

Уникальные возможности вибросейсмического метода при использовании кусочно-линейных развёрток

■ Кострыгин Ю.П., ООО «Новоросморгео», г. Новороссийск

Кусочно-линейные вибросейсмические развёртки представляют из себя, как известно, непрерывные последовательности ЛЧМ-сигналов, которые могут отличаться частотными диапазонами, длительностями или фазовыми характеристиками. И основное преимущество таких развёрток по сравнению с другими развёртками, используемыми при вибросейсмических исследованиях, заключается в возможности возбуждения колебаний с любым наперёд заданным спектром.

Такое преимущество позволяет, в частности, реализовать способ оптимальной фильтрации обнаружения, применяемый на этапе возбуждения колебаний и позволяющий максимизировать отношение сигнал/помеха [1]. Указанный способ заключается в использовании управляющих сигналов, амплитудный спектр которых определяется совокупной частотной характеристикой геологической среды и системы вибратор-грунт, поделённой на спектр мощности некогерентных помех (1):

$$S_{ynp}(f) \sim H(f) / B(f), \quad (1)$$

где $S_{ynp}(f)$ – амплитудный спектр управляющего сигнала; $H(f)$ – совокупная амплитудно-частотная характеристика геологической среды и системы вибратор-грунт; $B(f)$ – амплитудный спектр мощности микросейсм.

Физически энергетическая эффективность рассматриваемого способа объясняется тем обстоятельством, что он обеспечивает увеличение плотности энергии возбуждаемых колебаний в области частотных интервалов, характе-

ризующихся наибольшими значениями параметра сигнал/помеха.

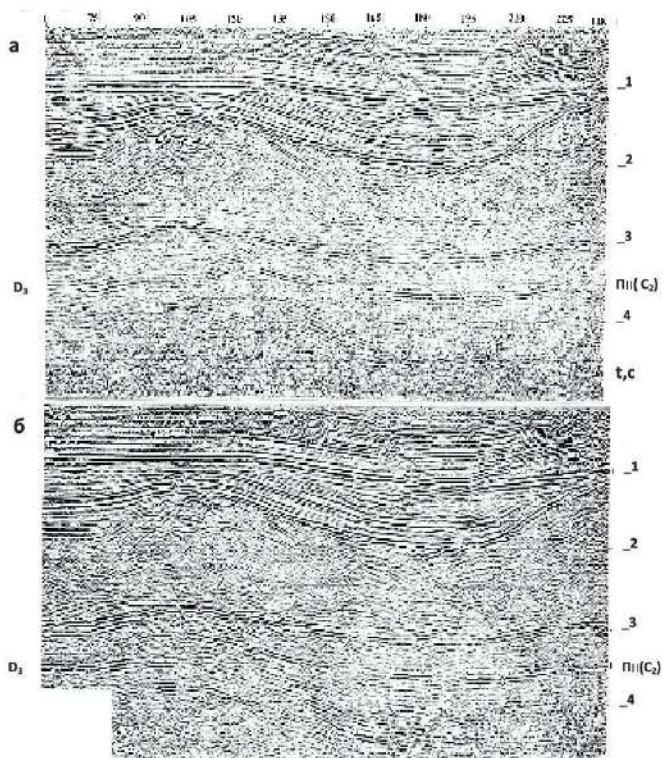
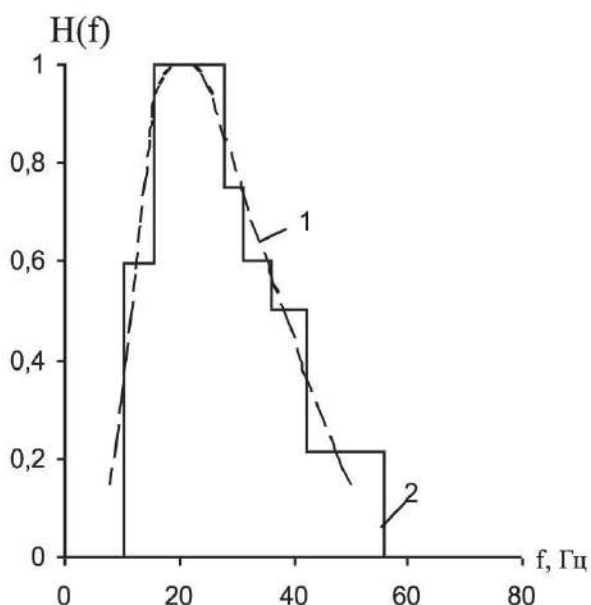
Очевидно, что при такой технологии вибросейсмических наблюдений происходит некоторое ухудшение динамики возбуждаемых и регистрируемых колебаний. Поэтому рассматриваемый способ целесообразно применять лишь в тех случаях, когда целевые границы практически не удаётся проследить с использованием всех других методических приёмов.

