



## СЕЙСМИЧЕСКАЯ ИНВЕРСИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ГЛУБИННОЙ МИГРАЦИИ

**Д.К. Дмитричков, М.И. Протасов**

*Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН,*

*630090, Новосибирск, просп. Акад. Коптюга, 3, Россия,*

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

Сейсмическая инверсия используется на практике как инструмент для прогноза свойств резервуаров. Она позволяет извлекать 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, как правило, не рассматриваются. В представленной работе реализован алгоритм сейсмической инверсии, основанной на модели. Входными данными для инверсии являются результаты глубинной миграции в истинных амплитудах и глубинно-скоростная модель. Численно исследуются возможности сейсмической инверсии для уточнения низкочастотной составляющей модели. Эксперименты проведены с использованием синтетических сейсмических данных, полученных для реалистичной модели Sigsbee.

*Сейсмическая инверсия, глубинная миграция, низкочастотная составляющая модели*

## SEISMIC INVERSION OF DEPTH MIGRATION RESULTS

**D.K. Dmitrachkov, M.I. Protasov**

*Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, Koptug Ave., 3, Novosibirsk, 630090, Russia,*

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

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.

*Seismic inversion, depth migration, low-frequency model*

---

## ВВЕДЕНИЕ

Сейсмическая инверсия стала стандартной процедурой, которая во многих случаях в обязательном порядке используется для прогноза свойств резервуаров. Традиционно под сейсмической инверсией понимается алгоритм, который преобразует временной или мигрированный временной сейсмический разрез в разрез акустических импедансов [Russell, 1988; Ампилов и др., 2009], т. е. обычно

входными данными для инверсии являются результаты временной обработки сейсмических данных, причем как до, так и после суммирования [Russell and Hampson, 1991; Hampson et al., 2005].

Однако глубинная обработка зачастую является необходимой, и сейсмическую инверсию желательно использовать по результатам глубинной обработки. Существуют подходы для проведения сейсмической инверсии непосредственно в глубинной области после миграции [Fletcher et al., 2011], однако они являются вычислительно затратными. При этом более простой подход, когда изображение после глубинной миграции трансформируется во временную область и применяются стандартные алгоритмы инверсии на основе одномерного сверточного моделирования, дает разумные результаты, и именно он используется на практике.

Главным результатом стандартного использования сейсмической инверсии является детальная модель упругих свойств геологической среды, позволяющая прогнозировать свойства резервуаров [Яковлев и др., 2011], т. е. инверсия нацелена на восстановление высокочастотной составляющей модели. При этом низкочастотная компонента «остаётся 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, основанной на модели, где в качестве начального приближения используется миграционная модель. Исследование проведено с использованием синтетических данных и модели Sigsbee.

### СЕЙСМИЧЕСКАЯ ИНВЕРСИЯ, ОСНОВАННАЯ НА МОДЕЛИ

В рамках данной работы мы рассматриваем акустическую модель среды. В основе акустической сейсмической инверсии лежит одномерная сверточная модель [Russell, 1988; Ампилов и др., 2009]:

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

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 свертки,  $w_i$ ,  $S_i$ ,  $R_i$  – дискретные значения импульса, трассы и коэффициентов отражения соответственно. В алгоритме инверсии, основанной на модели, используется слабоконтрастное приближение [Russell and Hampson, 1991; Russell et al., 2005]:

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

Здесь  $Z_i$  – акустические импедансы. В матричном виде выражение (3) выглядит следующим образом:

$$R = \frac{1}{2} Dx - \frac{1}{2} \hat{L}, \quad (4)$$

где  $D$  – это  $N$ -мерная матрица, а  $x$ ,  $\hat{L}$  –  $N$ -мерные вектора:

$$D = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & & 0 & 0 \\ -1 & 1 & 0 & \cdots & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 1 & & 0 & 0 \\ & \vdots & & \ddots & \vdots & \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & & -1 & 1 \end{bmatrix}, \quad x = \begin{bmatrix} \ln Z_2 \\ \ln Z_3 \\ \vdots \\ \ln Z_{N+1} \end{bmatrix}, \quad \hat{L} = \begin{bmatrix} \ln \hat{Z}_1 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (5)$$

В верхнем слое акустический импеданс  $\hat{Z}_1$  считается известным. Запишем систему уравнений (2) относительно вектора  $x$  (логарифм акустических импедансов), подставляя в нее выражение (4) для коэффициентов отражения:

$$\frac{1}{2}WDx = S + \frac{1}{2}W\hat{L}. \quad (6)$$

Введем обозначения:

$$C = \frac{1}{2}WD, \quad A = C^T C, \quad b = C^T \left( S + \frac{1}{2}W\hat{L} \right). \quad (7)$$

