

РУБРИКА: ИНЖЕНЕРНАЯ И РУДНАЯ ГЕОФИЗИКА

### **Двумерная акустическая сейсмическая инверсия для определения импеданса объектов дифракции**

М. И. Протасов (ИНГГ СО РАН), Д. К. Дмитрачков (ИНГГ СО РАН),  
Д. А. Ланшаков (ИНГГ СО РАН)

В работе предложен, реализован и исследован алгоритм двумерной сейсмической инверсии изображений рассеянных волн, основанный на операторе двумерного сверточного моделирования, позволяющий восстанавливать акустический импеданс объектов дифракции. Алгоритм был протестирован на ряде созданных синтетических моделей и изображений. Численные эксперименты выполнены с использованием синтетических данных, полученных для реалистичной модели с трещинами для месторождения в Восточной Сибири.

**Ключевые слова:** двумерная сейсмическая инверсия, акустический импеданс, объекты дифракции.

### **Two-dimensional acoustic seismic inversion for determining impedance of diffraction objects**

M. I. Protasov (IPGG SB RAS), D. K. Dmitrachkov (IPGG SB RAS),  
D. A. Lanshakov (IPGG SB RAS)

This paper proposes, implements, and analyzes an algorithm for two-dimensional seismic inversion of scattered wave images based on a two-dimensional convolutional modeling operator. This algorithm allows for reconstructing the acoustic impedance of diffraction objects. The developed algorithm was tested on a number of synthetic models and images. Numerical experiments were performed using synthetic data obtained for a realistic fractured model for a field in Eastern Siberia.

**Keywords:** 2D seismic inversion, acoustic impedance, diffraction objects.

## Введение

Алгоритмы сейсмической инверсии позволяют количественно оценивать распределение упругих свойств геологической среды. В основе традиционных методов сейсмической инверсии лежит одномерная сверточная модель сейсмической трассы [1, 2], согласно которой сейсмическая трасса представляет собой результат свертки трассы коэффициентов отражения с сейсмическим импульсом. В свою очередь, коэффициенты отражения связаны с контрастами акустического импеданса на границах слоев среды.

Актуальность исследований в области разработки алгоритмов сейсмической инверсии обусловлена возрастающими требованиями к точности интерпретации сейсмических данных при разведке углеводородных месторождений. Известно, что применение сейсмической инверсии к средам с горизонтальными и наклонными отражающими границами приводит к удовлетворительным результатам [3, 4]. Однако при наличии в среде рассеивающих объектов мезомасштаба, например, таких как трещины, заполненные флюидом, сейсмическая инверсия на основе одномерной сверточной модели сейсмической трассы приводит к значительным ошибкам в определении упругих свойств среды [5]. Так происходит потому, что рассеивающие объекты, представляющие собой латеральные неоднородности среды, являются существенно двумерными/трехмерными объектами и не могут быть корректно описаны одномерной сверточной моделью. Поэтому развитие и внедрение методов инверсии, учитывающих латеральные неоднородности среды, способно существенно улучшить прогнозирование свойств коллекторов, что имеет важное практическое значение для нефтегазовой отрасли.

Многомерная инверсия, а тем более двумерная инверсия — в широком смысле идея понятная и известная. Поэтому необходимо указать место предлагаемого подхода среди других методов обращения сейсмической информации. При обработке и интерпретации сейсмических данных существует разделение на кинематические (например, сейсмическая томография) и динамические методы (например, полноволновое обращение, акустическая сейсмическая инверсия). Представленный метод относится к классу динамических. Далее, динамические задачи можно разделить на два вида по типу используемой информации: область данных (например, полноволновое обращение) и область изображений (например, сейсмическая инверсия). Конечно же, и сейсмическая томография, и полноволновое обращение реализованы и используются как в двумерном, так и трехмерном варианте. Однако до сих пор сейсмическая инверсия мигрированных изображений реализована и используется только как 1D-инверсия, хотя, как было указано выше, существует необходимость развития двумерных и трехмерных алгоритмов, чему и посвящена данная работа.

Необходимо также подчеркнуть, что современные вычислительные возможности и развитие алгоритмических подходов открывают новые перспективы для совершенствования методов сейсмической инверсии. Например, геостатистические методы, такие как стохастическая инверсия, позволяют интегрировать данные скважин и сейсмоки, минимизируя разрыв между этапами разведки и разработки месторождений [6].

Учитывая вышеизложенное, в данной работе предложен, реализован и исследован алгоритм двумерной сейсмической инверсии изображений рассеянных волн, основанный на операторе двумерного сверточного моделирования, позволяющий восстанавливать акустический импеданс объектов дифракции. Численные эксперименты выполнены на ряде синтетических моделей, которые описывают двумерные срезы трехмерной модели трещиноватого коллектора.

