

---

# **ВИБРАЦИОННАЯ сейсморазведка**

---

Под редакцией  
М. Б. ШНЕЕРСОНА



МОСКВА "НЕДРА" 1990

ББК 26.2  
В 41  
УДК 550.834

Авторы: *М.Б. Шнеерсон, О.А. Потапов, В.А. Гродзенский,  
А.Н. Иноземцев, И.С. Лев, А.П. Жуков*

Рецензент канд. техн. наук *А.М. Иванчук*

**Вибрационная сейсморазведка**/М.Б. Шнеерсон, О.А. Потапов,  
В 41 В.А. Гродзенский и др.; Под ред. М.Б. Шнеерсона. — М.: Недра,  
1990. — 240 с.: ил.  
ISBN 5-247-00595-3

Изложены физические основы, теория и практика вибрационной сейсморазведки — быстро развивающегося метода разведочной геофизики, позволяющего управлять спектрами возбуждаемых упругих колебаний и широко применяемого при поисках и разведке полезных ископаемых в нашей стране и за рубежом. Рассмотрены технические средства вибрационной сейсморазведки, методика полевых работ и обработки материалов, области применения. Приведены примеры успешного использования метода в районах с различными сейсмогеологическими условиями.

Для геофизиков-сейсморазведчиков.

В 2503010200 — 227  
043 (01) — 90 61—90

ББК 26.2

ПРОИЗВОДСТВЕННОЕ (ПРАКТИЧЕСКОЕ) ИЗДАНИЕ

**Шнеерсон Михаил Борисович,  
Потапов Олег Александрович,  
Гродзенский Виталий Абрамович и др.**

**ВИБРАЦИОННАЯ СЕЙСМОРАЗВЕДКА**

Заведующий редакцией *Е.Г. Першина*, редактор издательства *В.И. Жукова*,  
обложка художника *Ю.Ф. Тырнова*, художественный редактор *В.В. Шутько*,  
технический редактор *А.А. Миронова*, корректор *Г.П. Вергун*, оператор  
*Н.В. Штанько*

ИБ № 7119

Подписано в печать с репродуцируемого оригинал-макета 12.06.90. Т—05196.  
Формат 60 x 90<sup>1/16</sup>. Бум. офсетная № 1. Гарнитура Универс. Печать офсетная.  
Усл.-печ. л. 14,70. Усл. кр.-отт. 14,94. Уч.-изд. л. 16,48. Тираж 2500 экз.  
Зак. № 960/1292—3. Цена 95 коп.

Набор выполнен на наборно-пишущей машине

Ордена "Знак Почета" издательство "Недра".  
125047 Москва, пл. Белорусского вокзала, 3.

Московская типография № 6 Государственного комитета СССР по печати  
109088, Москва, Ж-88, Южнопортовая ул., 24.

ISBN 5-247-00595-3

© Коллектив авторов, 1990

## ВВЕДЕНИЕ

Стремление заменить взрыв более управляемым, безопасным, экологически чистым и дешевым источником упругих колебаний привело к созданию невзрывной сейсморазведки, в которой волны возбуждаются специальными установками и механизмами без использования зарядов взрывчатых веществ или линий детонирующего шнура. Сначала получила развитие импульсная невзрывная сейсморазведка, в которой волны генерировались кратковременными, импульсными нагрузками на поверхность земли или водного слоя. Импульсная невзрывная сейсморазведка, упростив производство работ и сделав их более безопасными для окружающей среды, не смогла решить целый ряд вопросов, связанных с управлением процесса возбуждения колебаний и концентрацией энергии в необходимом диапазоне частот.

