РОСНЕФТЬ

РН-КРАСНОЯРСКНИПИНЕФТЬ
ОБЩЕСТВО С ОГРАНИЧЕННОЙ ОТВЕТСТВЕННОСТЬЮ

СЕЙСМОРАЗВЕДКА В СИБИРИ И ЗА ЕЁ ПРЕДЕЛАМИ

МАТЕРИАЛЫ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ

14–17 ноября 2023 г.

Красноярск
2024

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Сибирский федеральный университет

СЕЙСМОРАЗВЕДКА В СИБИРИ И ЗА ЕЁ ПРЕДЕЛАМИ

Материалы научно-практической конференции

Красноярск, 14–17 ноября 2023 г.

Электронное издание

Красноярск
СФУ
2024

УДК 550.834(571.1/.5)
ББК 26(253)
С288

Ответственные за выпуск: Никитина Елена Викторовна
Епифанцева Наталья Сергеевна

С288 **Сейсморазведка в Сибири и за её пределами** : материалы науч.-практ. конф. Красноярск, 14–17 ноября 2023 г. [Электронный ресурс] / отв. за вып. Е. В. Никитина, Н. С. Епифанцева. – Электрон. дан. (19,6 Mb). – Красноярск : Сиб. федер. ун-т, 2024. – 176 с. – Систем. требования : PC не ниже класса Pentium I ; 128 Mb RAM ; Windows 98/XP/7/8/10 ; Adobe Reader V8.0 и выше. – Загл. с экрана.
ISBN 978-5-7638-4925-7

Представлены результаты научной работы по применению современных методик обработки и интерпретации данных сейсморазведки, разработке новых алгоритмов, а также использованию Data Science в сейсморазведке.

Предназначены для профильных специалистов, сотрудников научно-исследовательских и проектных организаций, представителей нефтегазовых компаний и учреждений РАН.

Электронный вариант издания см.: http://catalog.sfu-kras.ru

УДК 550.834(571.1/.5)
ББК 26(253)

ISBN 978-5-7638-4925-7

Электронное научное издание

Корректор *Л. В. Боос*
Компьютерная вёрстка *Е. А. Сафиной*

Подписано в свет 01.03.2024. Заказ № 20741
Тиражируется на машиночитаемых носителях

Библиотечно-издательский комплекс
Сибирского федерального университета
660041, г. Красноярск, пр. Свободный, 82а
Тел.: (391) 206-26-16; http://bik.sfu-kras.ru
E-mail: publishing_house@sfu-kras.ru

Миграционный скоростной анализ по высокочастотной асимптотике уравнения двойного корня

Н. Н. Шилов[1], *А. А. Дучков*[2]
[1,2] *Новосибирский государственный университет,*
[1,2] *Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН*
[1] *n.shilov@g.nsu.ru,* [2] *DuchkovAA@ipgg.sbras.ru*

Введение. Сейсморазведка методом отражённых волн является ведущим методом изучения внутреннего строения Земли, в особенности в целях поиска залежей углеводородов. Основным результатом обработки сейсмических данных являются волновые изображения отражающих границ, причём достоверность этих изображений определяется точностью скоростной модели изучаемого участка [1]. Избыточность данных сейсморазведки позволяет уточнять скоростную модель среды по погрешностям в волновых изображениях – такие подходы называются миграционным скоростным анализом [2]. В данной работе будет изложен новый метод этой группы, основанный на высокочастотной асимптотике одной из аппроксимаций волнового уравнения и являющийся развитием метода регулируемого направленного приёма (РНП) [3; 4]. В тексте доклада будет рассматриваться только двумерная постановка задачи, но предлагаемый подход может быть обобщён и на трёхмерный случай.

