

Д. К. Дмитричков^{1✉}, М. И. Протасов¹

**Алгоритм совместной глубинной миграции
и акустической инверсии
с применением эмпирических зависимостей
для устойчивого определения упругих свойств среды**

¹Институт нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН,
г. Новосибирск, Российская Федерация
e-mail: dmitrachkovdk@ipgg.sbras.ru

Аннотация. Современная тенденция к увеличению объемов данных сейсморазведки требует разработки вычислительно эффективных алгоритмов построения глубинной скоростной модели среды. При совместном использовании глубинной миграции и сейсмической инверсии в итерационном процессе удастся уточнять глубинную скоростную модель среды, сохраняя вычислительную эффективность алгоритма. В практически значимом случае неизвестной плотности среды требуется осуществить переход от модели акустического импеданса к скоростной модели среды, чего нельзя сделать без априорной информации о плотности. Для преодоления этой трудности в данной работе в итерационный процесс алгоритма миграции-инверсии вводится эмпирическая зависимость между скоростью волны и плотностью среды, что делает алгоритм миграции-инверсии применимым для случая неизвестной плотности среды. Эмпирическая зависимость вносит в решение априорную геологическую информацию, что повышает устойчивость решения обратной задачи восстановления глубинной скоростной модели среды. В работе рассматривается применение эмпирической зависимости Нафе – Дрейка как связи между скоростью и плотностью в алгоритме совместной глубинной миграции и акустической сейсмической инверсии для обновления глубинной скоростной модели в итерационном процессе при неизвестной плотности среды. Численные эксперименты выполнены с использованием синтетических данных и реалистичной модели Marmousi.

Ключевые слова: сейсмическая инверсия, глубинная миграция, глубинная скоростная модель

D. K. Dmitrachkov^{1✉}, M. I. Protasov¹

**Algorithm of joint depth migration and acoustic inversion
using empirical relations
for stable determination of elastic properties of the medium**

¹Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, Novosibirsk, Russian Federation
e-mail: dmitrachkovdk@ipgg.sbras.ru

Abstract. The contemporary trend toward increasing volumes of seismic data necessitates the development of computationally efficient algorithms for constructing a depth velocity model of the medium. By jointly using depth migration and seismic inversion within an iterative process it becomes possible to refine the depth velocity model of the medium while preserving the computational efficiency of the algorithm. In the practically significant case of an unknown density of the medium, it is necessary to make a transition from the acoustic impedance model to the velocity model of the medium, which cannot be done without a priori information about the density. To overcome this difficulty, in this paper an empirical relation between the wave velocity and the density of the medium is introduced into the iterative process of the migration-inversion algorithm, which makes the migration-

inversion algorithm applicable to the case of unknown medium density. Empirical relation introduces a priori geological information into the solution, which increases the stability of solving the inverse problem of restoring the depth velocity model of the medium. This study examines the application of the Nafe – Drake empirical relation as a velocity-density connection in an algorithm combining depth migration and acoustic seismic inversion to update the depth velocity model in an iterative process under conditions of unknown density of the medium. Numerical experiments were performed using synthetic data and the realistic Marmousi model.

Keywords: seismic inversion, depth migration, depth velocity model

Введение

Сейсмическая инверсия представляет собой стандартную процедуру для прогнозирования коллекторских свойств горных пород. Традиционно инверсия применяется к результатам временной обработки сейсмических данных [1, 2]. В то время как применение инверсии после процедуры миграции распространено на практике, последовательное применение глубинной миграции и сейсмической инверсии в итерационном процессе уточняет глубинную скоростную модель среды, что особенно актуально для сложнопостроенных геологических сред. В отличие от требовательных к вычислительным ресурсам алгоритмов обращения полного волнового поля (FWI) [3], в разработанном алгоритме используется глубинная миграция на гауссовых пучках [4] и одномерная процедура акустической сейсмической инверсии, благодаря чему разработанный алгоритм является вычислительно эффективным.

