

ДВУХЭТАПНЫЙ МЕТОД ОБРАЩЕНИЯ ПОЛНЫХ ВОЛНОВЫХ ПОЛЕЙ: ОТ ПРИПОВЕРХНОСТНЫХ СЛОЕВ К ГЛУБИНЫМ ЦЕЛЕВЫМ ГЕОЛОГИЧЕСКИМ СТРУКТУРАМ

Кирилл Геннадьевич Гадильшин

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, тел. (383)330-27-96, e-mail: gadylshinkg@ipgg.sbras.ru

Дмитрий Александрович Неклюдов

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, тел. (383)330-27-96, e-mail: neklyudovda@ipgg.sbras.ru

Максим Игоревич Протасов

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, тел. (383)330-27-96, e-mail: protasovmi@ipgg.sbras.ru

Владимир Альбертович Чеверда

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, доктор физико-математических наук, профессор, зав. лабораторией, тел. (383)333-00-54, e-mail: cheverdava@ipgg.sbras.ru

Александр Евгеньевич Королев

ПетроТрейс, 115114, Россия, г. Москва, ул. Летниковская, 10, стр. 4, тел. (495)995-52-30, e-mail: inforus@ptgeos.com

Кирилл Романович Старков

ПетроТрейс, 115114, Россия, г. Москва, ул. Летниковская, 10, стр. 4, тел. (495)995-52-30, e-mail: inforus@ptgeos.com

Алексей Александрович Шевченко

ПетроТрейс, 115114, Россия, г. Москва, ул. Летниковская, 10, стр. 4, тел. (495)995-52-30, e-mail: inforus@ptgeos.com

Метод обращения полного волнового поля в своей ставшей уже классической постановке сводится к отысканию точки минимума целевого функционала, характеризующего измеряемое в некоторой норме (как правило, квадратичной) зарегистрированного волнового поля от рассчитанного для текущей модели среды. Накопленный опыт показывает, что для успешного применения данного подхода необходимо выполнение двух условий:

- Наличие низких временных частот в зарегистрированном волновом поле;
- Знание верхней части разреза.

Ключевые слова: целевой функционал, полное волновое поле, дальние выносы, макроскоростная модель, верхняя часть разреза.

TWO-STAGES TECHNIQUE OF TO FULL WAVEFORM INVERSION: FROM NEAR SURFACE TO DEEP TARGET GEOLOGICAL STRUCTURES

Kirill G. Gadylshin

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 3, Prospect Akademik Koptyug St., Novosibirsk, 630090, Russia, Ph. D., Senior Researcher, phone: (383)330-27-96, e-mail: gadylshinkg@ipgg.sbras.ru

Dmitry A. Neklyudov

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 3, Prospect Akademik Koptyug St., Novosibirsk, 630090, Russia, Ph. D., Senior Researcher, phone: (383)330-27-96, e-mail: neklyudovda@ipgg.sbras.ru

Maksim I. Protasov

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 3, Prospect Akademik Koptyug St., Novosibirsk, 630090, Russia, Ph. D., Senior Researcher, phone: (383)330-27-96, e-mail: protasovmi@ipgg.sbras.ru

Vladimir A. Tcheverda

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 3, Prospect Akademik Koptyug St., Novosibirsk, 630090, Russia, D. Sc., Professor, Head of Laboratory, phone: (383)333-00-54, e-mail: cheverdava@ipgg.sbras.ru

Aleksandr E. Korolev

Petrotrace, bld. 4, 10, Letnikovskays St., Moscow, 115114, Russia, phone: (495)995-52-30, e-mail: inforus@ptgeos.com

Kirill R. Starkov

Petrotrace, bld. 4, 10, Letnikovskays St., Moscow, 115114, Russia, phone: (495)995-52-30, e-mail: inforus@ptgeos.com

Aleksey A. Shevchenko

Petrotrace, bld. 4, 10, Letnikovskays St., Moscow, 115114, Russia, phone: (495)995-52-30, e-mail: inforus@ptgeos.com

Full Waveform Inversion in its traditional formulation is nothing else but finding the minimum of the objective functional, that characterizes L_2 difference between acquired and simulated wave fields. The accumulated experience proves the necessity of the following conditions for correct recovery of the wave propagation velocity:

- The presence of low time frequencies in the data;
- Information about near surface structure of the media.

