

Анализ возможностей сейсмической инверсии после глубинной миграции для восстановления низкочастотной составляющей модели

Д. К. Дмитрачков¹, М. И. Протасов^{1}*

¹ Институт нефтяной геологии и геофизики СО РАН, г. Новосибирск,
Российская Федерация

* e-mail: protasovmi@ipgg.sbras.ru

Аннотация. Сейсмическая инверсия используется на практике как инструмент для прогнозирования коллекторских свойств. Она позволяет выделить из сейсмических данных модель с высоким уровнем детализации, т.е. высокочастотную составляющую модели. При этом входными данными являются результаты временной обработки, а вопросы, связанные с низкочастотной составляющей модели, обычно не рассматриваются. В представленной работе реализован алгоритм сейсмической инверсии на основе модели. Входными данными для инверсии являются глубинные изображения в истинных амплитудах и миграционная скоростная модель. Численно исследуются возможности сейсмической инверсии для уточнения низкочастотной составляющей модели. Эксперименты проводятся с использованием синтетических сейсмических данных, полученных для реалистичной модели Sigsbee.

Ключевые слова: сейсмическая инверсия, глубинная миграция, низкочастотная модель

Analysis of seismic inversion after depth migration for recovery of the low-frequency component of the model

D. K. Dmitrachkov¹, M. I. Protasov^{1}*

¹ Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, Novosibirsk, Russian Federation

* e-mail: protasovmi@ipgg.sbras.ru

Abstract. Seismic inversion is used in practice as a tool for predicting reservoir properties. It allows one to extract a model with a high level of detail from seismic data, i.e. high-frequency component of the model. In this case, the input data are the time processing results, and the issues related to the low-frequency component of the model are not considered usually. In the presented work, a model-based seismic inversion algorithm is implemented. The input data for the inversion are the depth image results in true amplitudes and the depth migration velocity model. The possibilities of seismic inversion are numerically investigated to refine the low-frequency component of the model. Experiments were carried out using synthetic seismic data got for realistic Sigsbee model.

Keywords: seismic inversion, depth migration, low-frequency model

Введение

Обычно под сейсмической инверсией понимается алгоритм, который преобразует временной или мигрированный временной сейсмический разрез в разрез акустических импедансов [1, 2]. Т. е. входными данными для инверсии являются результаты временной обработки сейсмических данных, причем как до, так и после суммирования [3, 4]. Однако в областях со сложной геологией требуется глубинная обработка сейсмических данных для построения точного представле-

ние о структуре резервуара, а тогда сейсмическую инверсию применяют к результатам глубинной обработки. При этом изображение после глубинной миграции трансформируется во временную область, и применяются стандартные алгоритмы инверсии.

Основным результатом стандартного использования сейсмической инверсии является детальная модель упругих свойств геологической среды, позволяющая прогнозировать свойства резервуаров [1]. Т. е. инверсия нацелена на восстановление высокочастотной составляющей модели. При этом низкочастотная компонента «остается в тени», хотя логика работы инверсии указывает, что эта часть модели тоже должна уточняться. Если это так, тогда инверсию по результатам глубинной обработки можно использовать для уточнения низкочастотной составляющей модели. Поэтому в рамках данной работы исследуется сейсмическая инверсия с целью определения ее возможностей для восстановления низкочастотной компоненты модели. При этом реализован алгоритм сейсмической инверсии, основанный на модели, где в качестве начального приближения используется миграционная скоростная модель. Исследование проведено с использованием синтетических данных и модели Sigsbee.

Сейсмическая инверсия, основанная на модели

Один из наиболее активно используемых на практике алгоритмов называется инверсией, основанной на модели. Далее дано краткое описание этого алгоритма и конкретного способа его реализации. Во-первых, в основе сейсмической инверсии лежит одномерная сверточная модель:

$$S(t) = w(t) * R(t). \quad (1)$$

Здесь $S(t)$ – сейсмическая трасса, $R(t)$ – коэффициенты отражения, $w(t)$ – сейсмический импульс. При дискретизации уравнение (1) принимает следующий вид:

$$S = \begin{bmatrix} S_1 \\ S_2 \\ \vdots \\ S_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} w_1 & 0 & 0 & \dots \\ w_2 & w_1 & 0 & \dots \\ w_3 & w_2 & w_1 & \dots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} R_1 \\ R_2 \\ \vdots \\ R_N \end{bmatrix} = WR. \quad (2)$$

