

УДК 550.3

DOI: 10.52531/1682-1696-2024-24-1-20-24

Научная статья

ОПЫТ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ДЕКОНВОЛЮЦИИ В ИНЖЕНЕРНОЙ СЕЙСМОРАЗВЕДКЕ

В.В. Романов, А.А. ИвановРОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ГЕОЛОГОРАЗВЕДОЧНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИМЕНИ СЕРГО ОРДЖОНИКИДЗЕ, МОСКВА,
РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

В статье приводится обоснование возможности применения деконволюции в инженерной сейсморазведке с целью выделения неглубоких границ и слоев небольшой мощности, например кровли скальных грунтов, прослеживании уровня грунтовых вод, выделении проявлений карстово-суффозионного процесса. Несмотря на несколько скептическое отношение геофизиков в области малоглубинных исследований к некоторым стандартным процедурам обработки нефтегазовой сейсморазведки, деконволюция может применяться при исследовании малых глубин без каких-то специальных условий. В статье этот тезис доказывается на примере подборки достаточно разнородного по качеству материала.

Ключевые слова: инженерная сейсморазведка, метод отраженных волн, обратная фильтрация, деконволюция

ВВЕДЕНИЕ

В середине прошлого века сейсморазведка стала активно применяться на акваториях, где резкие отражающие границы «вода–воздух» и «вода–дно» создавали множество интенсивных кратных волн–помех [2]. В инженерной сейсморазведке основными кратнопобуждающими границами являются поверхность Земли, кровля скальных [12], многолетнемерзлых и водонасыщенных дисперсных грунтов [7], подошва приповерхностного слоя повышенной скорости [5]. Наибольшее влияние перечисленные границы оказывают на результаты сейсморазведки при глубине залегания до 10 м. Кроме большого количества кратных волн, при исследовании верхней части разреза сейсморазведкой, значительное влияние оказывает нелинейность грунтов [4], благодаря чему импульсы сейсмических волн растягиваются и падает разрешающая способность.

© 2024, В.В. Романов, А.А. Иванов
Поступила в редакцию 15.10.2023

Original article

EXPERIENCE OF USING DECONVOLUTION IN ENGINEERING SEISMIC EXPLORATION

V.V. Romanov, A.A. IvanovSERGO ORDZHONIKIDZE RUSSIAN STATE
UNIVERSITY FOR GEOLOGICAL PROSPECTING,
MOSCOW, RUSSIAN FEDERATION

The article provides a rationale for the possibility of using deconvolution in engineering seismic exploration in order to identify shallow boundaries and layers of low thickness, for example, the roof of rocky soils, tracking groundwater levels, and identifying manifestations of the karst-suffusion process. Despite the somewhat skeptical attitude of geophysicists in the field of shallow-depth studies to some standard procedures for processing oil and gas seismic exploration, deconvolution can be applied to the study of shallow depths without any special conditions. In the article, this thesis is proven using the example of a selection of sufficiently heterogeneous in quality surveys.

KEYWORDS: engineering seismic exploration, reflected wave method, reverse filtration, deconvolution

Эффективным способом компенсации сжатия импульсов волн стали предложенные Э.А. Робинсоном алгоритмы обратной фильтрации, применение которых называется деконволюцией [3, 11, 16, 18]. Основная идея деконволюции – уменьшение длительности сигнала за счет подавления его побочных экстремумов (рис. 1).

В основном применяются, выделяются два алгоритма обратной фильтрации — деконволюция сжатия и предсказывающая деконволюция. Деконволюция сжатия (spiking deconvolution) основана на приведении импульсов сейсмических волн к бесконечно короткому всплеску — дельта-импульсу. На практике деконволюция сжатия просто уменьшает длину импульса. Предсказывающая деконволюция (predictive deconvolution) также применяется для сокращения сейсмических импульсов за счет вычитания спрогнозированных значений в «хвосте» импульса [20]. Важным параметром предсказывающей деконволюции является интервал предсказания α — количество отсчетов, на которое прогнозируются значения импульса. С увеличением интервала предсказания растёт

устойчивость обратной фильтрации к случайным колебаниям, но уменьшается степень сжатия импульсов (рис. 2). Если интервал предсказания выбрать равным единице, то действие обоих алгоритмов будет одинаковым. За счет возможности управлять параметром предсказания, предсказывающая деконволюция имеет большую гибкость настройки, ее результаты более устойчивы к уровню обрабатываемых данных [15].