We modify the traditional L_2 objective functional on the base of decomposition of the model space. This modification weakens the requirements for the presence of low time frequencies.

Key words: objective function, full wavefield, far offsets, macrovelocity component, near surface velocity distribution.

1. Введение

Метод обращения полного волнового поля (FWI, от английского Full Waveform Inversion) все более уверенно становится одним из основных инстру-

ментов для построения глубинной скоростной модели. В его основе лежит решение обратной динамической задачи сейсмологии, опирающееся на отыскание точки минимума целевого функционала, характеризующего разность между зарегистрированными и рассчитанными данными. Однако накопленный опыт применения данного подхода к обработке результатов сейсмических наблюдений показывает, что при его реализации необходимо уделять особое внимание двум аспектам:

1. Надежному восстановлению верхней части разреза;

2. Устойчивой реконструкции макроскоростной составляющей в условиях отсутствия низких временных частот в зарегистрированных данных.

Для восстановления скоростного строения верхней части разреза (ВЧР) в настоящее время наиболее распространенной является версия FWI, опирающаяся на использование волновых полей, соответствующих первым вступлениям на дальних выносах.

После восстановления скоростного строения верхней части разреза мы используем для восстановления глубинных целевых объектов предложенную в работах [1, 2] модификацию целевого функционала. Напомним, кратко, основные ее моменты.

2. Описание метода обращения полного волнового поля с использованием модифицированного целевого функционала.

Полная скоростная модель ищется в виде суперпозиции двух функций из различных подпространств

- Подпространство медленно меняющихся функций или макроскоростная составляющая, которая определяет времена пробега волн между достаточно удаленными внутренними точками, но не возвращает сейсмическую энергию к системе наблюдения;

- Подпространство резко изменчивых рефлекторов, напротив, не меняющих время распространения волны, но изменяющих ее направление, обеспечивая возвращение сейсмической энергии к системе наблюдения.

Такая суперпозиция вводит представление скорости распространения продольных и поперечных упругих волн в виде:

$$V_{P,S} = (pV)_{P,S} + (rV)_{P,S} \quad (1)$$

где p означает макроскоростную модель (пропагатор), а r – пространственный рефлектор¹ (см. рис. 1).

¹ Здесь и далее под рефлектором понимается локальный геологический объект, в частности, граница раздела сред с разными упругими параметрами.

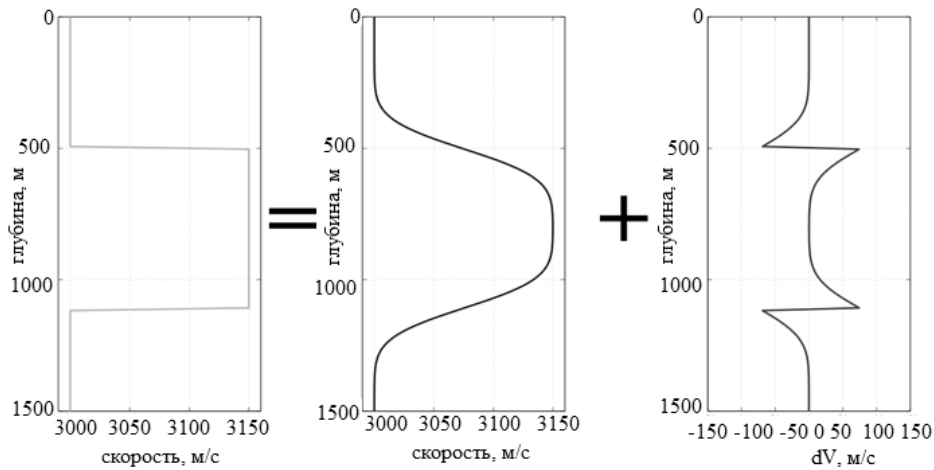


Рис. 1. Разложение полной скорости на пропагатор и рефлектор.

