



ВОЗМОЖНОСТИ ПОВЫШЕНИЯ РАЗРЕШЕННОСТИ СЕЙСМОГРАММ МЕТОДА ПРЕЛОМЛЕННЫХ ВОЛН (МПВ)

В.В. Романов

Российский государственный геологоразведочный университет им. Серго Орджоникидзе, 117997, Москва, ул. Миклухо-Маклая, 23, Россия, e-mail: roman_off@mail.ru

Увеличение детальности получаемых моделей является актуальной проблемой инженерной сейсморазведки, где мощности выделяемых слоев не превышают нескольких метров. Цель предлагаемой работы заключалась в оценке влияния различных способов обработки и полевых технологий на разрешающую способность метода преломленных волн. Каждый из способов был применен к набору полевых сейсмограмм различного качества, что позволило установить степень возрастания разрешающей способности и зафиксировать общее увеличение случайного высокочастотного шума. Были проанализированы результаты проведенного исследования и выявлены сильные и слабые стороны каждого из методов. Наибольшую эффективность показала фильтрация верхних частот в сочетании с поворотом фазы.

Инженерная сейсморазведка, обработка, разрешенность, преломленные волны, интерференция, источники упругих волн, дифференцирование, частотная фильтрация, деконволюция

IMPROVING RESOLUTION OF SEISMIC REFRACTION METHOD

V.V. Romanov

Russian State Geological Prospecting University (MGRI-RSGPU), Miklouho-Maclay str., 23, Moscow, 117997, Russia, e-mail: roman_off@mail.ru

Achieving increase dresolution of estimated models is an actual problem of engineering seismology where the layer thickness does not exceed a few meters. The objective of this paper has been to evaluate the effect of different acquisition techniques and processing methods on the resolution of a seismic refraction method. Each technique and method in question was applied to field seismic data of different quality. This allowed observing there solution increase, as well as the overall increase of random high frequency noise. By analyzing the test results, the strengths and weaknesses of each of the methods have been identified. Among them, phase shift (high pass) filter has appeared to be most efficient.

Near-surface seismic exploration, processing, resolution, refracted waves, interference, elastic waves sources, differentiation, frequency filtering, deconvolution

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время в связи со значительным объемом работ методом преломленных волн в инженерной сейсморазведке актуальны вопросы повышения его разрешающей способности. Разрешающая способность метода отражает возможность выделения неоднородных по упругим свойствам слоев минимальной мощности. На нее существенно влияет явление пропуска небольших слоев из-за невыхода соответствующих преломленных волн в первые вступления. Отсутствие волны на годографе приводит к систематическому завышению размеров толщи, залегающей над пропущенным слоем. Кроме того, волны с небольшим интервалом прослеживания плохо выделяются даже в первых вступлениях. Причиной является *интерференция* – сложение колебаний волн с близкими временами вступлений. Интерференция в области первых вступлений усложняет корреляцию и снижает точность нахождения точек излома годографа. Отсутствие четких фаз импульса делает процесс корреляции более субъективным, что сопровождается неизбежными ошибками в прослеживании волн и интерпретации материалов. Интерференция искажает динами-

ческие параметры волн и форму годографа при фазовой корреляции.

ВЛИЯНИЕ ИНТЕРФЕРЕНЦИИ

Рассмотрим влияние интерференции на форму годографа первых вступлений и динамику преломленных волн. В качестве примера возьмем трехслойную сейсмогеологическую модель толщи дисперсных грунтов различной водонасыщенности. Вблизи поверхности залегает зона аэрации с минимальным значением скорости продольных волн. Ниже по разрезу водонасыщенность увеличивается, а затем становится полной. Скорость продольных волн V_p существенно зависит от водонасыщенности, поэтому она скачкообразно увеличивается на границах модели (таблица).

