

УДК 550.34.098

РЕКОНСТРУКЦИЯ ВЕРХНЕЙ ЧАСТИ ГЕОЛОГИЧЕСКОГО РАЗРЕЗА В ВОСТОЧНОЙ СИБИРИ ПУТЕМ ОБРАЩЕНИЯ ПОЛНОГО ВОЛНОВОГО ПОЛЯ

© 2022 г. К. Г. Гадыльшин^{1,*}, В. А. Чеверда¹, Д. Н. Твердохлебов²

Представлено академиком РАН М.И. Эповым 28.09.2021 г.

Поступило 28.09.2021 г.

После доработки 06.10.2021 г.

Принято к публикации 26.10.2021 г.

Предложен, реализован и апробирован подход к реконструкции глубинной скоростной модели верхней части разреза на основе обращения полного волнового поля. Как было показано авторами ранее, вовлечение в обработку кратных волн, образующихся на свободной поверхности, хотя и повышает устойчивость метода, но снижает его разрешающую способность. Поэтому на первой стадии мы вовлекали в обработку все волновое поле, но впоследствии выполняли подавление кратных, связанных со свободной поверхностью. Полученные результаты продемонстрировали перспективы использования метода при восстановлении весьма сложного строения верхней части разреза даже в условиях распространения в ней трапповых включений.

Ключевые слова: трапповые включения, верхняя часть разреза, метод обращения полного волнового поля

DOI: 10.31857/S2686739722020074

ВВЕДЕНИЕ

Сейморазведочные работы на обширной территории Восточной Сибири выполняются в сейсмогеологических условиях различной сложности. Получение качественного динамического сейсмического изображения для района работ является первоочередной задачей в условиях контрастных неоднородностей верхней части разреза (ВЧР). Один из способов решения этой задачи, получивший широкое распространение в промышленности, заключается в построении так называемой эффективной глубинно-скоростной модели, обеспечивающей компенсацию скоростных аномалий и расчета статических поправок. Однако для наиболее сложного приповерхностного строения среды, например, широко распространенных в Восточной Сибири, трапповых интрузий и туфогенных образований в верхней части разреза, точность и информативность скоростных моделей ВЧР, полученных на основании такого подхода, включая томографическое уточнение, оказывается недостаточным.

Таким образом, требуется другой подход, гарантирующий более точное и полное определение глубинно-скоростной модели ВЧР. В работе предложено использовать для этого метод обращения полного волнового поля и приведены результаты численных экспериментов для реалистичных моделей, характерных для ряда районов Восточной Сибири.

МЕТОД

Обратная динамическая задача сейморазведки заключается в решении нелинейного операторного уравнения [1–3]:

$$F(m) = d, \quad (1)$$

где $F : M \rightarrow D$ — нелинейный оператор прямой задачи, описывающий процесс распространения волн в среде, отображающий пространство моделей M в пространство данных D . Метод обращения полного волнового поля при этом сводится к применению нелинейного метода наименьших квадратов для уравнения (1). Для этих целей вводится следующий целевой функционал