Теоретические основы метода. Рассмотрим двумерное пространство $z \geq 0$, в котором задано гладкое распределение скорости упругих волн $v(x,z)$. Пусть на плоскости $z=0$ в координатах x_s и x_r соответственно расставлены источники и приёмники сейсмических колебаний. Обозначим время пробега отражённой волны между источником и приёмником за $\tau(x_s,x_r,z=0)$ и рассмотрим поведение этой функции при $z>0$, т. е. при пересчёте времён пробега в нижнее полупространство. В [5] было показано, что она подчиняется дифференциальному уравнению:

$$\frac{\partial\tau}{\partial z}+\sqrt{\frac{1}{v_s^2}-\left(\frac{\partial\tau}{\partial x_s}\right)^2}+\sqrt{\frac{1}{v_r^2}-\left(\frac{\partial\tau}{\partial x_r}\right)^2}=0, \quad (1)$$

где за v_s и v_r обозначены соответственно скорости в источнике и приёмнике, $v(x_s,z)$ и $v(x_r,z)$. Это уравнение описывает кинематику отражённой волны вплоть до отражающей границы при условии, что её лучи нигде не становятся горизонтальными. В [6] по нему строится псевдодифференциальное уравнение двойного корня (англ. *Double Square Root equation*), позволяющее пересчитывать не только времена пробега, но и всё волновое поле, а в [7] показывается, что изложенная ниже теория есть высокочастотная асимптотика этого уравнения.

По аналогии с классическим лучевым методом [8; 9] уравнение (1) можно решать методами гамильтоновой механики. Для этого определяются векторы ***координат*** и ***медленности*** (верхний индекс T указывает на транспонирование):

$$\vec{x} = \left(x_s, x_r, z\right)^T, \quad \vec{p} = \left(p_s, p_r, p_z\right)^T = \left(\frac{\partial\tau}{\partial x_s}, \frac{\partial\tau}{\partial x_r}, \frac{\partial\tau}{\partial z}\right)^T, \tag{2}$$

а также ***гамильтониан*** системы:

$$H\left(\vec{x}, \vec{p}\right) \propto p_z + \sqrt{\frac{1}{v_s^2} - p_s^2} + \sqrt{\frac{1}{v_r^2} - p_r^2}, \tag{3}$$

в котором знаком $\propto$ обозначена пропорциональность. Конкретная форма гамильтониана приведена в [7]. Уравнение (1) выполнено, если гамильтониан равен нулю, и наоборот.

Введённому гамильтониану соответствует ***система уравнений луча***, параметризированного временем пробега:

$$\begin{cases} \dfrac{d\vec{x}}{d\tau} = \nabla_{\vec{p}} H, \quad \nabla_{\vec{p}} = \left(\dfrac{\partial}{\partial p_s}, \dfrac{\partial}{\partial p_r}, \dfrac{\partial}{\partial p_z}\right)^T, \\ \dfrac{d\vec{p}}{d\tau} = -\nabla_{\vec{x}} H, \quad \nabla_{\vec{x}} = \left(\dfrac{\partial}{\partial x_s}, \dfrac{\partial}{\partial x_r}, \dfrac{\partial}{\partial z}\right)^T. \end{cases} \tag{4}$$

Её решения – пары $\vec{x}\left(\tau\right)$, $\vec{p}\left(\tau\right)$ – лучи уравнения двойного корня, или просто лучи. В работе [7] показано, как поставить для них начальные условия и трассировать ***в обратном времени*** от $\tau = \tau^{obs}$ – времени регистрации волны в приёмнике – до $\tau = 0$ – нулевого времени отражения. Формально нулевое время отражения реализуется, когда источник и приёмник расположены в одной и той же точке непосредственно на отражающей границе. Неравенство $x_s\big|_{\tau=0} \neq x_r\big|_{\tau=0}$ нарушает ***физику*** отражения и может свидетельствовать об ошибках в скоростной модели.