Сейсмогеологическая модель

Слой	Мощность, м	Скорость продольных волн, м/с
1	3	500
2	5	1300
3	0	1700

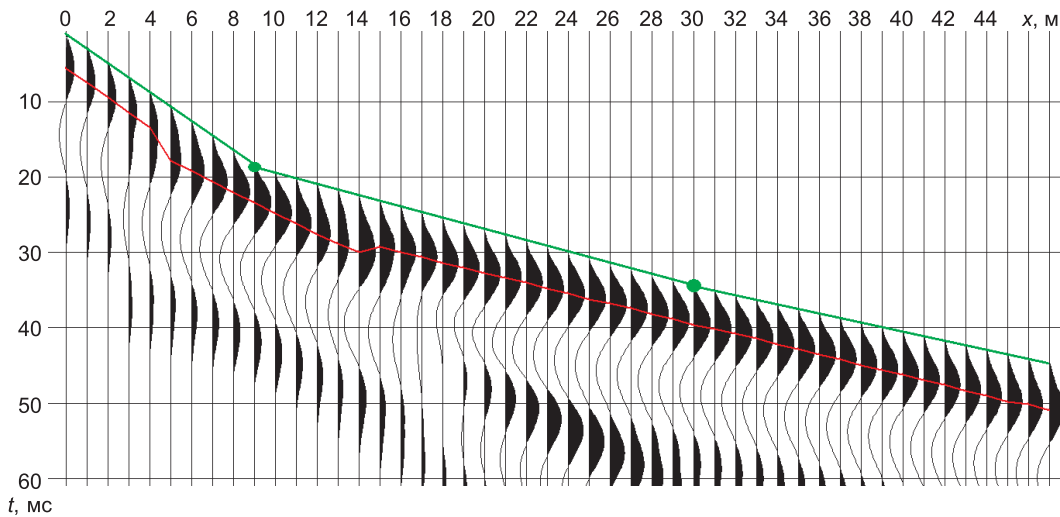


Рис. 1. Модель сейсмограммы МПВ для трехслойной среды. Ломаной линией показан годограф первых вступлений, кружками – точки излома на годографе. Ниже изображен фазовый годограф.

Волна, образовавшаяся на кровле 2-го слоя, выходит в первые вступления на удалениях 9–30 м, далее ее сменяет более быстрая волна, скользящая по кровле слоя 3 (рис. 1). При корреляции годографа по вступлению волны точки излома на удалениях 9 и 30 м различимы визуально, при фазовой корреляции более удаленная точка излома не выделяется, а ближняя с уменьшением частоты постепенно смещается к источнику (рис. 2). Рассмотренный пример наглядно показывает, что интерференция, не затрагивая годограф вступлений, заметно искажает форму фазового годографа, особенно на низких частотах.

Влияние интерференции на сейсмические данные определяется частотой и длительностью импульса, а также разницей времен вступления интерферирующих волн. Протяженность зон интерференции уменьшается с увеличением частоты и снижением длительности импульса, что приводит к повышению точности и достоверности получаемых результатов. Существующие методы увеличения разрешающей способности основаны на повышении преобладающей частоты и/или расширении спектра регистриру-

емых волн. В МПВ получили практическое применение следующие способы:

- 1) уменьшение массы ударного механизма источника;
- 2) дифференцирование сейсмических записей;
- 3) частотная фильтрация;
- 4) деконволюция.

Уменьшение массы ударного механизма источника

Слабые ударные источники используются для увеличения частоты возбуждаемых колебаний с целью получения сейсмических изображений высокой детальности. На рис. 3 показана сейсмограмма, полученная при пяти ударах десятикилограммовой кувалдой по металлической подложке. По предварительной оценке, в волновом поле ожидалось наличие прямой волны, распространяющейся в покровных неводонасыщенных суглинках, и преломленной волны от границы грунтовых волн. Использование относительно тяжелого источника подтвердило отсутствие промежуточных границ в покрывающей толще суглинков. В первых вступлениях наблюдается преломленная волна с высокой амплитудой, четким вступлением и постоянным наклоном годографа.

Применение легкого источника (металлического лома массой 5 кг) усложнило структуру волнового поля, единая ось синфазности “распалась” на две оси с различным наклоном (рис. 4). Более быстрая волна, связанная с границей полного водонасыщения, значительно затухает с расстоянием. Волна, преломленная на промежуточной границе, затухает медленнее, поэтому на некотором расстоянии от источника начинает доминировать в последующих вступлениях. В волновом поле от тяжелого источника из-за интерференции волны образовывали единую ось синфазности, что означает пропуск промежуточного слоя и неверное определение глубины опорной границы.