Указанный способ достаточно продолжительное время использовался в пределах Калмыкии сейсмическими партиями ПГО «Центргеофизика» при изучении глубокопогруженных девонских отложений. Для повышения глубинности исследований на начальной стадии работ применялось шестиэлементное группирование вибраторов СВ-5-150М, длительность ЛЧМ-развёрток равнялась 16 с, а кратность статистического накопления 12. То есть возбуждение колебаний осуществлялось фактически на пределе энергетических возможностей того времени. Однако даже при таких параметрах методики не удавалось проследить девонские отложения для большинства площадей Калмыкии. В этой связи в качестве последней возможности для решения поставленных задач было предложено использовать способ оптимальной фильтрации обнаружения с применением кусочно-линейных развёрток. Для этого предварительно определялись совокупные частотные характеристики среды и системы вибратор-грунт $H(f)$ для волн, отражённых от относительно устойчивого горизонта в отложениях башкирского яруса $\Pi\Pi(C_2)$, расположен-

ного в непосредственной близости от девонских отложений. Расчёт совокупных характеристик осуществлялся путём спектрального анализа колебаний, зарегистрированных с применением широкополосных ЛЧМ-сигналов. При выборе кусочно-линейной развёртки зависимость $B(f)$ в данном случае не учитывалась, т.к. микросейсмы, регистрируемые в степных районах, отличаются достаточно равномерным амплитудным спектром в сейсмическом диапазоне частот [2]. Параметры развёртки задавались таким образом, чтобы спектр ФАК управляющего сигнала максимально приближался к функции $H(f)$ (рис. 1).

На рис. 2 сопоставлены временные разрезы, полученные на участке территории Калмыкии, расположенном в пределах юго-западной части Прикаспийской

▼ Рис. 1. Выбор параметров кусочно-линейной согласованной развёртки для условий юго-западной части Прикаспийской впадины: 1 – совокупная частотная характеристика среды и системы вибратор-грунт для отражений от горизонта П11; 2 – приблизительный спектр ФАК использованной кусочно-линейной развёртки.



▲ Рис. 2. Разрезы, полученные в условиях юго-западной части Прикаспийской впадины с использованием ЛЧМ-развёртки (а) и согласованной кусочно-линейной развёртки (б)

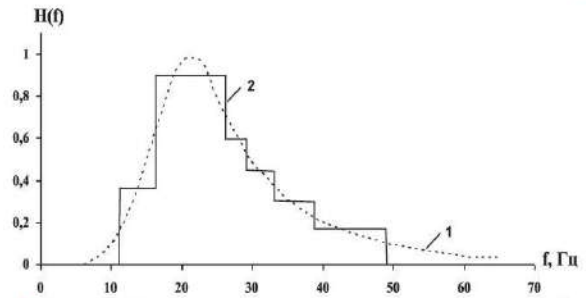
впадины, с применением согласованной кусочно-линейной развёртки и обычного ЛЧМ-сигнала. Методика полевых наблюдений и граф обработки при использовании нелинейной развёртки в данном случае были такими же, как и при использовании ЛЧМ-сигнала.

Наблюдения выполнялись по системе 24-кратных перекрытий, частотный диапазон развёрток равнялся 12-56 Гц, колебания возбуждались шестью вибраторами СВ-5-150М, применялась 18-элементная группа сейсмоприёмников на базе 51 м. Из рис. 2 можно видеть, что использование кусочно-линейной согласованной развёртки обеспечило более высокую надёжность выделения горизонтов в отложениях девона.

Значительный положительный эффект от применения согласованных кусочно-

линейных развёрток был достигнут при проведении вибросейсмических работ в условиях Ферганской впадины. Так, в 1992 году при бурении одной из глубоких скважин на площади Мингбулак, расположенной на территории Ферганской впадины, при достижении забоем кирпично-красной свиты на глубине 5300 м возник мощный нефтяной фонтан. Суточный объём фонтанирующей нефти составлял $\approx 1800 \text{ м}^3$, при этом в $\approx 70 \text{ м}$ от скважины протекала река Сыр-Дарья. Необычность ситуации заключалась в том, что вибросейсмические исследования, которые ранее проводились на площади Мингбулак с использованием ЛЧМ-сигналов, не позволяли даже ориентировочно оценить конфигурацию и размеры ловушки нефти, с которой был связан фонтан. И это затрудняло оперативное принятие необходимых решений в сложившейся критической ситуации специалистами, приглашёнными из Западной Сибири и США.

