

Искажения вибрационного сигнала, обусловленные земной толщей

■ Жуков А.П., ООО «НПП «Спецгеофизика», г. Москва

Настоящую статью заставило написать меня настороженное отношение, в первую очередь, со стороны Заказчиков работ, а также многих полевых геофизиков и обработчиков, к способам компенсации амплитудных и фазовых искажений, обусловленных исследуемой земной толщей. В статьях [2, 3] показано, как улучшается детальность изображения, увеличивается глубинность и разрешенность исследований.

В отечественной системе управления GDS-II реализованы технологии Broad sweep и Well sweep [5, 6], позволившие наконец-то раскрыть потенциальные возможности вибрационного метода по управлению зондирующим сигналом, а также скомпенсировать искажения, обусловленные земной толщей.

Однако бытует точка зрения, что вибрационный источник должен посылать так называемый ЛЧМ-сигнал (линейно-частотно-модулированный), а дальнейшее улучшение изображения будет осуществляться при обработке данных. С одной стороны, алгоритмы обработки непрерывно совершенствуются, особенно различные способы расширения спектра (деконволюция), миграции, инверсные преобразования, и т.п. С другой стороны, искажающее действие земной толщи на ЛЧМ-сигнал может быть настолько значительным, что при обработке получить кондиционное изображение изучаемой толщи бывает весьма затруднительно, а то и невозможно.

В то же время прогресс в расчете оптимальных вибросигналов позволяет в значительной степени скомпенсировать искажения, обусловленные земной средой, что в дальнейшем оптимизирует

последующую обработку и увеличивает достоверность получаемых результатов.

Рассмотрим эту проблему более подробно. Как известно из теории вибрационных сигналов [1], приведение зарегистрированных вибросигналов (виброграмм) к импульсному виду осуществляется путем расчета функции взаимной корреляции (ВКФ) управляющего сигнала и колебаний, принятых сейсмоприёмниками и зарегистрированными сейсмостанцией. Математически эта операция выражается корреляционным интегралом вычисления ВКФ:

$$R_{a, s(\tau)} = \frac{1}{T} \int a(t) S(t+\tau) dt, \quad (1)$$

где $a(t)$ и $S(t)$ соответственно зарегистрированный и управляющий, посланные в Землю, сигналы, τ - временной сдвиг между ними.

Выражение (1) может быть представлено в несколько ином, важном для понимания особенностей вибрационной сейсморазведки, виде. Действительно, сигнал $a(t)$ при отсутствии помех описывается интегралом свертки.

$$a(t) = \int h(\theta) S(t-\theta) d\theta \quad (2)$$

где $h(\theta)$ - оператор фильтра земли, распределение коэффициентов отражения по разрезу.

Подставляя (2) в (1) и меняя порядок интегрирования, получим:

$$R_{a, s(\tau)} = \int h(\theta) \int S(t-\theta) S(t+\theta) dt d\theta,$$

$$R_{a, s(\tau)} = \int h(\theta) r(\tau-\theta) d\theta,$$

где

$$r(\tau-\theta) = \int S(t-\theta) S(t+\theta) dt \quad (3)$$

Величина $r(\tau-\theta)$ представляет собой автокорреляционную функцию (АКФ) управляющего сигнала. Основываясь на выражении (3), можно составить обобщенную модель прокоррелированной вибросейсмической трассы во временной области

$$R_{a, s(\tau)} = r_{s(\tau)} * h(\tau) * F(\tau) * P(\tau) * N(\tau) + n(\tau), \quad (4)$$

где

$F(\tau)$ - искажение волн верхней частью разреза;

$P(\tau)$ - искажение волн при распространении в земной толще;

$N(\tau)$ - искажение волн при регистрации;

$n(\tau)$ - результаты корреляции аддитивных помех с управляющим сигналом.

Из (4) следует, что информативной является та часть коррелограммы, которая определяется сверткой АКФ управляющего сигнала с распределением коэффициентов отражения по разрезу.

Остальная ее часть формируется действием помех, влияние которых должно быть сведено к минимуму, что и определяет основное содержание многих методических, аппаратных, технических приемов и средств современной вибросейсморазведки. При этом АКФ управляющего сигнала может рассматриваться как некоторая импульсная нагрузка, действующая на среду.