Пусть вместо точной скоростной модели задано её приближение $v_0\left(x, z\right)$, и в нём по системе (4) были построены K лучей уравнения двойного корня $\vec{x}^k\left(\tau\right)$, $\vec{p}^k\left(\tau\right)$, $k = \overline{1, K}$. Такие лучи могут ***не сойтись*** на отражающих границах при $\tau = 0$. Обозначим за h_k величину

$$h_k = \left(x_r^k - x_s^k\right)\Big|_{\tau=0} \tag{5}$$

и введём функционал невязки:

$$L = \frac{1}{K}\sum_{k=1}^{K} h_k^2 \geq 0. \tag{6}$$

Будем искать возмущение скоростной модели в параметрическом виде:

$$v\left(x, z; \tilde{\boldsymbol{V}}\right) = v_0(x, z) + \tilde{v}\left(x, z; \tilde{\boldsymbol{V}}\right), \quad L = L\left(\tilde{\boldsymbol{V}}\right), \quad h_k = h_k\left(\tilde{\boldsymbol{V}}\right), \tag{7}$$

где матрица параметров $\tilde{\boldsymbol{V}}$ задаёт ***возмущение скорости*** в узлах фиксированной сетки:

$$\tilde{\boldsymbol{V}} = \left\{\tilde{v}_{mn}\right\}, \quad \tilde{v}\left(x_m, z_n; \tilde{\boldsymbol{V}}\right) = \tilde{v}_{mn}, \quad m = \overline{1, M}, \quad n = \overline{1, N}, \tag{8}$$

а между узлами строится интерполяционный бикубический сплайн [10]. Используя методы теории возмущений луча, изложенные в [11; 12], можно рассчитать градиент $L\left(\tilde{\boldsymbol{V}}\right)$ и реализовать подбор матрицы $\tilde{\boldsymbol{V}}$, минимизирующей функционал невязки (6). В нашей работе мы пользуемся алгоритмами *L-BFGS-B* [13] и *SLSQP* [14] из библиотек *SciPy* [15] языка *Python*.

Данные для инверсии. Для лучевого трассирования в обратном времени и расчёта градиента целевого функционала (6) необходимо знать времена пробега отражённых волн и их производные на поверхности наблюдений. Такие же данные нужны в методе РНП [3; 4] и стереотомографии [16], авторы которых разработали методику их извлечения из сейсмограмм до суммирования [17]. В итоге массив данных для инверсии включает в себя следующие значения:

- x_s^{obs} – координата источника;
- x_r^{obs} – координата приёмника;
- τ^{obs} – время регистрации отражённой волны;
- $p_s^{obs} = \dfrac{\partial \tau_{obs}}{\partial x_s^{obs}}$ – производная времени пробега по координате источника;
- $p_r^{obs} = \dfrac{\partial \tau_{obs}}{\partial x_r^{obs}}$ – производная времени пробега по координате приёмника;
- $\sigma \in [0,1]$ – мера когерентности (сембланс) выделенной волны, характеризующая степень уверенности в выделении события на трассе.

Регуляризация функционала невязки. Функционал невязки в форме (6) характеризует неточность скоростной модели при отсутствии ошибок в данных. Такие ошибки неизбежно возникают при анализе сейсмограмм, поэтому по аналогии с [17] мы вводим регуляризированный функционал невязки:

$$L_\sigma\left(\tilde{\mathbf{V}}\right)=L_h\left(\tilde{\mathbf{V}}\right)+L_{\tilde{v}_{mn}}\left(\tilde{\mathbf{V}}\right),\quad L_h\left(\tilde{\mathbf{V}}\right)=\frac{1}{K}\sum_{k=1}^{K}h_k^2\sigma_k^2$$
$$L_{\tilde{v}_{mn}}\left(\tilde{\mathbf{V}}\right)=\frac{1}{MN}\sum_{m=1}^{M}\sum_{n=1}^{N}\left[v_{mn}^2+\left(\Delta\tilde{v}\left(x_m,z_n;\tilde{\mathbf{V}}\right)\right)^2\left(\delta x\delta z\right)^2\right]\Delta\frac{1}{K}\sum_{k=1}^{K}\left(\tau_k^{obs}\right)^2\left(1-\sigma_k\right)^2, \tag{9}$$

в котором к целевой функции были прибавлены члены, ограничивающие сложность скоростной модели. Оператор $\Delta=\dfrac{\partial^2}{\partial x^2}+\dfrac{\partial^2}{\partial z^2}$ есть оператор Лапласа, δx и δz – шаги по сетке, на которой ищется возмущение скорости, а знак умножения поставлен, чтобы визуально подчеркнуть перемножение сумм. Нормирующие множители подбирались нами эвристически, исходя из следующих соображений:

- размерность функционала невязки (9) должна совпадать с размерностью (6);
- штраф за расхождение источника и приёмника $L_h\left(\tilde{\mathbf{V}}\right)$ должен быть максимальным для достоверно ($\sigma_k\approx 1$) выделенных событий;
- штраф за возмущения скорости $L_{\tilde{v}_{mn}}\left(\tilde{\mathbf{V}}\right)$ должен быть максимальным для ненадёжно ($\sigma_k\approx 0$) выделенных событий.