Умножая обе части системы уравнений (6) на матрицу  $C^T$ , приходим к системе линейных алгебраических уравнений (СЛАУ):

$$Ax = b. \quad (8)$$

Матрицы  $W$  и  $D$  – квадратные, размера  $N \times N$  и невырожденные, следовательно, матрица  $A = C^T C$  – симметричная и положительно определенная. Поэтому систему (8) можно решать методом сопряженных градиентов. Для этого понадобится начальное приближение – априорная модель акустических импедансов. Отсюда 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 [Тихонов, 1965; Тихонов, Арсенин, 1986]. При этом от решения СЛАУ (8) предлагается перейти к задаче минимизации параметрического функционала:

$$\Psi(x, \alpha) = \|Ax - b\|_2^2 + \alpha \|x\|_2^2. \quad (9)$$

Здесь  $\alpha > 0$  и называется параметром регуляризации. Слишком малые значения параметра регуляризации приводят к исходной некорректной задаче, а слишком большие значения дают решения, имеющие мало общего с исходной системой. Поэтому критически важен вопрос выбора параметра регуляризации. Одним из самых популярных подходов автоматического подбора параметра регуляризации является принцип невязки [Морозов, 1966]. Он сводится к тому, что при заданном уровне шума  $\varepsilon$  параметр регуляризации  $\alpha$  следует выбирать корнем уравнения:

$$\|Ax_\alpha - b\|_2 = \|\varepsilon\|_2. \quad (10)$$

Это устанавливает явную зависимость между параметром регуляризации и погрешностями в наблюдаемых данных. Эффективность метода зависит от точности оценивания шума. Для задачи сейсмической инверсии эту информацию обычно получают из скважинных данных.

Для того чтобы получать гладкие решения, способ регуляризации нужно модифицировать. Для этого минимизируется функционал вида:

$$\Psi(x, \alpha) = \|Ax - b\|_2^2 + \alpha \|x - x_0\|_2^2. \quad (11)$$

Вид второго слагаемого накладывает на решение требование близости к начальному приближению  $x_0$ . Далее требуется, чтобы решение было гладким. Сделать это можно с помощью градиента второго порядка [Тихонов, 1965; Жданов, 2007], который в матричной форме имеет вид:

$$D = \begin{bmatrix} -1 & 1 & 0 & \dots & \dots & 0 \\ -1 & 2 & -1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & -1 & 2 & -1 & \ddots & 0 \\ \vdots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \vdots \\ \vdots & 0 & 0 & -1 & 2 & -1 \\ 0 & \dots & \dots & 0 & -1 & 1 \end{bmatrix}. \quad (12)$$

Тогда задача сводится к минимизации функционала вида:

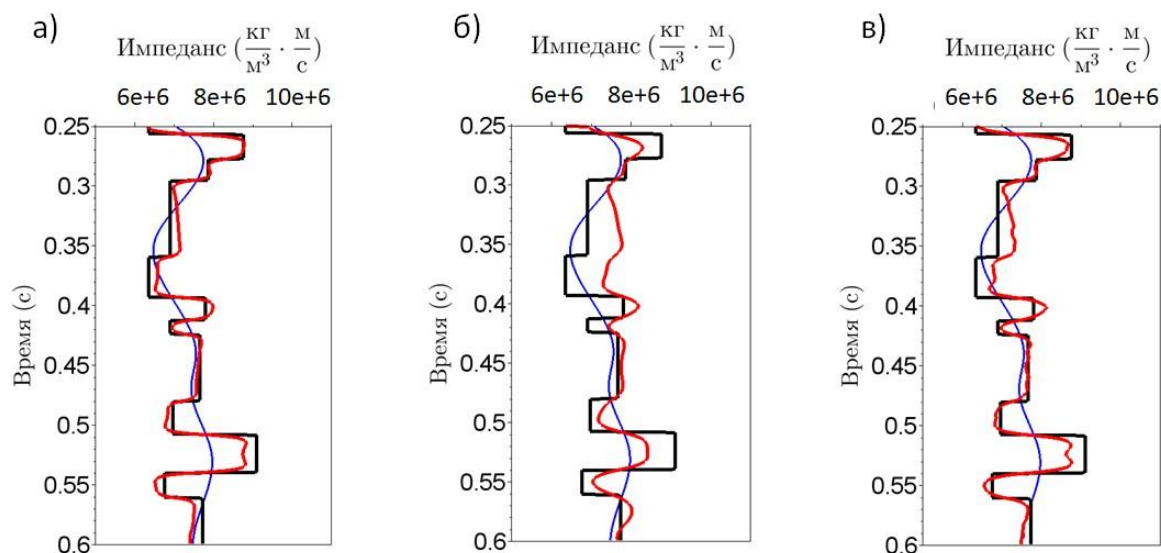
$$\Phi(x, \alpha) = \|Ax - b\|_2^2 + \alpha \|D(x - x_0)\|_2^2. \quad (13)$$

В работе были реализованы и использованы два описанных выше способа регуляризации. Первый способ, соответствующий минимизации функционала (11), условно называем «стандартной» регуляризацией, а второй способ, соответствующий минимизации функционала (13), называем регуляризацией «максимальной гладкости».

## ЧИСЛЕННЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ

### Пример 1. Тестирование алгоритма инверсии

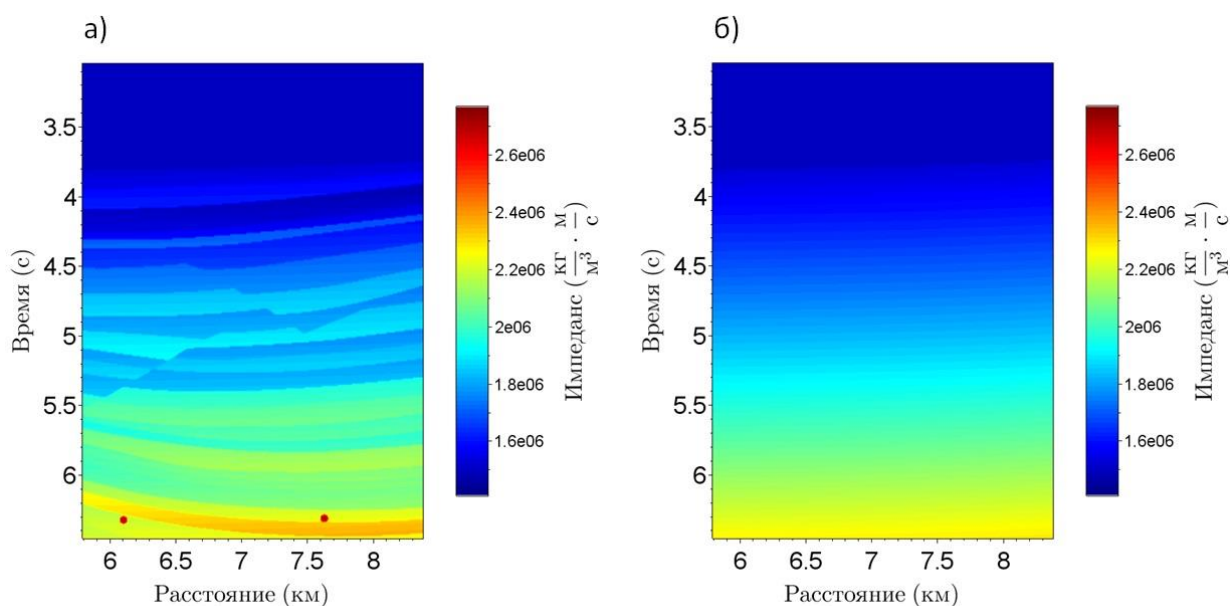
Для тестирования разработанного алгоритма инверсии мы создали модель, идентичную модели, представленной в работе [Ли, 2017]. Затем рассчитали идеальную сейсмическую трассу посредством свертки соответствующих модельных коэффициентов отражений и сейсмического импульса согласно (1). В данном случае используется импульс Риккера с доминирующей частотой 20 Герц. Далее были проведены расчеты с применением инверсии данных без шума, но при этом изменялся параметр регуляризации. Результаты показывают, что при увеличении параметра  $\alpha$  решение становится более гладким (рис. 1а, б). Следующая серия расчетов проведена для данных с добавлением гауссовского шума. Параметр регуляризации в этом случае выбирается автоматически по принципу невязки (рис. 1в). Стоит отметить, что в конкретном случае, когда уровень шума равен 15 %, полученный нами результат (рис. 1в) визуально практически не отличается от результата аналогичных расчетов, представленных в работе [Ли, 2017]. Факт повторяемости результата на идентичных данных указывает на то, что разработанные алгоритмы работают корректно.



**Рис. 1.** Результат инверсии, основанной на модели. Черным показаны истинные импедансы, синим – начальная модель, красным – результат инверсии: а – данные без шума, параметр «стандартной» регуляризации  $\alpha=1$ ; б – данные без шума,  $\alpha=20$ ; в – данные с шумом 15 %, с подбором параметра по принципу невязки  $\alpha=2.71$

### Пример 2. Инверсия результатов глубинной миграции

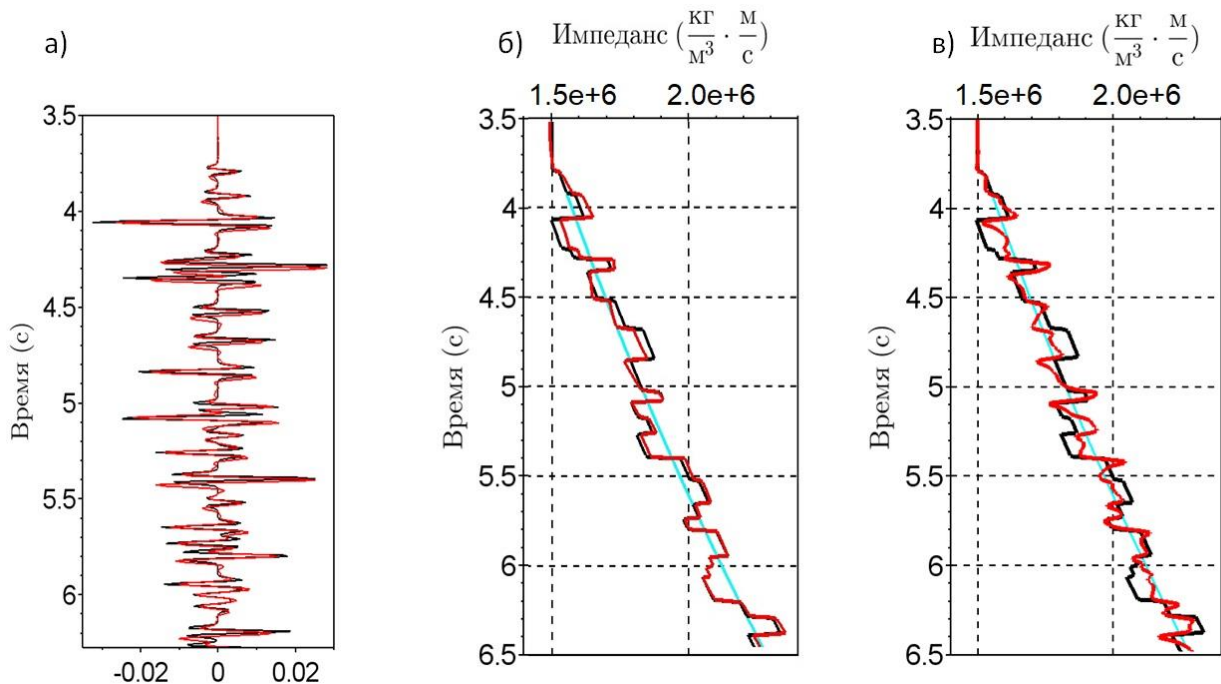
В следующей серии численных экспериментов разработанный алгоритм сейсмической инверсии, основанной на модели, применялся к результатам глубинной сейсмической миграции в истинных амплитудах. Поскольку и миграционная скоростная модель, и результат миграции заданы в глубинном масштабе, а сейсмическая инверсия работает во временном масштабе, то дополнительно было использовано преобразование «глубина–время» [Robein, 2010]. 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 (рис. 2).



