

Опыт адаптивной фильтрации данных георадиолокации и сейсморазведки

- Романов В.В., РГУ нефти и газа (НИУ) им. И.М. Губкина, г. Москва.
- Алтухов Е.Е., Латышев К.А., РГГРУ им. Серго Орджоникидзе, г. Москва.
- Кауркин М.Д., Институт геоэкологии им. Е.М. Сергеева РАН, к.т.н., г. Москва.

Аннотация: Статья посвящена анализу коррелируемой помеховой компоненты радарограмм и подавлению её стохастической адаптивной фильтрацией. Созданный алгоритм вычитания помех опробован на полевых данных георадиолокации и инженерной сейсморазведки.

Ключевые слова: георадиолокация, инженерная сейсморазведка, адаптивная фильтрация.

Введение

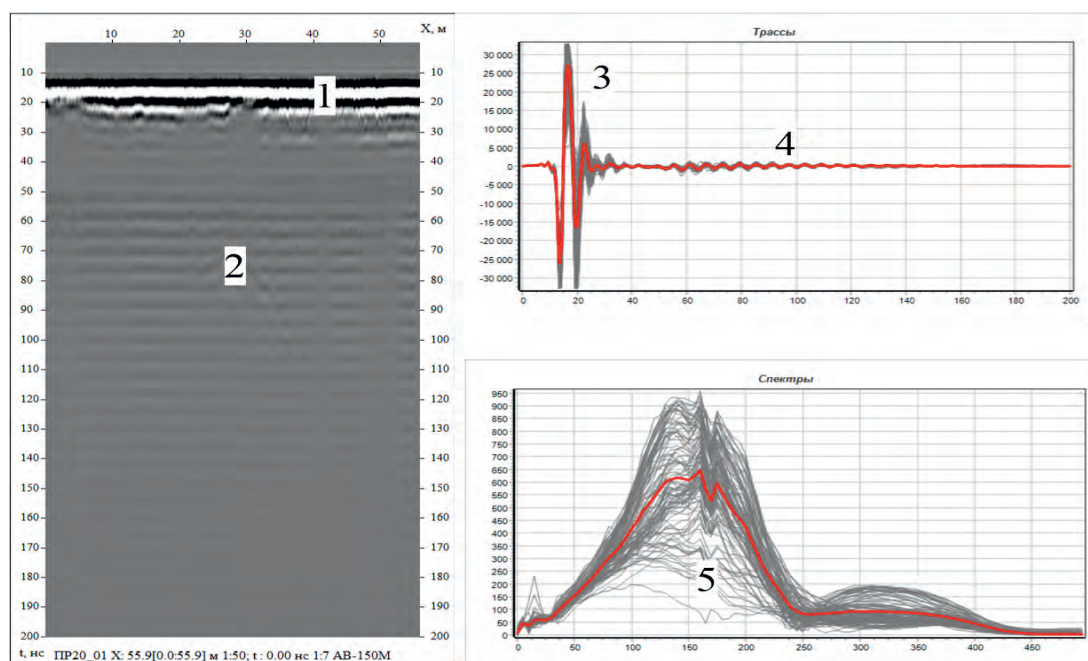
В георадиолокации, как и в любом другом методе геофизики, существенную проблему составляют регулярные и случайные помехи. Особенно сильно влияние помех при работах в крупных городах и промышленных зонах, где в верхней части разреза преобладают неоднородные техногенные грунты, проходит большое количество подземных коммуникаций, изменены гидрогеологические условия, велик уровень

электромагнитных полей и воздушных отражённых волн. Часть помех, наблюдаемых на радарограммах, порождается антенным блоком [Набатов, 2014] георадара, включающим излучающее и приёмное устройства, как правило расположенные на жёсткой базе.

В первую очередь это прямая волна, наблюдаемая в первых вступлениях и обладающая амплитудой, на порядок превышающей уровень всех прочих волн (Рисунок 1). Импульс прямой волны

▼ **Рис. 1.** Исходная радарограмма (Георадар ОКО–3, АБ-150), её трассы во временном и спектральном представлении.