Применение разработанного алгоритма в практически значимом случае неизвестного распределения плотности в среде вызывало затруднения, поскольку с помощью алгоритма акустической инверсии восстанавливается модель акустического импеданса, а для процедуры глубинной миграции на вход требуется скоростная модель, и при неизвестной плотности осуществить переход от импеданса к скорости проблематично [5]. В данной работе алгоритм совместной глубинной миграции и акустической сейсмической инверсии дополнен шагом оценки значений скорости продольной волны по модели акустического импеданса, восстановленной с помощью акустической инверсии, с использованием эмпирической зависимости Нафе – Дрейка [6]. Такая зависимость устанавливает функциональную связь между скоростью продольной волны и плотностью для горных пород. Она применима для широкого диапазона горных пород, за исключением мафических и обогащенных кальцием пород, а также для широкого диапазона скоростей продольной волны V_p от 1500 м/с до 8500 м/с. Широкие границы применимости выбранной эмпирической зависимости вносят априорную геологическую информацию о решении в итерационный алгоритм миграции-инверсии в отсутствии информации о плотности среды.

По результатам численных экспериментов сделан вывод, что использование эмпирических зависимостей приводит к устойчивому обновлению скоростной модели на каждом шаге итерационного процесса совместной глубинной миграции и сейсмической инверсии. Численные эксперименты выполнены с использованием синтетических данных и реалистичной модели Marmousi.

Совместная глубинная миграция и акустическая инверсия.

Рассматриваемый в работе совместный алгоритм состоит из алгоритма акустической сейсмической инверсии и алгоритма глубинной миграции, которые следуют друг за другом в итерационном процессе.

В основе используемого алгоритма акустической сейсмической инверсии лежит одномерная сверточная модель сейсмической трассы [7], в рамках которой однократно-отраженное волновое поле во временной области представляется в виде свертки трассы коэффициентов отражения с сейсмическим импульсом в предположении горизонтально-слоистого строения среды. Обратная задача по определению акустического импеданса по зашумленным сейсмическим трассам является некорректно поставленной. В качестве априорной информации о решении предполагается блочное строение среды, наличие в решении заданного низкочастотного тренда акустического импеданса, а также латеральная связность восстановленной модели импеданса. Инверсия выполняется в два этапа. На первом этапе по зашумленным сейсмическим трассам восстанавливаются разреженные трассы коэффициентов отражения, что достигается с помощью стабилизирующего слагаемого в норме L_1 , которое обеспечивает наименьшее число ненулевых компонент в решении. Ненулевые коэффициенты отражения фокусируются около границ пластов, и восстановленная модель акустического импеданса имеет блочное строение. В то же время задача оптимизации становится нелинейной, и для ее устойчивого решения используется метод FISTA [8]. Его отличительной особенностью является теоретически обоснованная высокая скорость сходимости, благодаря которой с помощью метода FISTA удается за небольшое количество итераций минимизировать целевую функцию. При практических расчетах в рамках данной работы не возникало ситуаций, чтобы метод расходился. Выбор параметра регуляризации осуществляется по принципу невязки, благодаря чему удастся построить регуляризующий алгоритм решения некорректной задачи [9]. На втором этапе по найденным коэффициентам отражения для всего набора трасс коэффициентов отражения, восстановленных на первом этапе инверсии, определяется модель акустического импеданса со стабилизирующим слагаемым, обеспечивающим учет низкочастотного тренда в модели. Целевая функция на втором этапе инверсии является квадратичной, а матрицы разреженными, поэтому для решения задачи оптимизации применяется прямой метод решения систем линейных уравнений, а именно метод Гаусса с выбором ведущего элемента, который находит единственный минимум квадратичной целевой функции. Таким образом, на втором этапе инверсии также не возникает трудностей с решением задачи оптимизации и расходимостью численного метода. Для выбора параметра регуляризации на втором этапе также используется принцип невязки. Нелинейное уравнение одной переменной на параметр регуляризации, возникающее из принципа невязки, решается численно с помощью метода ИТР [10], который сочетает в себе высокую скорость сходимости метода секущих и гарантии сходимости к решению метода бисекции. Выбранные численные

методы в применении к задаче акустической сейсмической инверсии обеспечивают высокую надежность и скорость работы алгоритма.

В совместном алгоритме используется глубинная миграция в истинных амплитудах, основанная на гауссовых пучках. Миграция на гауссовых пучках сочетает в себе быстроедействие миграции Кирхгофа [11], что отличает ее от вычислительно затратной миграции в обратном времени (RTM) [12], при этом обеспечивая высокое качество сейсмических изображений для сложнопостроенных геологических сред.