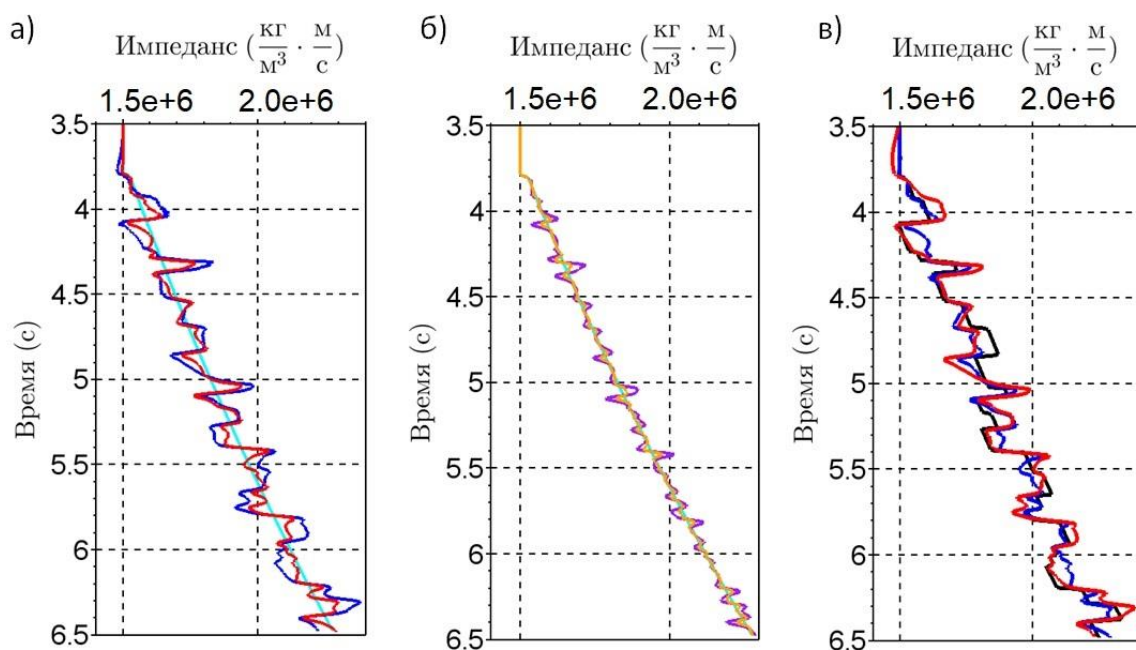
**Рис. 2.** Фрагмент модели Sigsbee во временном масштабе: а – акустический импеданс; б – миграционная скоростная модель

Сейсмическое изображение или сейсмические трассы в глубинном масштабе были получены с помощью алгоритма глубинной миграции в истинных амплитудах, описанного в статье [Protasov, Tcheverda, 2011]. Также параллельно были рассмотрены идеальные сейсмические изображения, которые должны получаться в случае, если алгоритм миграции сработает корректно и не будет содержать никаких артефактов и ошибок аппроксимаций. Формально такие идеальные трассы являются результатом двумерной свертки глубинной модели коэффициентов отражения с сейсмическим импульсом [Protasov, Tcheverda, 2011]. Идеальные изображения и результаты глубинной миграции, полученные в глубинной области, были преобразованы во временной масштаб.

Сначала для детального численного исследования рассматривается одна сейсмическая трасса после миграции (рис. 3а). Видно, что она во многом совпадает с идеальной, но наблюдаются и расхождения. К обеим трассам применяется разработанный алгоритм сейсмической инверсии (рис. 3б, в). Также были проведены расчеты для нескольких значений параметра регуляризации, чтобы пронаблюдать его влияние (рис. 4а, б). Видно, что инверсия по идеальной трассе дает результат, с высокой точностью совпадающий с истинным решением (рис. 3б). Однако результат инверсии по сейсмической трассе после миграции менее точный, что является следствием разницы между мигрированной трассой и идеальной (рис. 3в). Видно, что восстановленная модель импедансов «улавливает» многие скачки истинных импедансов, а неточности проявляются в основном внутри пластов. Такое поведение частично объясняется регуляризацией. При увеличении параметра «стандартной» регуляризации результат инверсии получается ближе к начальной модели (рис. 4а, б). Также можно наблюдать, что параметр «стандартной» регуляризации дает возможность балансировать между более точным описанием резких изменений модели и более корректными значениями внутри пластов. Чтобы улучшить такую ситуацию, регуляризация в инверсии была изменена: в алгоритме стала использоваться регуляризация «максимальной гладкости» (рис. 4в). Видно, что это решение точнее описывает истинные импедансы по сравнению с решением, построенным с применением «стандартной» регуляризации.