Слева направо: полная скоростная модель, макроскоростная составляющая, пространственный рефлектор

При известной макроскоростной составляющей, рефлектор корректно определяется в результате выполнения миграционного преобразования зарегистрированных данных. Более того, существует ряд методов, позволяющих отображать рефлектор в «истинных» амплитудах, когда контрастность границ пропорциональна отражающей способности соответствующих локальных геологических объектов [5, 7]. Этот факт позволяет представлять искомую полную скоростную модель в виде суперпозиции:

$$V_{P,S} = (pV)_{P,S} + \Pi_r W M_{P,S}(pV_{P,S}) < s > \quad (2)$$

где $M_{P,S}(pV) < s >$ есть результат применения миграционного преобразования для продольных/поперечных волн (в дальнейшем просто «миграционный оператор») к так называемому «временному» рефлектору, который, в свою очередь есть результат продольной/поперечной «демиграции» [6] пространственного продольного/поперечного рефлектора r . Оператор W обеспечивает корректировку получаемых при этом амплитуд изображения, а проектор Π_r обеспечивает погружение полученного результата в подпространство рефлекторов.

Такая декомпозиция позволяет выполнить модификацию целевого функционала:

$$\tilde{\Phi}(pV_P, pV_S, s) = \left\| F(pV_{P,S} + \Pi_r W M_{P,S}(pV_{P,S}) < s >) - u_0 \right\|_{L_2(D)}^2, \quad (3)$$

и рассматривать следующую формулировку обратной задачи:

$$\tilde{\Phi}(pV_P, pV_S, s) \rightarrow \min_{pV_P, pV_S, s}, \quad (4)$$

с последующим пересчетом временных рефлекторов в пространственные:

$$r_{P,S} = \Pi_r WM_{P,S}(pV_{P,S}) < s > \quad (5)$$

3. Верификация метода

3.1. Синтетические данные

Верификацию предложенного подхода к обращению полного волнового поля мы начали с проведения численных экспериментов на синтетических данных, полученных в результате конечно-разностного моделирования. На наш взгляд этот этап является необходимым для обеспечения уверенности в корректности созданного метода. Действительно, результаты обработки синтетических данных легко проверяются, так как используемая для генерации данных модель известна абсолютно точно. Заметим, что в настоящее время, благодаря стремительно возрастающим вычислительным мощностям становится возможным создание весьма сложных трехмерных сейсмогеологических моделей и последующее полномасштабное численное моделирование распространяющихся в них сейсмических полей. Уже в течение ряда лет в структуре общества SEG (Society of Exploration Geophysicists) функционирует специально созданный консорциум SEAM (SEG Advanced Modeling Corporation), основное направление деятельности которого состоит в построении моделей, наиболее востребованных нефтяными и сервисными компаниями (более детально см. <https://seg.org/News-Resources/Research-and-Data/SEAM>). Именно на таких синтетических данных и выполняется апробация новых методов обработки и интерпретации, причем прохождение этого этапа является необходимым шагом, без которого такие методы не принимаются к рассмотрению.

Для проведения численных экспериментов мы использовали модель, построенную в результате интерпретации трехмерного сейсмического куба, включающего в себя некоторое обобщение разреза Восточной Сибири с крайне неоднородной верхней и средней частью (рис. 2). Эта модель нами взята из публикаций [3, 4].

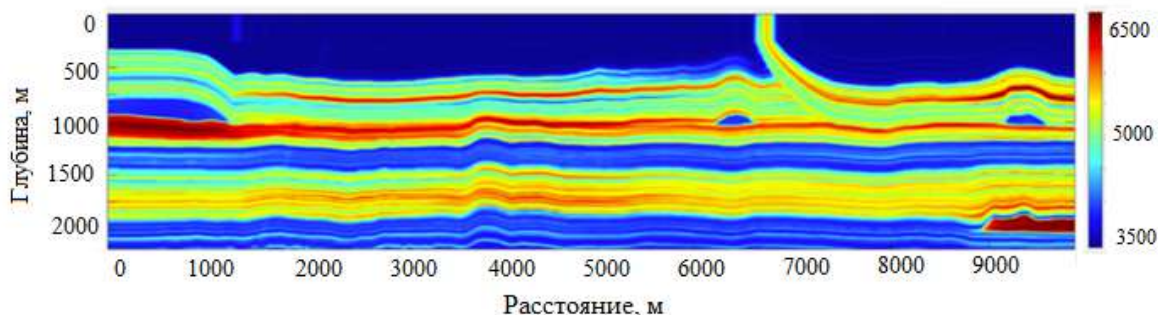


Рис. 2. Скоростная модель, используемая для численных экспериментов

Для реконструкции строения верхней части разреза мы использовали волновые поля на дальних выносах (рис. 3). В качестве начального приближения была взята вертикально неоднородная среда (рис. 4, а). После завершения цикла обращения волнового поля на больших выносах мы получили скоростной разрез, изображенный на рис. 4, б, который уже с неплохой точностью соответствует истинному скоростному строению верхней части, в том числе отображает высокоскоростное включение, выходящее на поверхность.