Параллельно с импульсной шло развитие вибрационной невзрывной сейсморазведки, которая в последние годы находит все большее применение при проведении поисковых и разведочных работ на нефть, газ и другие полезные ископаемые. Вибрационная сейсморазведка (ВСР), основываясь на тех же физических принципах, что и взрывная, импульсная сейсморазведка, отличается от нее использованием длительных, переменных во времени и относительно небольших по величине нагрузок известной формы для возбуждения упругих колебаний в земле без нарушения верхнего слоя грунта и дорожных покрытий. Возможность направленного управления спектральным составом возбуждаемых и регистрируемых волн, применения корреляционных методов сжатия сигналов и их выделения на фоне помех и проведения работ в городах, населенных пунктах, вдоль дорог при высоком уровне помех и без ущерба для окружающей среды обуславливает преимущества вибрационной сейсморазведки перед импульсной и позволяет высоко оценить ее перспективы, особенно при решении сложных задач, требующих активного воздействия на форму и частотный состав регистрируемых волн. Вибрационная сейсморазведка привлекательна еще и тем, что позволяет использовать большой класс сложных сигналов для возбуждения упругих колебаний в среде. Ведущее место среди них занимают линейно- и нелинейно-частотно-модулированные (ЛЧМ и НЛЧМ) сигналы. Наряду с ними определенное развитие получили кодовые последовательности импульсов (кодоимпульсные или виброимпульсные сигналы).

Вибрационная сейсморазведка начала развиваться в нашей стране с конца шестидесятых годов, сначала в направлении создания эксцентриковых (И.С. Чичинин, В.И. Юшин, Г.П. Евчатов, Ю.П. Лукашин и др.), а затем и гидравлических (В.М. Косов, А.С. Шагинян, А.Г. Асан-Джалалов, А.М. Седин, Г.И. Молоканов, А.С. Кастанов, В.М. Шевкунов и др.) излучателей. В результате этих работ были созданы промышленные и

полупромышленные образцы аппаратуры и оборудования для вибрационной сейсморазведки: комплексы "Вибролокатор" и ВСК-1, а впоследствии ВСК-2, вибраторы СВ-5-150 и СВ-10-100.

Одновременно с созданием вибрационной техники шло ее полевое опробование, разрабатывались регистрирующая аппаратура, методика проведения полевых работ и обработки материалов (Ю.П. Лукашин, Т.М. Гродзянская, М.Б. Шнеерсон, Г.П. Евчатов, В.А. Гродзенский, Ю.И. Лугинец, Ю.П. Кострыгин, В.М. Косов и др.). В результате был создан и подготовлен к промышленному изготовлению комплекс технических средств для вибрационной сейсморазведки, базирующийся на возбуждении и передаче грунту протяженных во времени квазигармонических нагрузок. Кроме того, развивалось и другое направление вибрационной сейсморазведки, основанное на возбуждении кодовых импульсных посылок, которое завершилось созданием вибрационных источников дискретного действия или кодоимпульсных (виброимпульсных) установок (В.В. Ивашин, С.И. Николаев, Ю.А. Бару и др.).

Промышленное применение вибрационная сейсморазведка получила с конца семидесятых годов, когда начался серийный выпуск гидравлических вибраторов СВ. В настоящее время их изготавливают в нескольких модификациях и разрабатывают вибраторы специального назначения для северных районов Союза. Технические характеристики вибраторов непрерывно улучшаются, поэтому повышается эффективность их применения при решении различных задач по изучению строения исследуемых территорий, поиску и разведке месторождений полезных ископаемых. В СССР сейсмические работы с вибрационными источниками колебаний проводятся в значительных объемах и в перспективе должны существенно увеличиться в ближайшие годы. Поэтому необходимо систематическое изложение основных вопросов теории и практики вибрационной сейсморазведки, чтобы сделать более эффективным ее применение, особенно при решении сложных, нестандартных задач.



# 1. ТЕОРИЯ ВИБРАЦИОННОЙ СЕЙСМОРАЗВЕДКИ

## 1.1. ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ВИБРАЦИОННОЙ СЕЙСМОРАЗВЕДКИ

Вибрационная сейсморазведка базируется на возбуждении колебаний переменными нагрузками, длительность которых существенно больше времен распространения отраженных или преломленных волн до разведываемых границ раздела. В практике вибрационной сейсморазведки основное применение получили нагрузки, представляющие собой квазигармонические частотно-модулированные сигналы (ЧМ) длительностью до 20–30 с с полосой частот от 10–15 до 200–250 Гц. Плавное нарастание или убывание частоты сигналов является необходимым репером для сжатия информации и выделения времен прихода регулярных волн.