Нас будет, в основном, интересовать насколько $F(\tau)$ и $P(\tau)$ из выражения (4) будут оказывать искажающее действие на идеальный квазисинусоидальный сигнал, возбуждаемый виброисточником (ЛЧМ-сигнал). Что касается искажений, вносимых геофоном, имеющим заданную частотную характеристику, при обработке – как правило, это искажение устраняется, хотя может учитываться и при конструировании вибрационного сигнала.

За уровнем случайного шума при проведении полевых работ также ведется постоянный контроль (хотя процесс корреляции виброданных его уменьшает).

Для подавления регулярных волн-помех в любой системе обработки существует объёмный пакет алгоритмов, позволяющих значительно уменьшить их энергию вплоть до полного подавления.

Амплитудные искажения

В зависимости от сейсмогеологических условий конкретных площадей (ВЧР и глубинных) уровень поглощения средне-высокочастотных составляющих вибросигнала может быть достаточно высоким. Обычно земная толща хорошо пропускает частоты от 2 – 3 Гц до 45 Гц, и с различной степенью крутизны ослабляет средне-высокочастотные составляющие вибросигнала.

Вибрационная сейсморазведка позволяет в определенных пределах управлять частотным составом возбуждаемых волн, изменяя их энергетический уровень в заданных полосах частот. Имеется три способа решения этой задачи.

Первый - заключается в том, что в процессе синхронного накопления воздействий последовательно возбуждаются линейные управляющие сигналы, имеющие различные полосы частот. Очевидно, что при их накоплении произойдет сложение волн, и суммарный спектр накопленного сигнала будет неравномерным с подъемами на тех частотах, которые присутствовали на всех исходных посылах. Это так называемые комбинированные управляющие сигналы [4], которые получили определенное практическое применение на первой стадии разработки технологий, позволяющих расширить частотный диапазон зондирующих сигналов, и показали свою

эффективность.

Второй следует из того, что в соответствии с соотношением, определяющим скорость изменения частоты

$$\beta = \Delta F/T = (F_k - F_n)/T,$$

где ΔF , F_k , F_n и T - полоса частот, конечная и начальная частоты и длительность управляющего сигнала, соответственно;

спектр мощности управляющего сигнала $P(\omega)$ и скорость изменения частоты β связаны между собой обратной зависимостью: $P(\omega) = 1/\beta$ - при уменьшении скорости развертки повышается уровень возбуждаемых колебаний и наоборот.

Следовательно, меняя скорость развертки частоты управляющего сигнала, можно увеличивать или уменьшать в определенных частотных диапазонах уровень посылаемых в землю волн.

Управляющие сигналы с переменной скоростью развертки получили название нелинейных.

Третий возможный способ управления спектрами возбуждаемых колебаний заключается в изменении амплитуды управляющего сигнала при постоянной скорости развертки, что приведет к соответствующему изменению уровня возбуждаемых колебаний. Известно несколько реализаций этого способа, основанных на модуляции амплитуды управляющего сигнала некоторой низкочастотной функцией с заданными фиксированными параметрами.

Все эти способы управления спектрами волн реализуются на основе сигналов, которые отнесены к разряду нелинейных. Основным признаком нелинейных сигналов является то, что формируемые ими управляющие развертки имеют неравномерные спектры в полосе генерируемых частот.

Наиболее широкое применение

получили сигналы с переменной скоростью изменения частоты в связи с тем, что они наиболее технологичны и позволяют в определенной степени расширить спектр регистрируемых волн и повысить эффективность вибрационной сейсморазведки.

Основной способ коррекции амплитудных искажений – адаптивные технологии вибрационной сейсморазведки и связан он, в основном, с изменениями скорости развертки в процессе реализации зондирующего свип-сигнала. Основной задачей, которую необходимо решить при выборе того или иного типа нелинейного сигнала, является оценка амплитудно-частотного затухания, обусловленного поверхностными условиями и земной толщей в конкретной точке возбуждения.

В классической модификации адаптивного возбуждения для решения этой задачи сначала возбуждается широкополосный ЛЧМ-сигнал. Далее, с помощью специального программного обеспечения, осуществляется оценка средневысокочастотных искажений регистрируемого сигнала. И уже следующее накопление производится с нелинейным свип-сигналом, позволяющим в той или иной степени скомпенсировать вышеуказанные искажения. Замечательным в данной технологии является то, что этот процесс легко автоматизируется и осуществляется в реальном времени. Более детальное описание данной технологии приведено в статье [2].