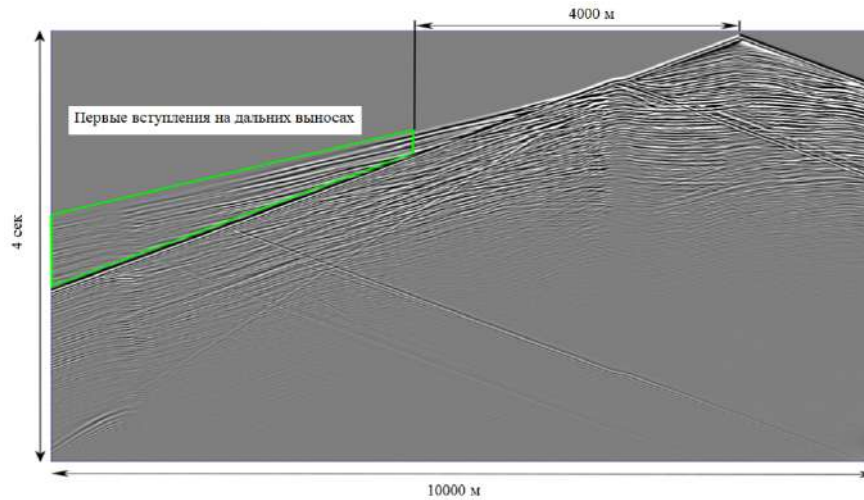


Рис. 3. Используемые для восстановления верхней части разреза первые вступления на дальних выносах