На входе итерационного алгоритма совместной миграции-инверсии имеется глубинная миграционная скоростная модель и сейсмические данные. Одна итерация алгоритма состоит из следующих шагов:

1. с помощью миграции в скоростной модели строится глубинное сейсмическое изображение;
2. преобразованием «глубина-время» с помощью той же скоростной модели из глубинного масштаба во временной переводятся сейсмическое изображение и сама скоростная модель;
3. с помощью эмпирической зависимости рассчитывается низкочастотный тренд акустического импеданса для инверсии;
4. восстановленная детальная модель акустического импеданса переводится в глубинный масштаб тем же преобразованием «глубина-время»;
5. с помощью эмпирической зависимости оценивается детальная глубинная скоростная модель по восстановленной модели акустического импеданса;
6. из детальной глубинной скоростной модели выделяется гладкая компонента при помощи сглаживания.

В результате одной итерации обновляется глубинная скоростная модель среды. Дальнейшие итерации происходят аналогично, но уже с обновленной скоростной моделью для миграции и для преобразования «глубина-время». Итерации повторяются до тех пор, пока изменения скоростной модели не станут достаточно малыми. В численных экспериментах для сходимости совместного алгоритма чаще всего достаточно 5-6 итераций.

Результаты

Рассмотрим реалистичную модель Marmousi (рис. 1в). Для моделирования синтетических сейсмических данных использовался импульс производной от импульса Рикера с доминирующей частотой 15 Гц. В результате глубинной миграции в начальной скоростной модели (рис. 1б) было построено сейсмическое изображение (рис. 1а). Детальная скоростная модель, полученная после применения сейсмической инверсии к изображению (рис. 1г) хорошо согласуется с истинной. Дальнейшие итерации алгоритма будут еще более уточнять скоростную модель среды.

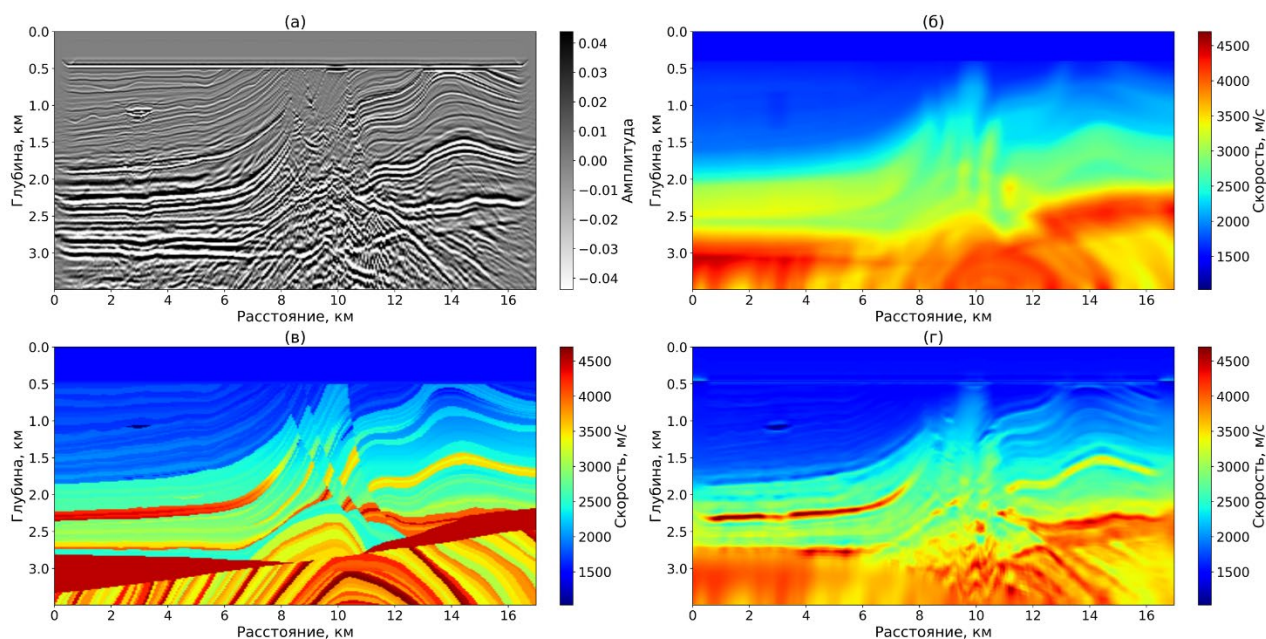


Рис. 1. Изображение после миграции (а), миграционная скоростная модель (б), истинная скоростная модель (в) и восстановленная детальная скорость после одной итерации совместного алгоритма (г)

