



ТЕСТИРОВАНИЕ МАТРИЧНОЙ РЕАЛИЗАЦИИ АЛГОРИТМА ПОВЕРХНОСТНО-СОГЛАСОВАННОЙ КОМПЕНСАЦИИ СЕЙСМИЧЕСКИХ АМПЛИТУД

Р.С. Кушнарев^{1,2}, Н.А. Горевачев^{1,2}, Г.М. Митрофанов^{1,2}

¹Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН,
630090, Новосибирск, просп. Акад. Коптюга, 3, Россия,

²Новосибирский государственный университет, 630090, Новосибирск, ул. Пирогова, 1, Россия
e-mail: R.kushnarev@g.nsu.ru

В данной работе проводится тестирование и оценка алгоритма поверхностно-согласованной компенсации сейсмических амплитуд. Алгоритм основан на факторной декомпозиции и реализован в матричном виде. Матричный вид связывает все сейсмические наблюдения, что позволяет точно определять вариации, связанные с неоднородностями верхней части разреза. Тестирование алгоритма проводилось на синтетических данных, содержащих порядка 10.5 млн наблюдений. Тестирование показывает возможность применения метода на больших объемах данных с высокой точностью.

Верхняя часть разреза, факторная декомпозиция, система наблюдений, матричное дополнение

TESTING THE MATRIX IMPLEMENTATION OF THE ALGORITHM FOR SURFACE-CONSISTENT COMPENSATION OF SEISMIC AMPLITUDES

R.S. Kushnarev^{1,2}, N.A. Goreyavchev^{1,2}, G.M. Mitrofanov^{1,2}

¹Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, Koptug Ave., 3, Novosibirsk, 630090, Russia,

²Novosibirsk State University, Pirogova Str., 1, Novosibirsk, 630090, Russia,
e-mail: R.kushnarev@g.nsu.ru

This paper tests and evaluates the algorithm for surface-consistent compensation of seismic amplitudes. The algorithm is based on factorial decomposition and is implemented in matrix form. The matrix view links all seismic observations to accurately identify variations associated with discontinuities in the upper section. The algorithm was tested on synthetic data containing about 10.5 million observations. Testing shows the possibility of applying the method to large amounts of data with high accuracy.

Upper part of the section, factor decomposition, observation system, matrix complement

ВВЕДЕНИЕ

Важной задачей сейсморазведки является определение неоднородностей верхней части разреза (ВЧР), влияющих на условия возбуждения и приема сейсмического сигнала. Корректное решение этой задачи напрямую определяет качество и достоверность получаемых результатов обработки и сейсмической инверсии [Глоговский, Хачатрян, 1986].

Неоднородности ВЧР могут быть связаны с переменным рельефом земной поверхности, зоной выветривания, часто связанной с зоной малых скоростей, и многолетнемерзлыми породами. Все эти неоднородности в той или иной степени осложняют сейсмический сигнал. Кроме того, он может быть осложнен за счет расположения источников и приемников на неоднородных отложениях [Сысоев, 2011; Давлетханов, 2017].

Одним из классических подходов при решении задачи компенсации неоднородностей верхней части разреза является факторное представление. Идея этого подхода сформировалась в 70-х гг., параллельно и независимо в СССР [Митрофанов, 1972, 1975; Гольдин, Митрофанов, 1973, 1975] и за рубежом [Taner et al., 1974; Booker et al., 1976; Wiggins et al., 1976; Taner, Koehler, 1981]. Введенное Гольдиным и Митрофановым в 1972 г. факторное представление [Митрофанов, 1972] опиралось на предложенную Гурвичем в 1970 г. модель [Гурвич, 1970], представляющую форму отраженного сигнала последовательной сверткой нескольких импульсных характеристик. Конструкция модели предполагает выделение области источника, приемника, отражения и прохождения, которые определяют основные изменения в форме сигнала. Сверточное представление Гурвича линейаризуется за счет перехода в частотную область, а характеристики отраженного сигнала переходят в сумму факторов: за источник, приемник, точку отражения и пройденный путь. Таким образом происходит переход от сложной сверточной модели к более простой линейаризованной модели, которую можно раскладывать на отдельные составляющие – факторы.

Такое представление позволило сформировать систему линейных уравнений (СЛУ) с неизвестными составляющими в виде факторов. Число уравнений определяется числом сейсмических наблюдений. СЛУ представима в матричном виде, где вектор наблюдений равняется произведению матрицы X , определяемой системой наблюдения и факторной моделью на вектор факторов. Изначально матрица X вырождена и не имеет обратной матрицы. Следовательно, СЛУ переопределена и не имеет единственного решения. Для устранения неединственности СЛУ было решено воспользоваться методом алгебраических дополнений. СЛУ дополняется уравнениями, которые содержат в себе априорную информацию за вклад определенной области в изменение сейсмического сигнала. Обращение дополненной матрицы, связывающей краевые наблюдения, позволяет точно определить искомые факторы.