В наземной инженерной сейсмозазведке форма импульса до проведения полевого эксперимента обычно неизвестна, поэтому оператор обратного фильтра вычисляется на основе значений автокорреляционной функции (АКФ), определяемой по самим сейсмическим данным [6].

Целью работы является обобщение опыта по эффективному применению деконволюции при обработке данных методов отраженных и преломленных волн инженерной сейсмозазведки. С этой целью алгоритмы деконволюции были адаптированы для системы обработки SeisShall (разработчик В.В. Романов, Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2016613644, 01.04.2016.) и апробированы на большом количестве полевых сейсмических данных, полученных в Московском регионе.

МЕТОДИКА ОБРАБОТКИ И ПОЛУЧЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Так как эффективность деконволюции во многом зависит от уровня сейсмического шума в исходных данных [19], для тестирования выбирались записи

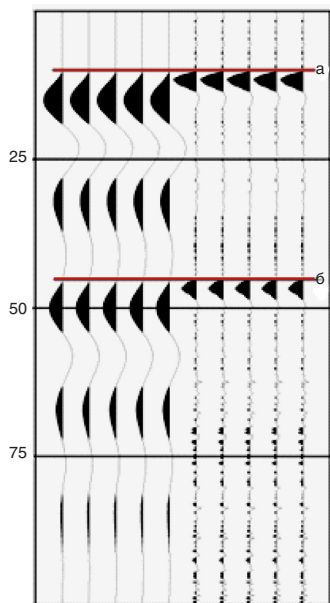


РИС. 1.

Сжатие импульсов сейсмических волн деконволюцией на примере модельных данных, полученных авторами. Первые 5 трасс – исходные, последующие – обработанные. По вертикальной оси – время вступления, мс; по горизонтальной – номер трассы. а, б – вступления волн

с достаточно высоким уровнем полезных регулярных волн. К таким волнам относились однократные и кратные отражения, а также преломленные волны, сформированные на резких сейсмических границах. На территории Московского региона — это уровень грунтовых вод для продольных волн, кровля каменноугольных, реже юрских отложений, при использовании поперечных волн. После регулировки амплитуд и полосовой фильтрации рассчитывалась автокорреляционная функция сейсмограмм и вычислялся оператор обратного фильтра [1]. Длина оператора фильтра ЛОП выбиралась равной длине импульса (60–120 мс), а интервал предсказания $\alpha=1-5$ отсчетов, выбор конкретных оптимальных значений осуществлялся путем анализа результатов обработки. Наилучшим считался набор параметров, обеспечивающих максимальное сжатие импульсов и минимальный уровень шума после деконволюции. На рисунке 3 показаны результаты тестирования параметров деконволюции. Разделение двух отраженных волн, приуроченных к каменноугольным отложениям, стало возможным только после выполненной предсказывающей деконволюции с правильно выбранными параметрами. Приведенный пример показывает важность применения деконволюции при обработке данных метода отраженных для решения задач поиска и разделения целевых волн [8].

Также деконволюция продемонстрировала свои возможности при обработке данных в вертикальном сейсмическом профилировании (ВСП) [9], где за счет сжатия импульсов повышалась точность корреляции и улучшалось прослеживание волн в последующих вступлениях [17], в первую очередь – отраженных. На рисунке 4 представлены результаты деконволюции данных ВСП, полученные по схеме наблюдений Y-Y, оптимальной для возбуждения и регистрации поперечных волн [10], на востоке Москвы. На необработанных данных в области последующих вступлений наблюдаются длительные паразитные колебания, вызванные плохим прижимом зонда ВСП к обсадке