Заметим также, что функционал (9) переходит в (6) при $\sigma_k\to 1$ для всех $k=\overline{1,K}$.

Двухстадийная оптимизация. Для устойчивого восстановления скоростной модели мы применили двухстадийную стратегию оптимизации, похожую на предложенную в [17]:

1) поиск возмущения скорости на сетке из четырёх узлов в углах модели;

2) поиск возмущения скорости на подробной сетке.

На первом шаге ищется «почти линейная» скоростная модель, максимально удовлетворяющая сразу всему массиву данных, а на втором – уточняются локальные неоднородности.

Пример инверсии синтетических данных. Для тестирования новых алгоритмов миграции и скоростного анализа часто пользуются моделью «Мармуси» [18]. Авторы метода стереотомографии [16] предложили упрощённый вариант этой модели и предоставили нам синтетические сейсмограммы для инверсии. Эти сейсмограммы были рассчитаны методом борновского моделирования [19] и включают в себя только однократно рассеянные волны, а истинная скоростная модель не содержит поверхностей разрывов.

На рис. 1 приведены начальное приближение, результат первой стадии инверсии и итоговая скоростная модель, построенные в результате инверсии 2 770 пропикированных отражённых волн с семблансом $\sigma > 0{,}8$. Поверх скоростных моделей наложены примерные положения отражающих площадок, координаты и ориентация которых находятся из геометрии лучей [3], а прозрачность экспоненциально возрастает с $|h|$ (5). Хорошо видно, как в процессе инверсии фокусируется структурное изображение. Для демонстрации корректности построенной модели была проведена глубинная миграция равных удалений [19], результаты которой изображены на рис. 2. Слева на нём приведены суммарные изображения, получаемые на разных стадиях инверсии, а справа – сейсмограммы общей точки изображения. Видно, что по мере уточнения скоростной модели волны на них выстраиваются в горизонтальные структуры, что свидетельствует о точности подбора скоростей [20].

Пример инверсии реальных данных. Для проверки работоспособности алгоритма в условиях реальной сейсмической съёмки были взяты данные по наземному профилю в Западной Сибири. На сейсмограммах было выделено 3 946 событий с семблансом $\sigma > 0{,}8$ и проведена инверсия. Её результаты приведены на рис. 3 в том же порядке, что и для инверсии синтетических данных. Хорошо видно, что в верхней (до 1 000 м) горизонтально-слоистой части разреза надёжно прослеживаются многочисленные отражающие границы, а в более глубинной синклинальной структуре – всего три основных горизонта. О достоверности восстанавливаемой скоростной модели можно судить по результатам миграции равных удалений, приведённым на рис. 4. Видно, что включённым в инверсию отражающим горизонтам соответствуют почти горизонтальные структуры на сейсмограммах общей точки изображения, но между ними сохранилось много неспрямлённых границ, которые не были надёжно пропикированы и не были включены в инверсию. Таким образом, вопрос корректной подготовки набора данных требует дальнейшего изучения, хотя уже можно утверждать, что предложенный метод не разошёлся на реальных сейсмограммах.