Для того, чтобы получить информацию о геологическом строении разреза в интервале кирпично-красной свиты, руководством ПО «Узбекгеофизика» было принято решение провести на площади Мингбулак вибросейсмические исследования с использованием кусочно-линейных согласованных развёрток.

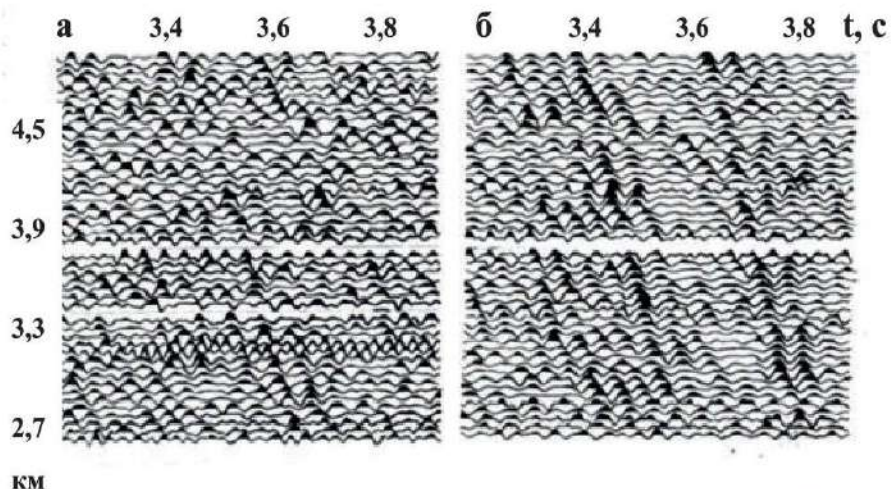


▲ Рис. 3. Выбор параметров кусочно-линейной развёртки для площади Мингбулак: 1 – совокупная частотная характеристика среды и системы вибратор-грунт; 2 – приблизительный спектр ФАК, использованной кусочно-линейной развёртки.

Кусочно-линейные развёртки были согласованы с совокупными амплитудно-частотными характеристиками системы вибратор-грунт и геологической среды для наиболее глубоких горизонтов, которые представлялось возможным качественно выделить при вибросейсмических наблюдениях с использованием ЛЧМ-сигналов, и состояли из последовательности 6 ЛЧМ-сигналов (рис. 3).

В результате проведённых работ были получены весьма качественные сейсмические материалы и было установлено, что фонтан нефти связан с протяжённой антиклинальной структурой. Так, на рис. 4 сопоставлены коррелограммы, полученные на площади Мингбулак, с исполь-

► Рис. 4. Коррелограммы, полученные на площади Мингбулак ($\Delta F=11-49 \text{ Гц}$, группа из 8 вибраторов): а – ЛЧМ-сигнал; б – согласованная кусочно-линейная развёртка.



зованием ЛЧМ-сигналов и кусочно-линейных согласованных развёрток. Из рисунка можно видеть, что в конкретных условиях кусочно-линейные согласованные развёртки обеспечили значительное улучшение качества регистрируемых глубоких отражений.

Следует отметить, что если на начальной стадии развития технологии, использующей кусочно-линейные развёртки, приходилось рассчитывать частотные диапазоны и длительности для каждого сегмента развёртки, то в настоящее время геофизику по точкам достаточно задать желаемый амплитудный спектр управляющих сигналов, остальную же работу выполняет компьютер системы управления вибросейсмических комплексов, что существенно упрощает использование таких развёрток и обеспечивает формирование более гладкого спектра сигналов. Следует также отметить, что современные вибросейсмические излучатели являются значительно более мощными по сравнению с вибраторами СВ-5-150М, однако и в настоящее время нередко возникают ситуации, когда отношение сигнал/помеха при регистрации колебаний характеризуется аномально низкими значениями. Поэтому рассмотренный способ может иметь хорошие перспективы применения и в современных условиях.

Наряду с реализацией оптимальной фильтрации обнаружения на этапе возбуждения колебаний, кусочно-линейные развёртки могут успешно использоваться и при необходимости увеличения веса высокочастотных гармоник. Вместе с тем, для усиления высокочастотных компонент сигнала в настоящее время системы управления вибраторами обеспечивают работу не только кусочно-линейных, но и, так называемых, логарифмических и степенных нелинейных развёрток. При этом практическое освоение таких сигналов, задава-

емых аналитическими выражениями, началось именно с логарифмических развёрток в связи с тем, что геофизики принимали во внимание то обстоятельство, что частотные искажения сейсмических колебаний при прохождении геологической среды, в основном, определяются экспоненциальной функцией с отрицательным показателем. Поэтому у специалистов преобладало мнение, что наиболее строгая компенсация искажений сигнала представляется возможным при условии, если возбуждение колебаний осуществляется с использованием нелинейных развёрток, амплитудный спектр которых соответствует экспоненциальным функциям с положительными показателями. Такими спектральными характеристиками, как известно, и отличаются именно логарифмические развёртки. Например, амплитудный спектр логарифмической развёртки вида «децибел-на-герц», предложенной компанией «PELTON», можно представить следующим образом [2]:

$$S_{\text{ynp}}(F) \sim e^{(F-F_H)H(\ln 10)/20}, \quad (2)$$

где F_H - начальная частота развёртки; H - градиент изменения спектральной плотности сигнала с размерностью дБ/Гц.