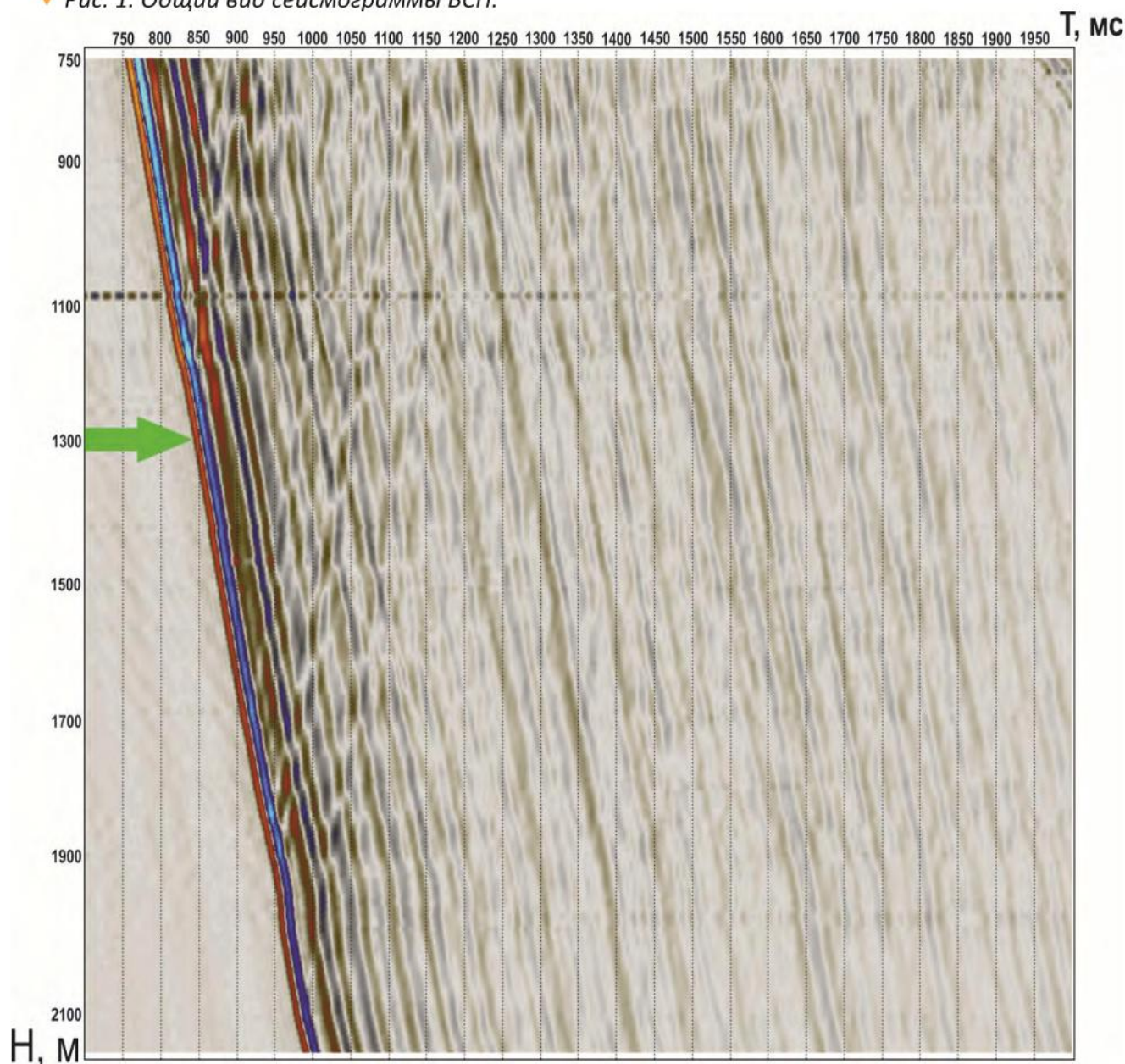
Следует отметить, что в последнее время наметившаяся тенденция смещения начальной частоты свип-сигнала в область ультранизких частот привела к появлению разновидности адаптивной вибротехнологии в широкополосном варианте – «Бродсвип» (Broadswipe®), что позволило расширить частотный

состав возбуждаемых колебаний не только в область высоких частот, но также и в область низких. Это позволило увеличить как разрешенность, так и глубину результирующих данных.

Фазовые искажения

Расширение свип-сигнала в область ультранизких частот высветило проблему фазо-частотного искажения, что наиболее заметно при возбуждении низких частот. Проиллюстрируем данный эффект на реальных данных.