1— прямая волна (сигнал прямого прохождения), 2— вторичная волна, 3— сигнал прямой волны, 4 — колебания последующих волн, 5— пик на центральной частоте антенного блока 150 МГц.



занимает заметную часть радарограммы, его высокая длительность во многом определяется интерференционной природой. Прямая волна формируется наложением колебаний воздушной прямой волны (direct signal, direct air wave) и прямой грунтовой волны (direct ground wave). Если первая из прямых волн распространяется в относительно однородной и слабопоглощающей среде по прямолинейной траектории, то скорость и глубина проникновения грунтовой волны зависит от свойств приповерхностной части разреза, которые непрерывно меняются в пространстве [Galagedara et al., 2003]. Колебания прямой волны складываются с сигналами полезных волн, сформированными дифракторами и рефлекторами верхней части разреза, что приводит пропуску малоглубинных объектов на радарограммах. На радарограммах прямая волна имеет центральную частоту, приближённо равную частоте антенного блока (Рисунок 1).

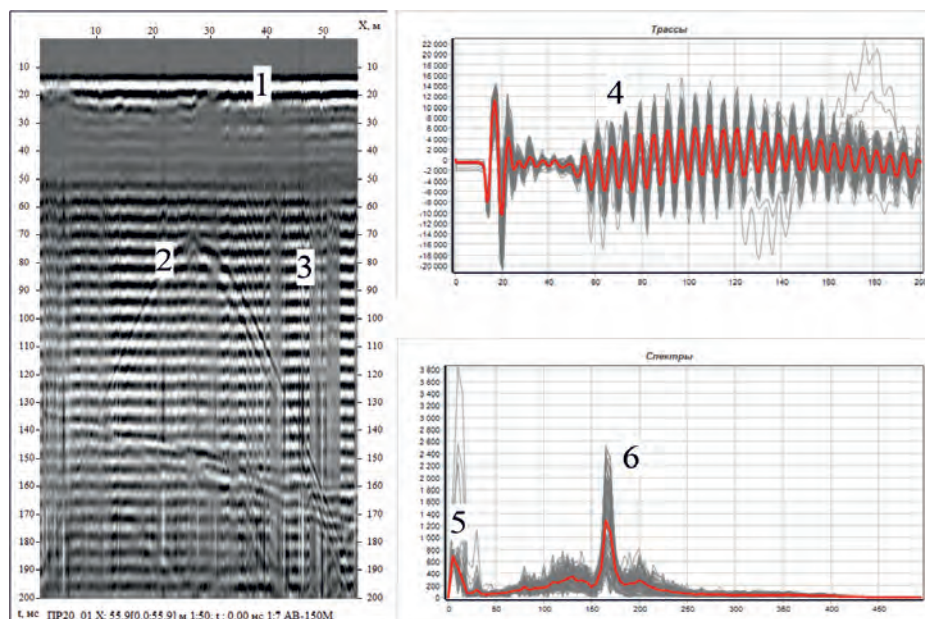
Резкое различие уровня и спектраль-

но-корреляционных характеристик прямой и последующих волн указывает на то, что их следует рассматривать как две компоненты наблюдаемого электромагнитного поля [Kadioglu, Daniels, 2010]. Без подавления или ослабления прямой волны некорректной становится обработка колебаний последующих волн. Одной из процедур обработки георадиолокации, направленной на выравнивание уровней компонент наблюдаемого поля, является коррекция амплитуд. При реализации коррекции отсчёты трасс радарограммы умножаются на кривую усиления, изменяющуюся во времени по экспоненциальному, степенному или линейному закону. Параметры уравнения кривой выбираются постоянным для всей записи, результатом работы процедуры становится уменьшение динамического диапазона радарограммы за счёт ослабления прямой волны и усиления слабых последующих волн.