Однако, рассматривая вопрос о возможности строгой компенсации искажений сигнала в геологической среде, следует также иметь ввиду и весьма значительное ослабление высокочастотных гармоник в процессе возбуждения и регистрации колебаний. Так, системы управления вибраторами, как известно, обеспечивают приблизительное равенство динамических усилий на грунт, а значит и ускорения возбуждаемых колебаний, в пределах всего частотного диапазона развёртки, за исключением интервалов скосов. Вместе с тем, регистрация колебаний осуществляется, как

правило, сейсмоприёмниками, т.е. датчиками скорости смещения. В этой связи в электромеханической части сейсмоприёмника происходит интегрирование колебательного процесса ускорения частиц грунта (3):

$$A f \sin \omega t \, dt = - (A/\omega) \cos \omega t \quad (3)$$

Поэтому, если, например, амплитуда гармонического сигнала A не зависит от частоты колебаний, то после интегрирования она определяется уже отношением (A/ω) , т.е. уменьшается пропорционально увеличению частоты. Связанные с этим искажения вибросейсмического сигнала соизмеримы с ослаблением высокочастотных гармоник при прохождении геологической среды, и поэтому строгое восстановление спектра колебаний путём использования логарифмических развёрток, впрочем, как и степенных развёрток, в принципе невозможно. Применение же кусочно-линейных развёрток позволяет без каких-либо ошибок при необходимости сформировать равномерный амплитудный спектр

интересующих нас отражений. Для этого следует определить совокупную частотную характеристику геологической среды и системы вибратор-грунт $H(f)$ и далее по точкам задать амплитудный спектр управляющего сигнала, совпадающий с функцией $1/H(f)$.

Однако, следует отметить, что развёртки, которые бы полностью компенсировали частотные искажения колебаний в среде и системе вибратор-грунт, применяются крайне редко, так как довосстановить спектр колебаний можно за счёт использования процедуры обратной фильтрации. При этом наиболее эффективное применение алгоритмов деконволюции представляется возможным, если управляющий сигнал обеспечивает для целевых отражений приблизительно одинаковое и достаточно высокое значение отношения сигнал/помеха в пределах всего частотного диапазона развёртки. Такое условие также можно реализовать исключительно с применением именно кусочно-линейных развёрток.