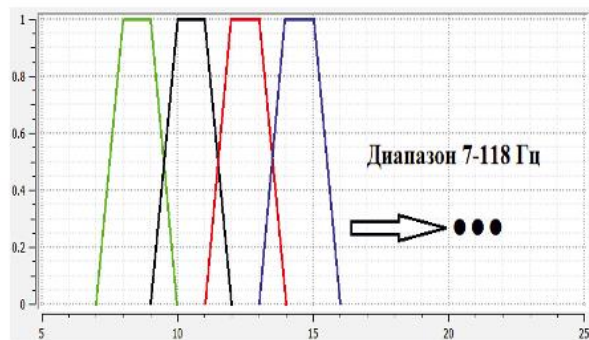
▼ Рис. 1. Общий вид сейсмограммы ВСП.



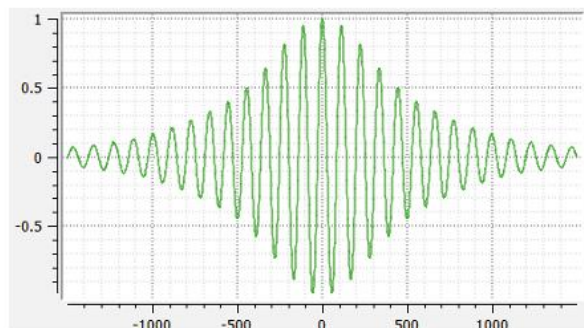
На Рис. 1 изображен общий вид сейсмограммы ВСП, по трассе которой проводился анализ (отмечена зелёным курсором и соответствует глубине ~1300 м). Частотный диапазон свип-сигнала, с которым была получена сейсмограмма, равнялся 7–118 Гц.

Далее, по трассе виброграммы была выполнена фильтрация узкополосными фильтрами трапецевидной формы: основание трапеции 3 Гц, шаг фильтрации 2 Гц (Рис. 2), длина оператора фильтра 2000 мс (Рис. 3).

На рис. 4 показаны амплитудно-

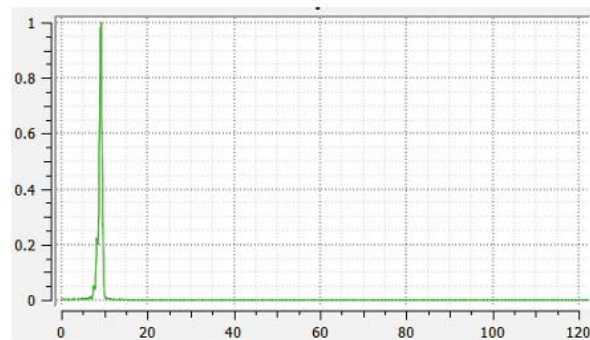


▲ Рис. 2. Схема узкополосной фильтрации трассы виброграммы.



▲ Рис. 3. Оператор фильтра.

частотные характеристики (АЧХ) результата фильтрации в диапазоне 7-8-9-10 Гц, а на рис. 5 - результат фильтрации во