Снижение массы источника сопровождается уменьшением амплитуды, что отрицательно сказывается на отношении сигнал/помеха. Когда уровень мешающих колебаний достаточно велик, требуется значительное число накоплений для выделения полезно-

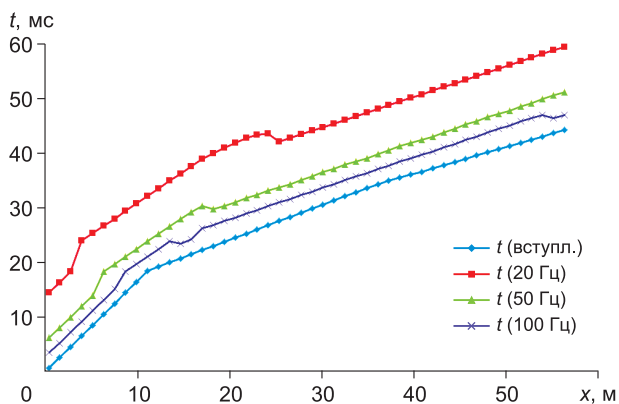


Рис. 2. Годографы первых вступлений, прокоррелированные по вступлению и первому максимуму для значений преобладающей частоты $f = 20, 50$ и 100 Гц.

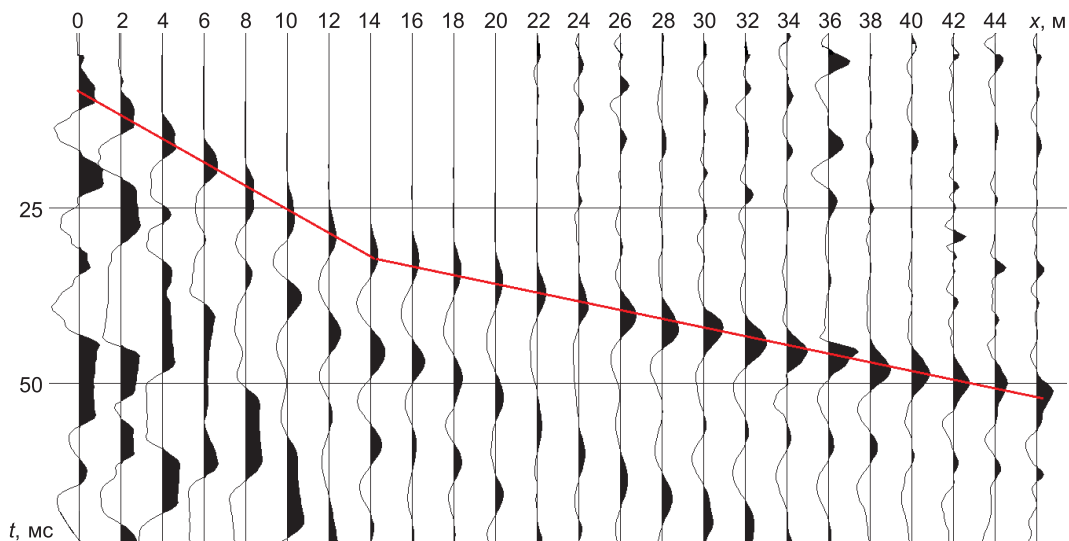


Рис. 3. Сейсмограмма, полученная при возбуждении колебаний ударами металлической кувалдой весом 10 кг.

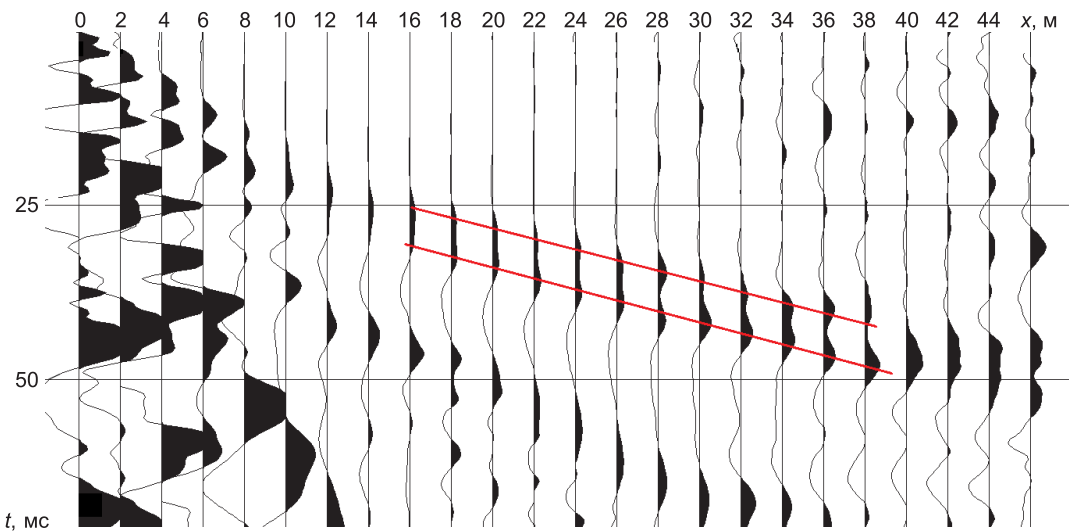


Рис. 4. Сейсмограмма, полученная при возбуждении колебаний ударами металлическим ломом весом 5 кг.