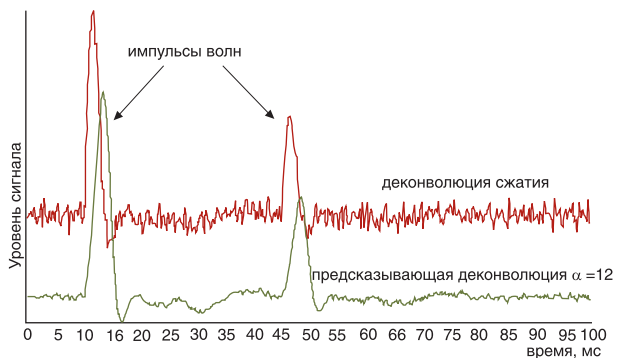


РИС. 2.

Сравнение действия двух видов деконволюции на примере модельных данных, полученных авторами

скважины или(и) обсадной колонны к горным породам [14]. Для подавления подобных мешающих колебаний длина оператора обратного фильтра увеличилась до 120–200 мс. После деконволюции уровень паразитных колебаний уменьшился.

Деконволюция применялась также при обработке уже сформированных сейсмических изображений – временных разрезов методов отраженных и преломленных волн. На просуммированных трассах форма импульса отличается большей стабильностью, поэтому обратная фильтрация на этом этапе обработки более эффективна, чем до суммирования [13]. На рисунке 5 показано применение деконволюции к временному разрезу метода отраженных волн. Разрез был получен на площадке в районе метро Шелепиха (Москва), выделенная отражающая граница приурочена к кровле каменноугольных известняков касимовского яруса. За счет сжатия импульсов была уточнена форма отражения, было выделено больше мелких деталей в рельефе границы.

ВЫВОДЫ

В результате анализа полученных результатов удалось доказать высокую эффективность включения предсказывающей деконволюции в граф обработки данных инженерной сейсморазведки. Благодаря сжатию импульсов повышается надежность выделения волн на сейсмических записях и определения их типа, точность определения времени вступления и скорости волн, глубин прослеживаемых границ. Данный алгоритм обработки рекомендуется применять при обработке данных метода отраженных волн и вертикального сейсмического профилирования.

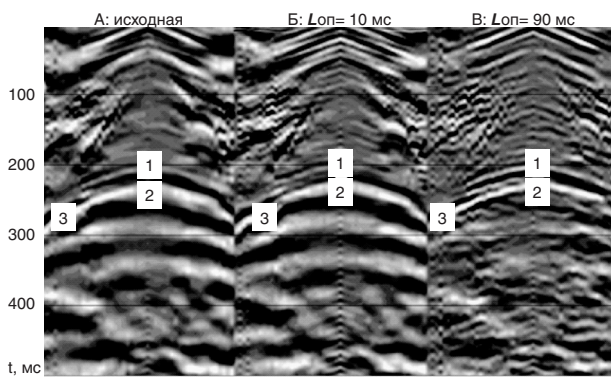


Рис. 3.

Сжатие импульсов сейсмических волн деконволюцией на примере полевых данных метода отраженных волн, полученных авторами в районе метро Таганская (Москва) в зимнее время. А – исходная сейсмограмма, Б – после предсказывающей деконволюции (длина оператора 10 мс, интервал предсказания – 1 отсчет), В – после предсказывающей деконволюции (длина оператора 90 мс, интервал предсказания – 1 отсчет) По горизонтали отложено удаление, м; по вертикали – время вступления, мс; 1 – первая отраженная волна, 2 – вторая отраженная волна, 3 – дифрагированная волна

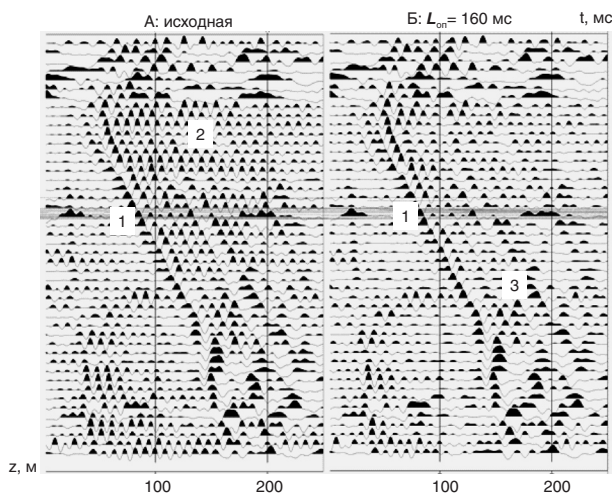


Рис. 4.