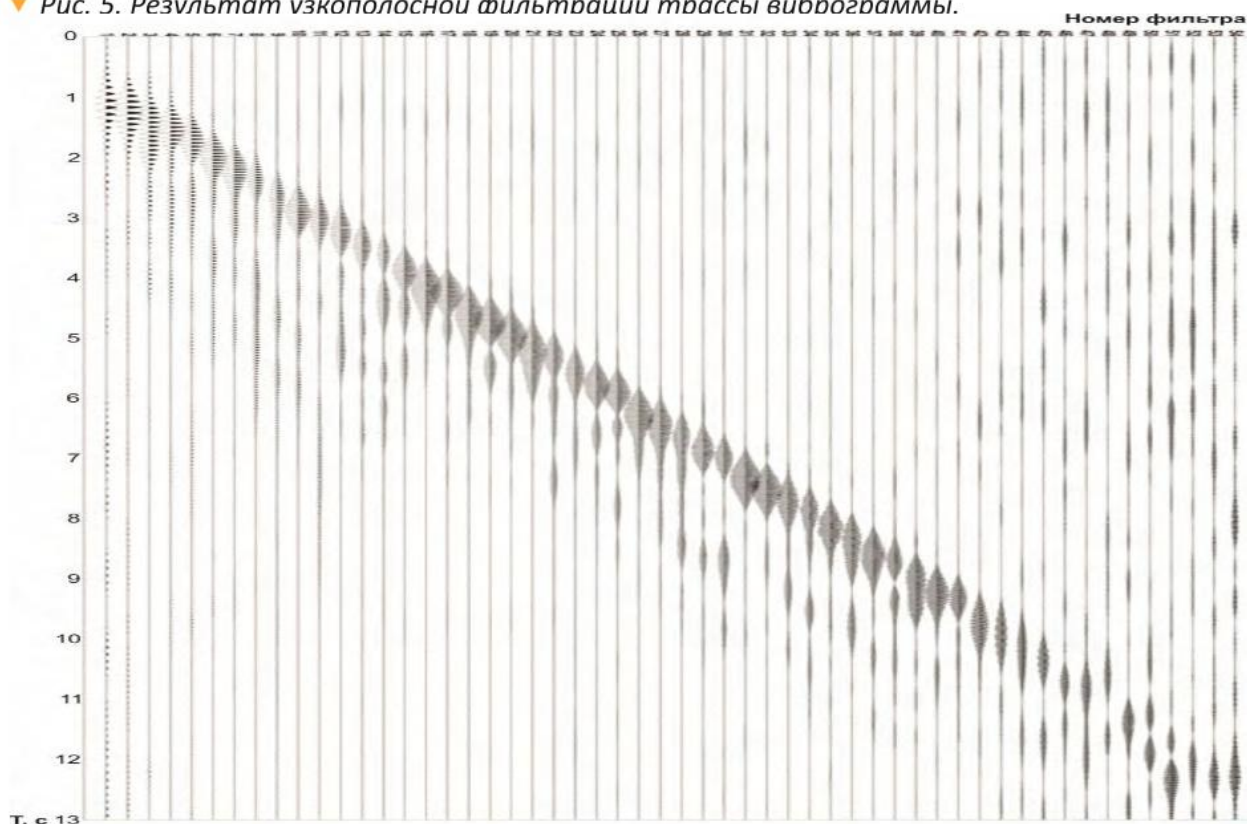
▲ Рис. 4. АЧХ результата фильтрации в диапазоне 7-8-9-10 Гц.

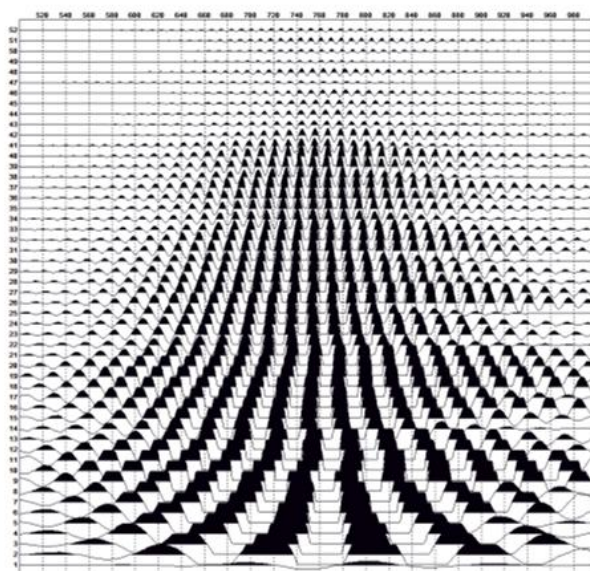
временной области.

После этого выполнена кросскорреляция результатов фильтрации с опорным сигналом (Рис. 6). Из рисунка видно, что фаза сигнала нестабильна. Результат суммирования узкополосных коррелограмм представлен на Рис. 7. Хорошо видно, что фазовые искажения, достигающие максимальных значений на низких частотах, в значительной степени искажают результат суммирования.

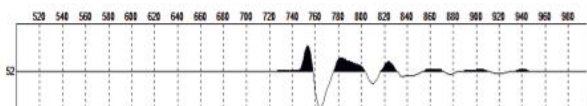
Введём фазовые поправки в результа-

▼ Рис. 5. Результат узкополосной фильтрации трассы виброграммы.





▲ Рис. 6. Коррелограмма трассы после узкополосной фильтрации.



