



ДИСКУССИЯ

УДК 550.834.535

О ВИБРОКОРРЕЛЯЦИИ И ВИБРОДЕКОНВОЛЮЦИИ ЗАПИСЕЙ СЕЙСМИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ

Ю.Г. Антипин, М.Т. Якупов

ООО НПЦ “Геостра”, 450071, Уфа, ул. Луганская, 3, Россия, e-mail: YakupovMT@mail.bngf.ru

В статье рассматривается процедура виброкорреляции, применяемая при обработке данных сейсморазведки с вибрационным источником колебаний, и ее недостатки. Приводится обоснование возможности использования вибродеконволюции, не имеющей минусов, присущих виброкорреляции. Сравниваются результаты обеих процедур, полученные с теоретическим свип-сигналом.

Виброграмма, виброкорреляция, вибродеконволюция

VIBROCORRELATION AND VIBRODECONVOLUTION FOR SEISMIC DATA PROCESSING

Yu.G. Antipin, M.T. Yakupov

SPC “GEOSTRA” Ltd., 450071, Ufa, 3, Luganskaya str., Russia, YakupovMT@mail.bngf.ru

The article considers a vibrocorrelation procedure used in processing of seismic data with vibration source and its shortcomings. The authors set grounds for applying of a vibrodeconvolution procedure, as an alternative method, having no such drawbacks, instead. Benchmarking of the results for a theoretical sweep-signal for the both procedures has been performed.

Vibro-seismic data, vibrodeconvolution, vibrocorrelation

Один из способов повышения разрешенности сейсмических записей некоторые исследователи связывают с применением процедуры деконволюции вместо корреляции при обработке материалов, полученных при возбуждении сейсмических колебаний виброисточниками. В данной статье рассматриваются основные особенности процедур корреляции и деконволюции, приводящие к различиям в результатах их применения.

Рассмотрим вначале алгоритм виброкорреляции.

Сейсмическую запись (вибrogramму) $v(t)$ в первом приближении можно представить так:

$$v(t) = k(t) * u(t) * z(t), \quad (1)$$

где $k(t)$ – функция коэффициентов отражения (импульсная сейсмограмма); $u(t)$ – собственный колебательный процесс, распространяющийся в геологической среде после прекращения работы источника колебаний; $z(t)$ – свип-сигнал. Знаком * обозначена процедура свертки. Здесь не рассматриваются такие факторы, как фильтрующее воздействие на сейсмический сигнал геологической среды, канала связи. Тогда результат $s(t)$ традиционной обработки вибrogramм процедурой взаимной корреляции представляется так:

$$s(t) = v(t) \otimes z(t) = k(t) * u(t) * (z(t) \otimes z(t)), \quad (2)$$

где знаком \otimes обозначена процедура корреляции. Тогда $(z(t) \otimes z(t)) = d(t)$ – автокорреляция свип-сигнала (импульс Клаудера) (рис. 1, а), и уравнение (2) можно записать в виде

$$s(t) = k(t) * u(t) * d(t).$$

Таким образом, автокорреляция сигнала $d(t)$ здесь выступает как полосовой фильтр с амплитуд-

но-частотной характеристикой, изображенной на рис. 2, б. Эта характеристика рассчитана на основе реального свип-сигнала, зарегистрированного от вибратора “SERSEL” М 27 с амплитудно-частотным спектром (рис. 2, а).

Как видно из рис. 2, б, амплитудно-частотная характеристика импульса Клаудера $d(t)$ заметно спадает в частотном диапазоне полезного сигнала, что приводит к существенному ослаблению высокочастотных составляющих в его спектре.

Очевидно, это и является главным стимулом поиска альтернативных способов исключения из сейсмической записи воздействия вибратора, вызывающих нежелательный спад частотной характеристики в диапазоне частот полезного сигнала. Как показали результаты исследований [Лесников и др., 2005; Шехтман, Кузенцов, 2005а,б; Жуков и др., 2011; Brittle et al., 2001], описанный эффект можно исключить с помощью деконволюции.