Здесь W – матрица свёртки, w_i , S_i , R_i – дискретные значения импульса, трассы и коэффициентов отражения соответственно. В алгоритме инверсии, основанной на модели, используется слабоконтрастное приближение [2, 6]:

$$R_i \approx \frac{1}{2} (\ln Z_{i+1} - \ln Z_i). \quad (3)$$

Здесь Z_i – акустические импедансы. Задача инверсии заключается в определении акустических импедансов по сейсмической трассе. В итоге она сводится к решению системы линейных алгебраических уравнений с симметричной и по-

ложительно определённой матрицей, которую можно решать методом сопряжённых градиентов. Для этого используется начальное приближение, откуда и происходит название этой разновидности инверсии, т.е. инверсии, основанной на модели, когда необходима некоторая начальная модель. При практическом использовании инверсии для решения тонких геологических задач, начальная модель строится с помощью интерполяции сглаженных данных ГИС вдоль прослеженных горизонтов. В наблюдаемых данных на практике присутствует шум, и для того, чтобы подавить его влияние и получить адекватное решение, используется регуляризация. Одним из популярных подходов является регуляризация Тихонова [5], которая и была реализована.

Численные эксперименты

Разработанный алгоритм сейсмической инверсии, основанной на модели, применяется к результатам глубинной сейсмической миграции в истинных амплитудах. Поскольку и миграционная скоростная модель, и результат миграции заданы в глубинном масштабе, а сейсмическая инверсия работает во временном масштабе, то дополнительно было использовано преобразование «глубина-время» [6]. Для его осуществления использовалась миграционная скоростная модель. Таким образом посредством этого преобразования были получены исходная и миграционная модели Sigsbee во временном масштабе и дополнительно пересчитаны в значения акустических импедансов (Рисунок 1). Далее инверсия была применена ко всему исследуемому фрагменту модели Sigsbee (Рисунок 2). Полученный результат в большей части за исключением окрестностей объектов дифракции и зон, содержащих артефакты миграции, демонстрирует удовлетворительную точность восстановления детальной модели импедансов, включая её высокочастотную составляющую. При этом видно, что этот результат описывает сейсмическую модель в целом, включая и низкочастотную составляющую.

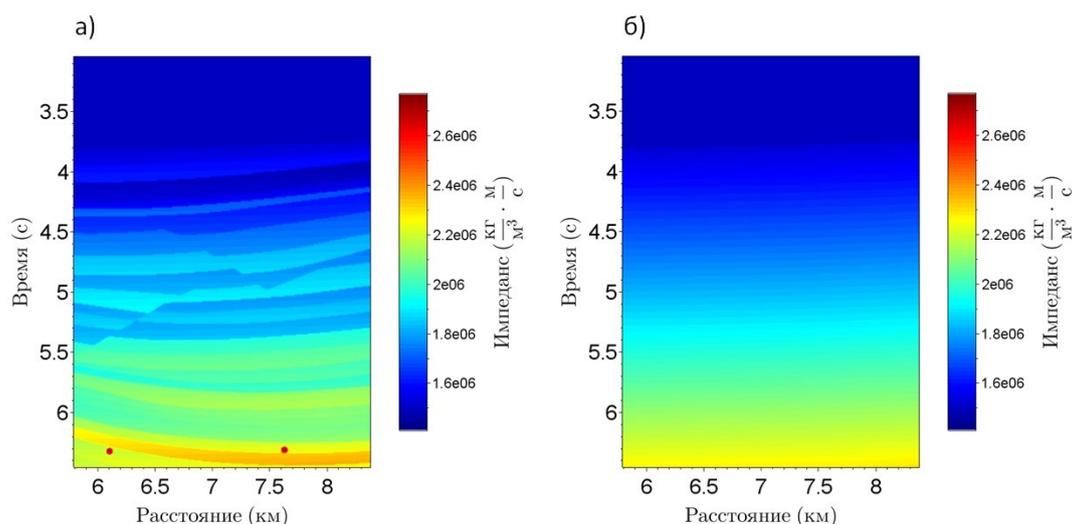


Рис. 1. а) Фрагмент исходной модели Sigsbee (акустический импеданс), переведённый во временной масштаб. б) Соответствующий фрагмент миграционной модели Sigsbee во временном масштабе