Так, на рис. 5 сопоставлены временные разрезы, полученные в пределах

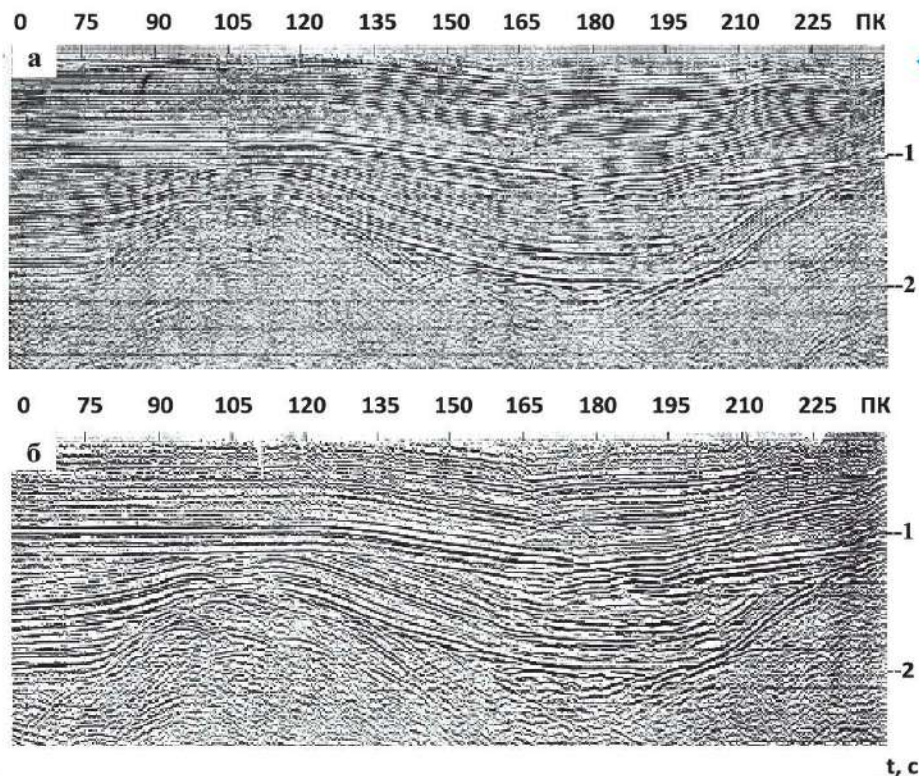


Рис. 5. Разрезы, полученные в условиях юго-западной части Прикаспийской впадины с использованием высокочастотной кусочно-линейной развёртки (а) и ЛЧМ-развёртки ($\Delta F = 10-90$ Гц) (б).

юго-западной части Прикаспийской впадины, с использованием кусочно-линейной развёртки (а) и ЛЧМ-сигнала (б). Методика полевых наблюдений и граф обработки при использовании нелинейной развёртки в данном случае были такими же, как и при работе с ЛЧМ-сигналом. Возбуждение колебаний осуществлялось 6-элементной группой вибраторов СВ-5-150М, развивающих номинальное динамическое усилие на грунт, равное 50 кН, частотный диапазон развёрток равнялся 10-90 Гц. Вибраторы располагались вдоль двух параллельных линий на базе 20 м. Для регистрации сигналов использовались 18-элементные группы сейсмоприёмников на базе 25 м.

Задача, которая в данном случае была поставлена перед исполнителями, заключалась в необходимости сформировать такую кусочно-линейную развёртку, которая бы обеспечила для отражений в нижней части надсолевого комплекса примерное равенство отношения сигнал/помеха в интервале всей используемой полосы частот, за исключением скосов. А далее, уже применив программу деконволюции DECVTX, предполагалось сопоставить материалы, полученные с применением нелинейной развёртки и ЛЧМ-сигнала.

Как видно из рисунка 5, совместное применение кусочно-линейной развёртки с деконволюцией позволило существенно повысить разрешённость и информативность записи. При этом количественный сравнительный анализ разрезов, выполненный с применением программ KGS и FREVTX показал, что при работе с нелинейной развёрткой разрешённость записи повысилась в ≈ 2 раза, а комплексный коэффициент качества (RPN) в 1,2-1,8 раза. В районе пикета 210 удалось проследить тектонические нарушения, выделяющие пассивный

горст, что было достаточно важно для геологов. При работе же с ЛЧМ-сигналом определение местоположения горста представлялось проблематичным.

Эффективное применение кусочно-линейных развёрток осуществляется также и при реализации технологии адаптивной вибросейсморазведки с торговой маркой АвиСейс, разработанной в ООО «Геофизические Системы Данных» под руководством Жукова Александра Петровича [3]. Основная задача, стоящая перед адаптивной вибросейсморазведкой, заключается в компенсации динамических аномалий волнового поля, возникающий вследствие неустойчивости вдоль профиля совокупной амплитудно-частотной характеристики системы вибратор-грунт и верхней части геологического разреза. Очевидно, наличие таких аномалий усложняет интерпретацию сейсмических материалов с использованием динамического атрибутивного анализа и снижает эффективность интерференционных систем на больших базах.

Основные принципы адаптивной вибросейсморазведки включают в себя необходимость дважды отрабатывать все пункты возбуждения, предусмотренные в проекте. При этом для первого наблюдения предполагается использование широкополосного ЛЧМ-сигнала и на основании спектрального анализа наиболее устойчивого отражения в верхней части разреза определять совокупную частотную характеристику системы вибратор-грунт и геологической среды $H(f)$. Дублирующее наблюдение осуществляется с применением кусочно-линейных развёрток, амплитудный спектр ФАК которых $S_{\text{фак}}(f)$ соответствует выражению (4):

$$S_{\text{фак}}(f) = J(f) / H(f), \quad (4)$$

где $J(f)$ – желаемый амплитудный спектр корреляционных импульсов для отражения, по которому производится расчёт совокупной частотной характеристики $H(f)$.