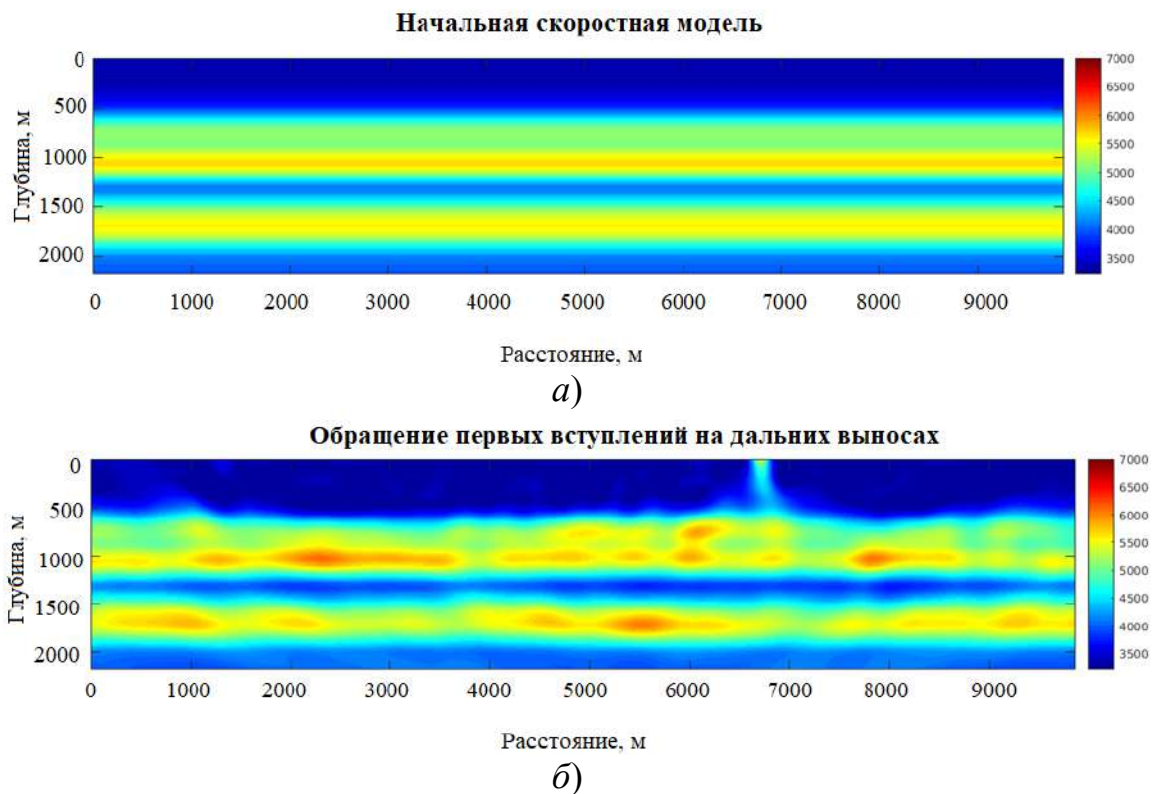


Рис. 4. Обращение волновых полей на дальних выносах:
 а) начальное приближение; б) результат полно волновой инверсии

Полученное решение бралось в качестве начального приближения на следующем этапе обращения, основанного на минимизации модифицированного целевого функционала. При этом мы использовали постепенно возрастающие временные частоты. Результаты нескольких шагов по выполнению такого обращения приведены на рис. 5.