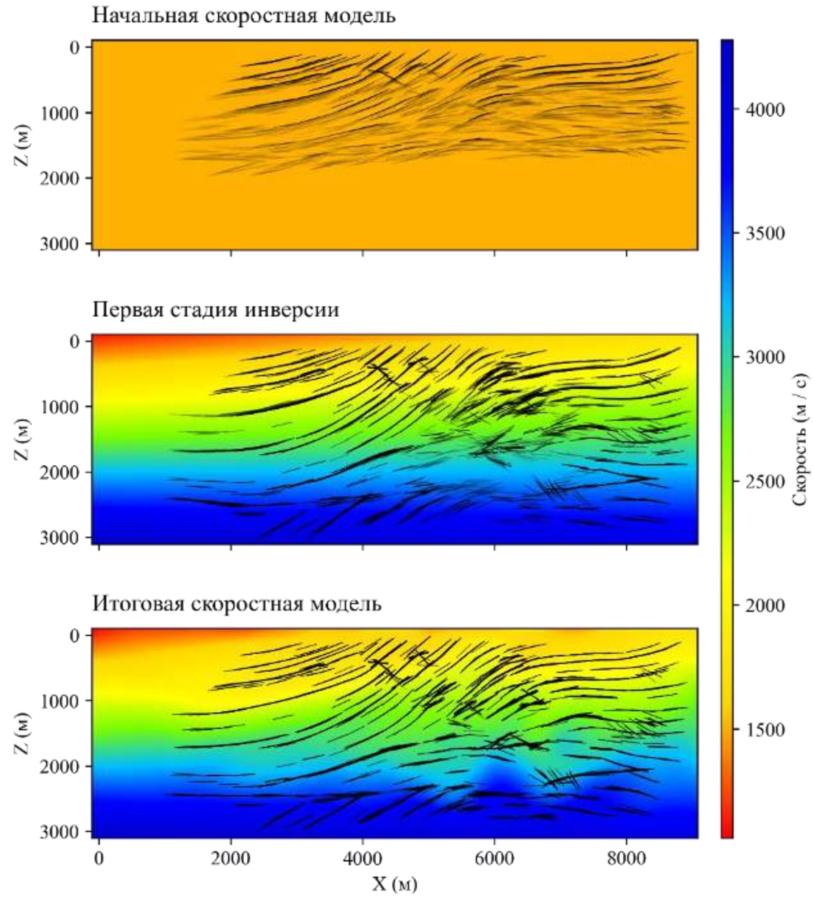

Рис. 1. Скоростные модели с наложенными отражающими площадками, построенные по синтетическим данным

