – 297 с.
2. Nolet, Guust, ed. Seismic tomography: with applications in global seismology and exploration geophysics. Vol. 5. – Springer, 1987. – 391 p.
3. Luo Y., Schuster G.T. Wave-equation traveltime inversion // Geophysics. – 1991. – Vol. 56 (5). – P. 645–653.
4. Tromp J., Tape C., Liu Q. Seismic tomography, adjoint methods, time reversal and banana-doughnut kernels // Geophys. J. Int. – 2005. – Vol. 160. – P. 195–216.
5. Liu Q., Tromp J. Finite-Frequency Kernels Based on Adjoint Methods // Bulletin of the Seismological Society of America. – 2006. – Vol. 96, N 6. – P. 2383–2397.
6. Liu Q., Gu Y.J. Seismic imaging: From classical to adjoint tomography // Tectonophysics. – 2012. – Vol. 566–567. – P. 31–66.

© Г. С. Чернышов, А. А. Дучков, А. С. Сердюков, 2017