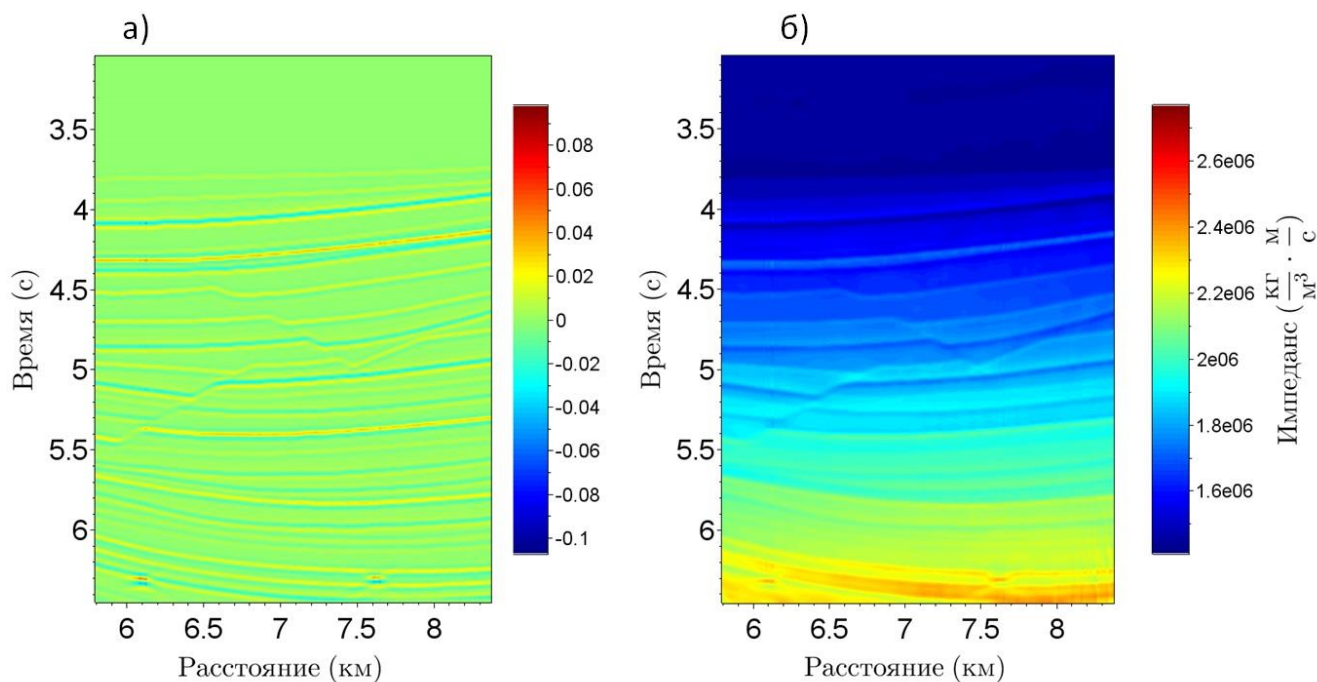


**Рис. 3.** Входные и выходные данные сейсмической инверсии при  $x=6705$  м: а – идеальная сейсмическая трасса показана черным, сейсмическая трасса после работы алгоритма миграции – красным; б – результаты инверсии по идеальной сейсмической трассе, черным – истинные акустические импедансы, голубым – начальная фоновая модель, красным – результат инверсии при  $\alpha=0.01$  со «стандартной» регуляризацией; в – аналогичные результаты инверсии сейсмической трассы после миграции



**Рис. 4.** Результаты инверсии по трассе после миграции,  $x=6705$  м: а – результат инверсии со «стандартной» регуляризацией при  $\alpha=0.001$  показан синим, при  $\alpha=0.01$  – красным, начальная модель – бирюзовым; б – результат инверсии со «стандартной» регуляризацией при  $\alpha=0.1$  – фиолетовым, при  $\alpha=1.0$  – оранжевым, начальная модель – бирюзовым; в – результат инверсии со «стандартной» регуляризацией при  $\alpha=0.01$  – синим, результат инверсии с регуляризацией «максимальной гладкости» при  $\alpha=0.01$  – красным, истинные акустические импедансы – черным

Далее инверсия с использованием регуляризации «максимальной гладкости» была применена ко всему исследуемому фрагменту модели Sigsbee (рис. 5). Полученный результат демонстрирует удовлетворительную точность восстановления детальной модели импедансов в большей ее части, за исключением окрестностей объектов дифракции и зон, содержащих артефакты миграции.



**Рис. 5.** Результаты миграции и инверсии во фрагменте модели Sigsbee во временном масштабе: а – результат глубинной сейсмической миграции; б – соответствующий результат сейсмической инверсии