В технологии применения этой процедуры при обработке вибrogramм для расчета обратного фильтра $d^{-1}(t)$ обычно используется автокорреляция свип-сигнала. Результат деконволюции $\hat{s}(t)$ вычисляется по известной формуле

$$\begin{aligned} \hat{s}(t) &= s(t) * d^{-1}(t) = k(t) * u(t) * (d(t) * d^{-1}(t)) = \\ &= k(t) * u(t) * K_p(t), \end{aligned} \quad (3)$$

где $(d(t) * d^{-1}(t)) = K_p(t)$ – импульс Кронекера:

$$K_p(t) = \begin{cases} 1, & \text{при } t = z_d; \\ 0, & \text{при } t \neq z_d, \end{cases}$$

где z_d – задержка обратного фильтра.

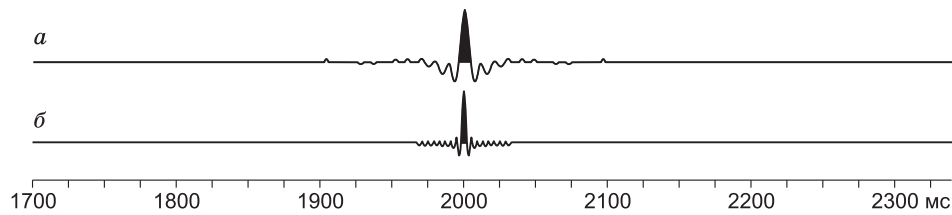


Рис. 1. Записи автокорреляции свип-сигнала (а) и импульса Кронекера в полосе частот свип-сигнала (б).

В данном случае не требуется определять параметр задержки обратного фильтра z_d . Ввиду симметричности автокорреляции, он составляет половину задаваемой длительности импульсной характеристики обратного фильтра.

Следует иметь в виду, что импульс Кронекера равен единице только при отсутствии помех и восстановлении составляющих амплитудно-частотного спектра во всем диапазоне от нуля до частоты Найквиста. В противном случае он имеет вид, изображенный на рис. 1, б, где диапазон восстанавливаемых частот соответствует полосе частот, генерируемой свип-сигналом.

Недостатком такой технологии является необходимость применения двух процедур – корреляции и свертки с обратным фильтром, вычисленным по автокорреляции свип-сигнала, которую необходимо предварительно рассчитать. Очевидным является тот факт, что последующая деконволюция по форме сейсмического импульса $u(t)$, отображающего собственный колебательный процесс в геологической среде, не приведет к качественному восстановлению частотных составляющих спектра. Так как они существенно подавляются фильтром с частотной характеристикой, соответствующей автокорреляции свип-сигнала.

В работах [Жуков и др., 2011; Brittle et al., 2001] рассматриваются результаты обработки синтетических виброграмм обратным фильтром, импульсная характеристика которого рассчитывалась по свип-сигналу.

Оригинальный способ выбора сигнала для расчета импульсной реакции обратного фильтра по материалам скважинной сейсморазведки, получаемым с

вибрационным источником, предложен Г.А. Шехтманом [Шехтман, Кузнецов, 2005а,б]. В его работе предлагается сигнал для расчета импульсной характеристики обратного фильтра выделять из записей волнового поля, регистрируемого внутри среды в виде виброграммы. Такой сигнал $\tilde{u}(t)$ можно представить в следующем виде:

$$\tilde{u}(t) = u(t) * z(t).$$

Тогда уравнение (1) примет вид

$$v(t) = k(t) * \tilde{u}(t)$$

и результат деконволюции $\hat{s}(t)$ соответственно

$$\hat{s}(t) = v(t) * \tilde{u}^{-1}(t) = k(t) * \tilde{u}(t) * \tilde{u}^{-1}(t) = k(t) * K_p(t).$$

Оригинальность данного подхода состоит в том, что обратный фильтр, рассчитанный по сигналу, определяемому таким образом, одновременно исключает влияние и свип-сигнала $z(t)$ и собственного сейсмического импульса $u(t)$. Достоинство его заключается в следующем: для вычислений обратного фильтра используются записи, зарегистрированные непосредственно внутри среды (в скважине). Тем самым исключается влияние различий между свип-сигналом, регистрируемым на поверхности, и свип-сигналом на виброграмме, испытывавшим на себе фильтрующее воздействие среды, контакта прибора со стенкой скважины и канала связи.