Наряду с ЧМ сигналами используются последовательности однополярных, а в ряде случаев разнополярных импульсов, следующих друг за другом через разные или одинаковые промежутки времени. Длительности последовательностей могут доходить до нескольких десятков секунд при средних частотах следования импульсов 5–25 Гц. В этом случае репером для сжатия информации служит или направление изменения временного интервала между импульсами, или порядок следования импульсов разного знака.

Сигналы, описывающие нагрузки вибрационной сейсморазведки, в отечественной литературе называются управляющими или опорными, а в американской – свипами или свип-сигналами. Длительность одной посылки управляющего сигнала во много раз больше периодов собственных колебаний грунта при импульсном возбуждении и генерируемых при этом волн, и для нее выполняется условие

$$FT \gg 1,$$

где  $F$  – частотный параметр сигнала, равный или средней частоте сигнала, или его полосе;  $T$  – длительность ЧМ сигнала или последовательности импульсов.

По этому признаку сигналы вибрационной сейсморазведки относятся к числу сложных и отличаются от колебаний импульсной сейсморазведки, для которых

$$F' T' = (1/T') T' = 1,$$

где  $F'$  и  $T'$  – средняя частота и период колебания;

Под действием длительных и переменных во времени нагрузок в среде возбуждаются поверхностные и объемные продольные и поперечные волны, которые, отражаясь и преломляясь на физических границах раздела и интерферируя между собой, образуют чрезвычайно сложное неразрешенное поле колебаний, в котором визуально невозможно

выделить пакеты регулярных волн, соответствующих отражающим и преломляющим поверхностям, а также определить времена их регистрации. Колебания почвы, принятые одиночными или групповыми сейсмоприемниками, расставленными по профилю, и зарегистрированные сейсмостанцией, представляют собой вибрационные трассы, а их совокупности – виброграммы, записи которых на магнитной ленте образуют первичные материалы вибрационной сейсморазведки.

Сжатие сигналов и выделение зарегистрированных регулярных волн производится на основе специальной обработки данных, которая может выполняться двумя, в общем идентичными, способами: корреляционным (временным) и спектральным [31]. Наибольшее применение получил корреляционный способ обработки благодаря простоте и более легкой реализуемости на современных ЭВМ. Поэтому он и рассматривается в книге. Этот способ основан на вычислении функции взаимной корреляции (ФВК) сигналов и сравнении ее значений с заданной пороговой величиной. В сейсморазведке, как правило, ограничиваются вычислением самого интеграла без сопоставления его с каким-либо пороговым значением. В статистической радиотехнике такая обработка получила название оптимальной или согласованной фильтрации [26]. Оптимальный фильтр работает таким образом, что все спектральные составляющие сигнала задерживаются на определенное время и поступают на его выход одновременно образуя интенсивный пиковый выброс амплитуды суммарного колебания.

Применительно к вибрационной сейсморазведке согласованная фильтрация сводится к нахождению нормированных значений ФВК управляющего сигнала и колебаний, принятых сейсмоприемниками и зарегистрированными сейсмостанцией.

Математически эта операция выражается корреляционным интегралом

$$R(\tau) = \frac{1}{T} \int_0^T a(t) S(t + \tau) dt, \quad (1.1)$$

где  $a(t)$  и  $S(t)$  – зарегистрированный и управляющий сигналы;  $\tau$  – временной сдвиг между коррелируемыми сигналами.

Последовательность значений  $R(\tau)$  для одной точки профиля образует корреляционную трассу, а совокупность трасс для полноканальной расстановки станции – коррелограмму.

Корреляционная трасса и коррелограмма являются результатами обработки первичных вибросейсмических данных и поэтому рассмотрим их более детально.