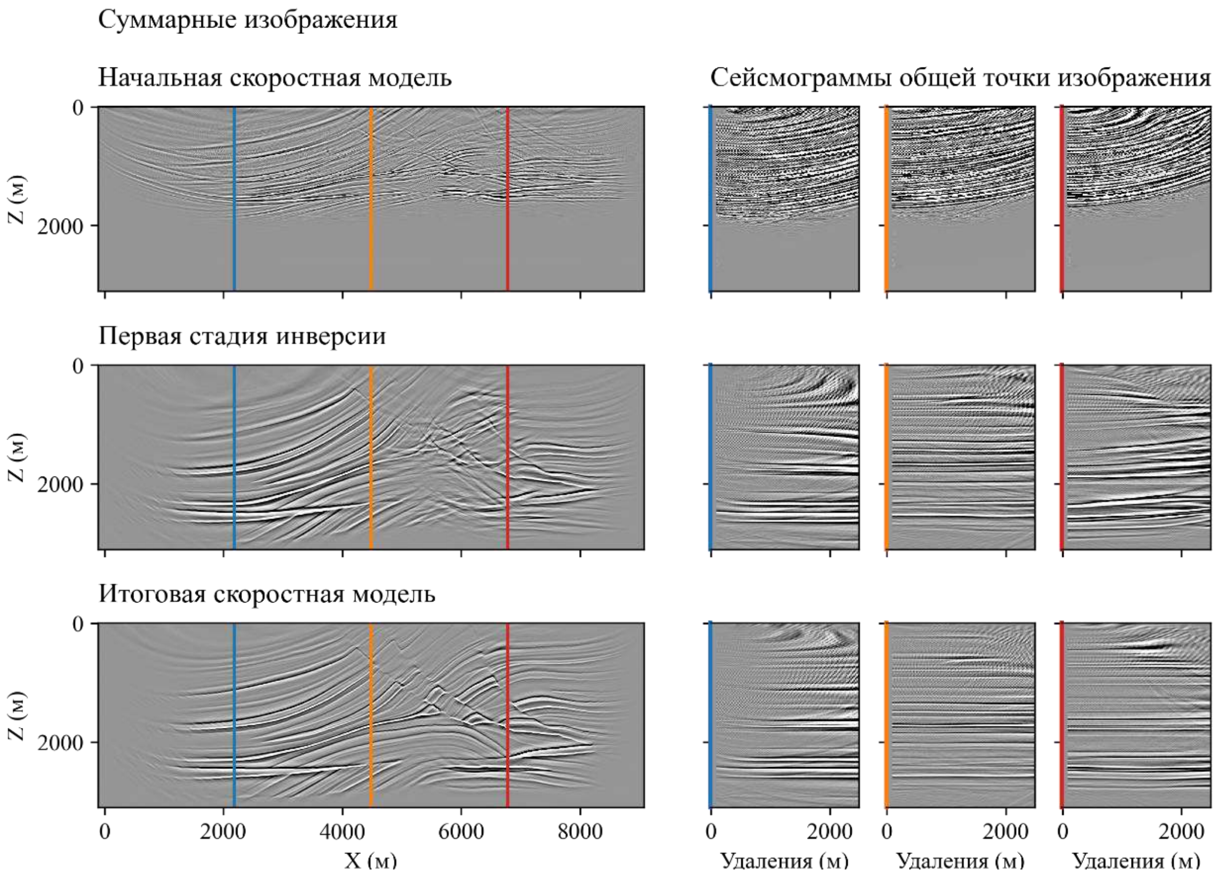

Рис. 2. Результаты глубинной миграции равных удалений по синтетическим данным

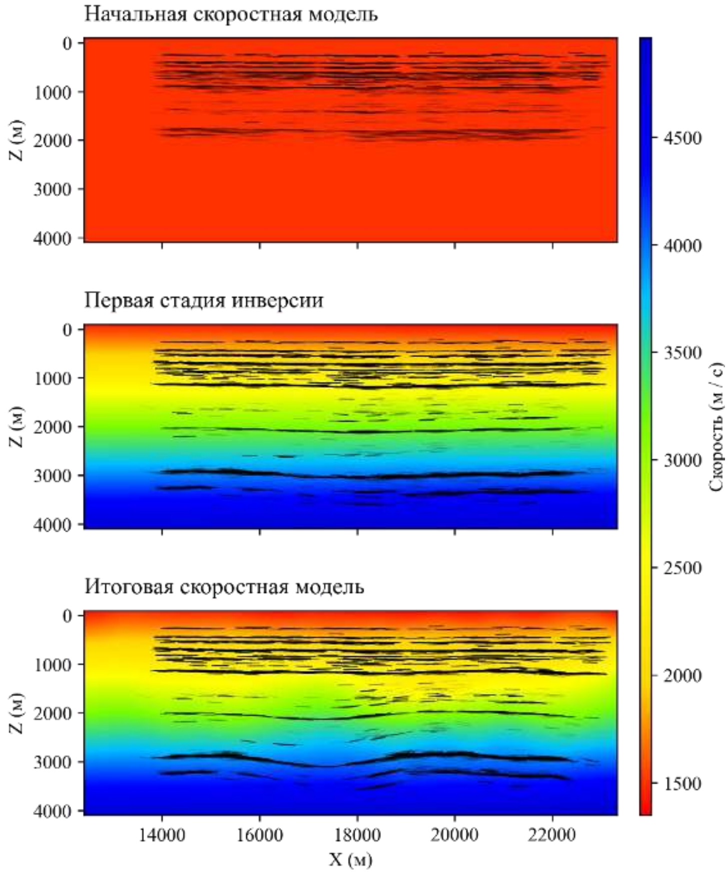

Рис. 3. Скоростные модели с наложенными отражающими площадками, построенные по реальным данным