$$E(m) = \frac{1}{2} d^{\text{obs}} - F(m)_D^2, \quad (2)$$

¹ Институт нефтегазовой геологии и геофизики, Новосибирск, Россия

² ООО «РН-Эксплорейшн», Москва, Россия

*E-mail: GadylshinKG@ipgg.sbras.ru

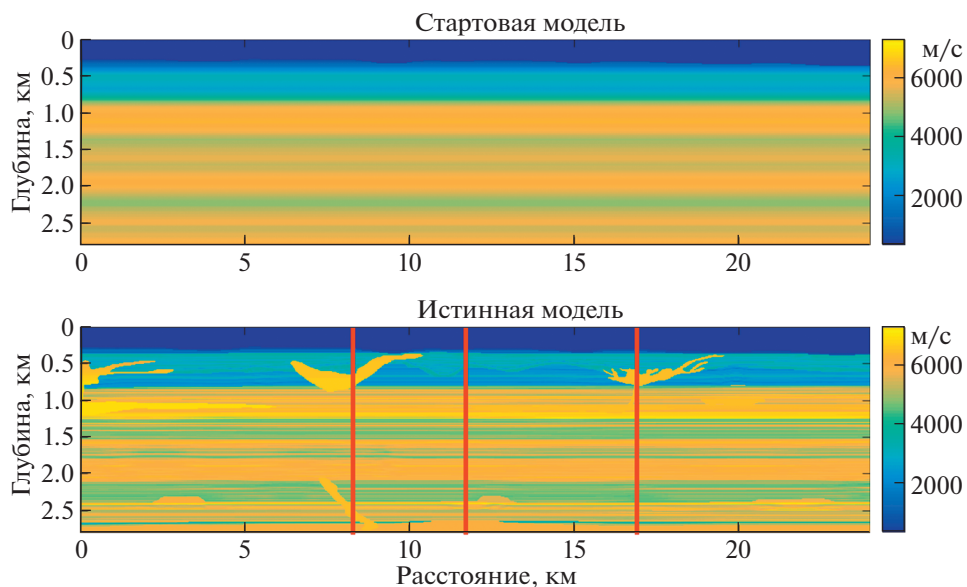


Рис. 1. Глубинно-скоростная модель, используемая для расчета синтетических наблюдаемых данных (внизу), и начальное приближение при реализации итерационного процесса отыскания точки минимума (вверху). Красным изображены положения вертикальных профилей, используемых для контроля качества восстановленной модели (см. рис. 4в).

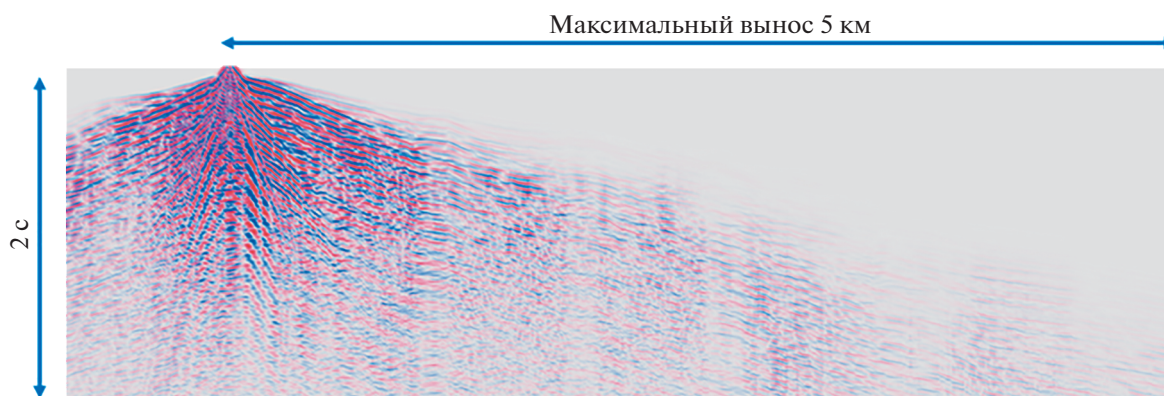


Рис. 2. Синтетические наблюдаемые данные, рассчитанные в истинной модели с учетом топографии свободной поверхности.