Не учитывая особенностей передачи нагрузок грунту и распространения волн, можно считать, что зарегистрированные колебания могут быть представлены интегралом свертки управляющего сигнала  $S(\theta)$  с оператором  $h(\theta)$  фильтра, характеризующего распределение коэффициентов отражений по разрезу. В этом случае зарегистрированный сигнал

$$a(t) = \int_0^{\infty} h(\theta) S(t - \theta) d\theta, \quad (1.2)$$

где  $h(\theta)$  — оператор фильтра.

Подставляя (1.2) в (1.1) и меняя порядок интегрирования, получим

$$R(\tau) = \frac{1}{T} \int_0^T h(\theta) \int_0^{\infty} S(t - \theta) S(t + \tau) dt \times \\ \times d\theta = \int_0^T h(\theta) r(\tau - \theta) d\theta, \quad (1.3)$$

где

$$r(\tau - \theta) = \frac{1}{T} \int_0^T S(t - \theta) S(t + \tau) dt$$

представляет собой функцию автокорреляции (ФАК) управляющего сигнала.

Таким образом, корреляционная обработка вибросейсмических данных сводится к нахождению интеграла свертки оператора  $h(\theta)$  с ФАК управляющего сигнала, которая может рассматриваться как некоторая "импульсная" нагрузка, прикладываемая к поверхности земли. В этом вибрационная сейсморазведка аналогична импульсной, в которой колебания, регистрируемые сейсмоприемниками, также могут быть представлены интегралом свертки излучаемого сигнала с фильтром, определяющим распределение коэффициентов отражения по разрезу. Основываясь на этом, можно говорить о принципиальной идентичности горизонтов, прослеживаемых при вибрационном и импульсном возбуждениях волн. Сходство и различие форм колебаний и их частотного состава при этом определяется тем, насколько автокорреляционные функции посылаемых в землю сложных сигналов отличаются от временных характеристик сигналов, возбуждаемых импульсными источниками.

Интеграл (1.1) вычисляется путем суммирования значений произведений  $a(t) S(t + \tau)$  для каждого момента времени  $t$  в интервале  $T$  при различных сдвигах  $\tau$  между анализируемыми колебаниями. Значения ФВК определяют взаимосвязь, или степень сходства, двух анализируемых колебаний, поэтому наибольшие значения ФВК будут наблюдаться при максимальных совпадениях их по форме. Так как в выражении (1.1) зарегистрированный сигнал  $a(t)$  представляет собой колебание, обусловленное наложением волн, близких по форме к управляющему сигналу  $S(t)$ , то разрастания корреляционного интеграла будут наблюдаться в тех случаях, когда сдвиги  $\tau$  между анализируемыми функциями равны запаздываниям волн относительно начала действия управляющего сигнала, что аналогично отметке момента начала действия импульсного источника. Моментам вступления волн будут соответствовать наибольшие значения корреляционной функции  $R(\tau)$ . Таким образом, при корреляционной обработке вибросейсмических сигналов временные сдвиги  $\tau$  между анализируемыми колебаниями являются аналогами времен прихода волн в им-

пульсной сейсморазведке. Значения  $t$  определяются глубиной разведки и поэтому не должны быть меньше, чем ожидаемые времена прихода волн от самых глубоких разведываемых горизонтов.

По внешнему виду коррелограммы близки к сейсмограммам импульсной сейсморазведки, вследствие компактности корреляционных функций, обусловленных перераспределением и концентрацией энергии ФВК в областях разрастания ее значений, приуроченных к временным сдвигам, равным временам прихода регулярных волн. Форма и поведение корреляционных функций определяются параметрами исходных сигналов, входящих в выражение (1.1). И если управляющий сигнал не искажен и известен с достаточной точностью, то зарегистрированные станцией колебания претерпевают существенные изменения в процессе передачи нагрузок грунту, распространения волн в среде и их регистрации приемными устройствами. Эти вопросы, а также особенности управляющих сигналов и их корреляционных функций рассмотрены в нижеследующих разделах данной главы.