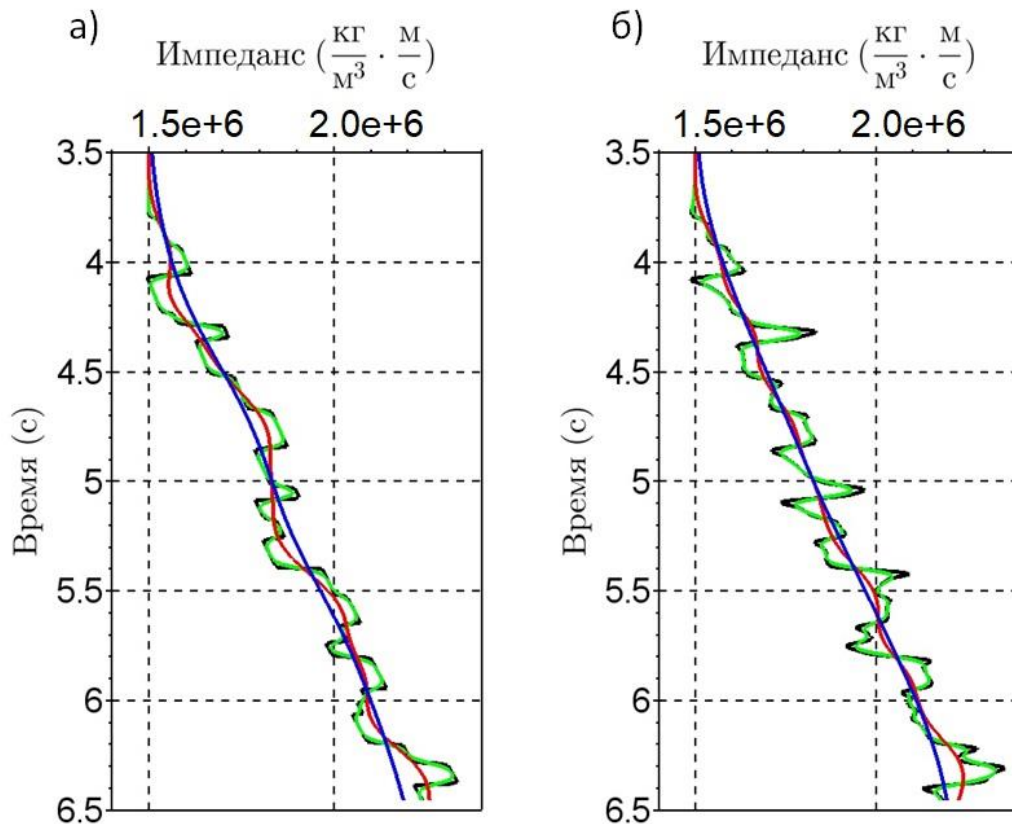
### Пример 3. Низкочастотная составляющая результата инверсии

Полученные выше результаты инверсии (рис. 5) показывают, что сейсмическая инверсия результатов глубинной миграции дает удовлетворительный результат восстановления детальной модели среды, включая ее высокочастотную составляющую. При этом видно, что этот результат описывает сейсмическую модель в целом, включая и низкочастотную составляющую. Конечно, низкочастотная составляющая содержится в начальной модели, которая используется как в инверсии, так и в миграции, однако видно, что происходит ее уточнение.

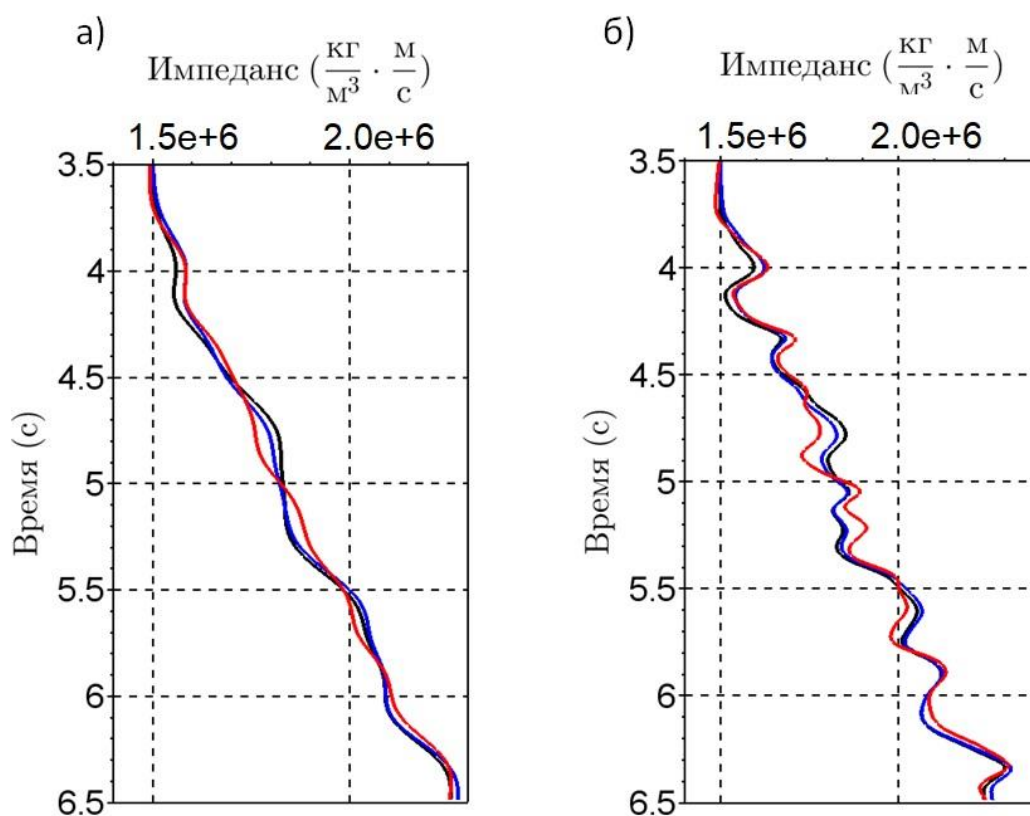
Чтобы выявить это более отчетливо, предлагается выделить низкочастотную составляющую модели посредством сглаживания результата инверсии. При этом аналогичная процедура производится с истинной моделью. В качестве оператора сглаживания используется функция с гауссовым ядром:

$$\tilde{y}_i = \frac{\sum_{j=1}^n K\left(\frac{x_i - x_j}{b}\right) y_j}{\sum_{j=1}^n K\left(\frac{x_i - x_j}{b}\right)}, \quad K(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot (0.37)} e^{-\frac{t^2}{2 \cdot (0.37)^2}}. \quad (14)$$