Современные сейсморазведочные системы могут включать в себя десятки миллионов физических наблюдений. Отсюда возникает вычислительная сложность, поскольку СЛУ, описывающая факторное представление, будет включать в себя десятки миллионов уравнений. Раньше решение таких систем было трудозатратным и практически неосуществимым, но благодаря современным технологиям появляется возможность решать подобные системы с высокой точностью.

Для апробации данного алгоритма была создана модель, имитирующая неоднородности в условиях возбуждения и приема сейсмических сигналов. По данной модели были получены синтетические данные, содержащие в себе большое количество наблюдений (примерно 10.5 млн). Оценка алгоритма была проведена по наблюдениям, которые были получены умножением энергии трасс на коэффициенты, имитирующие неоднородности в области возбуждения и приема сейсмических сигналов.

ФАКТОРНАЯ ДЕКОМПОЗИЦИЯ ПРИ ОЦЕНКЕ ИЗМЕНЕНИЙ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СЕЙСМИЧЕСКОГО СИГНАЛА

Как уже было сказано, одним из классических подходов для оценки изменений в характеристиках сейсмического сигнала является факторное разложение (декомпозиция). Факторное разложение опирается на предложенную Гурвичем модель [Гурвич, 1970], представляющую форму отраженного сигнала последовательной сверткой нескольких импульсных характеристик (1). При оценке изменений в динамических характеристиках конструкция модели предполагает выделение областей источника, приемника, отражения и прохождения, которые определяют основные изменения в форме сигнала:

$$W_{ij}(t) = S^0(t) * s_i(t) * r_j(t) * G_k(t) * L_l(t), \quad (1)$$

где $W_{ij}(t)$ – сейсмический сигнал, соответствующий фиксированной отраженной волне; $S^0(t)$ – исходный импульс; $s_i(t)$ – влияние области источника; $r_j(t)$ – влияние области приемника; $G_k(t)$ – влияние области точки отражения от целевой границы; $L_l(t)$ – влияние пройденного пути.

Вариации факторов рассматриваются относительно исходного сигнала, который представляет собой среднее значение сигнала по всем источникам. Выражение для коррекции сейсмического сигнала получается путем линеаризации сверточной модели (1). Для этого она переводится из временной области в частотную путем применения преобразования Фурье [Fourier, 1822; Сергиенко, 2011] (2) и логарифмированием [Митрофанов, 1975] (3). Таким образом, модель переходит в сумму

$$W_{ij}(\omega) = S^0(\omega)s_i(\omega)r_j(\omega)G_k(\omega)L_l(\omega) + \varepsilon_{ij}(\omega), \quad (2)$$

$$z_{ij}(\omega) = \ln(W_{ij}(\omega)) = \ln(S^0(\omega)) + \ln(s_i(\omega)) + \ln(r_j(\omega)) + \ln(G_k(\omega)) + \ln(L_l(\omega)) + \\ + \ln\left(1 + \frac{\varepsilon_{ij}(\omega)}{S^0(\omega)s_i(\omega)r_j(\omega)G_k(\omega)L_l(\omega)}\right), \quad (3)$$

где $W_{ij}(\omega)$ – спектральная характеристика регистрируемого сейсмического сигнала, ω – круговая частота.

Полученную логарифмированную спектральную характеристику $\ln(W_{ij}(\omega))$ в дальнейшем будем обозначать $z_{ij}(\omega)$. Логарифмы спектральной характеристики сигнала определяются суммой логарифмов спектральных характеристик, связанных с источником, приемником, точкой отражения, областью распространения сигнала в покрывающей среде:

$$z_{ij}(\omega) = C(\omega) + \alpha_i(\omega) + \beta_j(\omega) + \gamma_k(\omega) + \lambda_l(\omega) + \eta_{ij}(\omega). \quad (4)$$

Если зафиксировать значение частоты, то для каждой из частот мы имеем единообразное факторное представление следующего вида:

$$z_{ij} = C + \alpha_i + \beta_j + \gamma_k + \lambda_l + \eta_{ij}, \quad (5)$$

где C – константа, связанная с идеализированным сигналом; α , β , γ , λ – факторы; η_{ij} – нерегулярная помеха после $\ln$.