## Теория и метод

В основе акустической сейсмической инверсии лежит одномерная сверточная модель [1, 3]. Такая постановка предполагает, что для горизонтально-слоистой модели при нормальном падении плоской продольной волны однократно-отраженное волновое поле во временной области может быть представлено в виде свертки трассы коэффициентов отражения с зондирующим импульсом, которое в частотной области представляется в следующем виде:

$$S(t) = \int \widehat{W}(\omega) \widehat{R}(\omega) e^{i\omega t} d\omega, \quad (1)$$

где  $S(t)$  — сейсмическая трасса,  $\omega$  — частота,  $\widehat{W}$  и  $\widehat{R}$  — фурье-образы сейсмического импульса и коэффициентов отражения соответственно.

В случае, когда среда не является горизонтально-слоистой, то результаты и временной, и глубинной обработки в двумерной среде формально удовлетворяют двумерной сверточной модели. Поэтому в основе двумерной инверсии предлагается использовать двумерную сверточную модель, которая определяется в глубинной области.

Глубинное изображение, которое должно получаться после миграции, представляется выражением, являющимся двумерной сверткой в области пространственных частот [7]:

$$S_2(x_i, z_i) = \iint \widehat{W}(\omega(p_x, p_z)) \cdot \widehat{R}_2(p_x, p_z) \cdot e^{i(p_x x_i + p_z z_i)} dp_x dp_z, \quad (2)$$

где  $S_2(x_i, z_i)$  — результат миграции в двумерной среде в глубинной области,  $p_x, p_z$  — пространственные частоты,  $\widehat{W}$  — фурье-образ сейсмического импульса,  $\widehat{R}_2$  — фурье-образ линейаризованного коэффициента отражения/рассеяния в двумерной среде  $R_2(x, z)$ .

Очевидно, что в двумерной глубинной области выражение (2) записывается в виде двумерной свертки:

$$S_2(x_i, z_i) = G(x_i, z_i) * R_2(x_i, z_i), \quad (3)$$

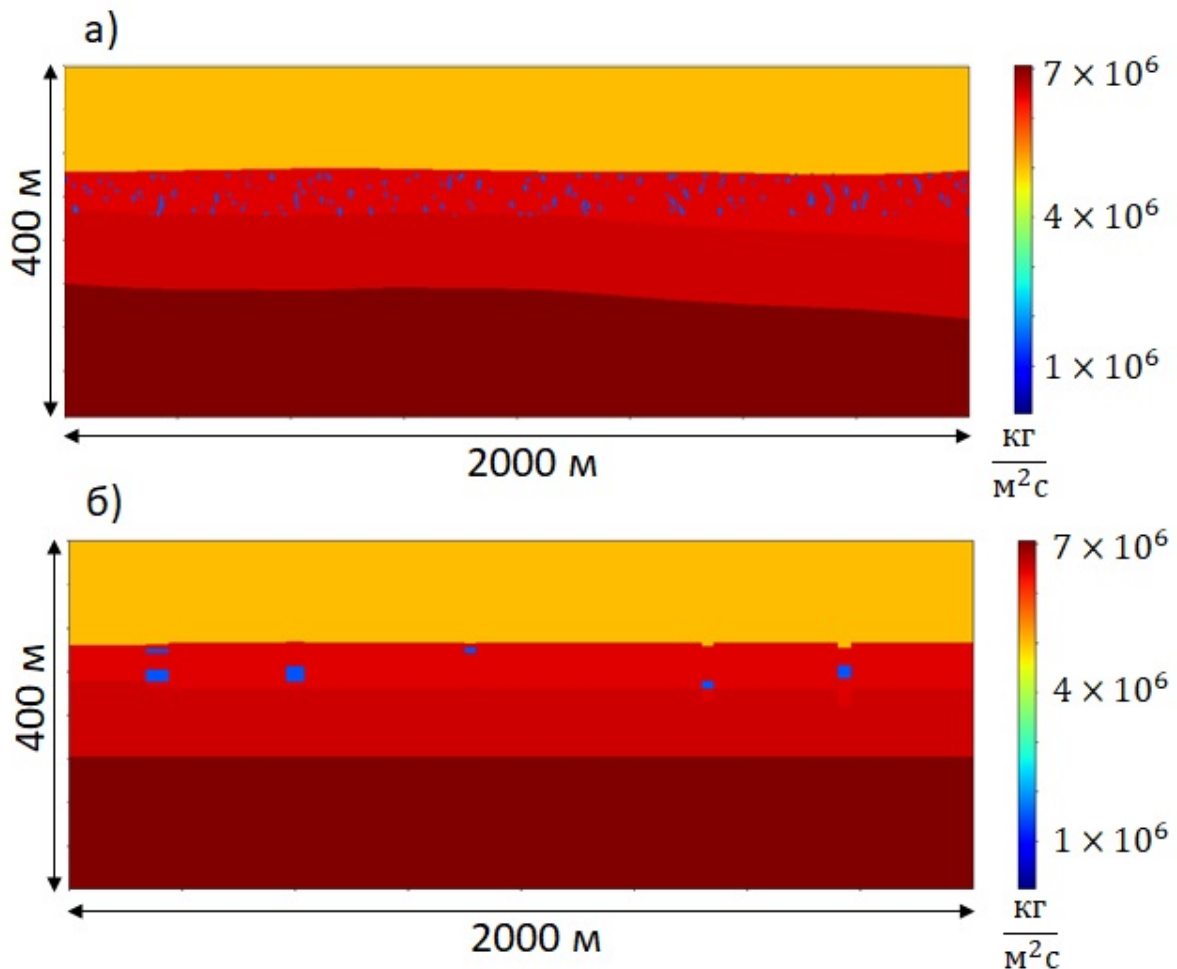
где  $G(x_i, z_i)$  — это ядро оператора свертки, которое получается в результате преобразования зондирующего импульса согласно выражению (2).