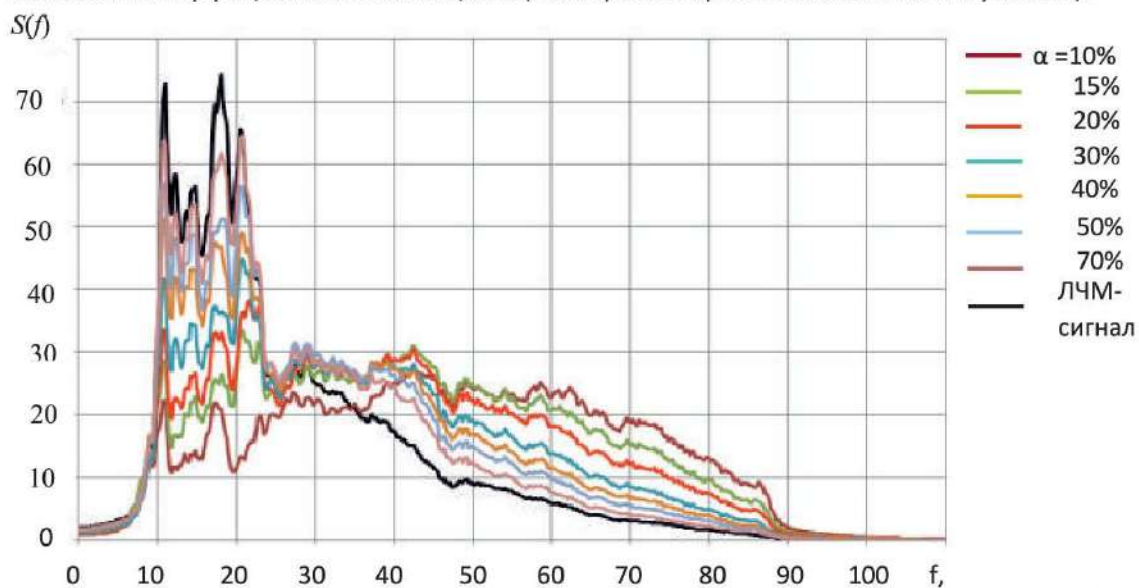
При этом, по аналогии с обрабатываемыми программами деконволюции в системе управления, предусмотренной для реализации технологии АвиСейс, выбор функции $J(f)$ и соответствующего ей сигнала, осуществляется в автоматическом режиме в зависимости от задаваемого относительного уровня некогерентных помех в процентах, условно называемого коэффициентом адаптации α . Наиболее полное восстановление спектра регистрируемых колебаний происходит при малых заданных значениях α . По мере же возрастания коэффициента адаптации, возбуждаемые дублирующие сигналы приближаются по своим возможностям к ЛЧМ-сигналам, а степень восстановления спектрального состава колебаний снижается. Т.е. коэффициент α при построении данной технологии является чрезвычайно важным параметром, фактически определяю-

щим компромисс между глубиной сейсмической разведки и динамикой формируемых колебаний.

Так, на рис. 6 приведены спектры отражений, зарегистрированных в условиях Южно-Русского нефтегазоконденсатного месторождения с использованием технологии АвиСейс. Из рисунка можно видеть, что спектр колебаний при проведении сейсмических исследований с применением адаптивной вибросейсморазведки зависит, по аналогии с алгоритмами деконволюции, от задаваемого уровня шума α .

В качестве примера использования адаптивной вибросейсморазведки на рис. 7 сопоставлены временные разрезы, полученные на основании исследований, проведённых ООО «Геофизические Системы Данных» на Южно-Русском месторождении с применением ЛЧМ-сигнала (а) и кусочно-линейной развёртки по технологии АвиСейс (б). Из рисунка можно видеть, что при работе с ЛЧМ-сигналом качество прослеживания целого ряда отражений в интервале 0,5-2,0 с было крайне низким. Использо-

▼ Рис. 6. Спектры отражений, зарегистрированных в условиях Южно-Русского месторождения с использованием технологии АвиСейс при различных значениях коэффициента адаптации α (материалы предоставлены А.П. Жуковым).