В отличие от рассмотренного выше способа, в данной статье рассматривается вопрос применения обратной фильтрации виброграмм в два этапа: внача-

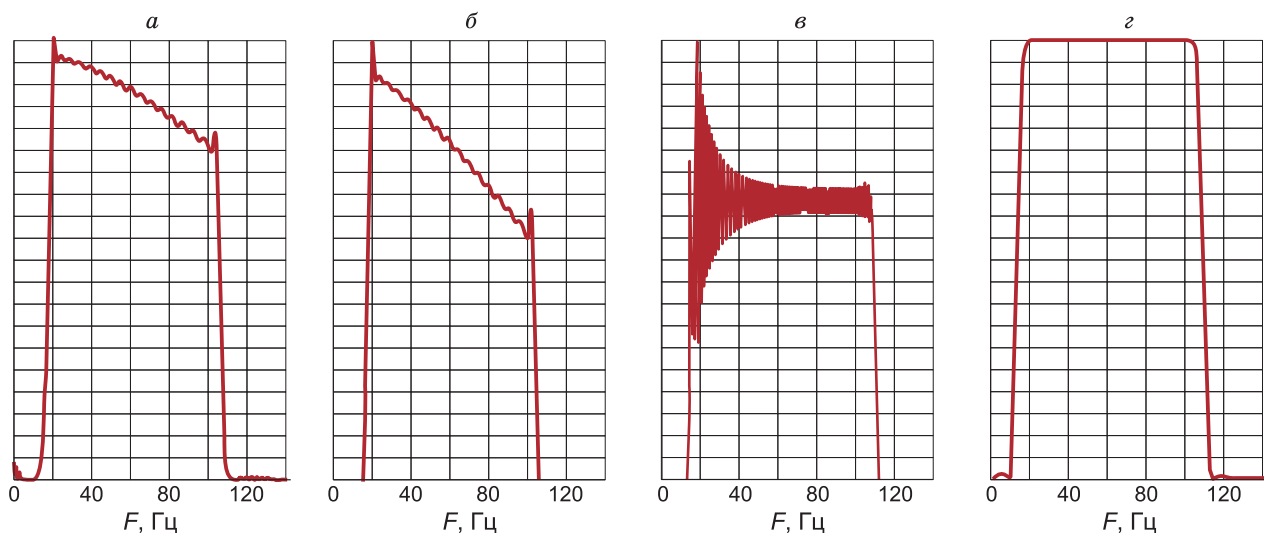


Рис. 2. Амплитудно-частотные спектры свип-сигнала (а), автокорреляции свип-сигнала (б) и импульса Кронекера в полосе частот свип-сигнала с нулевой (в) и расчетной задержкой обратного фильтра (г).

ле выполняется обратная фильтрация фильтром $z^{-1}(t)$, который рассчитывается непосредственно по свип-сигналу $z(t)$, а затем фильтрация классическим обратным фильтром $u^{-1}(t)$, рассчитанным по сейсмическому сигналу $u(t)$. В этом случае вместо формулы (2) для вычислений на первом этапе используется следующее выражение:

$$s(t) = v(t) * z^{-1}(t) = k(t) * u(t) * (z(t) * z^{-1}(t)) = k(t) * u(t) * K_p(t).$$

Пример обработки профиля ВСП обратным фильтром, вычисленным по реальному свип-сигналу, приведен на рис. 3. Исходный материал получен с применением вибратора М 27 компании "SERSEL", свип-сигнал генерировался в диапазоне 14–110 Гц.

Необходимо отметить, что для вычисления импульсной характеристики обратного фильтра необходимо задавать параметр задержки. При вычислении импульсной характеристики в частотной области этот параметр автоматически определяется способом, описанным в [Антипин, 1974]. Для демонстрации влияния задержки на рис. 2 приведены спектры результатов свертки исходного свип-сигнала с обратными фильтрами, рассчитанными с нулевой задержкой (см. рис. 2, в) и квазиоптимальной задержкой, определяемой как в [Антипин, 1974] (см. рис. 2, г).

Анализ рис. 2 позволяет сделать вывод о том, что импульсная реакция обратного фильтра, рассчитанная с нулевой задержкой, не может обеспечить приемлемое качество обработки. Поэтому в дальнейшем использовались только фильтры, задержка которых вычислялась предложенным в [Антипин, 1974] способом.