Таким образом, в отличие от одномерной сейсмической инверсии, где входными данными является сейсмическая трасса во временной области, алгоритм двумерной сейсмической инверсии принимает на вход двумерное сейсмическое изображение в глубинной области. При этом вместо одномерной сверточной модели во временной области используется двумерная сверточная модель в глубинной области.

Далее алгоритм двумерной сейсмической инверсии реализуется аналогично одномерной сейсмической инверсии с целью восстановления акустических импедансов, связанных напрямую с коэффициентами отражения/рассеяния. При решении обратной задачи для двумерной инверсии матрица свертки не формируется явно, а задается действием с использованием преобразования Фурье, что значительно снижает необходимый для работы программы объем памяти и ускоряет вычисления, при этом используется оптимизационный метод FISTA [8] и метод решения линейных алгебраических уравнений LSQR [9].

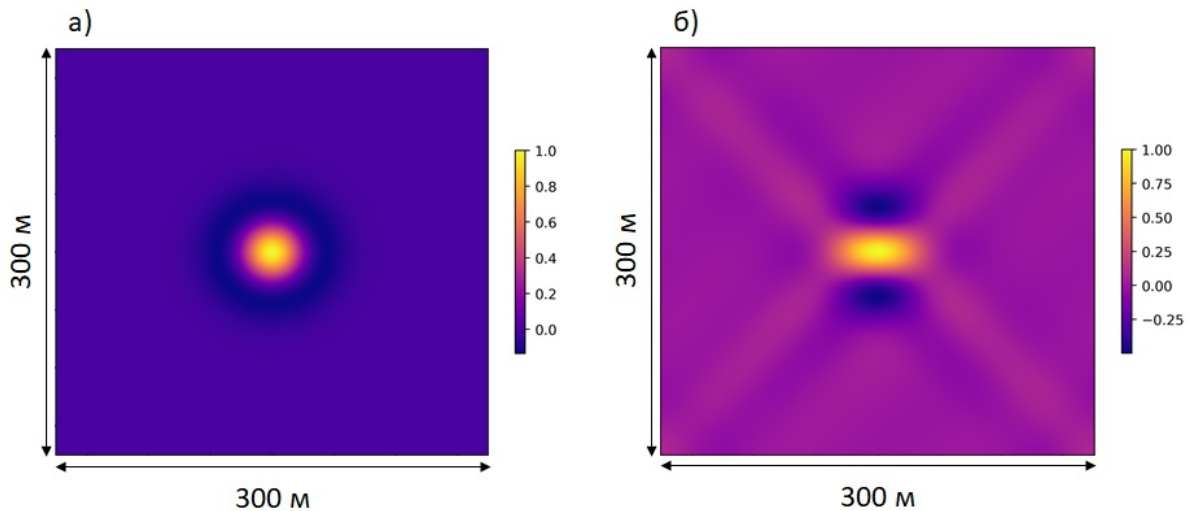
## Численные эксперименты и результаты

Для исследования возможностей сейсмической инверсии на основе одномерной и двумерной сверточных моделей сейсмической трассы для восстановления аномалий распределения упругих свойств, связанных с рассеивающими объектами, были построены две реалистичные модели (рис. 1). Обе модели построены по результатам обработки реальных сейсмических данных из Восточной Сибири. Первая модель содержит трещиноватый коллектор, который после осреднения на сетку модели с ячейкой 1 м на 1 м приводит к латеральным неоднородностям относительно небольшого «мелкого» масштаба. Средний размер и по латерали, и по вертикали равен 5 м (рис. 1а). Вторая модель создана аналогичным образом, но отличается тем, что отражающие границы горизонтальны, а латеральные неоднородности более «крупного» масштаба. Средний размер по латерали равен 35 м, а по вертикали — 15 м (рис. 1б).