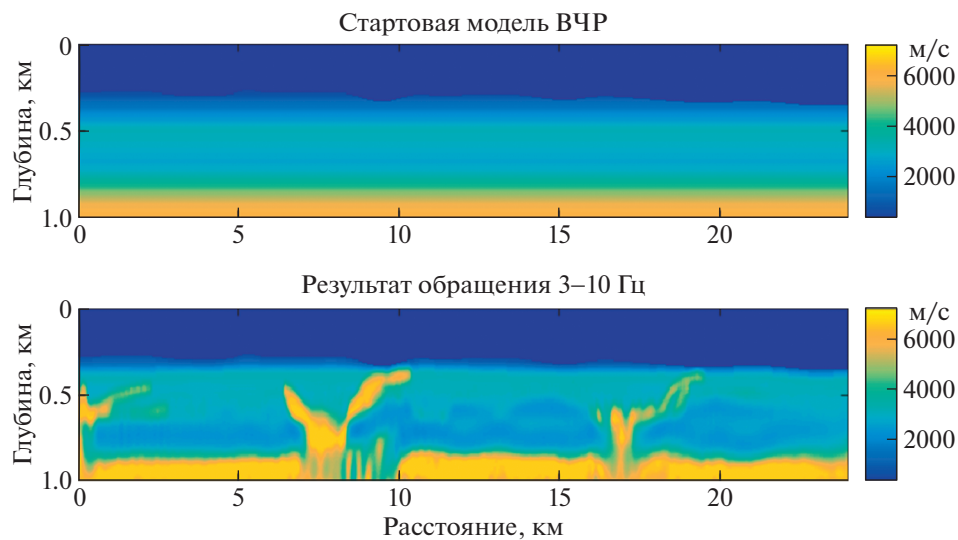


Рис. 3. Начальная модель ВЧР (вверху) и результат полноволнового обращения (внизу).