На рисунке 2 показан результат применения степенной кривой усиления с показателем $n=2$. После коррекции

▼ **Рис.2 Радарограмма после применения степенной программной коррекции амплитуд (показатель кривой усиления $n=2$), Георадар ОКО-3, АБ-150.**

1— прямая волна (сигнал прямого прохождения), 2— вторичная волна, 3— неоднородные волны, 4 — колебания последующих волн, 5—низкочастотный пик, 6— высокочастотный пик



амплитуд в спектре радарограмм проявляются два узких пика — низко и высокочастотный. В области последующих вступлений узкополосные колебания (“звон”) имеют форму амплитудно-модулированного сигнала, соответствующего явлению биения (Рисунок 2). Например, для антенного блока АБ–150 МГц часто наблюдаются пики 5 и 170 МГц, что соответствует интерференции двух гармонических колебаний с частотами 165 и 175 МГц, что немного превышает центральную частоту блока.

В работе [Капустин, 2011] подобные квазигармонические колебания связываются с поверхностными электромагнитными волнами. Если угол падения электромагнитной волны превышает критический угол (полного внутреннего отражения), то угол преломления становится комплексным, образуется неоднородная поверхностная волна. Они наблюдаются на нижних границах объектов с повышенной скоростью электромагнитных волн, например бетонных плит, техногенного покрытия, сезонно-мёрзлого слоя [Ермаков и др., 2012], фундаментов зданий и сооружений. На радарограммах поверхностные волны выделяются как субгоризонтальные оси синфазности.

Протяжённые зоны колебаний поверхностных волн характерны для низкочастотных антенных блоков, когда глубина нижней кромки порождающих их объектов меньше базы блока. На рисунке 3 продемонстрирована запись, полученная по стадиону, где искусственное покрытие располагалось на бетонном основании. Бетонные плиты прослеживаются по характерному рисунку волнового поля, включающие множество выраженных параллельных осей синфазности.

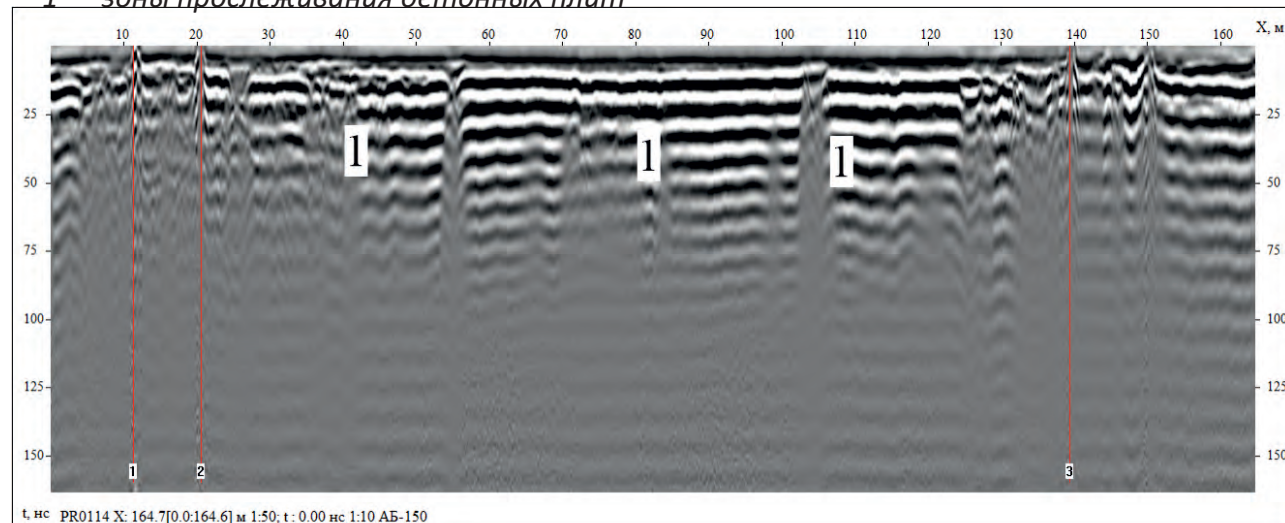
Адаптивное вычитание коррелируемых помех

Для подавления протяжённых колебаний прямой и последующих волн был разработан алгоритм вычитания, основанный на адаптивной стохастической фильтрации. Для применения стохастической адаптивной фильтрации не требуется знание формы импульса волн, что определяет широкие возможности такой фильтрации, в случае если сигнал неизвестен и(или) меняется в пределах радарограммы [Колесников и др., 2005].