СИСТЕМЫ ЛИНЕЙНЫХ УРАВНЕНИЙ

Приведенная выше модель (5) линейна относительно неизвестных составляющих (факторов) и формирует систему линейных уравнений [Митрофанов, 1975]. Рассмотрим случай двухфакторной модели. Система линейных уравнений представляет собой наблюдаемые значения в левой части и сумму произведения факторов и коэффициентов в правой части. В левой части наблюдения представляют собой логарифмированную спектральную характеристику $z_{ij}(\omega)$ или логарифмы амплитуд (энергий) сигналов. В правой части находится сумма произведения фактора за источники α_i на коэффициент φ_k и произведения фактора за приемники β_j на коэффициент ψ_l . Коэффициенты φ_k и ψ_l указывают на то, какой из факторов относится к данному наблюдению:

$$z_{ij} = \sum_{k=1}^{K=I} \varphi_k \alpha_i + \sum_{l=1}^{L=J} \psi_l \beta_j = \sum_{k=1}^{K=I} \varphi_k \ln(s_i(\omega)) + \sum_{l=1}^{L=J} \psi_l \ln(r_j(\omega)), \quad (6)$$

$$\text{где } \varphi_k = \begin{cases} 1, & k = i \end{cases}, \psi_l = \begin{cases} 1, & l = j \end{cases}.$$

В результате получаем систему линейных уравнений для двухфакторной модели, относящейся к вариациям формы сейсмического сигнала.

Рассмотрим вариации спектральных характеристик сигнала на фиксированной частоте ω_0 , введем вектор наблюдений Z (7) и вектор факторов θ (8).

$$Z = (z_{11}, z_{12}, \dots, z_{IJ}) = (\ln(W_{11}(\omega_0)), \dots, \ln(W_{IJ}(\omega_0))), \quad (7)$$

$$\theta = (\alpha_1, \dots, \alpha_I, \beta_1, \dots, \beta_J) = (\ln(s_1(\omega_0)), \dots, \ln(s_I(\omega_0)), \ln(r_1(\omega_0)), \dots, \ln(r_J(\omega_0))). \quad (8)$$

Согласно модели (6) связь между вектором наблюдений и вектором факторов определяется системой линейных уравнений, которая может быть записана в матричной форме:

$$Z = X\theta. \quad (9)$$

Матрица X состоит из значений φ_k и ψ_l , следовательно, в матрицу входят нули и единицы. Ее структура определяется факторной моделью (6) и структурой системы наблюдения. Единицы в матрице X связывают наблюдения (строка в которой стоит единица) с соответствующими факторами (столбец в котором стоит единица). 3D система наблюдения и ее матрица приведена на рис. 1.

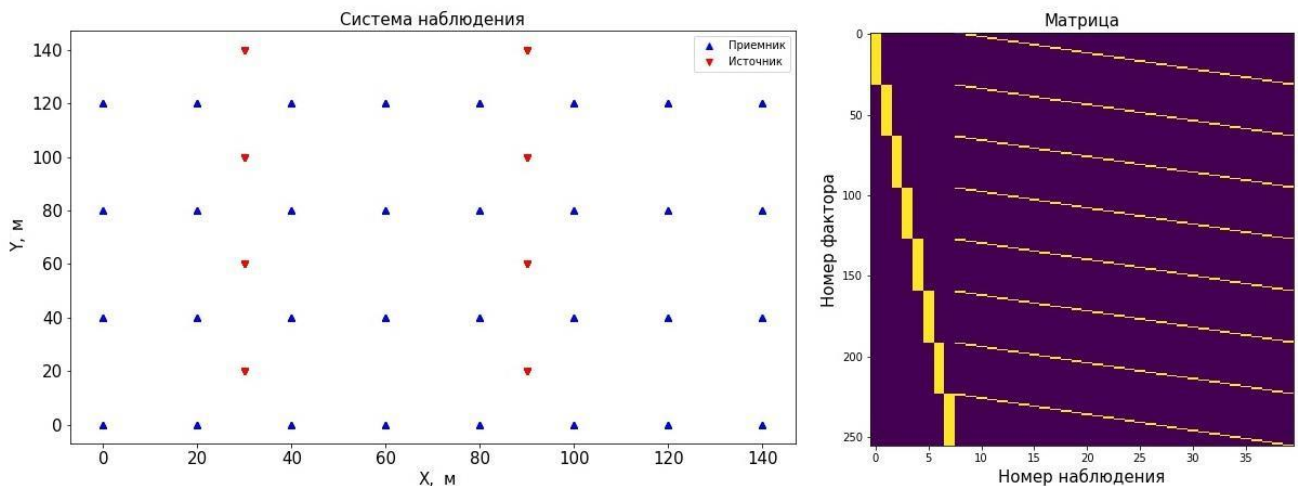


Рис. 1. 3D система наблюдения и матрица для данной системы наблюдений

Система наблюдения включает в себя 8 источников и 32 приемника, следовательно, матрица включает в себя 8 факторов за источник и 32 фактора за приемник, всего 40 факторов, что соответствует количеству столбцов. Каждый источник взаимодействует с каждым приемником, следовательно, количество наблюдений равняется 256, что соответствует количеству строк в матрице.

