



Slip Sweep – метод высокопроизводительной сейсморазведки без потери качества получаемых данных в условиях центральной части России

Гафаров Р.М., ОАО «Башнефтегеофизика», г. Уфа

1. Производительность

При проведении полевых сейсморазведочных работ всё большее значение приобретают методы высокопроизводительной сейсморазведки, такие как Slip Sweep, HFVS, DSSS, которые применяются, в основном, на пустынных ландшафтах. Мирового опыта проведения таких съёмок в густонаселённых районах практически нет. ОАО «Башнефтегеофизика» провела подобные работы в опытном варианте в центральной России (Самарская область).

Целью данных работ являлась проверка возможности проведения работ по данной методике в условиях местности с большим количеством промышленных помех.

На схеме (Рис.1) показаны линии приёма (синим цветом) и линии возбуждения (красный цвет). Около 50% площади работ расположено в зоне промышленных помех. Это три населённых пункта, две реки и дорога. Остальная территория занята под сельскохозяйственные работы.

Ниже дана краткая информация о современных полевых сейсмических методиках вибрационной сейсморазведки.

а) Работа с одиночной группой вибраторов

Время цикла работы вибраторов на точке состоит из свип-сигнала + время записи + время переезда вибраторов на следующую точку. Переезд вибраторов – это потерянное время, время простоя.

б) Работа двумя группами вибраторов (метод Flip flop)

Flip flop – использует 2 группы вибраторов. Время цикла = свип + запись. Запись идёт практически непрерывно. Основные задержки – наладка расстановки и объезды вибраторов. Влияние групп друг на друга отсутствует.

в) Расширенный Flip flop

Вследствие затухания высоких частот до достижения глубоких горизонтов возможно сократить время прослушивания. При этом можно использовать 3 группы вибраторов. Время цикла = времени свипа. Так как запись идёт непрерывно, необходима супер-расстановка, включающая все приёмные расстановки всех групп вибраторов.

г) Метод Slip sweep

Данный метод позволяет использовать более 3-х групп виброисточников. Время цикла – меньше времени свипа. Так же обязательна супер-расстановка, включающая все приёмные расстановки всех групп вибраторов.

Существуют также методы HFVS и DSSS, но в данной статье в их описании нет необходимости. Более подробную информацию о современных методах вибрационной сейсморазведки можно найти в [1, 2, 3].

В целях сравнения результатов, сначала участок был отработан по стандартной методике Flip flop со следующими параметрами возбуждения (1 этап):

- длина свип-сигнала – 10 с;
- начальная частота развёртки – $F_{нач}$ – 8 Гц;
- конечная частота развёртки – $F_{кон}$ – 90 Гц;
- количество накоплений – 2;
- количество вибраторов – 8 (2 группы по 4 вибратора).