## **1.2. ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ВИБРАЦИОННОГО ИСТОЧНИКА С ГРУНТОВЫМ ПОЛУПРОСТРАНСТВОМ**

В вибрационной сейсморазведке колебания возбуждаются приложением переменных во времени нагрузок непосредственно к поверхности земли. Излучающим элементом источника является жесткая металлическая плита, которая под действием развиваемых им сил приводится в движение в вертикальной или горизонтальной плоскости в зависимости от типа возбуждаемых волн. Нагрузки, развиваемые плитой, воспринимаются некоторым объемом грунта, получившим название присоединенного и играющим значительную роль в теории невзрывного возбуждения волн. Под действием внешних сил в присоединенном объеме грунта возникают переменные во времени объемные (линейные) или сдвиговые (угловые) деформации, которые выводят частицы грунта из положения равновесия и приводят к возбуждению упругих волн в среде. Регистрация их на поверхности или в скважинах позволяет решать задачи, стоящие перед сейсморазведкой.

В связи с тем, что линейные размеры излучающих плит существенно меньше, чем преобладающие длины возбуждаемых в среде волн, реальные источники и генерируемые ими силы могут считаться точечными.

Для упругого полупространства действие вертикальной силы приводит к возбуждению в нем поверхностных ( $R$ ) и объемных продольной ( $P$ ) и поперечной ( $S$ ) волн. Продольная волна распространяется со скоростью  $v_p$  и имеет наибольшую интенсивность по вертикали в направлении действия силы. По мере отхода от вертикали интенсивность продольной волны уменьшается по закону косинуса и становится равной нулю в направлении поверхности земли.

Поперечная волна распространяется со скоростью  $v_s$  и имеет довольно сложное распределение интенсивностей в зависимости от угла  $\theta$  между вертикалью и направлением на точку, в которой определяется амплитуда волны. Максимумы ее будут наблюдаться в диапазоне  $\theta \approx 40 \div 50^\circ$ , а минимумы при углах  $\theta = \arcsin (v_s/v_p)$  и вдоль свободной поверхности [26]. Продольные и поперечные волны затухают обратно пропорционально расстоянию от точки наблюдения до места приложения силы.

Поверхностные волны распространяются со скоростью, примерно равной  $v_s$ , и их интенсивность убывает обратно пропорционально  $\sqrt{R}$ . Следовательно, при поверхностных расстановках сейсмоприемников эти волны будут доминировать на записях, что хорошо подтверждается практикой работ с невзрывными источниками.

Если к поверхности упругого полупространства прикладывается сосредоточенная сила, направленная вдоль горизонтальной оси  $x$ , то в среде возбуждаются также поверхностные и объемные волны, которые имеют другое распределение амплитуд и не обладают осевой симметрией. В плоскости  $xOz$  существуют продольная, поперечная и поверхностная волны. Продольная волна в вертикальном направлении не излучается и имеет наибольшую интенсивность при углах с вертикалью  $40-60^\circ$ . Поперечная волна  $SV$  поляризована в вертикальной плоскости и характеризуется довольно сложным распределением амплитуд.

В плоскости  $yOz$  наблюдаются поперечные волны, поляризованные параллельно линии действия силы.

При приложении к поверхности земли силы, направленной вдоль горизонтальной оси  $y$ , в плоскости  $xOz$  наблюдается только поперечная волна  $SH$ , поляризованная в плоскости, которая перпендикулярна направлению ее распространения;

Под действием нагрузок, развиваемых вибрационными источниками, грунт деформируется. Величины усилий невелики и соизмеримы с пределом упругости пород, слагающих самую верхнюю часть разреза. Поведение грунтов под действием сжимающих сил определяется их компрессионными кривыми, которые характеризуют зависимость деформации некоторого объема пород от напряжения. При нагрузках, меньших чем предел упругости пород, нагрузка и разгрузка происходят по одному и тому же закону, и зависимость между напряжением и деформациями линейна. Коэффициент пропорциональности между напряжением и относительными деформациями грунта для случая его простого продольного сжатия с возможностью бокового расширения называется модулем упругости пород  $E$ .