**Рисунок 1.** 2D-модель с трещиноватым слоем: а) объекты дифракции «мелкого» масштаба (в среднем 5 м на 5 м) в вертикальном сечении; б) объекты дифракции «крупного» масштаба (в среднем 35 м на 15 м) в вертикальном сечении

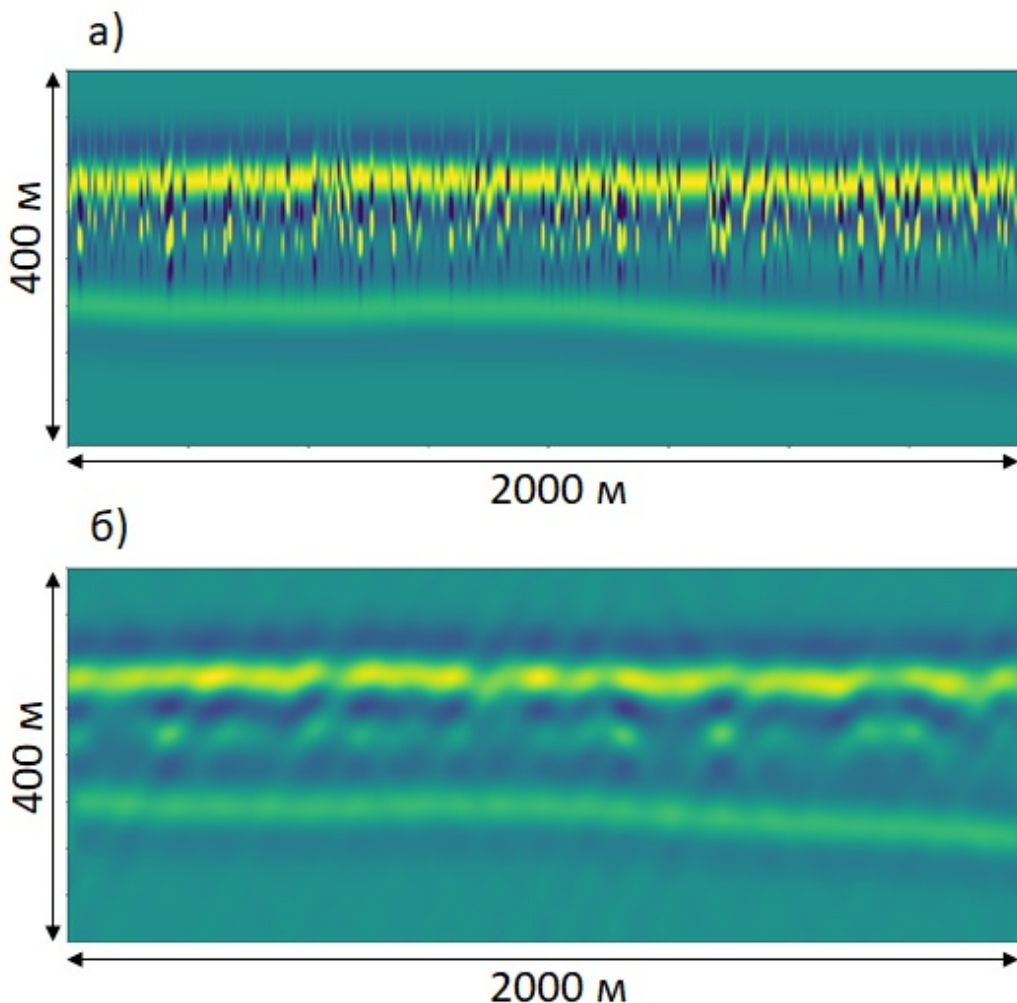
Далее для сверточного моделирования или построения идеальных сейсмических изображений используется импульс Рикера. Ядро оператора двумерной свертки, как и ядро оператора одномерной свертки, рассчитываются на основе импульса Рикера с доминирующей частотой 30 Гц. При условии полной апертуры ядро оператора двумерной свертки представлено на рисунке 2а. При построении реальных сейсмических изображений исследуемые объекты нельзя осветить со всех сторон, поэтому ядро оператора меняется в соответствии с ограниченностью апертуры (рис. 2б).



**Рисунок 2.** Примеры ядра оператора двумерной свертки, где зондирующий сигнал — импульс Рикера с доминирующей частотой 30 Гц: а) полная апертура; б) ограниченная апертура

Затем была выполнена серия численных экспериментов для модели, содержащей трещиноватый коллектор с неоднородностями «мелкого» масштаба (рис. 1а). Для нее были рассчитаны сейсмические трассы как одномерным, так и двумерным сверточным моделированием (рис. 3а, 3б). В первом случае модель была преобразована во временной масштаб [10], и там для каждой трассы реализована одномерная свертка согласно (1), затем осуществлен перевод из времени в глубину [10], а во втором изображении построены согласно (3) сразу в глубинном масштабе. В данной модели проявляются особенности, связанные с латеральными неоднородностями. Видно, что результаты сверточного моделирования в 1D и 2D достаточно близки для части модели, где имеются только отражающие границы (разность около 2–3 %). Но в случае присутствия объектов дифракции различие между результатами моделирования становится существенным и достигает 100 %.

Поскольку результат двумерного сверточного моделирования соответствует результату миграции сейсмических данных, т. е. результату обработки данных, то именно к этому изображению применяется сейсмическая инверсия. Далее к этому изображению, переведенному во временной масштаб, применяется одномерная сейсмическая инверсия (рис. 4а). Также к исходному изображению в глубинной области применяются разработанный алгоритм двумерной сейсмической инверсии (рис. 4б).