Затем, в режиме Slip sweep, эта площадь

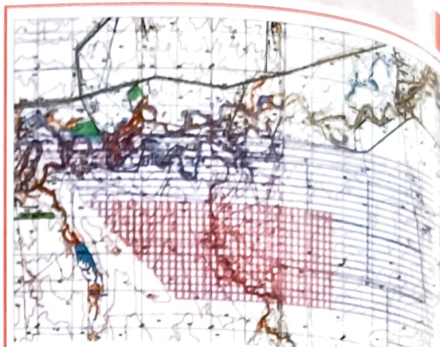


Рис. 1 Схема размещения линий приёма и линий возбуждения

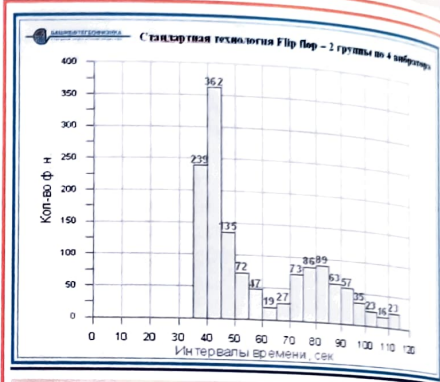


Рис. 2 Flip flop

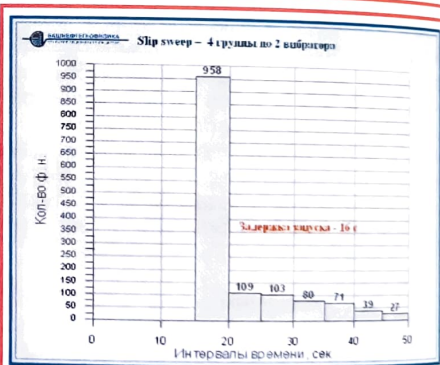


Рис. 3 Slip sweep, slip time – 16с

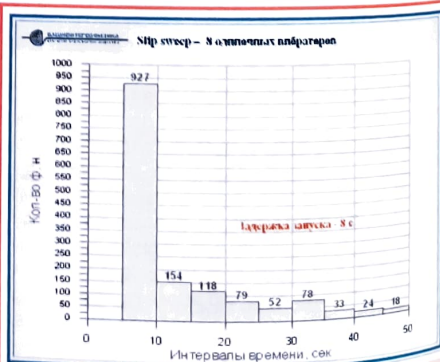


Рис. 4 Slip sweep, slip time – 8с

Статистика обработки опытного участка
(1560 ф.н)

Методика	Общее время обработки (час)	Средняя производительность (ф.н./час)	Максимальная производительность (ф.н./час)
Flip flop 2 группы по 4 вибратора	33	47	74
Slip sweep 4 группы по 2 вибратора	14,5	107	150
Slip sweep 8 одиночных вибраторов	9	173	278

Рис.5 Статистика по отстрелу участка

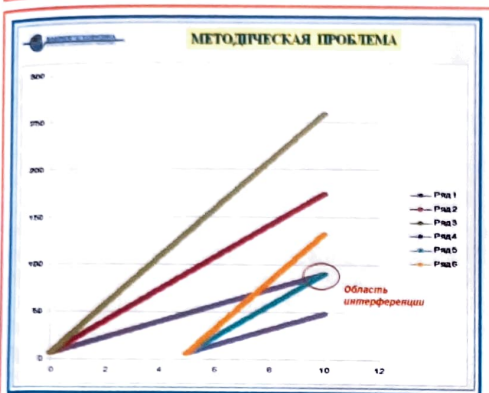


Рис.6 Результат свертки свип-сигнала со второй и последующими гармониками

была отработана с разным количеством источников.

II этап:

- длина свип-сигала – 20 с;
- начальная частота развёртки – $F_{нач}$ – 8 Гц;
- конечная частота развёртки – $F_{кон}$ – 90 Гц;
- количество накоплений – 1;
- количество вибраторов – 8 (4 группы по 2 вибратора).

время задержки запуска (slip time) – 16 сек;

III этап:

- длина свип-сигала – 20 с;
- начальная частота развёртки – $F_{нач}$ – 8 Гц;
- конечная частота развёртки – $F_{кон}$ – 90 Гц;
- количество накоплений – 1;
- количество вибраторов – 8 одиночных (8 групп по 1 вибратору).

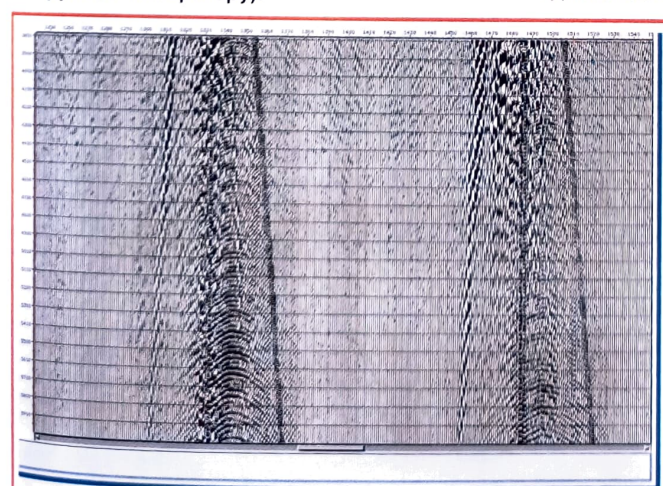


Рис.7 Гармонические искажения полезного сигнала

- время задержки запуска (slip time) – 8 сек.

По рапортам операторов была получена временная статистика обработки площади. Диаграммы времени приведены на рис 2 - 4:

Вся статистика по отстрелу участка сведена в таблицу (рис. 5). С применением Slip sweep, производительность увеличилась в 2 и 4 раза, соответственно. Из этой статистики убраны длительные временные затраты, не относящиеся к производству (по погодным условиям, заправка вибраторов и т.д.). Видно, что фактическая производительность выросла пропорционально уменьшению времени между запусками групп (с 32с при Flip flop до 8с при Slip sweep). Таким образом, мы в несколько раз смогли увеличить производительность в реальных условиях при наличии промышленных помех.