го сигнала, а это снижает частоту и резкость вступления. Следовательно, применение слабых источников эффективно только при небольшом уровне помех или накоплении с тщательной коррекцией фазовых сдвигов во время суммирования.

Дифференцирование сейсмических записей

Дифференцирование сейсмических записей равноценно замене стандартных сейсмических приемников на акселерометры, измеряющие ускорение компонент полного вектора смещения. Сейсмограммы акселерометров имеют большую частоту и ширину спектра, чем стандартные сейсмограммы, поэтому применение датчиков ускорения увеличивает разрешающую способность сейсморазведки. Дифференцирование на стадии обработки равносильно замене традиционных велосиметров на акселерометры, но не требует финансовых затрат.

Дифференцирование предусматривает вычисление предела отношения приращения функции к приращению ее аргумента при стремлении последнего к нулю. Для дискретной функции приращение времени постоянно и равно шагу дискретизации, поэтому вычисление производной цифровой сейсмической трассы сводится к нахождению разности между последовательными сейсмическими отсчетами. Абсолютные значения отсчетов значения не имеют, и деление на постоянный шаг дискретизации опускается. Упрощенный алгоритм расчета производной:

$$U'_i = U_i - U_{i-1}, \quad (1)$$

где U' – отсчеты обработанной сейсмической трассы, U – отсчеты исходной трассы, i – номер обрабатываемого отсчета. В спектральной области вычислению производной функции соответствует умножение каж-

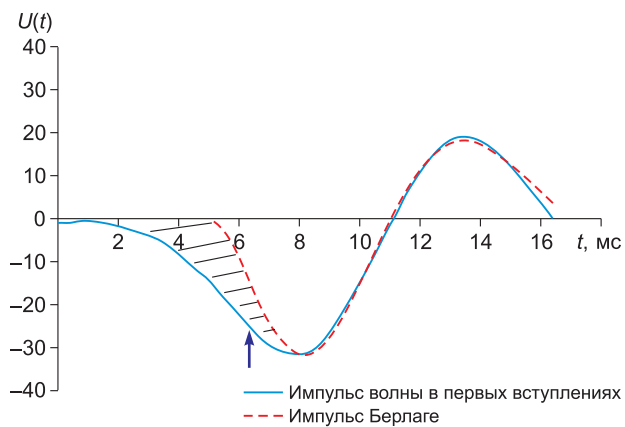


Рис. 5. Различия между реальным (сплошная линия) и модельным (пунктир) импульсами. Заштрихована область, где различия между импульсами наиболее велики. Стрелкой показана точка, где производная сигнала максимальна.

дой гармоники спектра на оператор $-j\omega$. Дифференцирование обогащает спектр трассы высокими частотами и полностью устраняет постоянную составляющую. Умножение комплексного значения гармоники на фазовращатель $-i$ смещает ее на $1/4$ периода назад по оси времени. Это означает, что вступлению гармонического сигнала будет соответствовать экстремум его дифференциала. Суммирование сигналов при накоплении и интерференция снижают резкость вступления импульса, поэтому время прихода волны, определенное по сейсмограмме, не совпадает с моментом прихода фронта волны на приемник. В качестве примера сравним импульс сейсмической волны в первых вступлениях и импульс Берлаге с параметрами, выбранными таким образом, чтобы расхождение между импульсами было минимально [Пузырев, 1997].

Из-за “размытия” вступления импульс зарегистрированной волны фиксируется на временах существенно меньших, чем модельный. Вместо резкого