Как видно из рис. 3, деконволюция с обратным фильтром, рассчитанным по свип-сигналу, обеспечи-

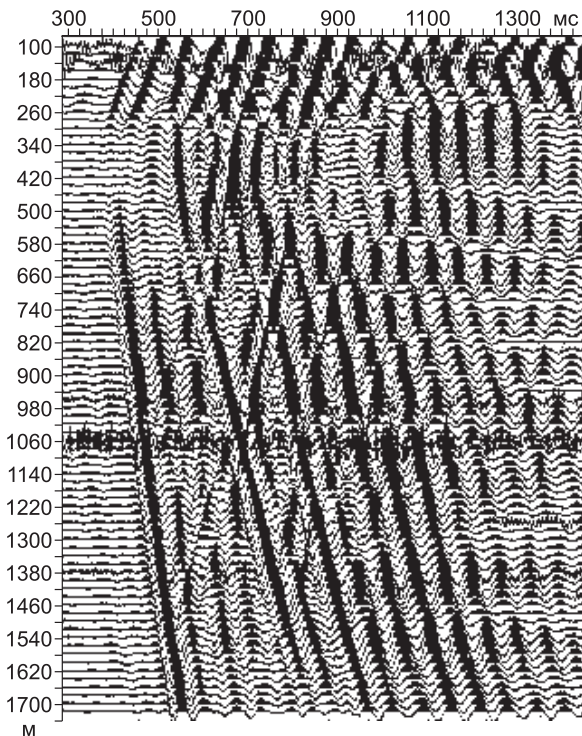


Рис. 3. Результат деконволюции по реальному свип-сигналу.

ла преобразование записи в импульсную форму (по аналогии с коррелограммой полученный результат удобно называть деконограммой). При этом отчетливо видно, что в интервале глубин 1060–1080 м записи деконограммы содержат помеху, а на записях коррелограмм подобных помех не наблюдалось. Причиной этого явления, как показал анализ исходных данных, явилось то, что свип-сигнал для этого интервала глубин зарегистрирован с интенсивной резонансной помехой, которая и проявилась при обратной фильтрации в области высоких частот. При виброкорреляции эта помеха практически не проявилась, так как была отфильтрована автокорреляцией свип-сигнала.

Для сравнения полученных записей с результатами виброкорреляции данный материал предварительно был профильтрован в полосе частот 14–110 Гц, соответствующей полосе частот свип-сигнала. В целом записи практически идентичны (рис. 4).

Одно из достоинств вибродеконволюции, когда обратный фильтр вычисляют по реальному свип-сигналу, состоит в том, что получаемый при этом результат приближается к данным, регистрируемым при возбуждении колебаний импульсным источником.

На втором этапе обработки данных, прошедших через процедуры виброкорреляции и вибродеконволюции с использованием реального свип-сигнала, реализуют фильтрацию обратным фильтром, рассчитанным по заданной форме сигнала $u(t)$, непосредственно распространяющимся в геологической среде. Полученный результат (рис. 5) соответствует тому, что получается в [Жуков и др., 2011] за один этап, когда сигнал для расчета обратного фильтра выбирают непосредственно с виброграмм.

Сравнение результатов данных деконволюции, полученных после виброкорреляции (см. рис. 5, а) и вибродеконволюции (см. рис. 5, б), демонстрирует, что прослеживаемость однотипных волн (показаны стрелками) и их разрешенность при разной входной информации близки между собой.

Для случаев, когда реальный свип-сигнал записан с помехой, опробована возможность применения для виброкорреляции и вибродеконволюции теоретического свип-сигнала $z_{tr}(t)$, рассчитываемого по следующим формулам:

$$z_{tr}(t) = \begin{cases} t * \sin(\Delta\omega * t) & \text{при } t < p; \\ p * \sin(\Delta\omega * t) & \text{при } p < t < (T - p); \\ (1 - (T - t)/p) * \sin(\Delta\omega * t) & \text{при } t > T - p, \end{cases}$$

где $\Delta\omega = (F_k - F_n)/T$, F_k, F_n – верхняя и нижняя частоты свип-сигнала; T – длительность свип-сигнала; p – задаваемый интервал времени нарастания интенсивности в начале и затухания – в конце излучения свип-сигнала.

Результат применения теоретического свип-сигнала для виброкорреляции и вибродеконволюции приведен на рис. 6, где для более детального рассмотрения полученных результатов приведены фрагменты обработанных профилей.