II. Качество

Наложение свип-сигналов от разных групп создаёт существенные помехи для соседних пунктов возбуждения. Сигнал от вибраторов для одного пункта возбуждения является информативным, а для других пунктов является помехой, причём помехой равной уровню полезного сигнала. И чем больше групп, тем больше наложенный записан в одной сейсмограмме. Например, если виброграмма 26с, а slip time 8с, то на одной виброграмме будет 3 возбуждения после полезного и 3 до него. То есть, из 7-ми свипов только один несёт полезную информацию, остальные необходимо удалить. В случае, когда время задержки запуска (slip time) больше времени записи, то после свёртки виброграммы со свип-сигналом шум от второстепенного свипа находится за пределами корелограммы. Помехой является результат свёртки свип-сигнала со второй и последующими гармониками (рис.6), которые накладываются на полезный сигнал и разделить их на этой стадии не представляется возможным.

Реально эти помехи проявляются в виде гармонических искажений полезного сигнала (рис.7). Поэтому удаление помех необходимо производить до свёртки, на стадии получения виброграмм. Если мы из полученных виброграмм удалим посторонние свипы, то тем самым мы также удалим их гармоники.

На первый взгляд проблема разделения и удаления свипов может показаться неразрешимой, так как свип-сигналы разных групп абсолютно похожи. Но нам помогут два фактора. То что, знание их состава, делает их прогнозируемыми и то, что они различаются по времени при одинаковых частотах или различаются по частоте в один и тот же момент времени.

В ОАО «Башнефтегеофизика» разработана методика обработки виброграмм при работе методом slip sweep. Идея была позаимствована из принципа работы электронной платы блока управления сейсмическим вибратором (БУСВ), производства СКТБ, г. Гомель, а именно - платы ФНС (фильтр низкочастотный следящий), аналоговой системы для выделения первой гармоники сигнала датчика ускорения плиты сеймовибратора СВ-10/100. ФНС – это аналоговый фильтр низкой частоты с изменяющейся граничной частотой, управляющим сигналом для которого является электронный свип-сигнал вибратора. Первым предложил использовать дополнительные



полезные свойства этого фильтра Савин Сергей Фёдорович. Будучи в то время инженером-электроником по сейсмовибраторам в полевой партии, он предложил и установил в сейсмостанцию Прогресс-3 дополнительный блок ФНС до блока оцифровки сейсмосигнала. При этом в процессе записи выделялось отражение от одного горизонта и подавлялись сигналы и их хвосты ФВК от других горизонтов. В данной работе предлагается использование цифровых фильтров с изменяющимися граничными частотами на стадии обработки виброграмм.

III. Методы устранения помех соседних ПВ

Для полного устранения помех соседних пунктов возбуждения требуется информация обо всех соседних ПВ, работавших во время съемки данного ПВ, плюс умение смещать и вычитать данные соседних ПВ, с коррекцией за время распространения до данного ПВ и за амплитудную неоднородность активной расстановки приема данного ПВ. Такое количество априорных требований к организации полевых работ и препроцессинга делает реализацию подобного метода практически невозможной.

Для подавления помех использовалась другая, упрощенная методика, основанная на различиях в частотно-временном составе виброграмм, вызванных смещением по времени разверток активных вибраторов на времена, кратные величине Slip time.

Для объяснения сути метода рассмотрим частотно-временную диаграмму трех ПВ, обработанных по методу Slip-Sweep (рис. 8), которые занумеруем в порядке их последовательного отстрела номерами 1, 2 и 3.

Пункт возбуждения №2 несет на себе фон вибропомех в верхней части записи, возбужденных вибраторами пункта №1 до регистрации ПВ №2, а также фон помех в нижней части от ПВ №3, начавшего работать позже.

Возьмем фактические значения параметров возбуждения, Slip-time и регистрации, использованных при отстреле данных полевых работ: Record time-26 s, Sweep time-20 s, Slip time-8 s, Fstart-10 Hz, Fend-90 Hz.