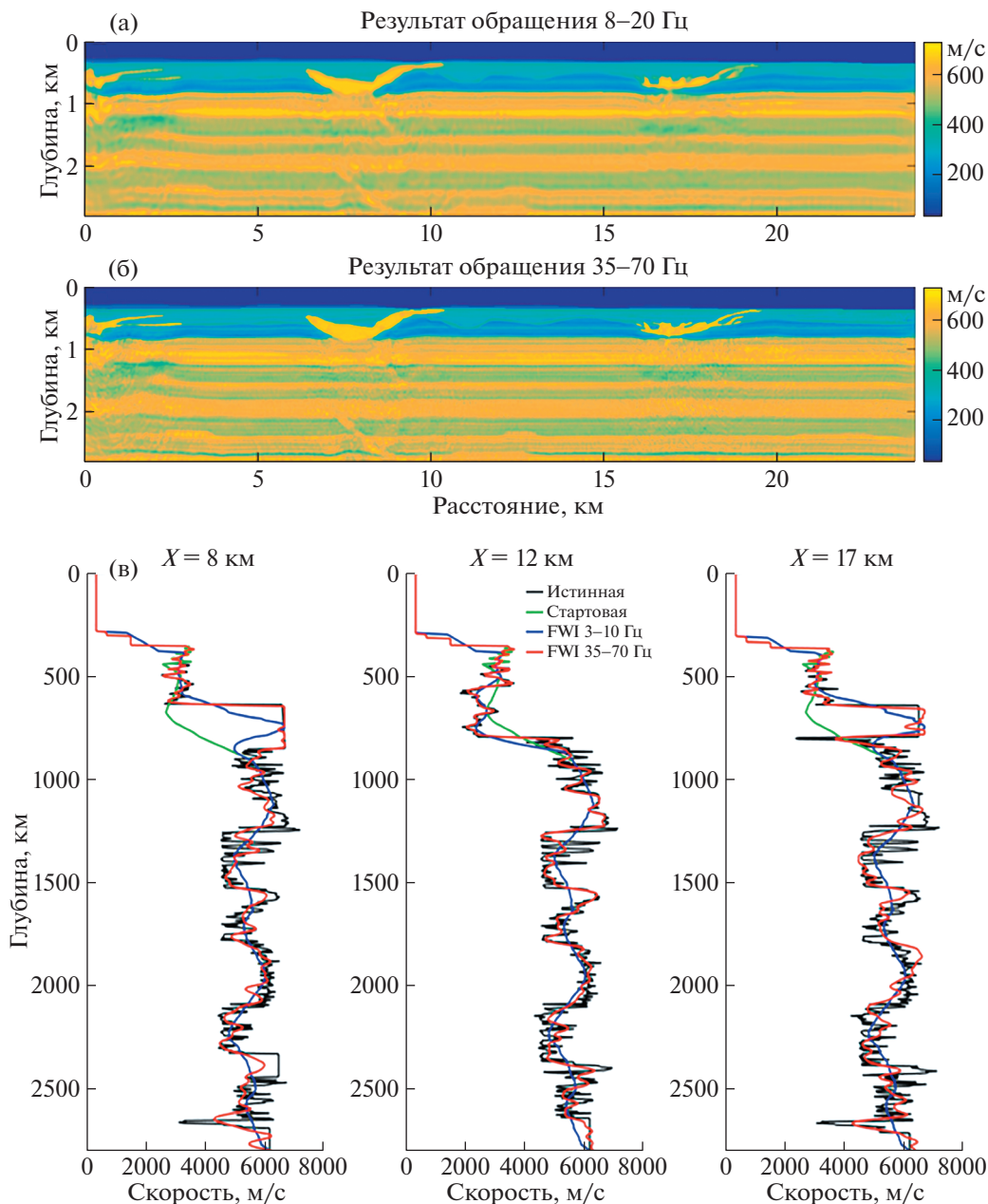


Рис. 4. Результат обращения всей скоростной модели с использованием данных с подавленными кратными волн, связанными с наличием свободной поверхности: FWI 8–20 Гц (а) и FWI 35–70 Гц (б). Вертикальные профили скоростных моделей (в), полученных на разных этапах обращения для $X = 8$ км, $X = 12$ км и $X = 17$ км. Черным изображена истинная модель, зеленым – стартовая модель, синим – модель, полученная в результате обращения ВЧР с учетом кратных волн и красным – финальный результат обращения во всей области [20, 40] Гц и [35, 70] Гц. Конечные результаты полноволнового обращения представлены на рис. 4а, 4б. Как видно, удается детально восстановить ГСМ практически во всей области. На рис. 4в можно проследить послойное восстановление вертикальных профилей скоростных моделей, полученных на разных этапах обращения.

где d^{obs} – наблюдаемые данные, $F(m)$ – синтетические данные, рассчитанные для текущей модели m . Отыскание точки минимума этого функционала в пространстве допустимых моделей и составляет основу метода обращения полного волнового поля – FWI (от англ. Full Waveform Inversion).

ЧИСЛЕННЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ

В представленных далее численных экспериментах использовалась разработанная в ООО “РН-Эксплорейшн” реалистичная модель, представленная на рис. 1. Горизонтальный размер модели равен 24 км, а ее глубина – 2.8 км. Основная

сложность в восстановлении глубинно-скоростной модели ВЧР вызвана присутствием трапповых интрузий, скорость распространения продольных волн в которых достигает 6500 м/с. Таким образом, перепад скоростей в интрузии и во вмещающей среде достигает 4500 м/с. Именно этот факт, наряду со сложной формой интрузии, существенно осложняет применение стандартных подходов к восстановлению глубинно-скоростной модели ВЧР.

Пример синтетической сейсмограммы, рассчитанной с учетом кратных волн, вызванных наличием свободной поверхности, приведен на рис. 2. Для решения обратной задачи была использована поверхностная система наблюдения, расположенная на свободной поверхности, с шагами по источникам и приемникам соответственно 100 и 25 м. В качестве зондирующего сигнала использовался импульс Рикера с доминирующей частотой 30 Гц. В качестве начального приближения мы взяли вертикально-неоднородную модель (см. рис. 1), построенную по “скважинной” информации, взятой в истинной модели на горизонтальном удалении 20 км с последующим ее Гауссовым сглаживанием и добавлением рельефа свободной поверхности. Таким образом, используемая для старта итерационного процесса глубинно-скоростная модель не содержала никакой информации о наличии высокоскоростных аномалий ВЧР.

Как было показано авторами ранее [4, 5], привлечение кратных волн, связанных со свободной поверхностью, снижает разрешающую способность и информативность результатов обращения полного волнового поля, но увеличивает их устойчивость в присутствии некоррелированных помех. Поэтому на первом этапе полноволнового обращения используется все волновое поле, включая кратные волны, связанные с наличием свободной поверхности. Глубинно-скоростная модель ВЧР, построенная в результате первого этапа реализации метода обращения полного волнового поля, приведена на рис. 3. Обращение производилось в области временных частот в диапазоне от 3 до 10 Гц, а целевая область ограничивалась глубиной в 1 км. Как можно видеть, при этом удается успешно идентифицировать высокоскоростные аномалии, однако области непосредственно под траппами восстановлены со значительными искажениями. Поэтому на последующих этапах обращения для улучшения качества восстановленной модели использовались данные с подавленными кратными волнами, связанными со свободной поверхностью.