Из приведенных результатов видно, что полученные данные вполне приемлемы для последующей обработки и интерпретации и, по крайней мере, не уступают результатам, рассчитанным с использованием реального свип-сигнала. Видно, что уровень помех в обоих случаях не высок.

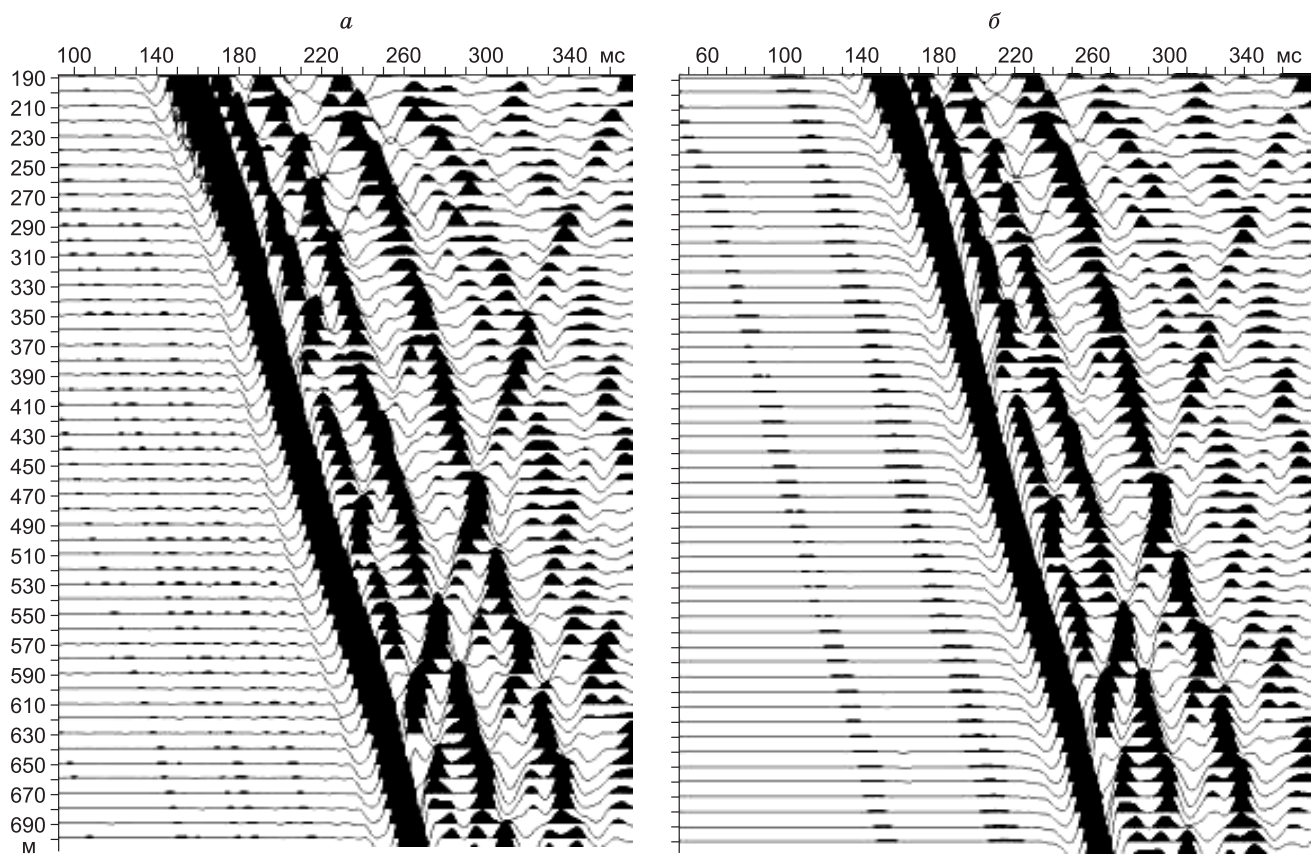


Рис. 4. Фрагмент записей деконограммы (а) и коррелограммы (б) с реальным свип-сигналом.