Артефакты в нижней части обновленной скоростной модели связаны с преобразованием из глубинного масштаба во временной и обратно, поскольку во временном масштабе ось времени меняется вместе с пространственной координатой. Тем не менее, наблюдается уточнение скоростной модели, как в смысле значений скорости, так и в смысле уточнения положения границ в глубинном масштабе.

Заключение

Модификация итерационного алгоритма совместной глубинной миграции и акустической сейсмической инверсии на основе внедрения процедуры оценки значения скорости по акустическому импедансу при помощи эмпирической зависимости между скоростью и плотностью в горных породах обеспечивает устойчивое обновление скоростной модели на итерациях, что особенно важно в практически значимом случае неизвестного распределения плотности в среде. Вычислительная эффективность алгоритма обеспечивает возможность построения глубинных скоростных моделей среды в задачах обработки сейсмических данных при низких требованиях к вычислительным ресурсам. Дальнейшие усилия следует направить на улучшение алгоритмов миграции и инверсии для адаптации алгоритма совместной миграции-инверсии к задачам экспресс-обработки при построении глубинных скоростных моделей по данным 3D-сейсморазведки.

Благодарности

Данная работа выполнена при поддержке Российского Научного Фонда, грант № 21-71-20002-П.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Hampson D. P., Russell B. H., Bankhead B. Simultaneous inversion of pre-stack seismic data // SEG Expanded Abstracts. – 2005. – P. 1633–1637.
2. Russell B. H., Hampson D. P. Comparison of poststack seismic inversion methods // SEG Expanded Abstracts. – 1991. – P. 876–878.
3. Chen G. [et al.] Salt Structure Elastic Full Waveform Inversion Based on the Multi-scale Signed Envelope // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. – 2022.
4. Protasov M. I., Tcheverda V. A. True amplitude imaging by inverse generalized Radon transform based on Gaussian beam decomposition of the acoustic Green's function // Geophysical Prospecting. – 2011. – Vol. 59. – P. 197–209.
5. Protasov M., Dmitrachkov D. Acoustic Seismic Inversion and Migration for Depth Velocity Model Reconstruction // Geosciences. – 2025. – Vol. 15, no. 8. – P. 321.
6. Brocher T. Empirical Relations between Elastic Wavespeeds and Density in the Earth's Crust // Bulletin of the Seismological Society of America. – 2005. – Vol. 95. – P. 2081–2092. – DOI: 10.1785/0120050077.
7. Russell B. H. Introduction to Seismic Inversion Methods // Course Notes Series, Society of Exploration Geophysicists. – 1988. – P. 80–101.
8. Beck A., Teboulle M. A Fast Iterative Shrinkage-Thresholding Algorithm for Linear Inverse Problems // SIAM Journal on Imaging Sciences. – 2009. – Vol. 2, no. 1. – P. 183–202.
9. Тихонов А. Н., Гончарский А. В., Степанов В. В., Ягола А. Г. Численные методы решения некорректных задач. – М. : Наука, 1990. – 232 с.
10. Fagundes David de Oliveira I., Takahashi R. An Enhancement of the Bisection Method Average Performance Preserving Minmax Optimality // ACM Transactions on Mathematical Software. – 2020. – Vol. 47, iss. 1. – P. 1–24.
11. Beylkin G. Imaging of discontinuities in the inverse scattering problem by inversion of a causal generalized Radon transform // Journal of Mathematical Physics. – 1985. – Vol. 26. – P. 99–108.
12. Yan Z., Yang Y., Liu S. True amplitude angle gathers from reverse time migration by wavefield decomposition at excitation amplitude time // Energies. – 2020. – Vol. 13, no. 23. – P. 6204.

© Д. К. Дмитрачков, М. И. Протасов, 2026