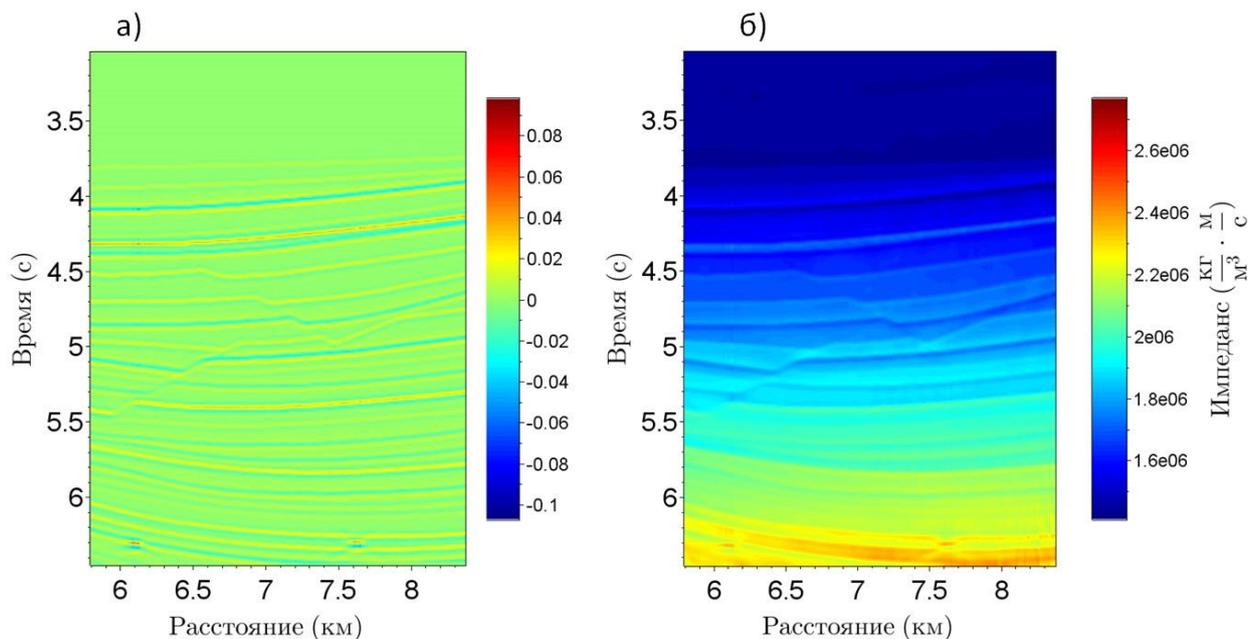


Рис. 2. а) Результат глубинной сейсмической миграции, преобразованный во временной масштаб. б) Соответствующий результат сейсмической инверсии

Конечно, низкочастотная составляющая содержится в начальной модели, которая используется как в инверсии, так и в миграции, однако видно, что происходит её уточнение. Чтобы выявить это более отчётливо далее выделяется низкочастотная составляющая модели посредством сглаживания результата инверсии. При этом аналогичная процедура производится с истинной модельной. В качестве оператора сглаживания используется функция с гауссовым ядром:

$$\tilde{y}_i = \frac{\sum_{j=1}^n K\left(\frac{x_i - x_j}{b}\right) \cdot y_j}{\sum_{j=1}^n K\left(\frac{x_i - x_j}{b}\right)}, \quad K(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot (0.37)} e^{-\frac{t^2}{2 \cdot (0.37)^2}}. \quad (4)$$

Здесь x_i – это узлы сетки, а y_i и \tilde{y}_i – значения исходной и сглаженной функции на этой сетке, b – параметр, регулирующий гладкость получаемой функции.

Результаты сглаживания показывают, что, например, для параметров $b = 0.1$ и $b = 0.3$ получаются достаточно гладкие решения, которые заметно отличаются от начальной модели для инверсии (Рисунок 3). Сравнение низкочастотных составляющих истинной модели, результата инверсии «идеальных трасс» и трасс после миграции, показывает, что инверсия определяет эти компоненты с высокой точностью. Относительная среднеквадратичная ошибка результата инверсии трасс после миграции относительно истинной модели для компонент, полученных сглаживанием с использованием параметра $b = 0.1$ и $b = 0.3$, составляет 1.78% и 1.35% соответственно. По этим результатам можно сделать вывод, что инверсия действительно определяет низкочастотную составляющую модели, при этом восстанавливает её с достаточно высокой точностью.