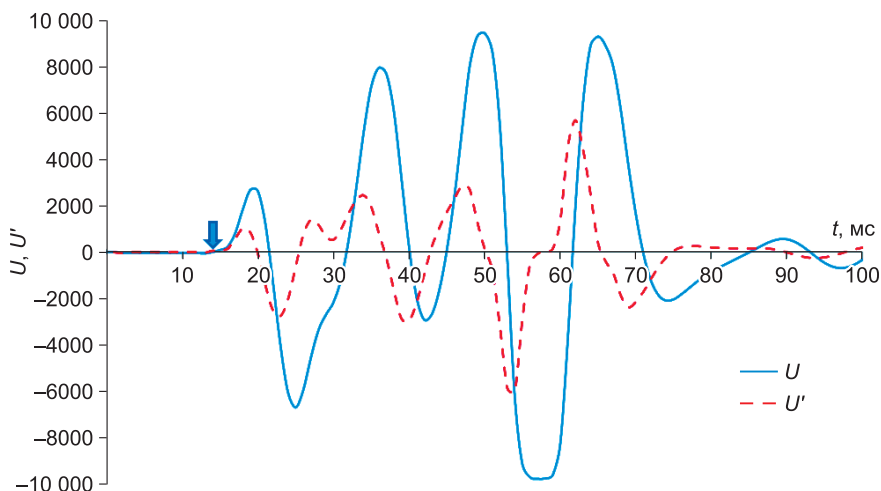


Рис. 6. Сейсмическая трасса до обработки (сплошная линия) и после дифференцирования (пунктир). Стрелкой показано первое вступление.

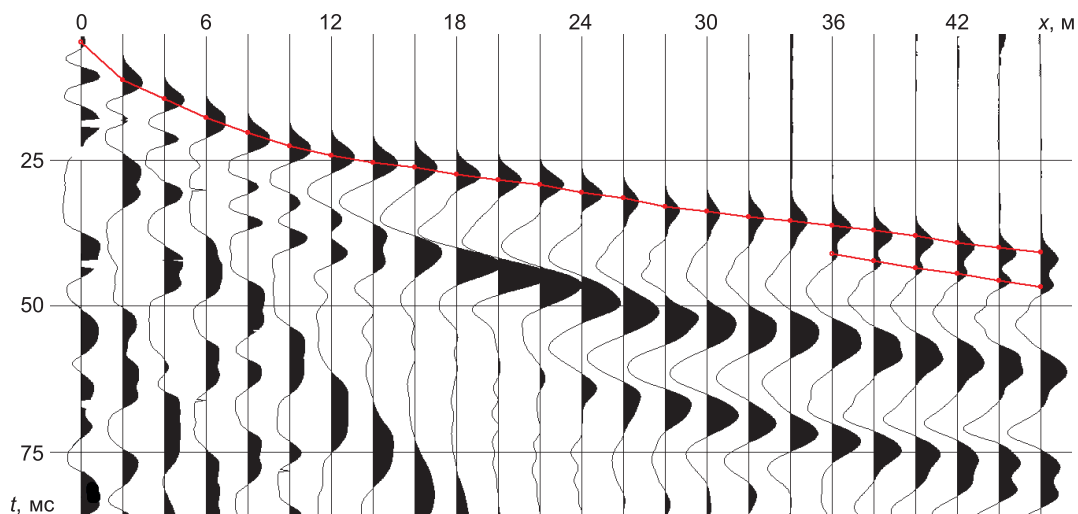


Рис. 7. Необработанная сейсмограмма.

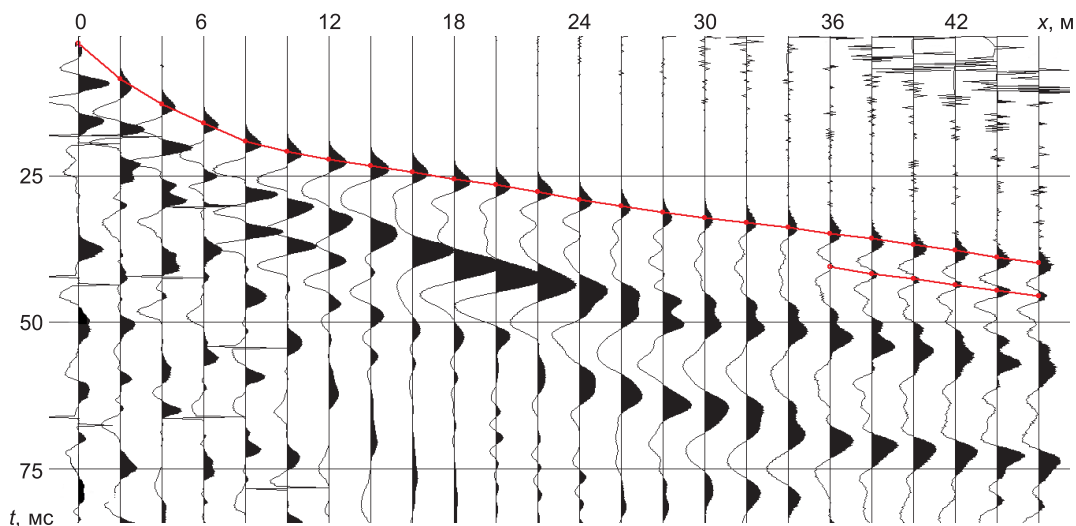


Рис. 8. Сейсмограмма после дифференцирования.