Основная идея адаптивного вычитания в предположении, что помеха коррелирована и её уровень превышает

▼ Рис.3. “Звон” на радарограмме.

1 — зоны прослеживания бетонных плит



амплитуды прямой и последующих волн. Тогда представляется возможность выделить её на трассах оптимальным фильтром воспроизведения [Jeng Y. et al., 2009] и вычесть из исходных данных. В роли сигнала тут выступает коррелируемая узкополосная помеха (“звон” различного генезиса), а полезные волны — подавляемый некоррелируемый шум. Ожидаемо, что результатом воздействия такого фильтра будет расширение спектра трассы и увеличение шумовой компоненты, что близко к свойствам обратной фильтрации.

Стадии реализации алгоритма следующие:

1) Уменьшение уровня прямой волны программной коррекцией по степенной кривой усиления. Показатель степени подбирается в диапазоне 1,5–2,5.

2) Вычисление комплексных спек-

тров трасс S быстрым преобразованием Фурье.

3) Расчёт энергетических спектров трасс умножением комплексных амплитуд на комплексно-сопряжённые значения. Предполагается, что энергетический спектр трассы близок к энергетическому спектру помехи.

$$W = |S|^2 = S \cdot S^*$$

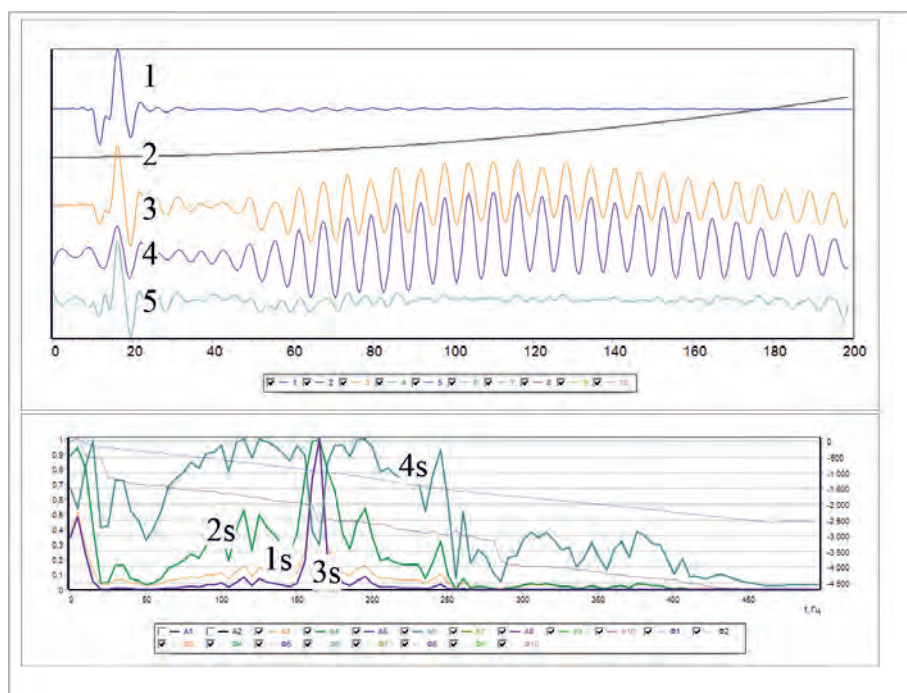
4) Вычисление частотной характеристики адаптивного фильтра воспроизведения (b — стабилизирующий коэффициент, с его уменьшением растёт доля белого шума в результате фильтрации, оптимальные значения 0,05–0,20).