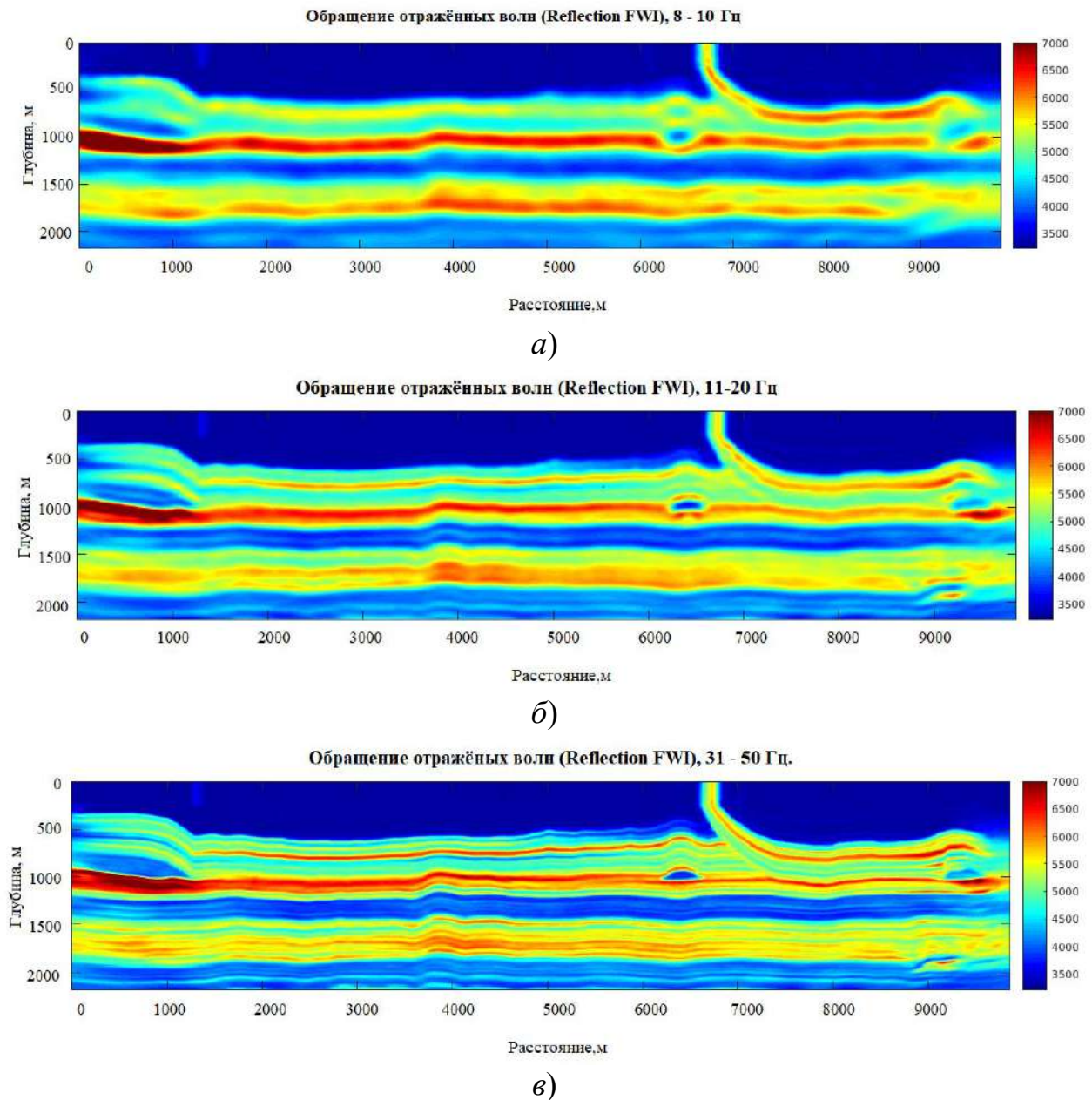


Рис. 5. Обращение отраженных волн (близкие выносы) для повышающейся доминирующей частоты

3.2. Данные реальных морских наблюдений

После успешной апробации предложенного двухэтапного метода на синтетических данных мы его применили для данных, полученных в ходе полевых

наблюдений. Эти работы были выполнены совместно с ООО «ПетроТрейс» на подготовленном специалистами компании тестовом двумерном морском профиле. В качестве одной из предварительных обрабатывающих процедур была выполнена полосовая фильтрация в целях подавления «шумов моря» в области временных частот ниже 5 Гц.

Как и ранее, для реконструкции верхней части разреза мы использовали первые вступления на дальних выносах (рис. 6). При выполнении их обращения одним из ключевых является вопрос оценки размеров целевой области, то есть минимального и максимального выносов. Чтобы оценить глубину проникновения рефрагированных волн и зону освещенности, для каждого сейсмического источника, используемого в обращении, на каждой итерации нелинейного процесса оптимизации были выполнено построение сейсмических лучей для оценки минимального и максимального используемого выносов. Во избежание краевых эффектов мы используем специальные окна, обеспечивающие гладкое обнуление градиента целевого функционала вне зоны освещенности.

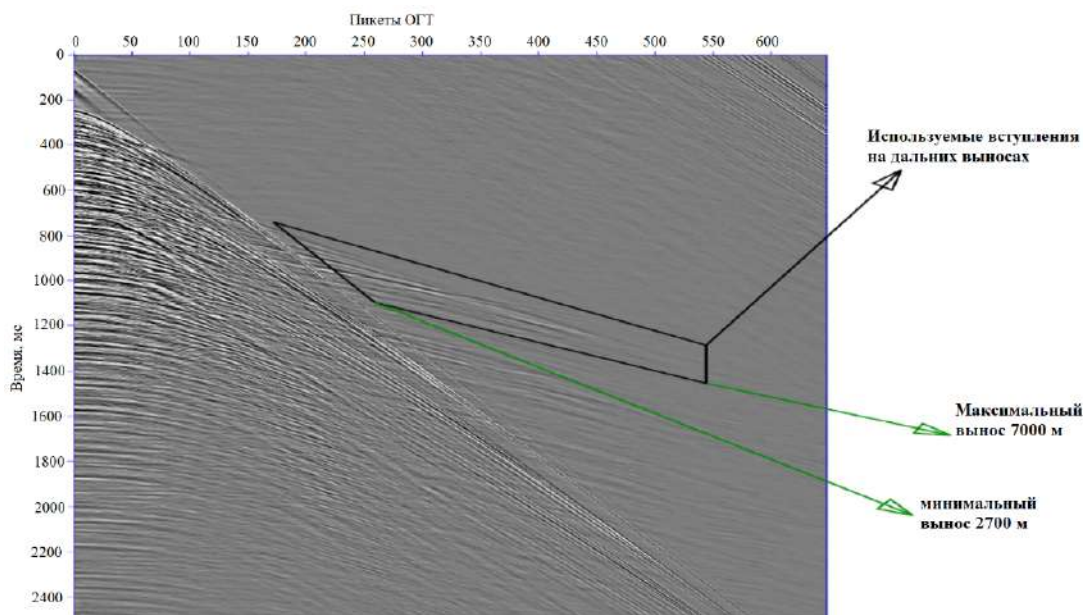


Рис. 6. Фрагмент реальных данных с выделенными первыми вступлениями, используемыми для реконструкции верхней части разреза

В качестве начального приближения использовалась модель интервальных скоростей, построенная по Диксе. В обращении использовалось 114 источников, с шагом 37.5м. Для каждого источника использовались 370 приемников с шагом 12.5м. Обращение производилось последовательно для временных частот 5 Гц и 6 Гц. Сравнение скоростных моделей можно видеть на рис. 7.