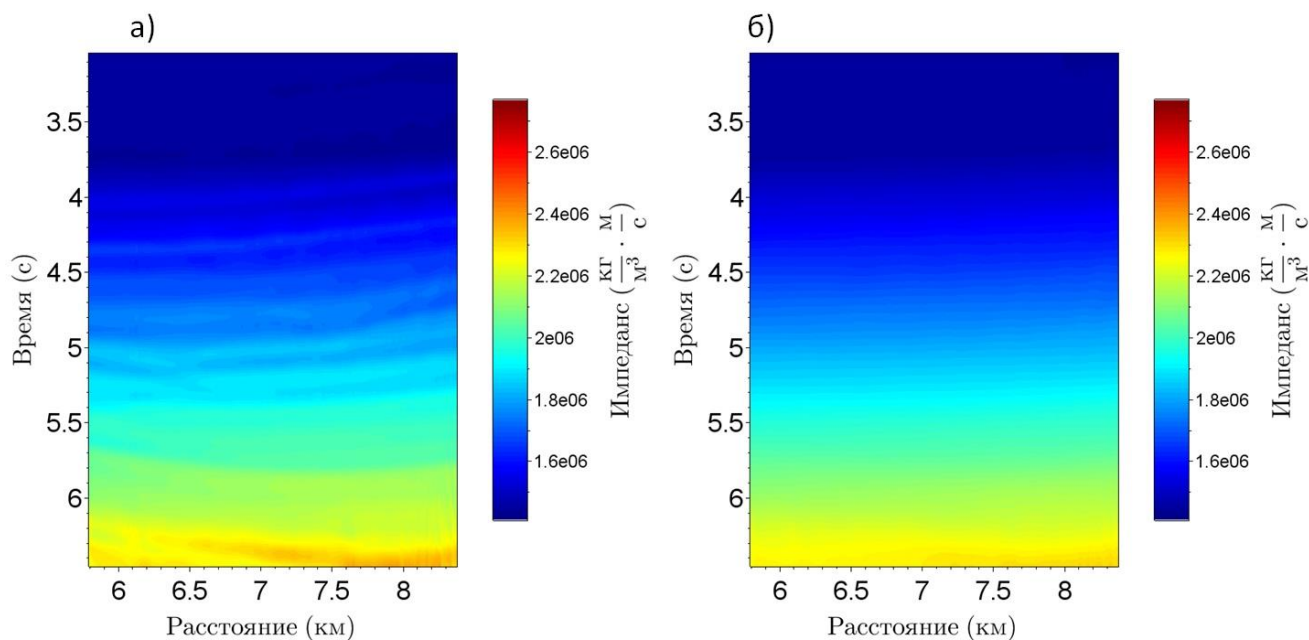
Здесь  $x_i$  – это узлы сетки, а  $y_i$  и  $\tilde{y}_i$  – значения исходной и сглаженной функции на этой сетке,  $b$  – параметр, регулирующий гладкость получаемой функции. Далее проводится выделение различных низкочастотных составляющих истинной модели и результата инверсии посредством сглаживания с различными значениями параметра  $b$  (рис. 6). При больших значениях  $b$ , например  $b = 0.8$ , результат сглаживания истинной модели становится близким к начальной модели инверсии (рис. 6а). При малых значениях  $b$ , например  $b = 0.05$ , результат сглаживания мало отличается от истинной модели (рис. 6а).



**Рис. 6.** Импедансы и их гладкие компоненты при  $x=6705$  м: а – исходная модель, показана черным, и ее гладкие составляющие для  $b=0.05$  – зеленым,  $b=0.03$  – красным,  $b=0.8$  – синим; б – модель, полученная инверсией трасс после миграции – черным, и ее гладкие компоненты составляющие для  $b=0.05$  – зеленым,  $b=0.3$  – красным,  $b=0.8$  – синим



**Рис. 7.** Низкочастотные компоненты моделей, полученные сглаживанием при  $x=6705$  м: а – параметр  $b=0.3$ ; б –  $b=0.1$ . Гладкая составляющая истинных акустических импедансов показана черным, результат инверсии по идеальной сейсмической трассе – синим, результат инверсии по сейсмической трассе после миграции – красным



**Рис. 8.** Низкочастотные компоненты модели результата инверсии после глубинной миграции, полученные сглаживанием с параметрами: а –  $b=0.1$ ; б –  $b=0.3$

Однако в промежутке между этими значениями, например  $b = 0.3$ , получаются достаточно гладкие решения, которые заметно отличаются от начальной модели для инверсии (рис. 6а). Аналогичные

результаты видны при применении сглаживания модели, полученной сейсмической инверсией (рис. 6б). Сравнение низкочастотных составляющих истинной модели, результата инверсии «идеальных трасс» и трасс после миграции показывает, что инверсия определяет эти компоненты с высокой точностью (рис. 7). Относительная среднеквадратичная ошибка результата инверсии трасс после миграции (рис. 8) относительно истинной модели для компонент, полученных сглаживанием с использованием параметра  $b = 0.3$ , составляет 1.35 %. При использовании параметра  $b = 0.1$  ошибка составляет 1.78 %. По этим результатам можно сделать вывод, что инверсия действительно определяет низкочастотную составляющую модели, при этом восстанавливает ее с достаточно высокой точностью.

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

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. Путем 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**

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и ЧНФ в рамках научного проекта № 20-55-26003.

The reported study was funded by RFBR and GACR, project number 20-55-26003.