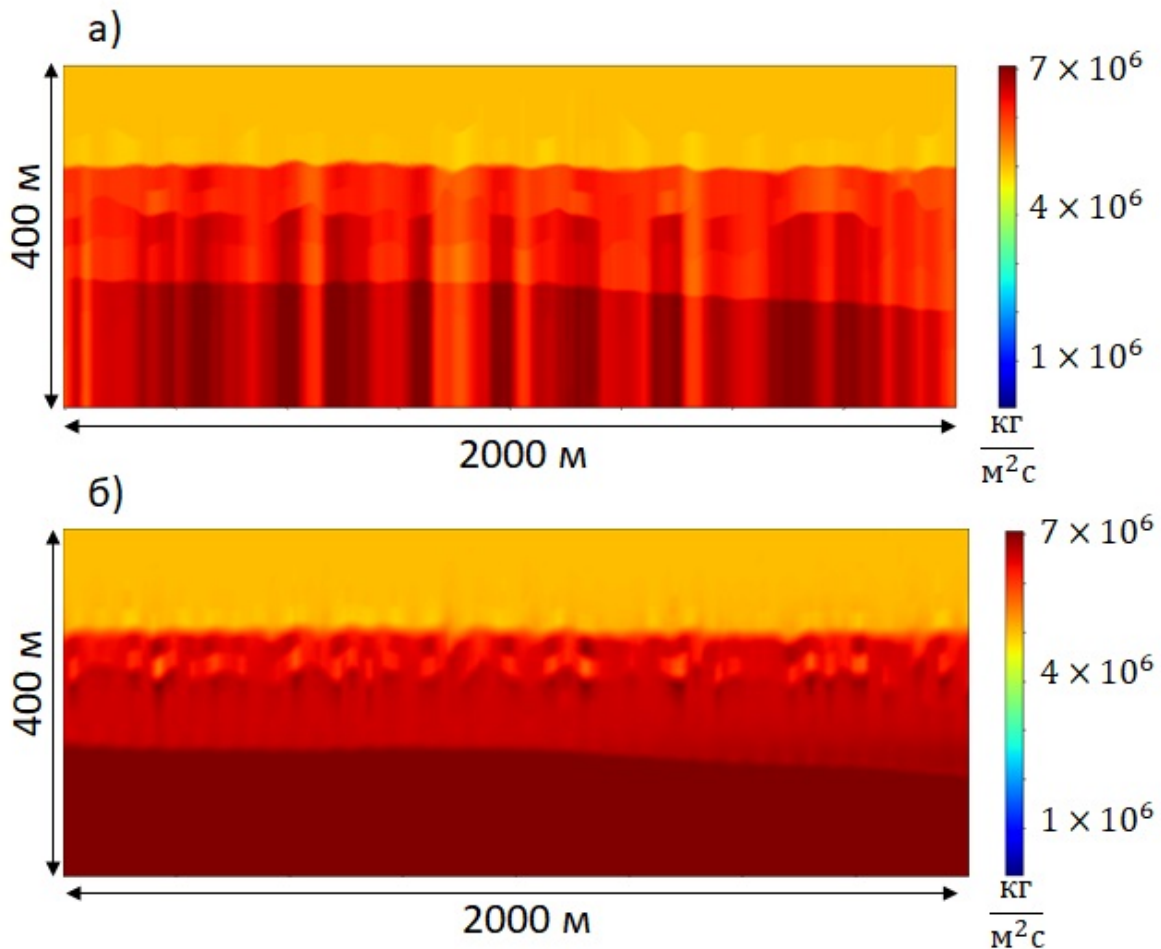


**Рисунок 3.** Результаты сверточного моделирования для модели с трещиноватым слоем с «мелкими» объектами дифракции (рис. 1а): а) результат одномерного моделирования; б) результат двумерного моделирования

Аналогичные эксперименты были проведены для модели, содержащей трещиноватый коллектор с неоднородностями «крупного» масштаба. Сначала проведено одномерное и двумерное сверточное моделирование (рис. 5), а затем применена сейсмическая инверсия к результатам двумерного сверточного моделирования (рис. 6).

Для количественного сравнения результатов инверсии используется метрика MAPE (Mean Absolute Percentage Error) — средняя абсолютная процентная ошибка:

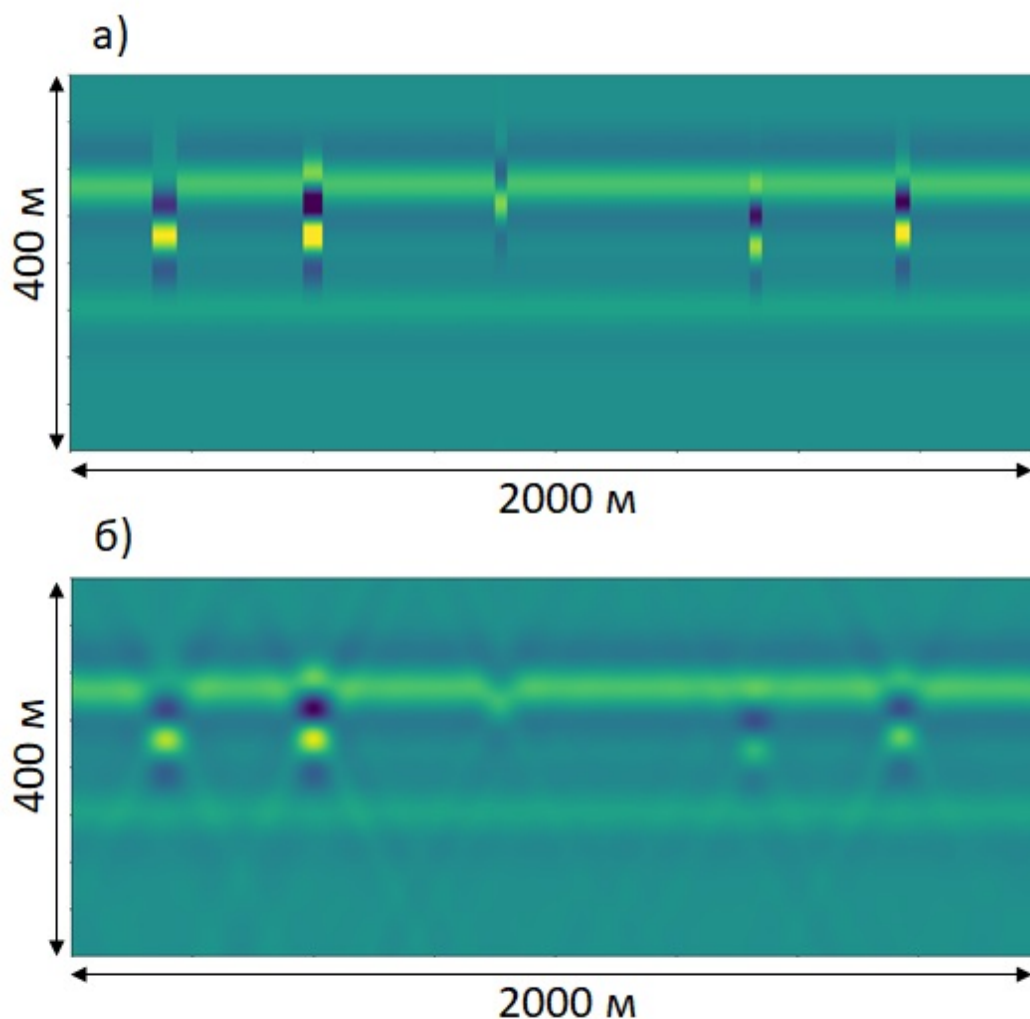
$$MAPE = \frac{100\%}{n_x \cdot n_z} \cdot \sum_{i=1}^{n_x} \sum_{j=1}^{n_z} \left| \frac{I_{ij}^{True} - I_{ij}^{Inverted}}{I_{ij}^{True}} \right|. \quad (4)$$



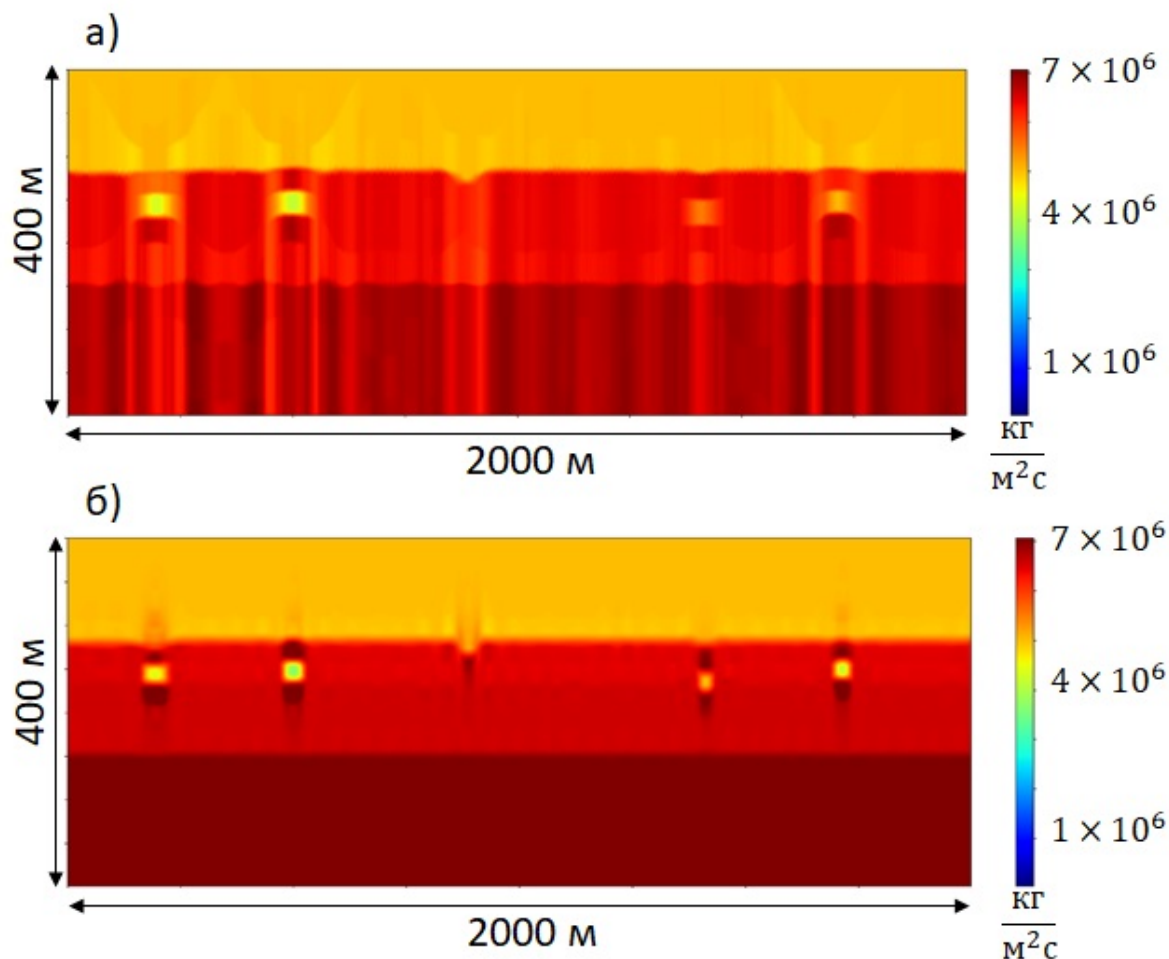
**Рисунок 4.** Результаты сейсмической инверсии, примененной к двумерному изображению (рис. 3б), полученному двумерным сверточным моделированием для модели с трещиноватым слоем с «мелкими» объектами дифракции (рис. 1а): а) результат одномерной инверсии; б) результат двумерной инверсии