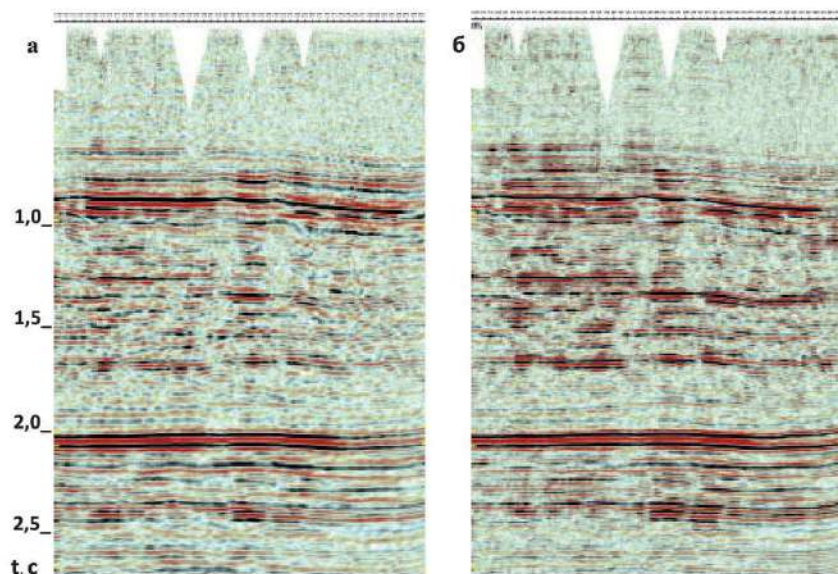


Рис. 7. Временные разрезы, полученные в условиях Южно-Русского месторождения ($\Delta F = 6 - 80$ Гц):
 а – использован ЛЧМ-сигнал;
 б – адаптивная вибросейсморазведка с применением кусочно-линейных развёрток (материалы предоставлены А.П. Жуковым).

ние же технологии адаптивной сейсморазведки позволило существенно улучшить прослеживаемость отражений в указанном диапазоне времён. При этом существенно повысился и спектральный состав колебаний, поскольку исполнители в данном случае задавали относительно высокочастотную функцию $J(f)$, соответствующую коэффициенту адаптации 20%.

И, наконец, значительный практический интерес представляют кусочно-линейные развёртки, состоящие из непрерывной последовательности укороченных до $2 \div 3$ секунд ЛЧМ-сигналов с одинаковыми частотными диапазонами и длительностями, но при этом с различными полярностями [4]. Такие развёртки отличаются повышенной скоростью изменения частоты и поэтому элементы конструкций зданий и сооружений, расположенных в непосредственной близости от вибросейсмических излучателей, не успевают войти в резонанс, что позволяет существенно снизить опасность их разрушения. Вместе с тем, таким последовательностям, в общем случае, соответствуют периодические корреляционные функции с периодом повторения $2 \div 3$ секунды, что

ограничивает возможности их использования для большинства задач, стоящих перед нефтегазовой сейсморазведкой. С целью же применения их в практической работе достаточно исключить на коррелограмме первый период повторения, что не сложно реализовать путём задания функции кода, у которой первый боковой дискрет ФАК равен 0. В этом случае, например, при значениях длительности сегментов T , равных 2 с или 3 с, коррелограмма в интервале соответственно 4 с или 6 с от первых вступлений будет свободна от интенсивного корреляционного фона, связанного с периодичностью исходного сигнала.

Такое требование выполняется, например, для разнополярной последовательности, состоящей из 7 ЛЧМ-сигналов, функция кода которой, соответствует последовательности (5):

$$1 \ 1 \ 1 \ -1 \ 1 \ 1 \ -1 \quad (5)$$

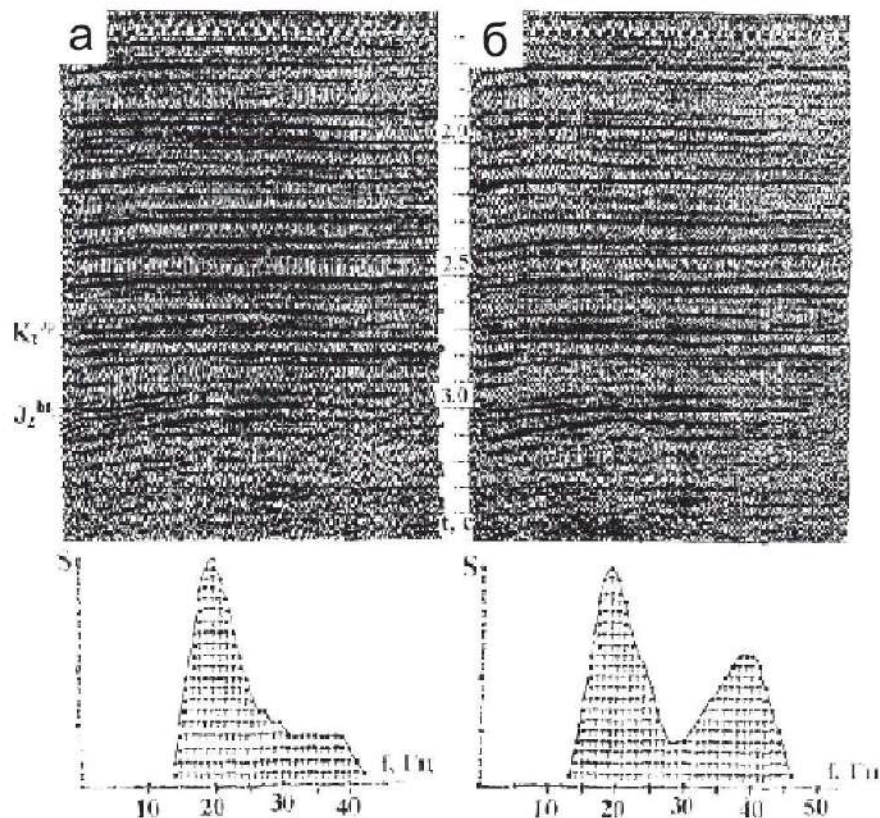
Первый боковой дискрет ФАК функции кода (5) равен нулю, поэтому выбор такого закона изменения полярности ЛЧМ-развёрток и приведёт к обнулению первого периода повторения коррелограммы.