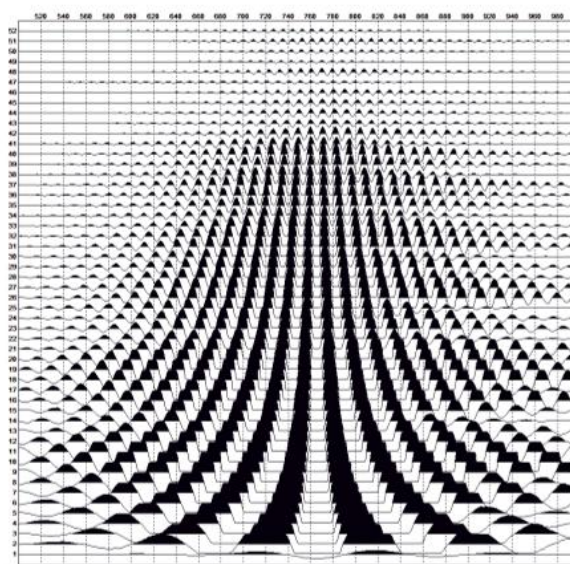
▲ Рис. 7. Результат суммирования узкополосных коррелограмм.

ты узкополосных фильтров (Рис. 8) и, после суммирования, получим идеальный симметричный импульс, соответствующий теоретическим выкладкам вибрационной теории (Рис. 9).

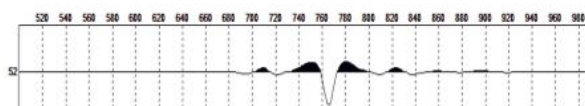
Таким образом, необходимость как амплитудной, так и фазовой коррекции вибрационного сигнала позволит получать более детальную информацию об изучаемой земной толще, увеличивая достоверность результирующих данных.

Такая технология под названием **Wellsweep** [5] была реализована в «НПП «Спецгеофизика» с участием «Газпром добыча Надым», «Газпром недра» и институтом «Газпром ВНИИГАЗ».

В работе [6] показана возможность конструирования различных обратных свип сигналов основываясь на данных ВСП, зарегистрированных после излучения стандартного линейного свип сигнала в широкой полосе частот. Стандартные скважинные наблюдения дают



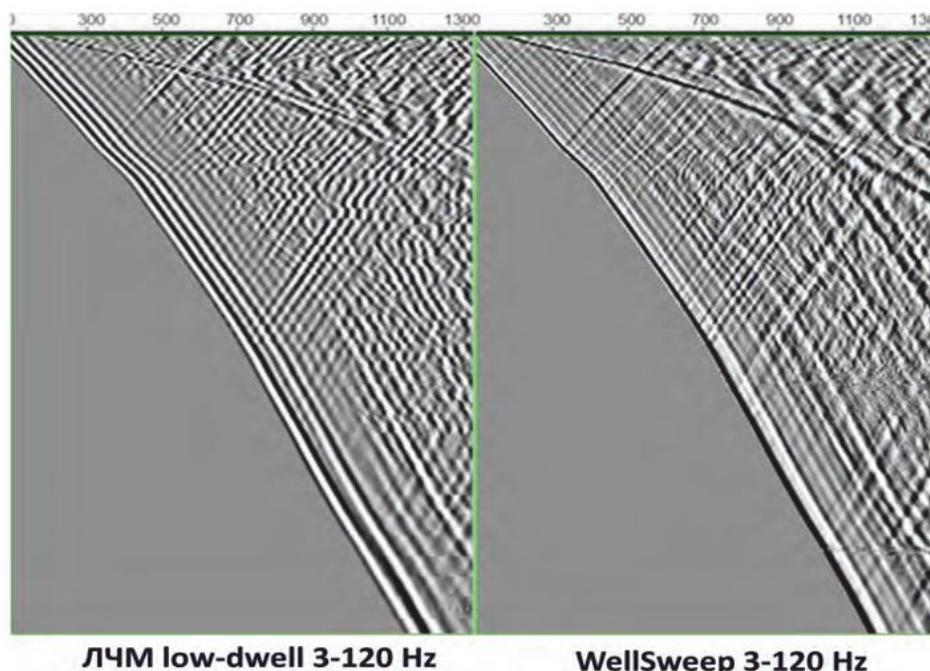
▲ Рис. 8. Коррелограмма. Трассы после фазовой коррекции.



▲ Рис. 9. Результат суммирования узкополосных коррелограмм после фазовой коррекции.

возможность напрямую, на уровне пласта, выделить сигнал падающей волны от источника, который расположен на поверхности наблюдений. Частотно зависимые потери амплитуд и фазовые искажения, возникающие во время прохождения исходного сигнала через геологическую среду, могут быть оценены и компенсированы с помощью различных обратных фильтров. Полная импульсная характеристика любого обратного фильтра пересчитывается в эквивалентный свип сигнал, который затем излучается в геологическую среду под управлением усовершенствованного контроллера виброисточника. Результаты ВСП, полученные с применением полностью управляемых свип сигналов демонстрируют повышение разрешенности отражений и их фазовую коррекцию, которые достигаются непосредственно во время полевых работ (Рис. 10).