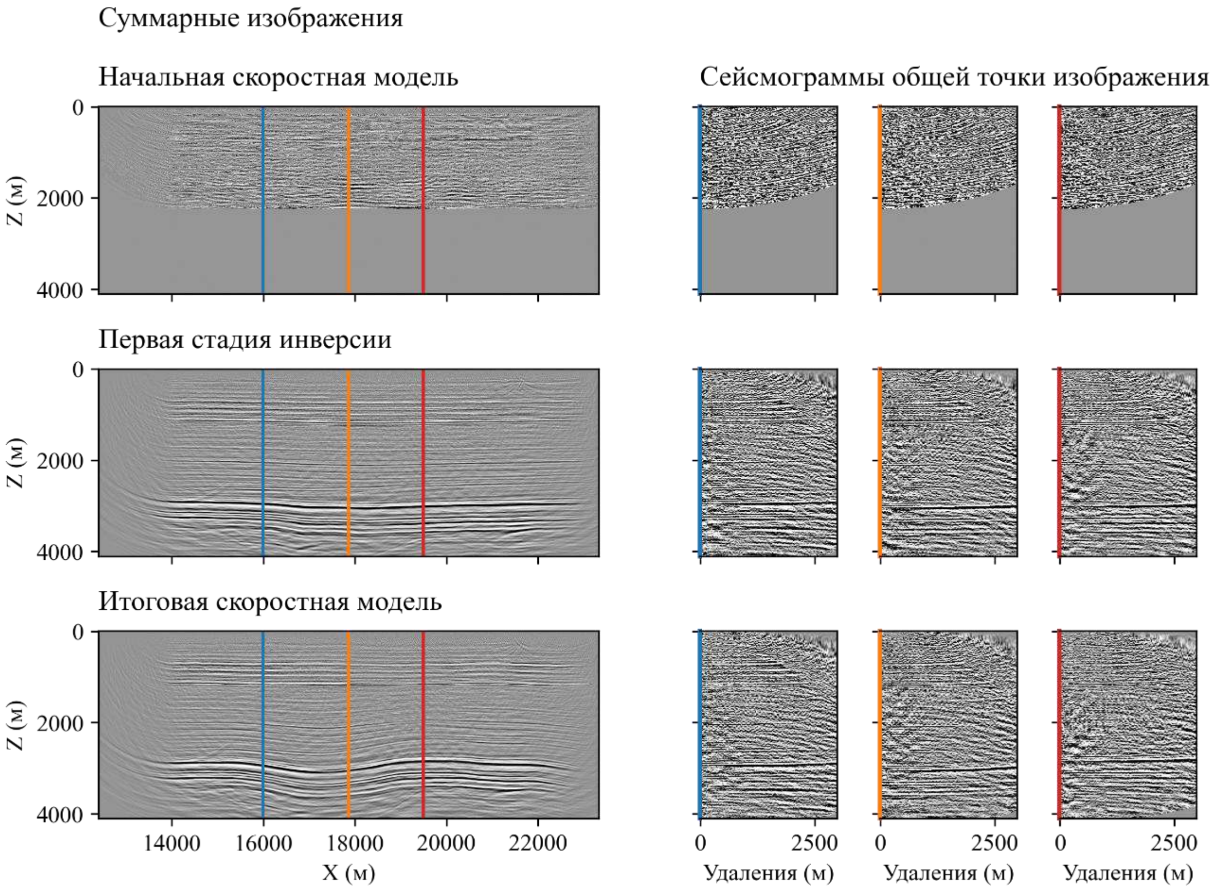

Рис. 4. Результаты глубинной миграции равных удалений по реальным данным

Заключение. В данной работе представлен метод уточнения скоростной модели среды, основанный на высокочастотной асимптотике псевдодифференциального уравнения двойного корня – аппроксимации волнового уравнения, описывающей только субвертикально распространяющиеся волны. В тексте работы приведён вывод функционала невязки и указан метод расчёта его градиента, предложен вариант регуляризации, в котором отдельно оговорены эвристические решения, принятые в этой работе и интересные для дальнейшего изучения. Работоспособность метода продемонстрирована на наборе синтетических и реальных данных.