Свойства решения системы (9) зависят от свойств матрицы X , в частности, неединственность решения определяется вырожденностью соответствующей матрицы. Изучить свойства матрицы можно благодаря сингулярному разложению.

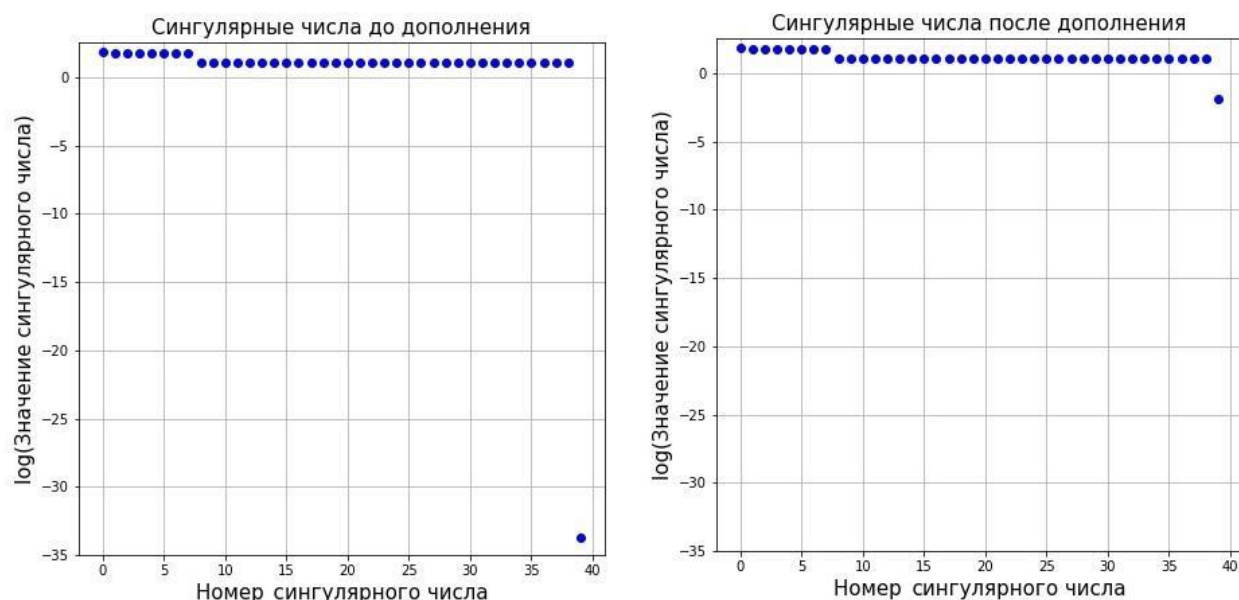


Рис. 2. Логарифмы значений сингулярных чисел матрицы X до дополнения и после

На рисунке 2 в левой части представлены сингулярные числа матрицы, представленной на рис. 1. Одно из сингулярных чисел на несколько десятков порядков меньше остальных, следовательно, такая матрица вырождена и система линейных уравнений, которая описывается данной матрицей не имеет единственного решения. Получить решение, используя данную матрицу, невозможно.

Решить проблему с вырожденностью матрицы X и, следовательно, с неоднозначностью решения СЛУ, можно методом дополнений. Метод дополнений позволяет ввести априорную информацию в систему линейных уравнений. В общем виде дополнение выглядит так:

$$H\theta = C. \quad (10)$$

Количество вводимой априорной информации зависит от того, сколько сингулярных чисел «выпадают».

Разложим факторы в полиномиальный ряд до первой степени (11). В представленных уравнениях число неизвестных больше, чем число известных величин (12) и (13). Зафиксируем константу и линейную составляющую, для того чтобы уровнять число известных и неизвестных величин, и дополним матрицу X соответствующим образом, чтобы это условие выполнялось:

$$\alpha_i = \alpha^0 + \alpha_i^1, \beta_j = \beta^0 + \beta_j^1, \quad (11)$$

$$z_{ij}^0 = \alpha^0 + \beta^0, \quad (12)$$

$$z_{ij}^1 = \sum_{k=1}^{k=I} \varphi_k \alpha_i^1 + \sum_{l=1}^{l=J} \psi_l \beta_j^1. \quad (13)$$

Так для матрицы X , у которой выпадает всего одно сингулярное число (см. рис 2), необходимо ввести одно уравнение с априорной информацией на константу (14). Таким образом получается восстановить сингулярное число матрицы X (см. рис. 2).

$$\ln(s_{\text{анп}}(\omega_0)) = \alpha_{i,\text{анп}}(\omega_0) = \ln(s_{i,\text{анп}}(\omega_0)). \quad (14)$$

Матрица X связывает между собой все краевые наблюдения, в отличие от повсеместно используемого итерационного метода [Taner, Koehler, 1981]. Это позволяет более точно восстановить неоднородности верхней части разреза, влияющие на сейсмический сигнал, в том числе длиннопериодные вариации.