Сжатие импульсов сейсмических волн деконволюцией на примере полевых данных ВСП (поперечные волны), полученных на северо-востоке Москвы. А – исходная сейсмограмма, Б – после предсказывающей деконволюции (длина оператора 160 мс, интервал предсказания – 1 отсчет). По горизонтали отложено время вступления, мс; по вертикали – глубина, м; 1 – прямая волна, 2 – паразитные резонансные колебания, 3 – отраженные волны

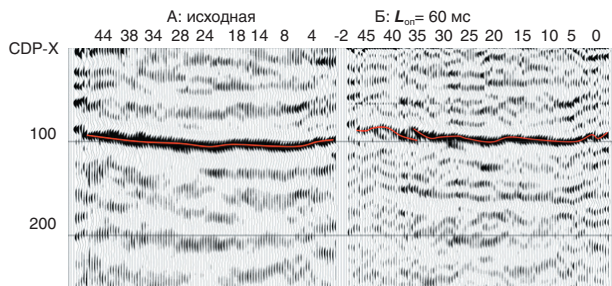


Рис. 5.

Сжатие импульсов сейсмических волн деконволюцией на примере временных разрезов метода отраженных волн (поперечные волны), полученных в районе метро Шелепиха (Москва) на асфальтовом покрытии. А – исходный разрез, Б – после предсказывающей деконволюции (длина оператора 60 мс, интервал предсказания – 1 отсчет). По горизонтали отложены координаты пунктов профиля, по вертикали – время вступления, мс, красной линией показано отражение от кровли известняков касимовского яруса

ЛИТЕРАТУРА

1. Белоусов А.В., Сергеев К.С. Особенности обработки данных инженерной сейсморазведки // Теория и практика разведочной и промысловой геофизики. 2015. С. 16–18.
2. Бондаренко В.И., Рашидов В.А. Строение вулканического массива Ушишир (центральные Курилы) // Вулканология и сейсмология. 2018. № 1. С. 18–34. DOI 10.7868/S0203030618010029. EDN YOFVLE.
3. Верпаховская А.О. Эффективность обработки данных морской сейсморазведки с применением