Грунты, отличающиеся друг от друга гранулометрическим составом, плотностью и упругими свойствами, характеризуются различными значениями модуля упругости. Установлено также, что модуль упругости зависит от скорости приложения нагрузок.

На линейном участке компрессионной кривой имеет место упругое сжатие скелета породы за счет деформации твердых частиц в точках их

контактов. При этом скелет не разрушается: после снятия нагрузки все частицы возвращаются в исходное положение и деформации носят обратимый характер. По экспериментальным данным предел упругости для большинства грунтов оказывается небольшим, 0,1–0,3 МПа. Мерзлые и вечномёрзлые грунты характеризуются существенно большими значениями предела упругости.

При приложении к поверхности земли квазигармонических вибрационных сил частицы грунта, прилегающие к плите излучателя, начинают совершать вынужденные колебательные движения, которые с течением времени распространяются во всем объеме пород. В большинстве случаев удельные нагрузки, развиваемые вибрационными излучателями, невелики ( $\sigma \leq 0,04 \div 0,1$  МПа) и не превышают предела упругости пород. Поэтому грунты ведут себя как упругие среды, деформации в большинстве случаев носят обратимый характер и на поверхности земли не остается штампа. Исключения могут наблюдаться в случае возбуждения колебаний на особо слабых грунтах, таких, как взрыхленная пашня, сыпучие, сухие пески и др. В большинстве случаев деформации незначительны и могут быть определены лишь инструментальными средствами.

Чтобы излучающая плита вибратора с присоединенным к ней объемом грунта представляла собой единую систему, она должна быть плотно прижата к поверхности земли. Поэтому во всех конструкциях вибраторов плита весом транспортного средства прижимается к грунту с силой  $Q$ , превышающей рабочие усилия  $P$ , развиваемые излучателем. При  $P < Q$  плита плотно прижата к грунту, и они образуют единую систему, колеблющуюся в соответствии с прилагаемой нагрузкой. Тем не менее возможны небольшие запаздывания движения грунта относительно плиты при изменении направления нагружения, вызванные силами инерции пород. Когда  $P > Q$ , происходит отрыв плиты излучателя от поверхности земли, что приводит к возникновению ударных нагрузок, появлению искажений и изменению характера колебаний грунта. Вибрационные источники, работающие в режиме возбуждения последовательностей импульсов, развивают нагрузки, соизмеримые с пределом упругости пород. Поэтому деформации носят обратимый характер и следов на поверхности земли практически не остается. При этом точки среды совершают не вынужденные, а собственные колебания. Однако вследствие частого следования ударных импульсов возбуждаемые ими волны будут интерферировать между собой, образуя сложное поле колебаний, выделение волн в котором возможно только на основе корреляционной обработки данных.

Рассмотрим характер процессов, протекающих в ближней зоне источника, т.е. в области, непосредственно примыкающей к его рабочей плите.

Предположим, что на грунт действует сила  $F = F_0(t) \sin \omega(t)t$ , где  $F_0(t)$  и  $\omega(t)$  — ее амплитуда и частота, являющиеся в общем случае функциями времени. Колебания, возбуждаемые плитой, имеющей мас-

су  $M_{пл}$ , передаются присоединенному объему грунта массой  $m_{пр}$ . Будем считать, что под действием внешней нагрузки в грунте возникают силы сопротивления, обусловленные инерционными, упругими и неупругими свойствами пород. При этом зависимость между напряжениями и деформациями линейна, а силы неупругого сопротивления грунта пропорциональны скорости его перемещения в процессе движения. Составим дифференциальное уравнение движения системы источник — грунт в вертикальной плоскости, рассмотрев силы, действующие на массу  $M = M_{пл} + m_{пр}$ . На нее действуют силы инерции  $Ml''$ , упругого восстановления  $C/S$  и неупругого сопротивления  $\eta l'$ , где  $C$  — коэффициент упругого равномерного сжатия (упругость);  $\eta$  — коэффициент неупругого сопротивления;  $S$  — площадь плиты излучателя;  $l, l'$  и  $l''$  — перемещение плиты с грунтом и его производные. Отметим, что коэффициент сжатия  $C$  при вертикальных нагрузках связан с модулем упругости  $E$  простым соотношением [30]