ТЕСТИРОВАНИЕ

Для тестирования алгоритма была задана 3D система наблюдения (расстановка «крест»). Она содержала 1640 источников и 24963 приемников. Общее число наблюдений составило около 10.5 млн. На основе горизонтально-слоистой среды (рис. 3) в программе *sofi3d* [Bohlen et al., 2012] была получена синтетическая сейсмограмма (рис. 4) в упругой постановке для одной активной расстановки. Полученная сейсмограмма показывает волновую картину для каждого приемника и связанных с ними приемников. Затем проводилась отбраковка краевых наблюдений (см. рис. 3)

На представленной сейсмограмме присутствуют как P -, так и S -волны. Присутствуют прямые, отраженные, кратные волны. Время записи 4 с, приведены трассы с 3080 по 3180. В ходе моделирования было учтено сферическое расхождение. После построения полной системы наблюдений выполнялось моделирование изменений в условиях возбуждения и приема колебаний. В стандартном графе сейсмической обработки при поверхностно-согласованной компенсации аномалий от верхней части разреза используют RMS амплитуды. Поэтому было принято решение рассматривать амплитуды сейсмического сигнала.

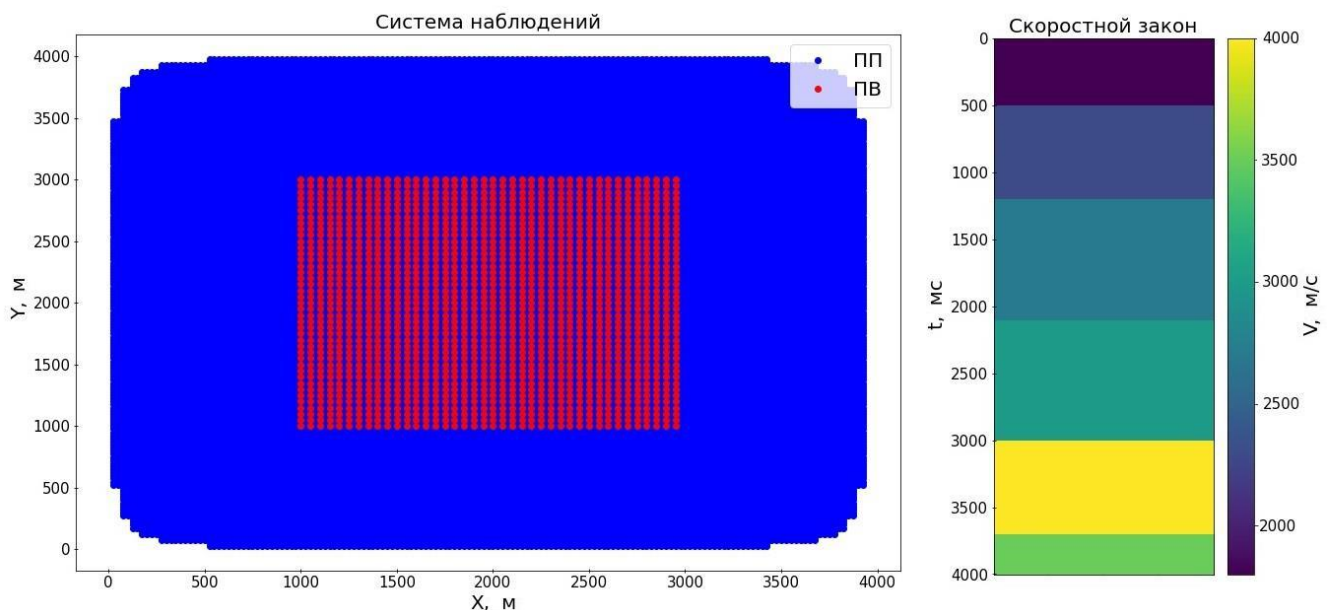