Из анализа результатов серии расчетов с применением двумерной инверсии следует вывод о том, что сейсмическая инверсия на основе двумерной сверточной модели сейсмической трассы обладает более привлекательными возможностями для восстановления латеральных неоднородностей мезомасштаба (для модели «мелких» объектов дифракции  $\text{МАРЕ} = 4.5\%$ ), чем аналогичный алгоритм одномерной сейсмической инверсии (на той же модели  $\text{МАРЕ} = 8.5\%$ ). Однако более детальный анализ результатов на модели «мелких» объектов дифракции показывает, что восстановленные импедансы локализованы в пространстве в больших областях, чем истинные импедансы, т. е. результат обращения изображения тесно связан с разрешающей способностью сейсмической инверсии. Действительно, рассматривая двумерный импульс, который использовался для прямого моделирования и при обращении, можно заметить, что при свертке он действует как осреднение с весом в окне шириной около 100–200 м по обеим осям, в то

время как размер латеральных неоднородностей в истинном распределении акустического импеданса существенно меньше. Таким образом, ограничения, связанные с разрешающей способностью, препятствуют восстановлению неоднородностей достаточно малого размера. Из анализа результатов для модели с крупными объектами дифракции следует, что одномерная сверточная инверсия способна восстанавливать местоположение «крупных» латеральных неоднородностей, связанных с рассеивающими объектами, но получаются количественно неверные значения импеданса (МАРЕ = 5.0 %). По результатам двумерной инверсии видно, что восстанавливается распределение импеданса, более близкое к истинному как количественно (МАРЕ = 1.6 %), так и структурно.



**Рисунок 5.** Результаты сверточного моделирования для модели с трещиноватым слоем с «крупными» объектами дифракции (рис. 1б): а) результат одномерного моделирования; б) результат двумерного моделирования



**Рисунок 6.** Результаты сейсмической инверсии, примененной к двумерному изображению (рис. 5б), полученному двумерным сверточным моделированием для модели с трещиноватым слоем с «крупными» объектами дифракции (рис. 1б): а) результат одномерной инверсии; б) результат двумерной инверсии

## Выводы

Разработан, реализован и исследован алгоритм двумерной сейсмической инверсии изображений рассеянных волн, основанный на операторе двумерного сверточного моделирования, позволяющий восстанавливать акустический импеданс объектов дифракции. Алгоритм был протестирован на ряде созданных синтетических моделей и изображений. Из результатов выполненных численных экспериментов следует ряд выводов. Сейсмическая инверсия, основанная на одномерной сверточной модели сейсмической трассы, приводит к неудовлетворительным результатам в случае наличия латеральных неоднородностей, соответствующих рассеивающим объектам, при обращении изображений, соответствующих двумерной сверточной модели. В моделях, имеющих отражающие границы, и одномерная, и двумерная сейсмическая инверсия корректно восстанавливает значения акустического импеданса. При

наличии рассеивающих объектов для восстановления связанных с ними аномалий наиболее привлекательны алгоритмы сейсмической инверсии, основанные на двумерной сверточной модели. При этом качество восстановления распределения акустического импеданса с помощью двумерной сейсмической инверсии в значительной степени определяется разрешающей способностью алгоритма, то есть более крупные неоднородности восстанавливаются лучше, чем более мелкие. Подход решения прямой задачи, основанный на использовании линейного оператора в качестве действия без явного хранения матрицы, приводит к вычислительно эффективной реализации алгоритма двумерной сейсмической инверсии.