- конечно-разностной миграции // Геология и полезные ископаемые мирового океана. 2017. № 3 (49). С. 73–85.
4. **Владов М.Л., Капустин В.В.** О проблемах инженерной сейсморазведки // Технологии сейсморазведки. 2014. № 2. С. 104–112. EDN STFSUT.
 5. **Гинодман А.Г., Гранит Б.А.** Инженерно-геофизические исследования карста на территории Москвы и московского региона методом многоволновой сейсморазведки // Вестник МГСУ. 2010. № 4–2. С. 120–127.
 6. **Копчиков А.В., Баев А.В., Табаков А.А.** Метод решения обратной динамической задачи ВСП с применением автокорреляционных функций // Технологии сейсморазведки. 2004. №1.
 7. **Крылатков С.М., Крылаткова Н.А., Нещеткин О.Б.** Исследование карстоопасных участков железных дорог с помощью сейсморазведки // Известия Уральского государственного горного университета. 2003. № 18. С. 177–185.
 8. **Ли В.О., Владов М.Л.** Анализ эффективности 2D сейсморазведки методом ОГТ при изучении приповерхностной части разреза // Вестник Московского университета. 2012. № 3. Серия 4: Геология. С. 52–60.
 9. **Ошкин А.Н., Хуснуллина Г.Ф.** Возможности и перспективы сейсмоакустических исследований скважин // Технологии сейсморазведки. 2015. Т. 1. С. 92–98.
 10. **Рагозин Н.А., Миндель И.Г., Трифонов Б.А.** Опыт сравнения программ обработки данных МОВ-ОГТ // 6th EAGE International Scientific and Practical Conference and Exhibition on Engineering and Mining Geophysics. European Association of Geoscientists & Engineers, 2010. С. ср-193-00051.
 11. **Романов В.В., Иванов А.А., Матюшенко А.А.** Опыт обратной фильтрации данных георадиолокации, полученных при исследовании автодорог / Инженерная сейсморазведка и сейсмология-2020. Георадар-2020. Теперь вместе: сборник тезисов научно-практической конференции, Москва, 16–22 октября 2020 г. Институт криосферы Земли ТюмНЦ СО РАН. М.: Издательский Дом «Академия Естественных наук», 2020. С. 25–29.
 12. **Романов В.В., Шнейерсон М.Б.** Инженерная сейсморазведка методом отраженных волн в Москве // Геофизика. 2018. № 6. С. 75–81. EDN SRACOD.
 13. **Холмянская Н.Ю.** Оптимизация методики обработки сейсморазведочных данных МОГТ с целью изучения верхнеюрских отложений Широкого Приобья // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. 2001. № 7. С. 42–49. EDN HZMWMB.
 14. **Шехтман Г.А., Нарский Н.В.** Факторы, влияющие на качество данных вертикального сейсмического профилирования // Технологии сейсморазведки. 2011. № 2. С. 59–69.
 15. **JURKEVICIS A., WIGGINS R.** A critique of seismic deconvolution methods // Geophysics. 1984. Vol. 49. № 12. P. 2109–2116.
 16. **SILVIA M.T., ROBINSON E.A.** Deconvolution of Geophysical Time Series in the Exploration for Oil and Natural Gas. Developments in petroleum science. 10. Amsterdam: Elsevier. 1957. 251 p.
 17. **KENNETT P., IRESOON R.L., CONN P.J.** Vertical seismic profiles: Their applications in exploration geophysics // Geophysical Prospecting. 1980. Vol. 28. № 5. P. 676–699.
 18. **MILLER R.D., BRADFORD J.H., HOLLIGER K. ET AL.** Advances in near-surface seismology and ground-penetrating radar. Society of Exploration Geophysicists, American Geophysical Union, Environmental and Engineering Geophysical Society, 2010.
 19. **POLOM U. ET AL.** High-resolution SH-wave seismic reflection for characterization of onshore ground conditions in the Trondheim harbor, central Norway // Advances in near-surface seismology and ground-penetrating radar. Society of Exploration Geophysicists, American Geophysical Union, Environmental and Engineering Geophysical Society, 2010. P. 297–312.
 20. **Yilmaz Ö** Seismic data analysis: Processing, inversion, and interpretation of seismic data. Society of exploration geophysicists, 2001.

REFERENCES

1. **BELOUSOV A.V., SERGEEV K.S.** Features of engineering seismic data processing. *Teoriya i praktika razvedochnoy i promyslovoy geofiziki*. 2015:16–18. (In Russian).
2. **BONDARENKO V.I., RASHIDOV V.A.** Structure of the Ushishir volcanic massif (central Kuriles). *Vulkanologiya i seismologiya*. 2018;1:18–34. DOI 10.7868/S0203030618010029. EDN YOFVLE. (In Russian).
3. **VERPAKHOVSKAYA A.O.** Efficiency of processing marine seismic data using finite-difference migration. *Vulkanologiya i seismologiya*. 2017;3;(49):73–85. (In Russian).
4. **VLADOV M.L., KAPUSTIN V.V.** On the problems of engineering seismic exploration. *Tekhnologii seysmorazvedki*. 2014;2:104–112. (In Russian).
5. **GINODMAN A.G., GRANIT B.A.** Engineering-geophysical studies of karst on the territory of Moscow and the Moscow region using the method of multi-wave seismic exploration. *Vestnik MGSU*. 2010;4–2:120–127. (In Russian).
6. **KOPCHIKOV A.V., BAEV A.V., TABAKOV A.A.** Method for solving the inverse dynamic VSP problem using autocorrelation functions. *Tekhnologii seysmorazvedki*. 2004;1. (In Russian).
7. **KRYLATKOV S.M., KRYLATKOVA N.A., NESHCHETKIN O.B.** Study of karst-hazardous sections of railways using seismic exploration. *Izvestiya*