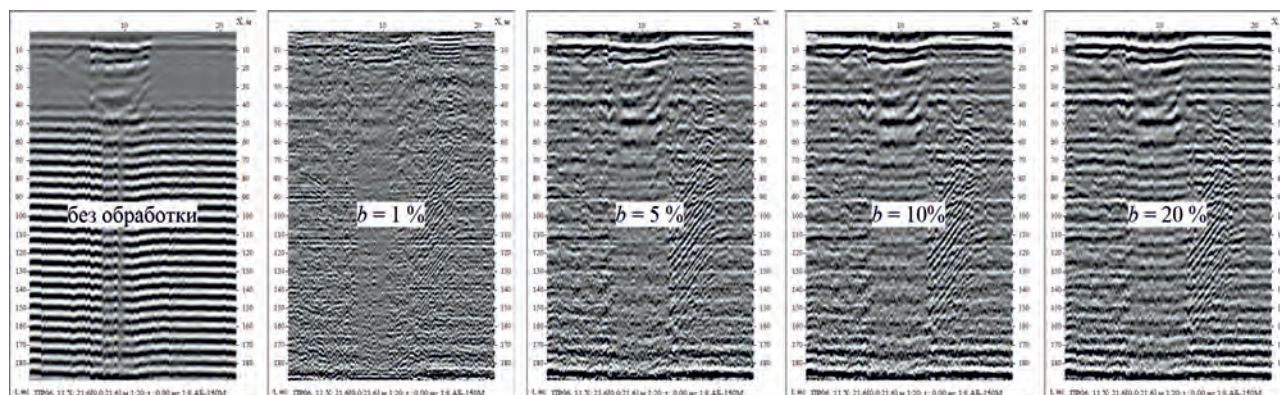
$$W' = \frac{W}{W_{max}}$$

$$H_B = \frac{W'}{W' + b^2}$$

▼ Рис. 4. Результат применения адаптивного вычитания коррелируемой помехи из трассы радарограммы, Георадар ОКО–3, АБ-150.

1— исходная трасса, 2— степенной закон усиления ($n = 2$), 3— трасса после коррекции амплитуд, 4 — результат оптимальной фильтрации ($b = 0,15$), 5— разность исходной и профильтрованной трассы, 1s — спектр трассы после коррекции амплитуд, 2s — частотная характеристика фильтра воспроизведения, 3s— спектр профильтрованной трассы, 4s — спектр результата применения адаптивного вычитания.





▲ Рис. 5. Анализ влияния выбора стабилизирующего коэффициента b на результаты адаптивного вычитания, Георадар ОКО–3, АБ-150.

5) Умножение спектра трассы на частотную характеристику фильтра.

6) Обратное преобразование Фурье.

7) Вычитание из исходной трассы обработанной.

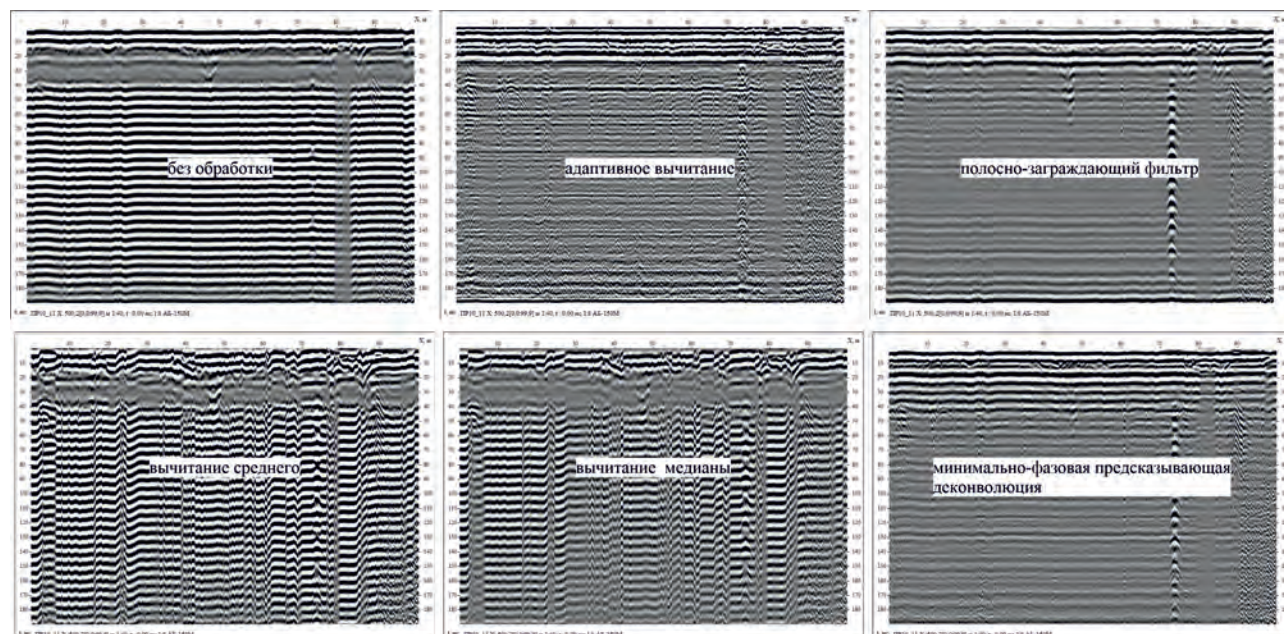
При реализации адаптивного вычитания обработчик подбирает только два параметра — показатель степенного закона усиления и стабилизирующий коэффициент фильтра. На рисунке 4 показано применение алгоритма адаптивного вычитания. В результате применения алгоритма звон был существенно подавлен, а спектр трассы расширился в область нижних и верхних частот, что характерно для обратной фильтрации [Романов, Иванов, 2024]. Отмечается хорошая согласованность спектра коррелируемой помехи и частотной характеристики фильтра воспроизведения.