### **Благодарности**

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда, грант № 21-71-20002-П. Результаты работы были получены с использованием вычислительных ресурсов суперкомпьютерного центра Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого (scc.spbstu.ru).

## Список литературы

1. Russell B. H. Introduction to Seismic Inversion Methods / Russell B. H. // Course Notes Series, Society of Exploration Geophysicists. — 1988. — P. 80–101.
2. Russell B. H. Comparison of poststack seismic inversion methods / Russell B. H., Hampson D. P. // SEG Annual Meeting, Expanded Abstracts. — 1991. — P. 876–878.
3. Ампилов Ю. П. Почти все о сейсмической инверсии. Часть 1 / Ампилов Ю. П., Барков А. Ю., Яковлев И. В., Филиппова К. Е., Приезжев И. И. // Технологии сейсморазведки. — 2009. — № 4. — С. 3–16.
4. Яковлев И. В. Почти все о сейсмической инверсии. Часть 2 / Яковлев И. В., Ампилов Ю. П., Филиппова К. Е. // Технологии сейсморазведки. — 2011. — № 1. — С. 5–15.
5. Дмитрачков Д. К. Применимость сейсмической инверсии для латерально-неоднородных сред / Дмитрачков Д. К., Протасов М. И. // Геофизика. — 2021. — № 6. — С. 33–37.
6. Chen T. Geostatistical seismic inversion constrained by reservoir sedimentary structural features / Chen T., Liang J., Li P., Cai H., Hu G., Wang Y. // Geophysics. — 2022. — Vol. 87. — P. 1942–2156.
7. Protasov M. I. True amplitude imaging by inverse generalized Radon transform based on Gaussian beam decomposition of the acoustic Green's function / Protasov M. I., Tcheverda V. A. // Geophysical Prospecting. — 2011. — Vol. 59. — P. 197–209.
8. Beck A. A fast iterative shrinkage-thresholding algorithm for linear inverse problems / Beck A., Teboulle M. // SIAM Journal on Imaging Sciences. — 2009. — Vol. 2. — P. 183–202.
9. Paige C. LSQR: an algorithm for sparse linear equations and sparse least squares / Paige C., Saunders M. // ACM Transactions on Mathematical Software. — 1982. — Vol. 8. — P. 43–71.
10. Robein E. Seismic Imaging / Robein E. // EAGE Publications. — 2010.

## References

1. Russell B. H. Introduction to Seismic Inversion Methods / Russell B. H. // Course Notes Series, Society of Exploration Geophysicists. — 1988. — P. 80–101.
2. Russell B. H. Comparison of poststack seismic inversion methods / Russell B. H., Hampson D. P. // SEG Annual Meeting, Expanded Abstracts. — 1991. — P. 876–878.
3. Ampilov Yu. P. Pochti vse o seysmicheskoy inversii. Chast' 1 [Almost everything about seismic inversion. Part 1] / Ampilov Yu. P., Barkov A. Yu., Yakovlev I. V., Filippova K. Ye., Priyetzhev I. I. // Seismic exploration technologies. — 2009. — № 4. — P. 3–16 (in Russ.).
4. Yakovlev I. V. Pochti vse o seysmicheskoy inversii. Chast' 2 [Almost everything about seismic inversion. Part 2] / Yakovlev I. V., Ampilov Yu. P., Filippova K. Ye. // Seismic exploration technologies. — 2011. — № 1. — P. 5–15 (in Russ.).
5. Dmitrachkov D. K. Primenimost' seysmicheskoy inversii dlya lateral'no-neodnorodnykh sred [Applicability of seismic inversion for laterally inhomogeneous media] / Dmitrachkov D. K., Protasov M. I. // Geophysics. — 2021. — № 6. — P. 33–37 (in Russ.).
6. Chen T. Geostatistical seismic inversion constrained by reservoir sedimentary structural features / Chen T., Liang J., Li P., Cai H., Hu G., Wang Y. // Geophysics. — 2022. — Vol. 87. — P. 1942–2156.
7. Protasov M. I. True amplitude imaging by inverse generalized Radon transform based on Gaussian beam decomposition of the acoustic Green's function / Protasov M. I., Tcheverda V. A. // Geophysical Prospecting. — 2011. — Vol. 59. — P. 197–209.
8. Beck A. A fast iterative shrinkage-thresholding algorithm for linear inverse problems / Beck A., Teboulle M. // SIAM Journal on Imaging Sciences. — 2009. — Vol. 2. — P. 183–202.
9. Paige C. LSQR: an algorithm for sparse linear equations and sparse least squares / Paige C., Saunders M. // ACM Transactions on Mathematical Software. — 1982. — Vol. 8. — P. 43–71.
10. Robein E. Seismic Imaging / Robein E. // EAGE Publications. — 2010.