Рис. 3. Система наблюдения без краевых наблюдений и скоростной закон

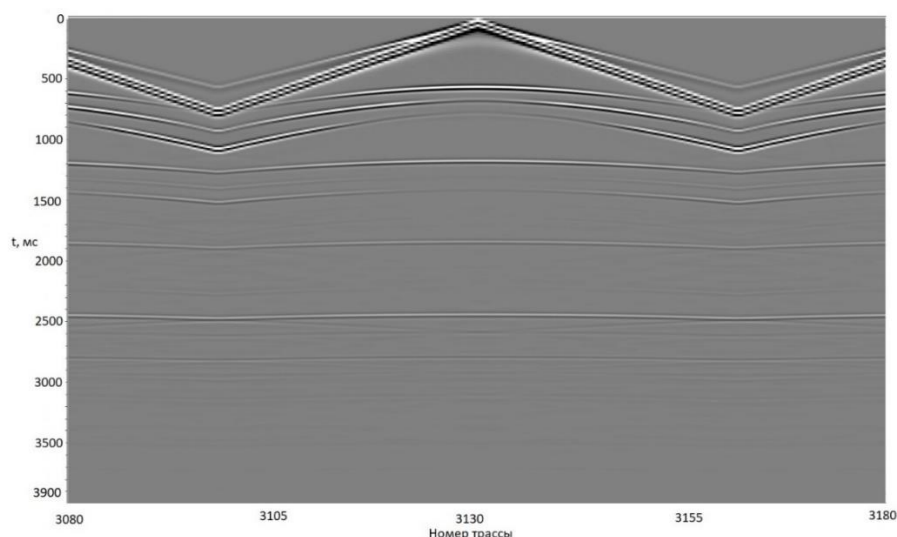


Рис. 4. Часть сейсмограммы

На рисунке 5 представлены карты, показывающие какие значения амплитудных вариаций принадлежат определенным пунктам приема и пунктам возбуждения.

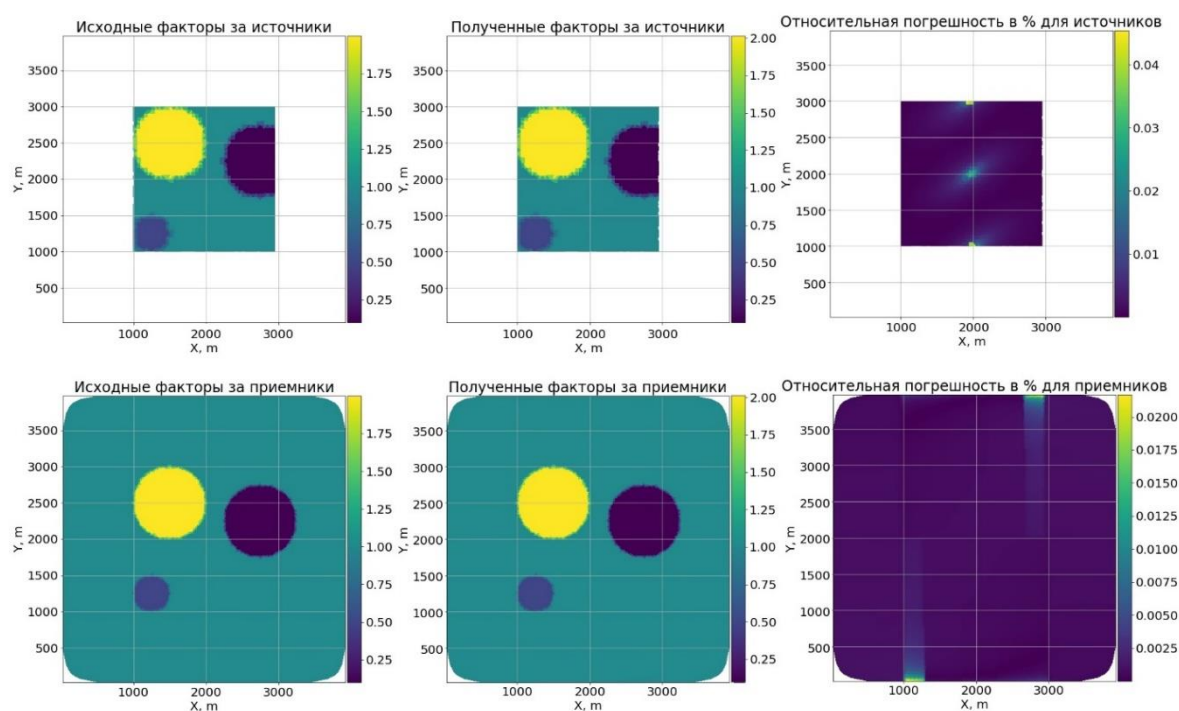


Рис. 5. Карты факторов и относительной погрешности

Такое моделирование имитирует некую основную приповерхностную геологическую среду (бирюзового цвета) с определенным уплотнением, внутри которой находятся некоторые геологические среды с большим и меньшим уплотнением. Внутренние среды имеют другую амплитудную вариацию за пункт приема и пункт возбуждения относительно основной геологической среды.

В синтетической модели неоднородности задавались только в областях возбуждения и приема сейсмических сигналов. Поскольку их влияние распространяется на всю сейсмическую запись, то вариации задавались путем домножения среднеквадратичной амплитуды всей трассы на

соответствующий фактор источника и приемника. Входными данными для анализа послужили среднеквадратичные амплитуды, рассчитанные для всех трасс, с введенными вариациями.