На следующем этапе обработки эти две скорости использовались при выполнении миграции до суммирования, результаты которой представлены на рис. 8.

Как видно, изображение, полученное с использованием глубинной скоростной модели, построенной путем обращения полного волнового поля, имеет

гораздо лучшую пространственную разрешенность и более высокую информативность.

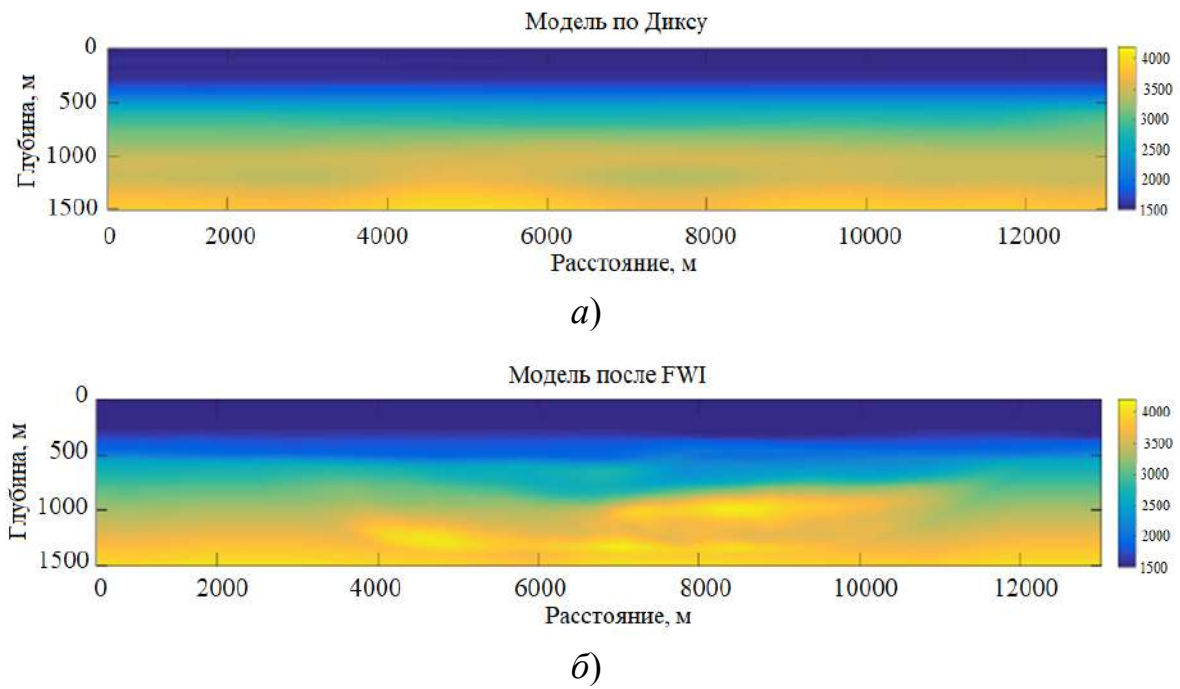


Рис. 7. а) скоростная модель по Диксу; б) скоростная модель по FWI.