срыва происходит плавное нарастание уровня сигнала, причем максимальное приращение соответствует не вступлению, как у гармонической функции, а некоторой последующей фазе импульса. Следовательно, для импульсов сложной формы смещение по времени, вызванное дифференцированием, случайно и зависит от резкости вступления. Как правило, дифференцирование вызывает групповое смещение на величину порядка одной восьмой периода ($T/8$). Неучтенные смещения заметно влияют на точность определения глубины преломляющих границ, так как смещение сигналов во времени не фиксировано и определяется формой импульса (рис. 5).

На рис. 6 изображена сейсмическая трасса до и после дифференцирования. На модифицированной трассе возросло количество экстремумов, а максимум импульса первой волны сместился до времени вступления. Трасса стала более разрешенной, длительность отдельных полупериодов сократилась, но возрос уровень случайного шума, что особенно заметно до времени первого вступления.

На сейсмограммах эффект дифференцирования проявляется более ярко. Во-первых, появляются новые оси синфазности, до обработки объединенные интерференцией. На рис. 7 в последующих вступлениях предположительно наблюдается волна с наклоном оси синфазности, большим, чем у волны в первых вступлениях. После дифференцирования оси стали подобными (рис. 8), что указывает на связь второй оси с последующей фазой волны в первых вступлениях.

Слабой стороной дифференцирования, очевидно, является невозможность настройки его спектральной характеристики для конкретного диапазона частот, что приводит к неконтролируемому росту высокочастотных помех.

Частотная фильтрация

Оператор дифференцирования $-i\omega$ раскладывается на две составляющие – поворачивающую $-i$ и фильтрующую ω . Последняя представляет фильтр верхних частот (ФВЧ) с бесконечной граничной

частотой. Отсутствие граничной частоты при дифференцировании усиливает высокочастотные помехи, снижая устойчивость обработки. В отличие от дифференцирования, ФВЧ может быть настроен на определенную граничную частоту, за которой усиления помех не происходит. На рис. 9 приведены амплитудно-частотные характеристики дифференцирования и ФВЧ с граничной частотой 50 Гц.

Последовательное применение поворачивающего множителя $-i$ и ФВЧ обеспечивает обработку более гибкую и устойчивую к случайному шуму, чем дифференцирование. На рис. 10 приведена сейсмограмма, обработанная двумя упомянутыми фильтрами. Дополнительные оси синфазности, не выделяемые до обработки, наблюдаются на большем числе трасс, чем при использовании дифференцирования. Уровень полезных волн закономерно снизился, а высокочастотного шума, как при дифференцировании, практически не наблюдается. При исключении поворачивающего множителя из обработки также не возникает и групповых смещений импульсов.

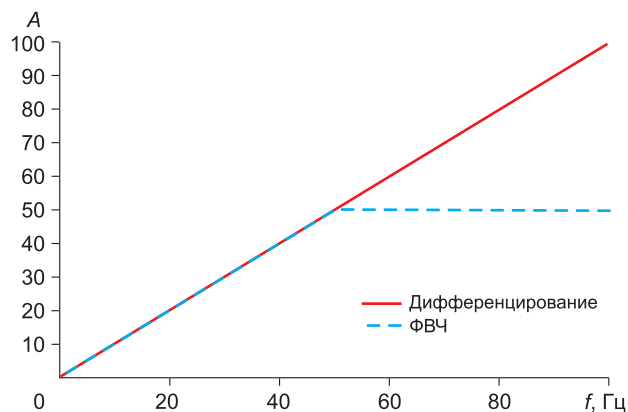


Рис. 9. Сравнение амплитудно-частотных характеристик дифференцирования и ФВЧ.

Деконволюция

Деконволюция (обратная фильтрация) предназначена для сжатия импульсов упругих волн с целью повышения временного или пространственного разрешения сейсмограмм. Деконволюция устраняет искажения, вносимые средой и системой регистрации в форму импульса источника. Поглощение, рассеяние, многократные отражения от промежуточных границ, интерференция растягивают импульс волны на временной оси, а деконволюция частично устраняет эти эффекты. Идеальные обратные фильтры рассчитываются в предположении, что исходной формой сигнала был импульс бесконечно малой длительности (дельта-импульс), а помехи на сейсмограмме отсутствуют. На реальных сейсмограммах подобный фильтр реализовать невозможно из-за его неустойчивости даже к самому низкому уровню случайного шума (рис. 11).