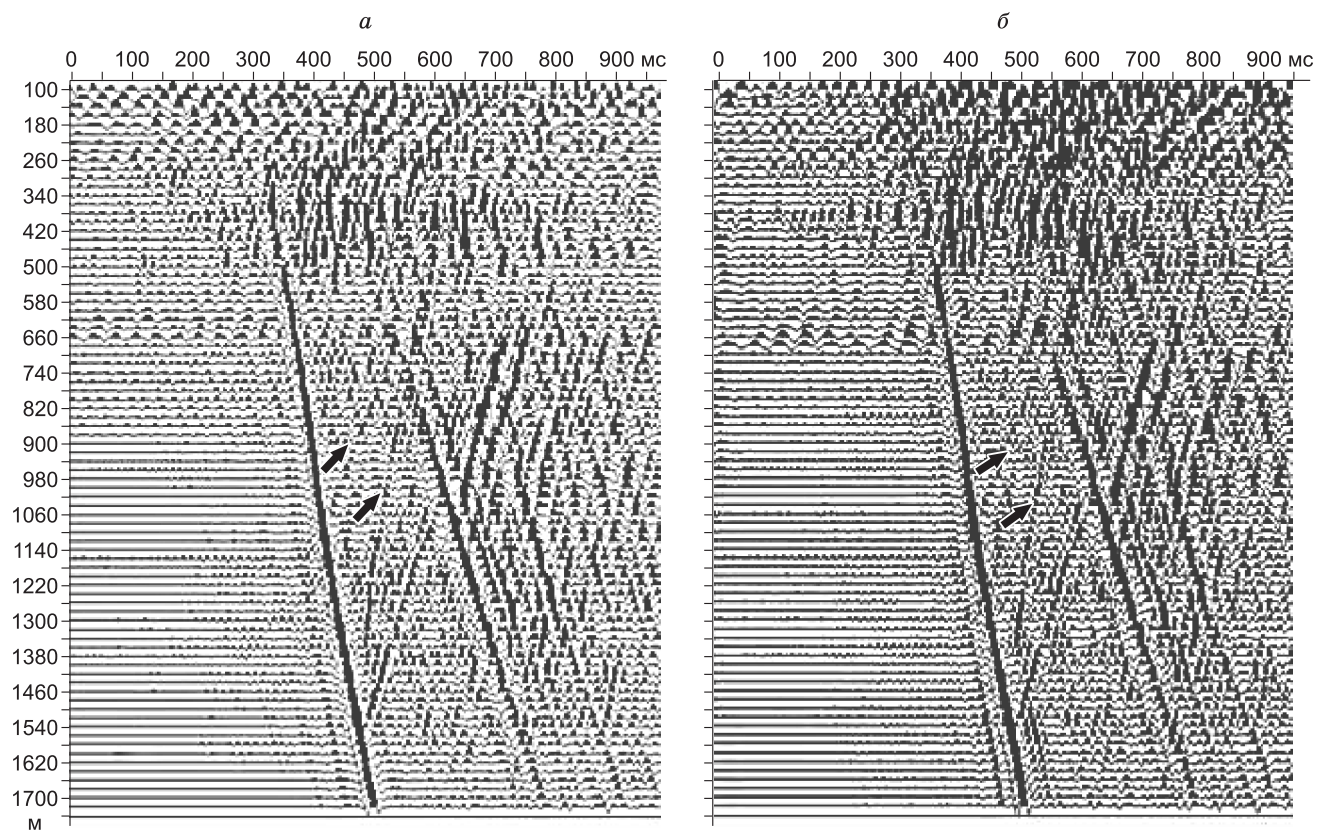


Рис. 5. Записи профиля НВСП после обратной фильтрации по заданной форме сейсмического импульса: а – на входе обратного фильтра коррелограмма профиля; б – деконограмма, рассчитанные по реальному свип-сигналу.