Метод «фильтра LP»

Развертка полосы свипа, равной $90-10=80$ Гц, осуществляется линейно в течение 20с, или с нарастанием частоты в 4 Гц/с. Таким образом, к началу регистрации ПВ №2 вибраторы ПВ №1 достигнут частоты, равной $10+8 \cdot 4=42$ Гц, в то время как вибраторы на ПВ №2 только начнут возбуждение на частоте 10 Гц. Очевидно, что в момент начала воз-

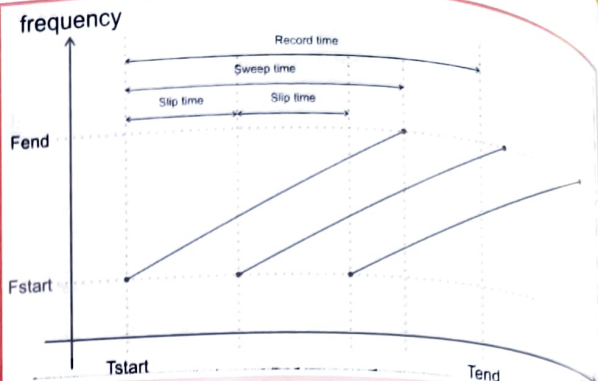


Рис. 8 Частотно-временная диаграмма отработки точки методом Slip-Sweep. Изображены три совместно работающие точки возбуждения

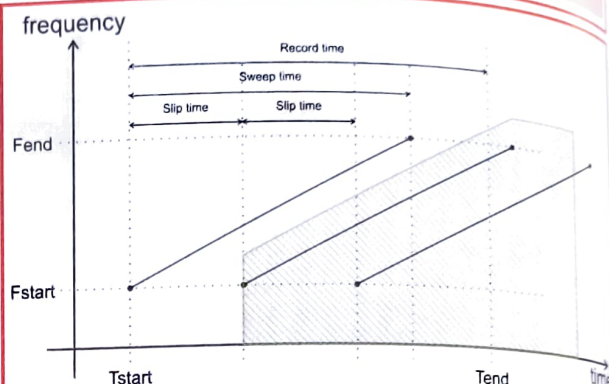


Рис. 9 Частотно-временная диаграмма методики удаления помех методом фильтра LP. Пункт возбуждения №2 защищен от помех пункта №1

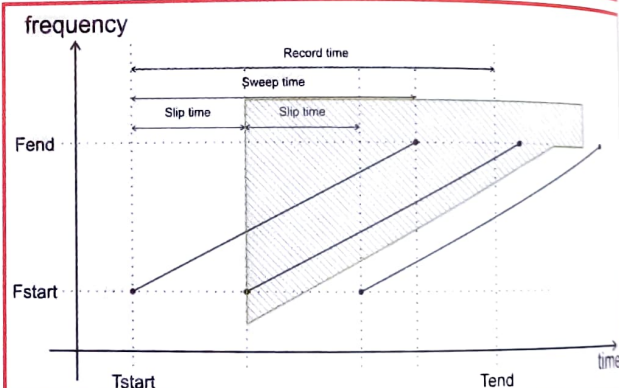


Рис. 10 Частотно-временная диаграмма методики удаления помех методом фильтра HP. Пункт возбуждения №2 защищен от помех пункта №3

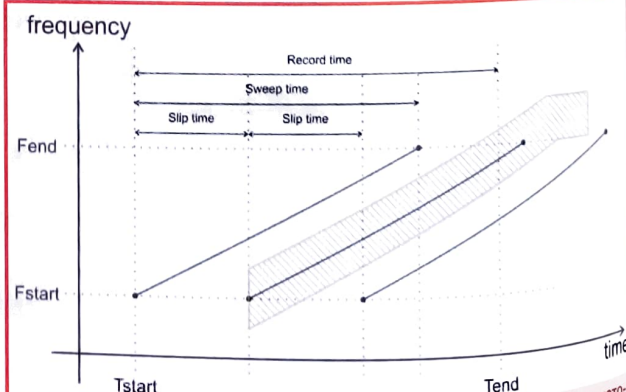


Рис. 11 Частотно-временная диаграмма методики удаления помех методом фильтра BP. Пункт возбуждения №2 защищен от помех пункта №1 и пункта №3.