При обращении в области временных частот общепринятой практикой является использование их перекрывающихся интервалов. В данном случае после выполнения обращения в частотном

диапазоне [3–10] Гц (без подавления кратных волн и с их подавлением) мы использовали следующий набор частотных групп: [8–20] Гц, [15–30] Гц.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе реализован подход к реконструкции глубинно-скоростной модели ВЧР на основе метода обращения полного волнового поля. Как было показано ранее, привлечение кратных волн, связанных со свободной поверхностью, снижает разрешающую способность этого подхода, но повышает устойчивость решения в присутствии некоррелированных помех. Поэтому на первом этапе полноволнового обращения используется все волновое поле, включая кратные волны, связанные с наличием свободной поверхности. Далее используются данные после подавления кратных волн. Полученные результаты демонстрируют способность метода обращения полного волнового поля восстанавливать сложные геологические структуры ВЧР даже в присутствии высокоскоростных аномалий (трапповые интрузии).

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Данная работа выполнена при поддержке Совета по грантам Президента Российской Федерации (грант МК-3947.2021.1.5).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Tarantola A.* Inversion of Seismic Reflection Data in the Acoustic Approximation // *Geophysics*. 1984. 49 (8). P. 1259–1266.
2. *Alekseev A.S., Avdeev A.V., Fatianov A.G., Cheverda V.A.* Wave Processes in Vertically-inhomogeneous Media: A New Strategy for a Velocity Inversion // *Inverse Problems*. 1993. V. 9 (3). P. 367–390.
3. *Гадьльшин К.Г., Чеверда В.А.* Решение обратной динамической задачи сейсмики путем обращения полного многокомпонентного упругого волнового поля // *ДАН*. 2018. Т. 482. № 6. С. 708–712.
4. *Гадьльшин К.Г., Чеверда В.А., Неклюдов Д.А.* Влияние свободной поверхности на качество решения обратной динамической задачи сейсмики // *Технологии сейсморазведки*. 2014. № 3. С. 43–50.
5. *Gadylyshin K., Bakulin A., Dmitriev M., Golikov P., Neklyudov D., Tcheverda V.* Effect of Free-surface Related Multiples on Near Surface Velocity Reconstruction with Acoustic Frequency Domain FWI // *Conference Proceedings, 76th EAGE Conference and Exhibition June 2014*. 2014. P. 1–5.

FULL WAVEFORM INVERSION OF COMPLEX NEAR-SURFACE WITH VARYING TOPOGRAPHY IN EASTERN SIBERIA

K. G. Gadylshin^{a,#}, V. A. Cheverda^a, and D. N. Tverdokhlebov^b

^a *Institute of Petroleum Geology and Geophysics, Novosibirsk, Russian Federation*

^b *LLC "RN-Exploration", Moscow, Russian Federation*

[#] *E-mail: GadylshinKG@ipgg.sbras.ru*

Presented by Academician of the RAS M.I. Erov September 28, 2021

Obtaining a high-quality dynamic seismic image is a priority task in the conditions of contrasting heterogeneities of the near-surface in the vast territory of Eastern Siberia. Thus, it is necessary to restore an effective depth-velocity model that provides compensation for velocity anomalies and calculates static corrections. However, for the most complex near-surface structure, for example, the presence of trap intrusions and tuffaceous formations, the information content of the velocity models of the near-surface area obtained by tomographic refinement turns out to be insufficient, and a search for another solution is required. The paper considers an approach based on the full-waveform inversion (FWI). It requires heavy computations, especially when considering varying topography, which requires a wave equation solution on a very fine mesh. The obtained results demonstrate the ability of the FWI to restore complex geological structures of the near-surface area, even in the presence of high-velocity anomalies (trap intrusions).

Keywords: trap intrusions, near-surface, full waveform inversion