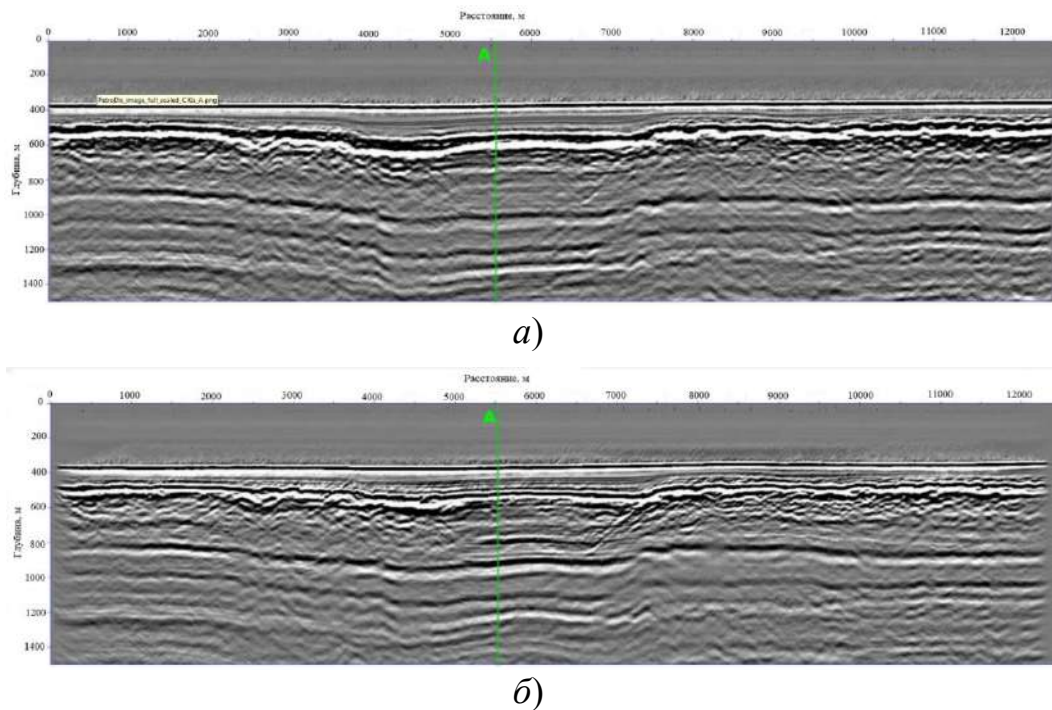


Рис. 8. Глубинные изображения, полученные с использованием глубинной скоростной модели по Диксу (а) и обращению полного волнового поля (б)

4. Заключение

Разработан, реализован и апробирован на синтетических и реальных данных двухэтапный метод построения глубинной скоростной модели, предусматривающий первоначальное использование волновых полей, соответствующих первым вступлениям на дальних выносах. Продемонстрировано повышение разрешающей способности и информативности сейсмических изображений при использовании скоростной модели, восстановленной методом обращения полного волнового поля.

Разработка алгоритма обращения, его численная реализация и применение для реконструкции скоростного строения выполнены Гадыльшиным К. Г., Неклюдовым Д. А., Протасовым М. И. и Чевердой В. А. при поддержке гранта РФФИ 17-17-01128. Авторы благодарны ООО «ПетроТрэйс» за предоставленные данные, их предварительную обработку и разрешение публикации.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Гадыльшин К.Г., Чеверда В.А. Реконструкция глубинной макроскоростной модели путем обращения полного волнового сейсмического поля // Доклады Академии наук. – 2017. – Т. 476(6). – С. 693 – 697.
2. Гадыльшин К.Г., Чеверда В.А. Решение обратной динамической задачи сейсмологии путем обращения полного многокомпонентного упругого волнового поля // Доклады Академии Наук. – 2018. – т. 482(6)ю – С. 708 – 712.
3. Конечно-разностное сейсмогеологическое моделирование с целью повышения эффективности обработки и качества интерпретации сейсмических данных / Д.Н. Твердохлебов, В.С. Коробкин, Е.А. Данько, Е.Г. Каширина // ГеоБайкал 2016. – SS07.
4. Конечно-разностное сейсмогеологическое моделирование с целью повышения эффективности обработки и качества интерпретации сейсмических данных / Д.Н. Твердохлебов, Е.А. Данько, Е.Г. Каширина, В.С. Коробкин, А.В. Филичев, А.В. Гайдук // Геофизика. – 2018. - №6. – С.10 -18.
5. Протасов М.И., Чеверда В.А. Построение сейсмических изображений в истинных амплитудах // Доклады РАН. – 2006. – Т. 407(4). – С. 528 – 532.
6. Kinematic time migration and demigration of reflections in pre-stack seismic data / E. Iversen, M. Tygel, B. Ursin B, de Hoop M. // Geophysical Journal International. – 2012. – Vol. 189. – P. 1635 – 1666.
7. Protasov M.I., Tcheverda V.A., Reshetova G.V. Fracture detection by Gaussian beam imaging of seismic data and image spectrum analysis // Geophysical Prospecting. – 2016. – Vol. 64(1). – P. 68 – 82.

© К. Г. Гадыльшин, Д. А. Неклюдов, М. И. Протасов, В. А. Чеверда,
А. Е. Королев, К. Р. Старков, А. А. Шевченко, 2019