Разработанный алгоритм включён в список процедур обработки ПО ERadarTool (автор Романов В.В.) [Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2016613999, 2016] и опробован на данных георадиолокации и сейсморазведки. На рисунке 5 показаны результаты применения адаптивного вычитания к исходной “звонящей” радарограмме. С уменьшением стабилизирующего коэффициента степень подавления помех растёт, но одновременно увеличивается уровень белого

шума, хуже выделяются полезные волны. Увеличение стабилизирующего коэффициента приводит к уменьшению уровня белого шума в обработанной радарограмме, но и коррелируемые помехи тоже подавляются хуже. Оптимальные значения коэффициента лежат в интервале 0,05–0,20 (5–20%).

Для оценки эффективности адаптивного вычитания помех радарограмма также была обработана другими способами, применяемыми для подавления коррелируемых помех и последующих полупериодов. При вычитании из радарограммы её моментных функции (среднего или медианы) [Адрианов, 2018], интенсивный “звон” подавлен не был. Результат, достигнутый при адаптивном вычитании, не был получен при применении полосно-заграждающего фильтра и деконволюции (Рисунок 6).

Благодаря общей волновой теории, а также способам обработки и представления результатов, алгоритм адаптивного вычитания удалось применить к данным наземной и скважинной сейсморазведки. На рисунке 7 показано, что адаптивное вычитание позволило существенно подавить фон кратных волн на несуммированных сейсмограммах МОВ–ОСТ и тем самым получить глубинный разрез с меньшим количеством мешающих артефактов и большим разрешением.



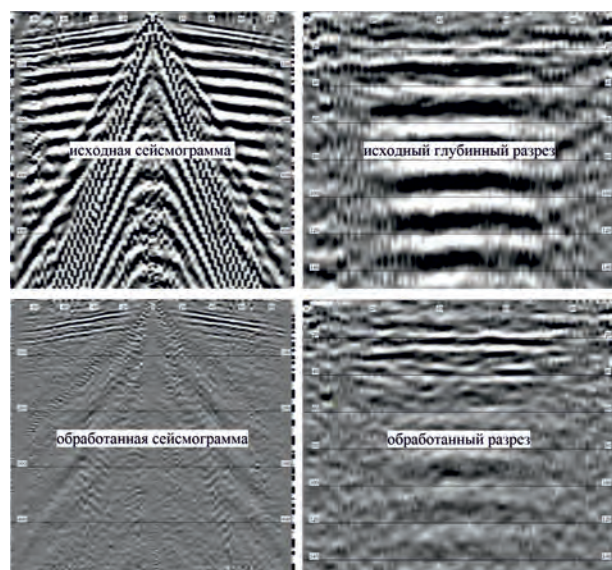
▲ Рис. 6. Применение различных алгоритмов подавления и сокращения длительности коррелируемых помех, Георадар ОКО–3, АБ-150.