- Ural'skogo gosudarstvennogo gornogo universiteta.* 2003;18:177–185. (In Russian).
8. LEE V.O., VLADOV M.L. Analysis of the effectiveness of 2D seismic exploration using the CDP method when studying the near-surface part of the section. *Vestnik Moskovskogo universiteta. Geologiya.* 2012;3;4:52–60. EDN PCXNXD. (In Russian).
 9. OSHKIN A.N., KHUSNULLINA G.F. Possibilities and prospects of seismoacoustic well research. *Tekhnologii seysmorazvedki.* 2015;1:92–98. (In Russian).
 10. RAGOZIN N.A., MINDEL I.G., TRIFONOV B.A. Experience in comparing MOV-CDP data processing programs. *6th EAGE International Scientific and Practical Conference and Exhibition on Engineering and Mining Geophysics. European Association of Geoscientists & Engineers.* 2010:cp-193-00051. (In Russian).
 11. ROMANOV V.V., IVANOV A.A., MATYUSHENKO A.A. Experience of reverse filtering of ground penetrating radar data obtained during the study of highways. Engineering seismic exploration and seismology-2020. GPR 2020. Now together: collection of abstracts of a scientific and practical conference, Moscow, October 16–22, 2020. Institute of the Earth's Cryosphere of the Tyumen Scientific Center SB RAS. Moscow: Izdatel'skiy Dom «Akademiya Yestestvoznaniya». 2020:25–29. (In Russian).
 12. ROMANOV V.V., SHNEERSON M.B. Engineering seismic exploration using the reflected wave method in Moscow. *Geophysica.* 2018;6:75–81. (In Russian).
 13. KHOLMYANSKAYA N.YU. Optimization of the methodology for processing CDP seismic data for the purpose of studying the Upper Jurassic deposits of the latitudinal Ob region. *Geologiya, geofizika i razrabotka neftyanykh i gazovykh mestorozhdeniy.* 2001;7:42–49. (In Russian).
 14. SHEKHTMAN G.A., NARSKY N.V. Factors influencing the quality of vertical seismic profiling data. *Tekhnologii seysmorazvedki.* 2011;2:59–69. (In Russian).
 15. JURKEVICS A., WIGGINS R. A critique of seismic deconvolution methods. *Geophysics.* 1984;49;12:2109–2116.
 16. SILVIA M.T., ROBINSON E.A. Deconvolution of Geophysical Time Series in the Exploration for Oil and Natural Gas. *Developments in petroleum science.* 10. Amsterdam: Elsevier. 1957:251.
 17. KENNETT P., IRESON R.L., CONN P.J. Vertical seismic profiles: Their applications in exploration geophysics. *Geophysical Prospecting.* 1980;28;5:676–699.
 18. MILLER R.D., BRADFORD J.H., HOLLIGER K. ET AL. Advances in near-surface seismology and ground-penetrating radar. Society of Exploration Geophysicists, American Geophysical Union, Environmental and Engineering Geophysical Society, 2010.
 19. POLOM U. ET AL. High-resolution SH-wave seismic reflection for characterization of onshore ground conditions in the Trondheim harbor, central Norway. *Advances in near-surface seismology and ground-penetrating radar.* Society of Exploration Geophysicists, American Geophysical Union, Environmental and Engineering Geophysical Society, 2010:297–312.
 20. Yilmaz Ö Seismic data analysis: Processing, inversion, and interpretation of seismic data. Society of exploration geophysicists. 2001.

Романов Виктор Валерьевич,
к.т.н., доцент кафедры геофизики Российского государственного геологоразведочного университета имени Серго Орджоникидзе (МГРИ)

Иванов Андрей Александрович,
к.г.-м.н., доцент кафедры геофизики Российского государственного геологоразведочного университета имени Серго Орджоникидзе (МГРИ)

☎ 117997, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 23,
тел.: +7 (495) 433-62-56, доб. 2152
117997, Moscow, Miklouho-Maclay St., 23