Наибольшей устойчивостью к уровню помех при неизвестной форме полезного сигнала обладает оптимальная минимально-фазовая деконволюция. Ее оператор рассчитывается через автокорреляционную функцию сеймотрасс в интервале преобладания полезных волн. Неустойчивость обратной фильтрации уменьшается введением параметра регуляризации, однако с его ростом падает и эффект сжатия импульсов. Степень сжатия импульсов деконволюцией зависит от значения сигнал/помеха сейсмограммы до обработки и степени соответствия формы импульсов минимально-фазовой модели.

Эффект применения деконволюции в целом мало отличается от описанных выше методик. Сложность и неустойчивость процедуры снижает ее ценность в графе обработки инженерной сейсморазведки. На рис. 12 изображена сейсмограмма после применения

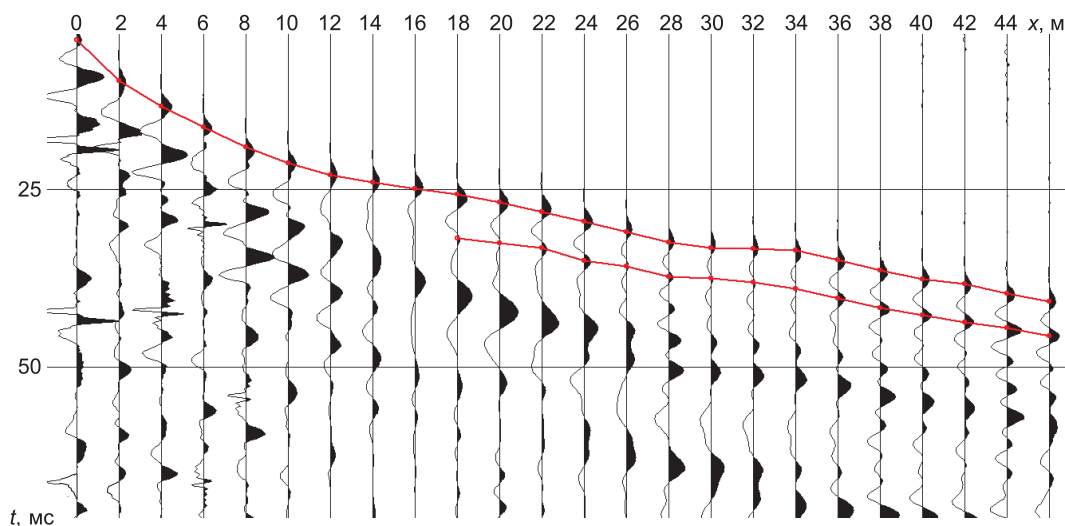


Рис. 10. Сейсмограмма после обработки ФВЧ с граничной частотой 400 Гц и поворотом фазы.

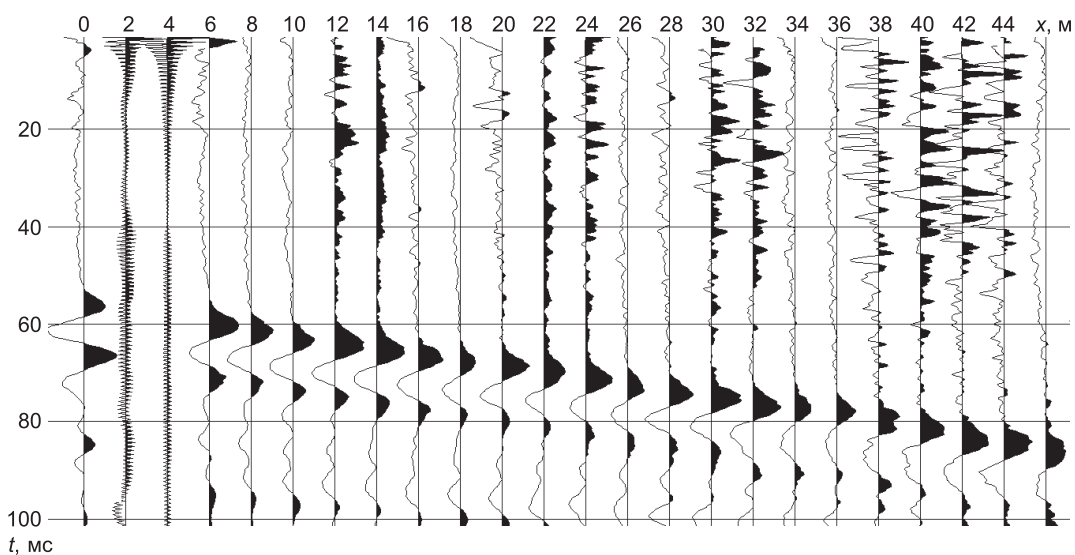


Рис. 11. Усиление уровня высокочастотного шума в области до первых вступлений из-за деконволюции.