## **ЛИТЕРАТУРА**

- 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.
- Жданов М.С.** Теория обратных задач и регуляризации в геофизике – М.: Научный мир, 2007. – 712 с.
- Ли Ц.** Разработка помехоустойчивых алгоритмов динамической инверсии сейсмических данных. Дисс. на соиск. уч. степ. канд. тех. наук. – М.: РГУ Нефти и газа, 2017.
- Морозов В.А.** О регуляризации некорректно поставленных задач и выборе параметра регуляризации // Журнал вычислительной математики и математической физики. – 1966. – Т. 6, № 1. – С. 170–175.
- Тихонов А.Н.** О некорректных задачах линейной алгебры и устойчивом методе их решения // ДАН СССР. 1965. – Т. 163, № 3. – С. 591–594.
- Тихонов А.Н., Арсенин В.Я.** Методы решения некорректных задач. – М.: Наука, 1986. – 181 с.
- Яковлев И.В., Ампилов Ю.П., Филиппова К.Е.** Почти все о сейсмической инверсии. Часть 2 // Технологии сейсморазведки. – 2011. – № 1. – С. 5–15.

- Fletcher R., Archer S., Nichols D., Mao W.** Inversion after depth imaging // SEG Technical Program, Expanded Abstracts. – 2012. – P. 1–5, doi: 10.1190/segam2012-0427.1.
- Hampson D.P., Russell B.H., Bankhead B.** Simultaneous inversion of pre-stack seismic data // SEG Annual Meeting, Expanded Abstracts. – 2005. – P. 1633–1637, doi: 10.1190/1.2148008.
- Protasov M., Tcheverda V.** True amplitude imaging by inverse generalized Radon transform based on Gaussian beam decomposition of the acoustic Green's function // Geophysical Prospecting. – 2011. – Vol. 59 (2). – P. 197–209, doi: 10.1111/j.1365-2478.2010.00920.x.
- Robein E.** Seismic imaging: A review of the techniques, their principles, merits and limitation. – EAGE Publications, 2010. – 244 p.
- Russell B.H.** Introduction to seismic inversion methods. Course notes series, Society of Exploration Geophysicists. – 1988. – P. 80–101, doi: 10.1190/1.9781560802303.
- Russell B.H., Hampson D.P.** Comparison of poststack seismic inversion methods // SEG Annual Meeting, Expanded Abstracts. – 1991. – P. 876–878, doi: 10.1190/1.1888870.

## REFERENCES

- Ampilov Yu.P., Barkov A.Yu., Yakovlev I.V., Filippova K.E., Priezzhev I.I.** Almost everything is about seismic inversion. Part 1 // Seismic technologies. – 2009. – No. 4. – P. 3–16.
- Fletcher R., Archer S., Nichols D., Mao W.** Inversion after depth imaging // SEG Technical Program, Expanded Abstracts. – 2012. – P. 1–5, doi: 10.1190/segam2012-0427.1.
- Hampson D.P., Russell B.H., Bankhead B.** Simultaneous inversion of pre-stack seismic data // SEG Annual Meeting, Expanded Abstracts. – 2005. – P. 1633–1637, doi: 10.1190/1.2148008.
- Li Ts.** Development of noise-immune algorithms for dynamic inversion of seismic data. PhD Thesis [in Russian]. – Moscow, 2017.
- Morozov V.A.** On the regularization of ill-posed problems and the choice of the regularization parameter // Journal of Computational Mathematics and Mathematical Physics. – 1966. – Vol. 6 (1). – P. 170–175.
- Protasov M., Tcheverda V.** True amplitude imaging by inverse generalized Radon transform based on Gaussian beam decomposition of the acoustic Green's function // Geophysical Prospecting. – 2011. – Vol. 59 (2). – P. 197–209, doi: 10.1111/j.1365-2478.2010.00920.x.
- Robein E.** Seismic imaging: A review of the techniques, their principles, merits and limitation. – EAGE Publications, 2010. – 244 p.
- Russell B.H.** Introduction to seismic inversion methods. Course notes series, Society of Exploration Geophysicists. – 1988. – P. 80–101, doi: 10.1190/1.9781560802303.
- Russell B.H., Hampson D.P.** Comparison of poststack seismic inversion methods // SEG Annual Meeting, Expanded Abstracts. – 1991. – P. 876–878, doi: 10.1190/1.1888870.
- Tikhonov A.N.** On ill-posed problems in linear algebra and a stable method for their solution // Doklady Akademii Nauk SSSR. – 1965. – Vol. 163 (3). – P. 591–594.
- Tikhonov A.N., Arsenin V.Ya.** Methods for solving ill-posed problems. – Nauka, Moscow, 1986.
- Yakovlev I.V., Ampilov Yu.P., Filippova K.E.** Almost everything is about seismic inversion. Part 2 // Seismic technologies. – 2011. – № 1. – P. 5–15.

**Zhdanov M.S.** Theory of inverse problems and regularization in geophysics [in Russian]. – Nauchnyy Mir, Moscow, 2007.

#### **КОРОТКО ОБ АВТОРАХ**

*ДМИТРАЧКОВ Данил Константинович* – лаборант лаборатории многоволновых сейсмических исследований Института нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН. Основные научные интересы: сейсмическая инверсия.

*ПРОТАСОВ Максим Игоревич* – доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории многоволновых сейсмических исследований Института нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН. Основные научные интересы: исследования в области разработки алгоритмов обработки данных сейсморазведки.

*Статья поступила в редакцию 26 октября 2021 г.,  
принята к публикации 20 декабря 2021 г.*