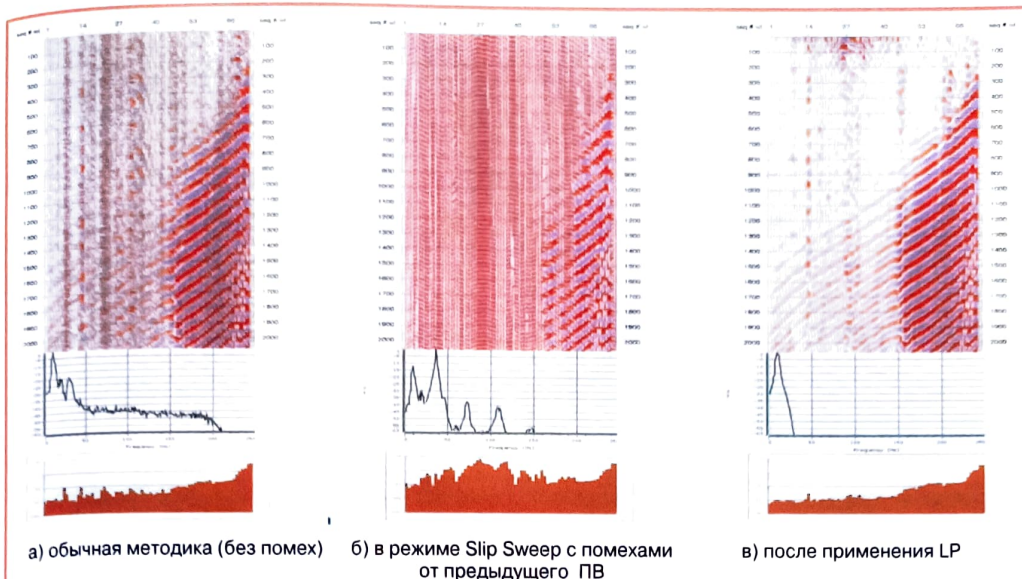


Рис 12. Фрагменты виброграмм, АЧХ и гистограммы амплитуд по каждой трассе с применением фильтра высоких частот (LP)

буждения ПВ №2 на записи с ПВ №2 все частоты выше 10 Гц будут считаться посторонними, и эти частоты могут быть исключены из записи с ПВ №2 фильтром НЧ (low-pass, LP). Через секунду после начала возбуждения ПВ №2 будет работать на частоте $10+4 \cdot 1 = 14$ Гц, и все частоты ниже этой величины также можно будет считать помехами, подлежащими исключению фильтром НЧ.

Чтобы избежать искажений, связанных с краевыми эффектами фильтрации, целесообразно кромку фильтра НЧ принимать равной не точно величине текущей частоты возбуждения, а несколько выше. Например, равной средней величине между частотой возбуждаемого ранее ПВ №1 и возбуждаемого сейчас ПВ №2, то есть равной $(42+10)/2 = 26$ Гц на моменте времени 0 с, $(46+14)/2 = 30$ Гц на моменте времени 1 с, и так далее. Таким образом, получаем метод подавления помех предыдущего ПВ, заключающийся в переменной по времени фильтрации НЧ по границе середины частот предыдущего и текущего пункта возбуждения.

Частотно-временной образ фильтра НЧ, реализующий данную методику, изображен в виде заштрихованной области на рис. 9. Этот метод в дальнейшем будем называть методом «фильтра LP».

Метод «фильтра НР»

Аналогичными рассуждениями разрабатывался метод подавления помех, названный методом «фильтра НР», только в этом случае рассматривалось устранение влияния последующего ПВ. Так, к примеру, в момент начала регистрации ПВ №2 помехи от последующих ПВ отсутствуют. Паразитные волны от последующих ПВ будут зарегистрированы расстановкой ПВ №2 не раньше, чем через интервал времени, равный Slip-time. При этом на ПВ №2 возбуждение будет вестись уже на частоте вибратора 42 Гц, в то время как на ПВ №3 возбуждение начнется только на частоте 10 Гц. Как и в случае защиты от помех предыдущих ПВ, с целью защиты от частот последующих ПВ можно использовать переменный по времени фильтр ВЧ (НР, high-pass), гарантированно отсекающий частоты посторонних ПВ, но сохраняющий частоты данного ПВ. Использование смещенной кромки частоты фильтра также позволяет сохранять волны, пришедшие со значительным запаздыванием от момента возбуждения. Так, например, при регистрации ПВ