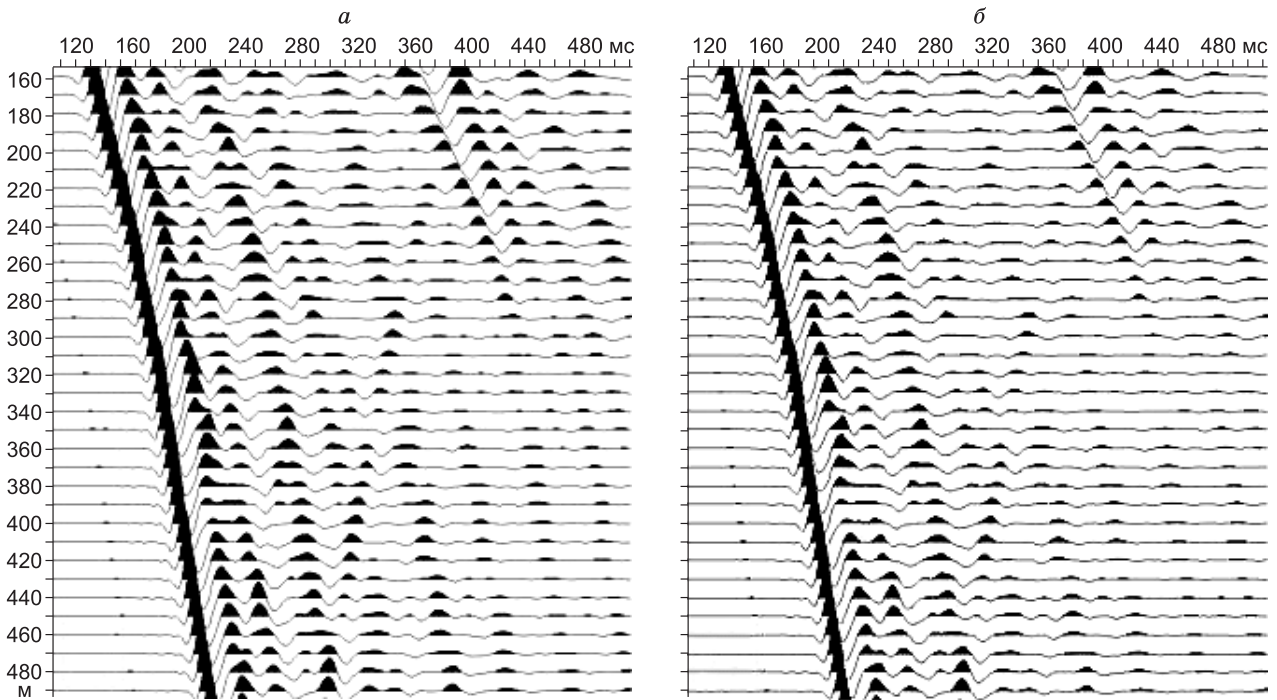


Рис. 6. Фрагмент записей НВСП после виброреконволюции (а) и виброкорреляции (б) с теоретическим свип-сигналом.

Следует отметить одну особенность, которую можно принять за достоинство теоретического свип-сигнала. Она заключается в том, что амплитудный спектр теоретического свип-сигнала равномерен в заданной полосе частот, и поэтому результат корреляции его с реальным свип-сигналом будет иметь такой же (с точностью до постоянного множителя) амплитудно-частотный спектр, что и спектр реального свип-сигнала. Это значит, что коррелограмма получаемая с теоретическим свип-сигналом, эквивалентна сейсмической записи от импульсного источника после обработки ее полосовым фильтром, частотная характеристика которого совпадает с таковой реального свип-сигнала.

Как отмечалось выше, коррелограмма аналогична сейсмической записи, зарегистрированной от импульсного источника, но прошедшей обработку полосовым фильтром с амплитудно-частотной характеристикой, совпадающей с характеристикой автокорреляции свип-сигнала, спад которой более интенсивный, чем у амплитудно-частотной характеристики свип-сигнала (см. рис. 2, а, б).

Это свойство теоретического свип-сигнала проявляется и при виброреконволюции, т. е. деконограмме, как и коррелограмме, полученная с теоретическим свип-сигналом, эквивалентна сейсмической записи, обработанной таким же фильтром. Об этом свидетельствуют результаты, приведенные на рис. 6. Кроме этого, в подтверждение отмеченного факта приведем спектры результата корреляции реального свип-сигнала с теоретическим и результата обратной фильтрации реального свип-сигнала фильтром, рассчитанным по теоретическому свип-сигналу (рис. 7). Они с высокой точностью совпадают между собой и спектром свип-сигнала на рис. 2, а.

Результаты обработки наземных виброграмм, выполненной нами с использованием теоретического свип-сигнала, подтверждают, что при его применении на выходе виброкорреляции и виброреконволюции получаются практически одинаковые результаты.