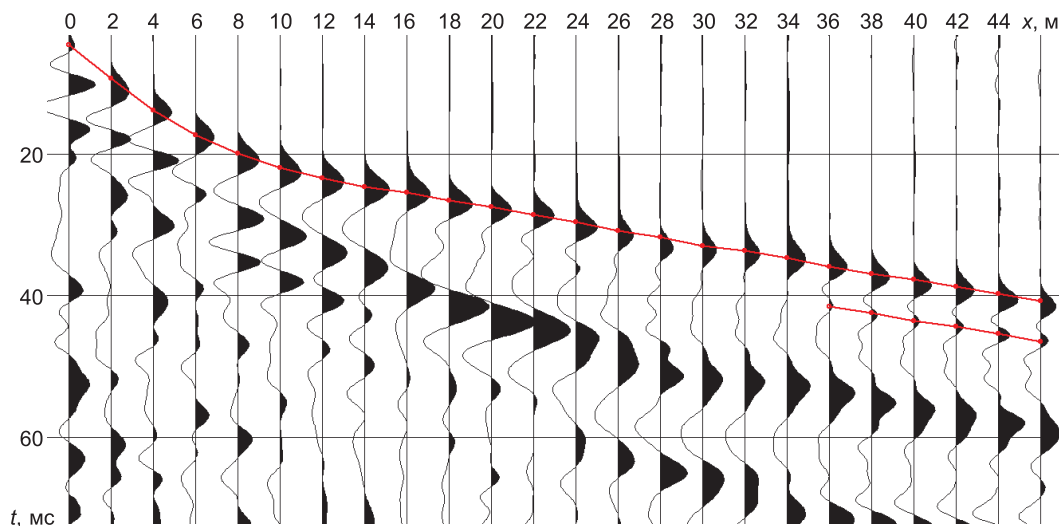


Рис. 12. Результат обработки сейсмограммы фильтром сжатия.

деконволюции, принципиального увеличения разрешенности по сравнению с изложенными способами получено не было.

ВЫВОДЫ

Было рассмотрено несколько подходов, направленных на повышение временной разрешенности. Все способы характеризуются различной устойчивостью к уровню высокочастотного шума и отношению сигнал/помеха. Рассмотренный метод повышения разрешенности, основанный на снижении массы излучателя, эффективен, но его использование возможно только при низком уровне помех и тщательной коррекции фазовых сдвигов при накоплении.

Более гибким инструментом повышения разрешенности оказался ФВЧ в сочетании с поворотом фазы или без него. Возможность настройки фильтра на различные диапазоны частот определяет возможность получения хороших результатов в различных сейсмогеологических условиях. Дифференцирование как аналог предыдущего способа, но без возможности

управления никакими преимуществами, кроме скорости обработки, по сравнению с частотной фильтрацией не имеет. При использовании современной компьютерной техники это достоинство дифференцирования утрачивает свою ценность. Применение фильтра сжатия оказалось возможным только с достаточно большими значениями параметра регуляризации, что снизило ценность деконволюции по сравнению с другими способами обработки.

Литература

Абрамкин Е.А. Повышение разрешающей способности сейсмограмм путем дифференцирования исходного сигнала // Инженерная и рудная геофизика 2010: Материалы VI научно-практической конференции (Геленджик, Россия, 26–30 апреля 2010 г.).

Пузырев Н.Н. Методы и объекты сейсмических исследований. Введение в общую сейсмологию. Новосибирск: Изд-во СО РАН, НИЦ ОИГМ, 1997. 301 с.

Рапопорт М.Б. Вычислительная техника в полевой геофизике: Учебник для вузов. М.: Недра, 1993. 350 с.

*Поступила в редакцию 31 октября 2013 г.,
в окончательном варианте – 15 ноября 2013 г.*

КОРОТКО ОБ АВТОРЕ

РОМАНОВ Виктор Валерьевич – кандидат технических наук, доцент кафедры геофизики МГРИ-РГГРУ.
E-mail: roman_off@mail.ru