Профильные наблюдения с применением рассматриваемого способа весьма успешно проводились ОАО «Краснодар-нефтегеофизика» на территории ряда станций Краснодарского края и, в частности, в пределах станции Тбилисская. Геологическая задача в пределах исследуемой площади заключалась в поиске структурных ловушек в нижнемеловых и юрских отложениях. Отражённые от целевых границ волны регистрировались в интервале 2,6 – 3,2 с. На ограниченном участке станции Тбилисская, расположенном на удалении от жилых домов, наблюдения проводились дважды: с использованием непрерывной разнополярной последовательности двух-секундных ЛЧМ-сигналов и обычных ЛЧМ-сигналов протяжённостью 10 с. Частотный диапазон развёрток соответствовал интервалу 10 - 48 Гц. Закон изменения полярности при использовании непре-

рывной последовательности ЛЧМ-сигналов определялся кодовой функцией (5), в следствие чего исключался первый побочный период корреляционной функции последовательности.

На рис. 8 сопоставлены временные разрезы, полученные при использовании ЛЧМ-сигнала и кусочно-линейной развёртки. На основании сравнительного анализа разрезов можно сделать вывод о том, что суммарные записи, полученные с применением обычного ЛЧМ-сигнала и разнополярной непрерывной последовательности 2-х секундных ЛЧМ-сигналов, характеризуются практически равноценным качеством. Вместе с тем, выполненный спектральный анализ свидетельствует о том, что при использовании укороченных ЛЧМ-сигналов удаётся расширить эффективную ширину спектра в область высоких частот, т.е. несколько улучшить динамику целевых

► Рис. 8. Временные разрезы ОГТ, полученные в пределах станции Тбилисская: а – ЛЧМ-сигнал; б - непрерывная последовательность 2-секундных ЛЧМ-сигналов, функция кода 1 1 1-1 1 1 -1; интервал спектрального анализа 2,6-3,2 с.



отражений. Указанное обстоятельство является чрезвычайно принципиальным и физически связано с многократным увеличением скорости изменения частоты при использовании укороченных развёрток и, в этой связи, значительно более быстрым прохождением низкочастотного резонанса колебательной системы вибратор-грунт. Т.е. если при стандартных технологиях вибросейсмических наблюдений с использованием ЛЧМ-сигналов динамика возбуждаемых колебаний практически не зависит от длительности развёртки, то при длительностях $1 \div 3$ с и соответственно повышенных значениях отношения $(\Delta F/T)$ вибратор не успевает войти в рабочий режим и это приводит к некоторому смещению спектра возбуждаемых колебаний в высокочастотную область.

Необходимо также отметить, что рассмотренный способ в настоящее время является фактически единственным способом, позволяющим значительно уменьшить опасность разрушения зданий и сооружений при проведении вибросейсмических наблюдений и при этом сохранить на коррелограммах такой же низкий уровень корреляционных помех, как и при работе с обычными ЛЧМ-сигналами.

Литература

1. Кострыгин Ю.П., Лев И.С., 1992, Способ вибросейсмической разведки: СССР, авт. св. №1774301.
2. Кострыгин Ю.П., 2014, Вибросейсмический и кодоимпульсный методы сейсмической разведки. – Краснодар: Просвещение-Юг, 494 с.
3. Жуков А.П., 2016, Технология адаптивной вибросейсморазведки (АВИСейс) повышает качество и эффек-

тивность сейсморазведочных работ. Приборы и системы разведочной геофизики, 1, 71–79.

4. Кострыгин Ю.П., Сидоренко Д.В., 1998, Способ вибросейсмической разведки: Россия, патент № 2102776.

Подробнее об авторе



Кострыгин
Юрий Петрович

Доктор технических наук,
директор ООО
«Новоросморгео».

Внимание, анонс!



Желающие приобрести книгу
Юрия Петровича Кострыгина
**«Вибросейсмический
и кодоимпульсный способы
сейсмической разведки»**
могут обращаться
kostr_p@mail.ru
или по телефону:
8-918-135-87-30.