$$C_z = \kappa \frac{E}{1 - \mu^2} \frac{1}{\sqrt{S}}, \quad (1.4)$$

где  $\mu$  — коэффициент Пуассона;  $\kappa$  — коэффициент, зависящий от конфигурации плиты и равный 1,06 и 1,13 для квадратной и круглой плит соответственно.

Приравняв нулю сумму всех действующих в системе сил, получим дифференциальное уравнение движения, определяющее поведение грунта под действием переменной по частоте силы,

$$Ml'' + \eta l' + C/S = F_0 \sin \omega t. \quad (1.5)$$

Поделив (1.5) на  $M$ , преобразуем его к каноническому виду

$$l'' + 2hl' + n^2 l = (F_0/M) \sin \omega t, \quad (1.6)$$

где  $2h = \eta/M$  и  $n^2 = CS/M$  — затухание и собственная частота колебаний системы плита — грунт.

В соответствии с (1.6) система излучатель — грунт совершает вынужденные и собственные колебания. Последние быстро затухают и, принимая во внимание значительное время приложения нагрузок ( $t < 5$  с), можно считать, что поведение системы определяется ее вынужденными колебаниями. В этом случае решением уравнения (1.6) будет

$$l = A \sin(\omega t - \varphi), \quad (1.7)$$

где  $A$  и  $\varphi$  — амплитуда колебаний и сдвиг фаз между силой и смещением.

Значения  $A$  и  $\varphi$  определяются соотношениями

$$A = F_0 / [M \sqrt{(n^2 - \omega^2)^2 + 4h^2 \omega^2}], \quad \operatorname{tg} \varphi = 2h \omega / (n^2 - \omega^2). \quad (1.8)$$

Решением уравнения (1.6) с учетом (1.8) будет

$$I = \frac{F_0}{M\sqrt{(n^2 - \omega^2)^2 + 4h^2\omega^2}} \times \\ \times \sin\left(\omega t + \arctg \frac{2h\omega}{n^2 - \omega^2}\right). \quad (1.9)$$

Из (1.9) следует, что под действием периодических сил система плита — грунт совершает гармонические колебания, частота и амплитуда которых определяются параметрами внешней нагрузки и свойствами грунта. При переменных по частоте нагрузках в системе могут наблюдаться резонансные явления (когда  $\omega_0 = n$ ). При этом амплитуды колебаний плиты и грунта определяются затуханием  $h$  и могут быть значительными. Таким образом, система вибратор — грунт представляет собой резонансную систему, собственная частота которой определяется как физическими свойствами пород в точках возбуждения колебаний, так и параметрами излучателя. Опыт работ с вибрационными источниками показывает, что практически повсеместно наблюдается резонанс в области 25–30 Гц. Имеет место также определенная зависимость амплитудных характеристик системы от строения и состава пород. Причем амплитудно-частотные характеристики, снятые в непосредственной близости от плиты вибратора, уже имеют сложный вид с четко выраженным резонансом в указанной полосе частот (рис. 1). В ряде случаев на повышенных частотах 60–80 Гц наблюдается второй всплеск амплитуд волн, что указывает на наличие еще одной механической системы со своей резонансной частотой.

Собственная частота системы определяется соотношением

$$\omega_0 = 1/\sqrt{\frac{M}{CS}}. \quad (1.10)$$

Нетрудно видеть, что с увеличением  $M$  собственная частота уменьшается и происходит смещение резонанса в сторону низких частот. Поэтому масса плиты у высокочастотных вибраторов выбирается минимально возможной. Соотношение (1.10) определяет принципиальную возможность изменения собственных частот вибрационных систем путем соответствующего подбора входящих в равенство (1.10) величин.