Данные сейсморазведки отличается большой уровень шума, нестабильность формы сигнала, а также присутствие на сейсмограммах множества волн с разными спектральными характеристиками. При использовании адаптивного вычитания сейсмических данных стабилизирующий коэффициент рекомендуется увеличить до 20–25 %, а при низкой амплитудной разрешённости исходных данных применять адаптивное вычита-

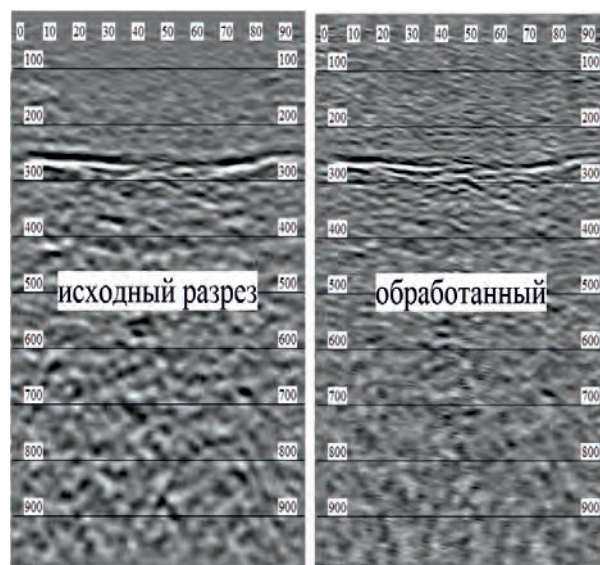
ние к временным разрезам. На рисунке 8 продемонстрировано увеличение вертикального разрешения временного разреза и ослабление фона коррелируемых помех после адаптивного вычитания.

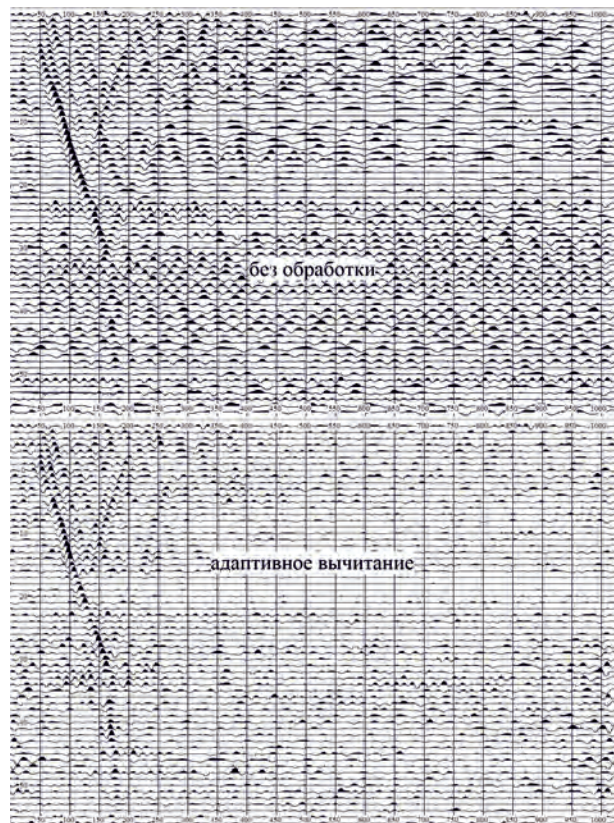
На сейсмограммах ВСП адаптивное вычитание позволило снизить уровень помех, вызванных неплотным прилеганием обсадной колонны к окословжвинному пространству (Рисунок 9) и получить вертикальные годографы прямой и нескольких отражённых волн.

▼ Рис. 7. Подавление кратных волн на сейсмограммах МОВ-ОГТ.