№2 на времени 8 с кромка фильтра составит $(42+10)/2 = 26$ Гц, что позволит сохранить частоты, возбужденные на времени 4 с $(10+4 \cdot 4) = 26$ Гц. Это означает, что использование кромки фильтра на середине между частотами последовательных ПВ позволяет без искажений регистрировать волны, отраженные с «глубины» 4 с, что значительно превосходит величину информативного разреза в данных сейсмо-геологических условиях. Частотно-временная диаграмма, иллюстрирующая такой переменный по времени фильтр ВЧ, изображена на рис. 10. На данный метод будем ссылаться в дальнейшем, как на метод «фильтра НР».

Метод «фильтра ВР»

Также был предложен метод, являющийся по факту комбинацией методов «фильтра LP» и «фильтра НР». Используя рассуждения, изложенные в каждом из вышеперечисленных методов, можно построить переменный по времени полосовой фильтр (ВР, band-pass), который бы обеспечивал защиту от помех как предыдущего ПВ в верхней части вибrogramмы, так и защиты от помех последующего ПВ в нижней части. Использование расширенных кромок полосы пропускания такого фильтра позволяет без заметных искажений выделять сигнал именно данного пункта возбуждения. Частотно-временная диаграмма подобного фильтра изображена на рис. 11. Этот метод в дальнейшем будем называть методом «фильтра ВР».

IV. Обработка экспериментальных данных

Предложенные три метода были в экспериментальном режиме применены к исходным полевым вибrogramмам методики №2 и методики №3, после чего производилось снятие свип-сигнала и преобразование вибrogramм в коррелогаммы и их дальнейшая обработка.

На рис. 12 показана работа фильтра LP. Под каждой вибrogramмой показана АЧХ по всем трассам вибrogramмы в диапазоне времён от 1 до 2 сек и гистограмма среднеквадратичных амплитуд по каждой трассе в таком же диапазоне времён от 1 до 2 сек. Первая вибrogramма (рис. 12 а) отстрелена в обычном режиме, без регулярных помех, имеются только микросейсм, преобладающая частота сигнала составляет 12 Гц. Виден значительный фон высокочастотных микросейсм. Вторая вибrogramма (рис. 12 б) получена в режиме Slip Sweep. Видны регуляр-

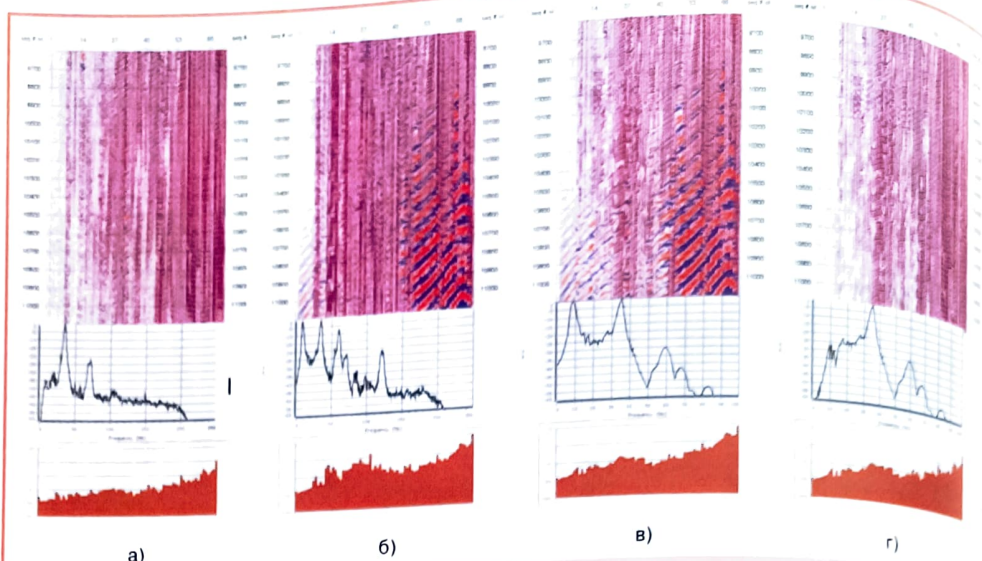


Рис 13. Фрагменты виброграмм, АЧХ и гистограммы амплитуд по каждой трассе с применением фильтра нижних частот (BP)