Затем полученные амплитуды логарифмировались. Таким образом получался вектор наблюдений Z . По системе наблюдения строилась двухфакторная матрица X , которая дополнялась априорной информацией за сотый источник. Так составлялась дополненная система линейных уравнений

$$\begin{cases} Z = X\theta \\ \ln(A_{100}) = \alpha_{100} \end{cases} \quad (15)$$

Затем находился вектор факторов. Система строилась относительно логарифмов амплитуд, а оценка качества проводилась на основе значений вариаций амплитуд, получаемых в результате потенцирования оценок фактора

$$\begin{aligned} Z_d &= X_d \theta, \\ X_d^T Z_d &= X_d^T X_d \theta, \\ \theta &= (X_d^T X_d)^{-1} X_d^T Z_d. \end{aligned} \quad (16)$$

$\text{Exp}(\theta)$ – полученные вариации амплитуд (см. рис. 5). Проверка точности решения проведена с помощью относительной погрешности

$$\delta = \frac{\alpha_{\text{апр}} - \alpha}{\alpha_{\text{апр}}} * 100 \%. \quad (17)$$

На картах относительной погрешности факторов, полученных за пункты возбуждения и пункты приема, видно, что относительные погрешности не превышают 0.04 % (см. рис. 5).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе был описан и протестирован алгоритм, позволяющий определить влияние неоднородностей верхней части разреза на условия возбуждения и приема сейсмических сигналов. Алгоритм основан на матричном разложении факторного представления большого объема сейсмических данных. Факторное представление позволяет сформировать систему линейных уравнений и записать ее в матричном виде. Матричный вид системы позволяет увязать между собой все сейсморазведочные наблюдения, что является полезным свойством при оценке длиннопериодных вариаций.

Сингулярное разложение позволило определить свойства получаемой матрицы и сделать вывод о вырожденности и неединственности решения обратной задачи. В ходе исследования был применен метод дополнения априорной информацией, который позволил избавиться от вырожденности и неоднозначного решения системы линейных уравнений.

Оценка на основе большого объема синтетических 3D данных, включающих более 10 миллионов наблюдений, показала высокую точность. Относительная погрешность оценки не превышает 0.04 %.

В дальнейшем планируется введение случайной составляющей и развитие алгоритма для факторных моделей большого порядка (3–5 факторов). Также планируется тестирование алгоритма в рамках задачи физического моделирования с 3D системой наблюдения. Неоднородности, влияющие на сейсмический сигнал, будут определяться свойствами физической модели. Полученные данные будут обработаны как описанным алгоритмом поверхностно-согласованной компенсации, так и алгоритмами из стандартных пакетов обработки сейсмических данных (G2, Promax).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Глоговский В.М., Хачатрян А.Р.** Коррекция статических поправок в сейсморазведке МОГТ на нефть и газ. – М.: ВНИИОЭНГ, 1986. – 306 с.
- Гольдин С.В., Митрофанов Г.М.** Восстановление формы сигнала при наличии поверхностных неоднородностей // Сейсмические методы поиска и разведки полезных ископаемых. – Киев: Знание, 1973. – С. 6–8.
- Гольдин С.В., Митрофанов Г.М.** Спектрально-статистический метод учета поверхностных неоднородностей в системах многократного прослеживания отраженных волн // Геология и геофизика. – 1975. – № 6. – С. 102–112.
- Гурвич И.И.** О теоретических основах динамических измерений в сейсморазведке // Изв. вузов. Геология и разведка. – 1970. – № 6. – С. 108–113.
- Давлетханов Р.Т.** Коррекция сейсмических записей за влияние верхней части разреза с сохранением кинематики отраженных волн, соответствующих пластовой модели среды: дис. ... канд. физ.-мат. наук: 25.00.10. – М.: МГУ, 2017.
- Митрофанов Г.М.** Учет поверхностных неоднородностей в методе ОГТ // Тезисы докладов X научной студенческой конференции (Геология. Геофизика. Геохимия). – Новосибирск: НГУ, 1972. – С. 44–45.
- Митрофанов Г.М.** Совместная оценка линейных факторов в системах наблюдений метода ОГТ // Применение методов вычислительной математики и математической статистики при цифровой обработке данных сейсморазведки. – Новосибирск: ИГиГ СО АН СССР, 1975. – С. 166–186.
- Сергиенко А.Б.** Цифровая обработка сигналов. – СПб.: БХВ-Петербург, 2011. – 787 с.
- Сысоев А.П.** Прикладные задачи компенсации неоднородности верхней части разреза при обработке и интерпретации сейсмических данных. – Новосибирск: ИНГГ им. А.А.Трофимука СО РАН, 2011. – 90 с.
- Bohlen T., De Nil D., Köhn D., Jetschny S.** SOFI3D-seismic modeling with finite differences 3D-acoustic and viscoelastic version: Users guide. – KIT, Karlsruhe, 2012.
- Booker A.H., Linville A.F., Wason C.B.** Long wavelength static estimation // Geophysics. – 1976. – Vol. 41 (5). – P. 939–959, doi: 10.1190/1.1440673.
- Fourier J.B.J.** Théorie analytique de la chaleur. – Firmin Didot, 1822.
- Taner M.T., Koehler F.** Surface consistent corrections // Geophysics. – 1981. – Vol. 46 (1). – P. 17–22, doi: 10.1190/1.1441133.
- Taner M.T., Koehler F., Alhilali K.A.** Estimation and correction of near-surface time anomalies // Geophysics. – 1974. – Vol. 39 (4). – P. 441–463, doi: 10.1190/1.1440441.
- Wiggins R.A., Lerner K.L., Wisecup R.D.** Residual statics analysis as a general linear inverse problem // Geophysics. – 1976. – Vol. 41 (5). – P. 922–938, doi: 10.1190/1.1440672.