▼ Рис. 8. Адаптивное вычитание на примере обработки разреза МОВ-ОГТ.





▲ Рис. 9. Адаптивное вычитание на примере обработки сейсмограммы ВСП.

Заключение

Разработанный и протестированный алгоритм адаптивного вычитания коррелируемых помех позволил эффективно снизить уровень “звона” на радарограммах, увеличить разрешающую способность георадиолокации и инженерной сейсморазведки.

Для применения фильтра для обработки данных георадиолокации предварительно требует уменьшить уровень сигнала прямого прохождения. Большая эффективность адаптивного вычитания достигается в сочетании с другими видами фильтрации.

Список литературы

1. Андрианов, С. В. Контроль за закреплением заобделочного пространства методом георадиолокации на примере тоннелей метрополитена / С. В. Андрианов // Труды Международной

геолого-геофизической конференции «ГеоЕвразия 2018. Современные методы изучения и освоения недр Евразии», Москва, 05–08 февраля 2018 года. – Тверь: ООО «ПолиПРЕСС», 2018. – С. 623–626. – EDN XMUBYD.

2. Ермаков А. П., Старовойтов А. В., Владов М. Л. Георадиолокационные исследования верхней части разреза при проектировании сейсмических работ в зимнее время // Технологии сейсморазведки. – 2012. – Т. 9. – №. 2. – С. 89–97.

3. Капустин, В. В. О возможности использования неоднородных электромагнитных волн для исследования фундаментных конструкций / В. В. Капустин, А. Ю. Хмельницкий, Д. В. Бакайкин // Вестник Московского университета. Серия 4: Геология. – 2011. – № 1. – С. 52–55. – EDN NXQUED.

4. Георадиолокационные признаки областей с аномальными физическими свойствами / В. И. Колесников, В. А. Явна, В. Л. Шаповалов [и др.] // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2005. – № 3. – С. 124–128. – EDN JVXKPV.

5. Набатов В. В. Повышение эффективности георадиолокационного обследования конструкций тоннелей метрополитенов за счет уменьшения помехового влияния прямой волны // ГИАБ. 2014. №S1.

6. Романов, В. В. Опыт использования деконволюции в инженерной сейсморазведке / В. В. Романов, А. А. Иванов // Вестник РАН. – 2024. – Т. 24, № 1. – С. 20–24. – DOI 10.52531/1682-1696-2024-24-1-20-24. – EDN TTUQUU.

7. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2016613999 Российская Федерация. ERadarTool - программа обработки георадиолокации : № 2016611478 : заявл. 24.02.2016 : опубл. 12.04.2016 / В. В.

Романов. – EDN KSACLT.

8. Galagedara L. W., Parkin G. W., Redman J. D. An analysis of the ground-penetrating radar direct ground wave method for soil water content measurement //Hydrological processes. – 2003. – Т. 17. – №. 18. – С. 3615-3628.

9. Jeng Y. et al. Adaptive filtering of random noise in near-surface seismic and ground-penetrating radar data //Journal of Applied Geophysics. – 2009. – Т. 68. – №. 1. – С. 36-46.

S. Kadioglu and J. J. Daniels, "Different time gain and amplitude-color arranging for ground penetrating radar data: Applied samples," Proceedings of the XIII Internarional Conference on Ground Penetrating Radar, Lecce, Italy, 2010, pp. 1-4, doi: 10.1109/ICGPR.2010.5550168

Подробнее об авторах



Романов
Виктор Валерьевич

Российский государственный университет нефти и газа (НИУ) им. И.М. Губкина, г. Москва,



Алтухов
Евгений Евгеньевич

доцент, Российский государственный геологоразведочный университет им. Серго Орджоникидзе, г. Москва



Латышев
Кирилл Алексеевич

студент, Российский государственный геологоразведочный университет им. Серго Орджоникидзе, г. Москва



Кауркин
Михаил Дмитриевич

Ведущий научный сотрудник лаборатории инженерной геофизики и сейсмического микрорайонирования Института геоэкологии им. Е.М. Сергеева РАН, к.т.н., г. Москва