ные помехи от предыдущего ПВ, гистограмма показывает, что их амплитуда равна амплитуде основного сигнала. АЧХ показывает, что преобладающая частота помехи составляет 36 Гц, это полностью соответствует мгновенной частоте группы вибраторов от предыдущего ПВ, причём суммарная мощность помехи даже превышает мощность основного сигнала. На АЧХ отчётливо видны спектры 2-ой и 3-ей гармоник помехи на частотах 72 Гц и 108 Гц. После применения следящего фильтра (рис. 12 в), полностью вырезана помеха от предыдущего ПВ, кроме того удалены микросейсм высокой частоты, которые попадают в зону действия ФНЧ. То есть виброграмма полностью очищена от высокочастотных влияний предыдущего ПВ, от его 2-ой и 3-ей гармоник, а так же от нерегулярных помех - микросейсм.

Аналогично работает фильтр ФВЧ (НР), рис. 13.

Здесь изображена фрагмент виброграммы на времени 9,5-11 сек, именно в этот момент начинает работать группа вибраторов следующего пункта возбуждения (slip time - 8 сек). В данном случае высокочастотный сигнал от данного ПВ является полезным, а низкочастотный - помехой. Для количественной оценки приведены графики и гистограммы, полученные из данных в одном окне на временах 10-11 сек. На рис. 13 а показана виброграмма в обычном режиме, без помех, «эталон», к которому необходимо стремиться. Амплитудно-частотная характеристика показывает основной сигнал на частоте 35 Гц и его гармоники меньшей амплитуды на частотах 70 Гц и 105 Гц.

На рис. 13 б - этот же ПВ, в режиме Slip Sweep, осложнён низкочастотной помехой от предыдущего ПВ. Здесь АЧХ регистрирует дополнительную частоту-помеху (~9 Гц) и дополнительный максимум (~60 Гц) от интерференции двух сигналов. Затем, на рис 13 в - виброграмма, прошедшая через высокочастотный следящий фильтр LP, та что изображена на рис. 12 в. Видно, что ФВЧ удалил высокие гармоники и существенно понизил (на ~30 Дб) помеху на частоте 60 Гц, при этом оба основных сигнала (9 Гц и 36 Гц) не претерпели изменений. И последняя процедура (рис. 13 г), применения следящего фильтра высокой частоты (НР) на ~30 Дб подавила низкочастотную помеху от группы вибраторов,

время начала работы которой было с запуском на Slip time 8 сек.

Применение последовательности фильтров LP и НР представляет собой ни что иное, как полосовой фильтр BP с такими же параметрами частоты среза и крутизны. Мы привели пример, как можно «отследить» наш полезный сигнал, удалив помехи от соседних ПВ без потери качества данных. Это удалось по причине того, что свип-сигнал является искусственно заданным по определённому закону, а значит прогнозируемым. Поэтому, если заключить его в какие-то границы и отслеживать на всём промежутке виброграммы, можно существенно (до 40-60 Дб) подавить регулярные и нерегулярные помехи.

В данной статье удалось убедительно доказать возможность селекции сигналов на стадии виброграмм после отработки методом Slip Sweep, что делает этот высокопроизводительный метод имеющим право на жизнь не только в условиях Аравийской пустыни, но и в густонаселённой части Центральной России.

Заключение

Основным предназначением полевых вибросейсмических работ методом Slip-Sweep является значительное увеличение производительности. Однако, вместе с увеличением производительности метод имеет недостаток в виде появления паразитных волн-помех, порожденных работой соседних пунктов возбуждения. С целью подавления этого типа помех разработаны три способа, первый из которых обеспечивает приемлемое подавление помех от ПВ, включенных ранее, второй - обеспечивает приемлемое подавление помех от ПВ, включенных позднее, третий - комбинирует в себе два предыдущих способа и очищает материал от помех соседних ПВ как раннего, так и позднего включения.

Литература

1. Denis Mougenot. Высокопроизводительный Вибросейс. Приборы и системы разведочной геофизики, №03(09)/ 2004
2. Шнеерсон М.Б., Жуков А.П. Современные тенденции вибрационной сейсморазведки. Приборы и системы разведочной геофизики. №03(33)/2010
3. Шнеерсон М.Б., Жуков А.П. Термины вибрационной сейсморазведки. Приборы и системы разведочной геофизики, №04(34)/2010