► Рис. 10.
Результаты ВСП,
полученные
стандартным
методом (слева)
и с применением
технологии
Wellsweep (справа).

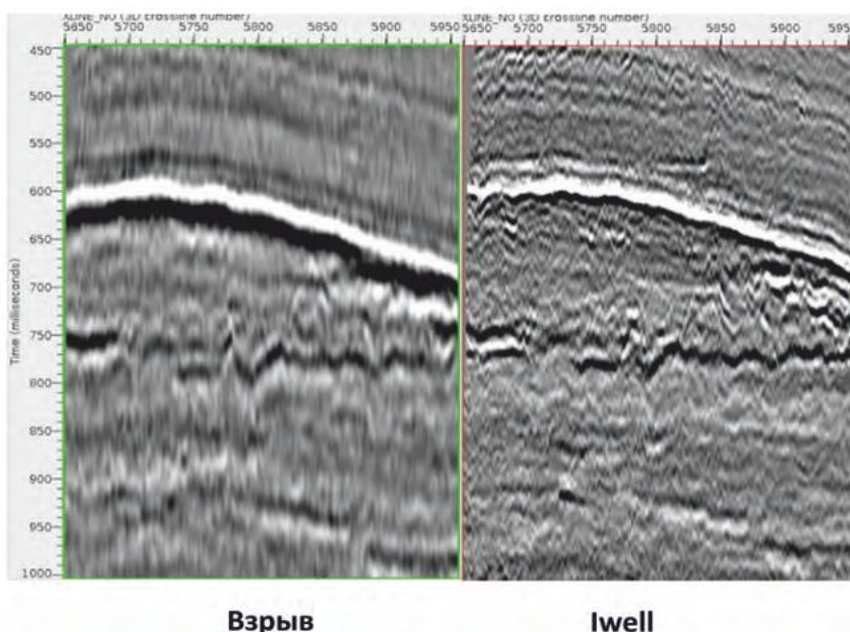


Такие вибрационные сигналы в дальнейшем могут быть использованы для проведения наземной сейсморазведки 3Д.

Поскольку настройка сигналов происходит по данным, зарегистрированным во внутренних точках геологической среды, результаты пространственной сейсморазведки будут максимально возможным способом соответствовать скважинным наблюдениям ВСП, одновременно сближая разрешающую спо-

собность этих двух сейсмических методов и распространяя околоскважинную информацию, извлеченную из ВСП, на пространство между скважинами.

На рис. 11 показаны результаты обработки участка профиля по методике 3Д (временные разрезы) с применением сконструированного свип-сигнала, учитывающего амплитудно-фазовые искажения, извлеченные из скважинных данных.



► Рис. 11.
Временные
разрезы,
полученные
взрывной
методикой
и с применением
технологии
Wellsweep.

Кровля
Залежь
ГВК

Выводы

Таким образом, учет амплитудных и фазовых искажений, осуществляемых в процессе конструирования возбуждаемого вибрационного сигнала, позволяет в значительной степени повысить эффективность вибрационной технологии, увеличивая детальность изображения изучаемого подземного пространства.

В дополнение к вышесказанному хотелось бы отметить следующее.

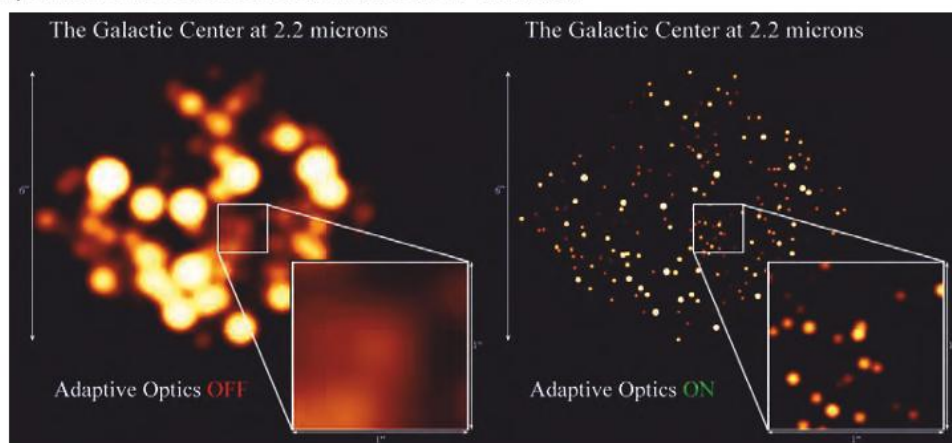
Задача улучшения изображения изучаемых пространств примерно одинакова как в случае исследования земных толщ при помощи сейсмических методов (технологий), так и в случае изучения космического пространства при помощи оптических телескопов, устанавливаемых на земной поверхности. И в том и другом случае существует среда, искажающая зондирующие и оптические сигналы, не позволяющие получать четкое изображение изучаемых объектов (земная толща в случае изучения подземных структур, атмосферная толща при изучении космического пространства). Практически одновременно (в 80-х годах) возникла идея изучения искажений, вносимых земной толщей (в случае астрофизики атмосферной) и коррекции получаемых изображений на основе их учета. Появление вибрационно-