Таким образом, на основании всего вышесказанного можно сделать вывод, что процедура деконволюции виброграмм обратным фильтром, рассчитанным по реальному свип-сигналу, позволяет получить результаты в полосе частот свип-сигнала, совпадающие с теми, какие бы получались при импульсном возбуждении. Это достигается тем, что амплитудно-частотная характеристика импульса Кронекера в выражении (3) будет равномерной в этой полосе частот. Однако при деконволюции по теоретическому свип-сигналу,

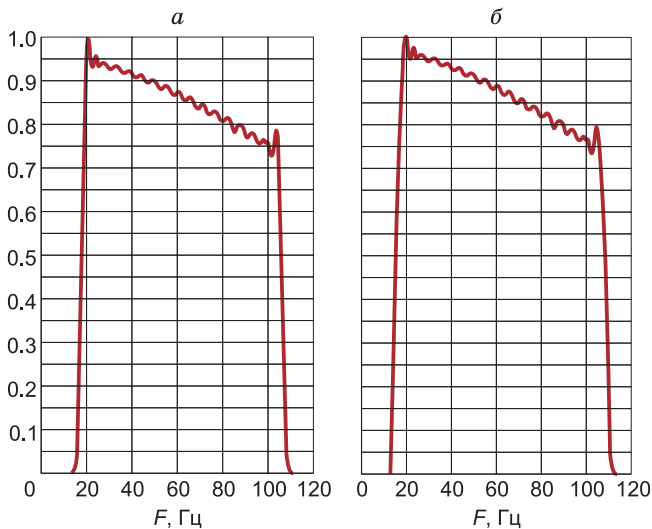


Рис. 7. Амплитудные спектры коррелограммы (а) и деконограммы (б) реального свип-сигнала.

напротив, компоненты спектра в той же степени не восстанавливаются, и в результате они остаются подавленными, т. е. недовосстановленными (см. рис. 2, *а*, 7, *б*). В этом случае результаты виброкорреляции и вибродеконволюции совпадают (см. рис. 6). Следует, однако, иметь в виду, что использование теоретического свип-сигнала как при виброкорреляции, так и при вибродеконволюции не исключает некоторого искажения формы сейсмического импульса вследствие возможных различий фазовых спектров реального и теоретического свип-сигналов.

Литература

Антипин Ю.Г. Способ определения оптимальной задержки обратного фильтра // Разведочная геофизика. Вып. 61. М.: Недра, 1974. С. 26–30.

Жуков А.П., Колесов С.В., Шехтман Г.А., Шнеерсон М.Б. Сейсморазведка с вибрационными источниками. Тверь: Изд-во “Герс”, 2011. 412 с.

Лесников В.В., Адиев Р.Я., Сергеев А.А. Некоторые особенности записей сейсмических колебаний при возбуждении вибрационными источниками // ВСП и трехмерные системы наблюдений в сейсморазведке: Гальперинские чтения-2005 (Москва, 24–27 окт. 2005 г.). М.: Geovers, 2005. С. 48–57.

Шехтман Г.А., Кузнецов В.М. Деконволюция виброграмм ВСП – альтернатива корреляционной обработке или ее подспорье? // Технологии сейсморазведки. 2005а. № 2. С. 80–85.

Шехтман Г.А., Кузнецов В.М. Корреляция или деконволюция виброграмм – что лучше? // ВСП и трехмерные системы наблюдений в сейсморазведке: Гальперинские чтения-2005 (Москва, 24–27 окт., 2005 г.). М.: Geovers, 2005б. С. 44–47.

Brittle K.F., Lines L.R., Dey A.K. Vibroseis deconvolution: a synthetic comparison of cross-correlation and frequency domain sweep deconvolution // Geophys. Prospect. 2001. V. 49. P. 675–686.

*Поступила в редакцию 28 сентября 2012 г.,
в окончательном варианте – 24 октября 2012 г.*

КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

АНТИПИН Юрий Григорьевич – ведущий геофизик подразделения ООО НПЦ “Геостра”, кандидат технических наук. Область научных интересов – скважинная сейсморазведка (способы обработки и интерпретации сейсмических данных, скважинная сейсмическая аппаратура).
E-mail: antipin@bngf.ru

ЯКУПОВ Максим Тимурович – магистр прикладной математики-информатики, аспирант НПФ “Геофизика”, инженер-программист ООО НПЦ “Геостра”. Область научных интересов – скважинная сейсморазведка (способы обработки и интерпретации сейсмических данных).
E-mail: YakupovMT@bngf.ru