REFERENCES

- Bohlen T., De Nil D., Köhn D., Jetschny S.** SOFI3D-seismic modeling with finite differences 3D-acoustic and viscoelastic version: Users guide. – KIT, Karlsruhe, 2012.
- Booker A.H., Linville A.F., Wason C.B.** Long wavelength static estimation // Geophysics. – 1976. – Vol. 41 (5). – P. 939–959, doi: 10.1190/1.1440673.

- Davletkhanov R.T.** Correction of seismic records for the influence of the upper part of the section with the preservation of the kinematics of reflected waves corresponding to the reservoir model of the medium. PhD Thes. [in Russian]. – MSU, Moscow, 2017.
- Fourier J.B.J.** Théorie analytique de la chaleur. – Firmin Didot, 1822.
- Glogovsky V.M., Khachatryan A.R.** Correction of static corrections in CDP seismic exploration for oil and gas [in Russian]. – VNIIOENG, Moscow, 1986.
- Goldin S.V., Mitrofanov G.M.** Reconstruction of the signal shape in the presence of surface inhomogeneities. // Seismic methods of prospecting and exploration of minerals [in Russian]. – Znanie, Kiev, 1973. – P. 6–8.
- Goldin S.V., Mitrofanov G.M.** Spectral-statistical method for accounting for surface inhomogeneities in systems for multiple tracking of reflected waves // Soviet Geology and Geophysics. – 1975. – No. 6. – P. 102–112.
- Gurvich I.I.** On the theoretical foundations of dynamic measurements in seismic exploration. Izvestiya Vuzov. Geologiya i Razvedka. – 1970. – No. 6. – P. 108–113.
- Mitrofanov G.M.** Accounting for surface inhomogeneities in the CDP method // Abstracts of the X scientific student conference (Geology. Geophysics. Geochemistry). – NSU, Novosibirsk, 1972. – P. 44–45.
- Mitrofanov G.M.** Joint estimation of linear factors in CDP observation systems // Application of methods of computational mathematics and mathematical statistics in digital processing of seismic survey data. – IGI, Novosibirsk, 1975. – P. 166–186.
- Sergienko A.B.** Digital signal processing [in Russian]. – BHV-Petersburg, St. Petersburg, 2011.
- Sysoev A.P.** Applied problems of compensating for the heterogeneity of the upper part of the section in the processing and interpretation of seismic data [in Russian]. – INGG SB RAS, Novosibirsk, 2011.
- Taner M.T., Koehler F.** Surface consistent corrections // Geophysics. – 1981. – Vol. 46 (1). – P. 17–22, doi: 10.1190/1.1441133.
- Taner M.T., Koehler F., Alhilali K.A.** Estimation and correction of near-surface time anomalies // Geophysics. – 1974. – Vol. 39 (4). – P. 441–463, doi: 10.1190/1.1440441.
- Wiggins R.A., Lerner K.L., Wisecup R.D.** Residual statics analysis as a general linear inverse problem // Geophysics. – 1976. – Vol. 41 (5). – P. 922–938, doi: 10.1190/1.1440672.

КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

КУШНАРЕВ Роман Сергеевич – студент НГУ, лаборант лаборатории динамических проблем сейсмики Института нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН. Основные научные интересы: исследование систем линейных уравнений в задачах обработки геофизических данных.

ГОРЕЯВЧЕВ Никита Алексеевич – младший научный сотрудник лаборатории динамических проблем сейсмики Института нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН. Основные научные интересы: методы повышения эффективности обработки геофизических данных.

МИТРОФАНОВ Георгий Михайлович – доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории динамических проблем сейсмики Института нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН. Основные научные интересы: обработка и интерпретация геофизических данных, методы решения обратных задач.

*Статья поступила в редакцию 29 августа 2021 г.,
принята к публикации 27 декабря 2021 г.*