Благодарности. *Исследования проводились в рамках государственных заданий FSUS-2022-0019 и FWZZ-2022-0017.*

Список источников

1. Гурвич И. И. Сейсморазведка: учебник / И. И. Гурвич, Г. Н. Боганик. Тверь: АИС, 2006. 744 с.

2. Biondi B. L. 3D Seismic Imaging / B. L. Biondi // Investigations in Geophysics. Society of Exploration Geophysicists, 2006. 247 p.

3. Sword C. H. Tomographic Determination of Interval Velocities from Reflection Seismic Data: the Method of Controlled Directional Reception: Ph. D. Thesis / C. H. Sword. Stanford University, 1987.

4. Рябинкин Л. А. Вопросы регулируемого направленного приёма (РНП) сейсмических волн / Л. А. Рябинкин. М.: Гостоптехиздат, 1957. 165 с.

5. Белоносова А. В. Об одной постановке обратной кинематической задачи сейсмики для двумерной неоднородной среды / А. В. Белоносова, А. С. Алексеев // Некоторые методы и алгоритмы интерпретации геофизических данных. 1967. С. 137–154.

6. Claerbout J. F. Imaging the Earth's Interior / J. F. Claerbout. Blackwell Scientific Publications, 1985. 398 c.

7. Шилов Н. Н. Система динамического лучевого трассирования для уравнения двойного корня: ВКР магистра / Н. Н. Шилов. Новосибирск, 2021. 96 с.

8. Алексеев А. С. Лучевой метод вычисления интенсивности волновых фронтов / А. С. Алексеев, В. М. Бабич, Б. Я. Гельчинский // Вопросы динамической теории распространения сейсмических волн. 1961. Т. 5. С. 3–24.

9. Červený V. Seismic Ray Theory / V. Červený. Cambridge: Cambridge University Press, 2001. 713 p.

10. Марчук Г. И. Методы вычислительной математики / Г. И. Марчук. М.: Наука, 1980. 535 с.

11. Шилов Н. Н. Миграционный скоростной анализ по лучевой асимптотике уравнения двойного корня / Н. Н. Шилов, А. А. Дучков // Сибирский журнал индустриальной математики. 2023. Т. 4 [прин. к публ.].

12. Farra V. Seismic Waveform Modeling in Heterogeneous Media by Ray Perturbation Theory (France) / V. Farra, R. Madariaga // Journal of Geophysical Research. 1987. Vol. 92. Pp. 2 607–2 712.

13. Byrd R. H. A Limited Memory Algorithm for Bound Constrained Optimization / R. H. Byrd et al. // SIAM Journal on Scientific Computing. 1995. Vol. 16. No. 5. Pp. 1 190–1 208.

14. Kraft D. A Software Package for Sequential Quadratic Programming / D. Kraft // Tech. Rep. DFVLR-FB. Wiss. Berichtswesen d. DFVLR. 1988. Vol. 88. No. 28.

15. Virtanen P. SciPy 1.0: Fundamental Algorithms for Scientific Computing in Python / P. Virtanen et al. // Nature Methods. 2020. Vol. 17. No. 3. Pp. 261–272.

16. Lambaré G. Stereotomography / G. Lambaré // Geophysics. 2008. Vol. 73. No. 5. Pp. VE25–VE34.

17. Billette F. Practical Aspects and Applications of 2D Stereotomography / F. Billette et al. // Geophysics. 2003. Vol. 68. No. 3. Pp. 1 008–1 021.

18. Brougois A. Marmousi, Model and Data / A. Brougois et al. // EAEG Workshop – Practical Aspects of Seismic Data Inversion. European Association of Geoscientists & Engineers, 1990.

19. Bleistein N. Mathematics of Multidimensional Seismic Imaging, Migration, and Inversion / N. Bleistein, J. K. Cohen, J. W. J. Stockwell. New York: Springer, 2001. Vol. 13. 511 p.

20. Sava P. C. Angle- domain Common- image Gathers by Wavefield Continuation Methods / P. C. Sava, S. Fomel // Geophysics. Society of Exploration Geophysicists. 2003. Vol. 68. No. 3. Pp. 1 065–1 074.