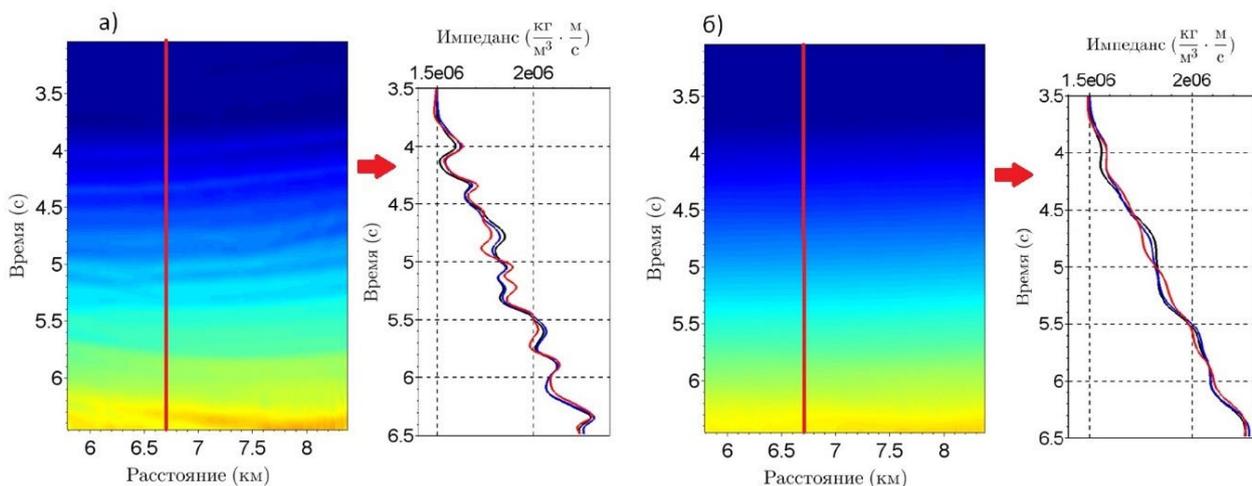


Рис. 3. Низкочастотные компоненты моделей, полученные сглаживанием результата инверсии трасс после миграции:

а) параметр сглаживания $b=0.3$; б) $b=0.1$. На соответствующих одномерных профилях при $x=6705$ м: гладкая составляющая истинных акустических импедансов – черным, результата инверсии по идеальной сейсмической трассе – синим, результата инверсии по сейсмической трассе после миграции – красным.

Заключение

В работе реализован алгоритм инверсии сейсмических трасс после глубинной миграции. Исследовано влияние параметра регуляризации на результат инверсии, а также влияние самого способа регуляризации. Проведено выделение низкочастотных компонент у модели импедансов и результатов инверсии по идеальным сейсмическим трассам и сейсмическим трассам после миграции. Показано, что сейсмическая инверсия, основанная на модели, позволяет восстановить высокочастотную составляющую модели при приемлемом качестве результата глубинной сейсмической миграции, что согласуется со стандартным применением инверсии к результатам временной обработки. Путём сравнительного анализа низкочастотных компонент исходной модели и результатов инверсии показано, что сейсмическая инверсия может восстанавливать часть гладкой составляющей модели. Такие обстоятельства создают предпосылки для использования сейсмической инверсии в качестве инструмента для уточнения миграционной модели.

Благодарности

Данное исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и ЧНФ в рамках научного проекта №20-55-26003. Acknowledgments: The reported study was funded by RFBR and GACR, project number 20-55-26003.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ампилов Ю.П., Барков А.Ю., Яковлев И.В., Филиппова К.Е., Приезжев И.И. Почти все о сейсмической инверсии. Часть 1: Технологии сейсморазведки. – 2009. – № 4. – С. 3–16.
2. Russell В. Н. Introduction to Seismic Inversion Methods: Course Notes Series, Society of Exploration Geophysicists. – 1988. – P. 80–101.

3. Hampson D.P., Russell B.H., Bankhead B. Simultaneous inversion of pre-stack seismic data: SEG Expanded Abstracts. – 2005. – P. 1633–1637.
4. Russell B.H. and Hampson D.P. Comparison of poststack seismic inversion methods: SEG Expanded Abstracts. –1991. – P. 876–878.
5. Тихонов А.Н. О некорректных задачах линейной алгебры и устойчивом методе их решения: ДАН СССР. – 1965. – Т. 163(3). – С. 591–594.
6. Robein, E. Seismic Imaging: EAGE Publications. – 2010.

© Д. К. Дмитрачков, М. И. Протасов, 2022