го способа возбуждения колебаний позволило решить эту задачу при изучении земной толщи на основе использования адаптивных технологий виброрейсморазведки [2, 3, 6], в астрономии при использовании сложнейшего аппаратно-программного комплекса, получившего также название "адаптивная оптика" (adaptive optic) [7, 8]. Не вдаваясь в детали, которые можно почерпнуть из многих статей на эту тему, суть ее состоит в следующем.

Первоначально получают информацию об искажениях, обусловленных земной атмосферой на основе анализа прохождения луча света либо от ярких звезд, либо от искусственных источников света, инициированных лазерами, затем корректируют кривизну зеркала телескопа, тем или иным способом, что позволяет сфокусировать изображение изучаемых космических объектов. Причем скорость адаптации высока - до нескольких тысяч раз в секунду. На рис. 12 приведена иллюстрация применения системы адаптивной оптики.

Почему я привел этот пример использования адаптивной технологии в астрономии? Только для того, чтобы показать, как натурное изучение искажений, вносимых земной толщей (в нашем случае) или атмосферой (в случае изучения космического пространства)

▼ Рис. 12. Применение системы адаптивной оптики.



нства) позволяет кардинально улучшать изображение изучаемых объектов, исходя из объективных параметров среды.

Поэтому, можно сколько угодно улучшать характеристики виброисточников (против этого никто не возражает), но основным, для получения качественного изображения изучаемого подземного пространства, является выбор оптимального широкополосного сигнала, учитывающего как амплитудные, так и фазовые искажения, обусловленные земной толщей.

Автор выражает благодарность И.А. Некрасову и И.П. Короткову за обработку материалов, иллюстрирующих эффект амплитудной и фазовой коррекции вибрационного сигнала.

Литература

1. Теория и практика наземной невзрывной сейсморазведки. Под редакцией Шнерсона М.Б.// Москва, ОАО «Издательство «Недра», 1998, 527 с.
2. Жуков А.П., Коротков И.П., Тищенко А.И. Адаптивные технологии вибрационной сейсморазведки. Часть I// Саратов, Приборы и системы разведочной геофизики, 1(68), 2021, с.32-47.
3. Жуков А.П., Коротков И.П. Адаптивные технологии вибрационной сейсморазведки. Часть II// Саратов, Приборы и системы разведочной геофизики, 2(69), 2021, с.32-45.
4. Кострыгин Ю.П. Вибросейсмический и кодоимпульсный способы сейсмической разведки.// Краснодар: Просвещение-Юг, 2014, 494 с.
5. Жуков А.П. и др. Способ вибросейсмической разведки. Россия, Патент № 2780460, Патентообладатель ООО «Газпром добыча Надым», 28.01.2022.
6. Коротков И.П., Жуков А.П., Некрасов И.А. Вибросейсморазведка с полностью

управляемыми сигналами на основе скважинных данных (Vibroseis acquisition with fully controllable sweep signals based on borehole VSP data analysis). 83rd EAGE Annual Conference and Exhibition, Madrid, 2022.

7. F.Merkle, et al. Successful Tests of Adaptive Optics. Журнал The Messenger, № 58, с. 1-4, 1989.

8. Лесин Алексей. Адаптивная оптика: как астрономы изучают звездное небо. <https://www.techinsider.ru/science/211391-adaptivnaya-optika-kak-rassmotret-zvyezdny-na-nebe>, 01.06.2022.

Подробнее об авторе



Жуков
Александр Петрович

главный научный
сотрудник
ООО «НПП
«Спецгеофизика»,
г. Москва.
Доктор технических наук,
профессор.