В соответствии с (1.9) наибольшие смещения и напряжения грунта равны:

$$I_{\max} = F_0 / (M\sqrt{2h\omega_0}), \quad \sigma_{\max} = E_d I_{\max} / l_0.$$

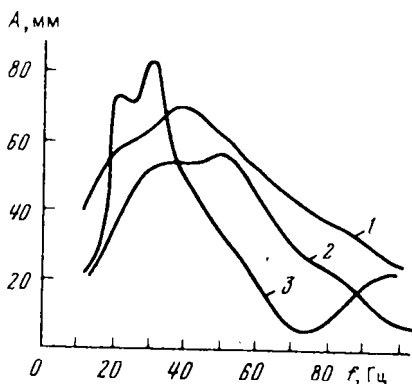
где  $l_0$  — вертикальный размер присоединенного объема грунта;  $E_d$  — динамический модуль упругости пород.

При возбуждении последовательностей импульсов система источник — грунт совершает собственные колебания, которые повторяются



Рис. 1. Амплитудно-частотные характеристики системы вибратор — грунт, снятые в непосредственной близости от плиты вибратора:

на лугу (1); грунте средней твердости (2); пашне после дождя (3)



в соответствии с частотой их следования. Поэтому характер поведения частиц грунта определяется уравнением (1.6) без правой части. Решение этого уравнения хорошо известно [31, 32] и здесь не рассматривается. Отметим, что частота собственных колебаний системы, как и в случае квазигармонического возбуждения определяется упругими свойствами пород грунта и суммарной массой  $M$ .

Стремление решить задачу о взаимодействии вибратора со средой потребовало заменить ее некоторой моделью, обладающей инерционным, упругим и неупругим сопротивлениями. Такой подход позволяет увидеть особенности происходящих процессов и выделить из них главные, определяющие эффективность работы источника. В этой связи проанализируем более подробно модель грунта, используя для этого решения, полученные в работе [31] на основании метода электромеханических аналогий.

Заменяем среду механической цепочкой, состоящей из параллельно соединенных массы  $m_{пр}$  присоединенного объема грунта, примыкающего к плите источника и воспринимающего передаваемые ему усилия, гибкости  $K_H$  и демпфера  $R_H$ , учитывающих, соответственно, инерционные, упругие и вязкие свойства грунта. Введенные параметры являются аналогами величин  $m_{пр}$ ,  $1/C$  и  $\eta$ , которые были использованы при составлении дифференциального уравнения движения системы плита — грунт. Электрический аналог этой механической системы состоит из последовательно включенных индуктивности, емкости и омического сопротивления с импедансом  $Z_H(\omega)$ :

$$Z_H(\omega) = j\omega m_{пр} + 1/(j\omega C_H) + R_H. \quad (1.11)$$

Величина  $Z_H(\omega)$  комплексная и зависит от частоты. Включенная в цепь силы (напряжения) рассматриваемая механическая (электрическая) цепочка образует колебательный контур, который на частоте  $\omega_0 = 1/\sqrt{m_{пр}C_H}$  имеет резонанс и минимальное сопротивление, равное  $R_H$ .

При этом ток в цепи (скорость смещения механических аналогов системы) достигает максимально возможных для данной системы значений.

Для вертикальной силы, действующей на жесткую круглую плиту, лежащую на упругом полупространстве, компоненты импеданса (1.11) [31]

$$\begin{aligned} m_{np} &= (1 - \mu^2) \rho r_0^3 a_m \\ 1/C_H &= K_H = 8 (1 - \mu^2) \rho v_S^2 r_0, \\ R_H &= 7 (1 - \mu^2) \rho v_S r_0^2 a_R, \end{aligned} \quad (1.12)$$

где  $\mu$  — отношение скоростей поперечной и продольной волн;  $\rho$  — плотность пород;  $r_0$  — радиус штампа;  $a_m$  и  $a_R$  — поправочные коэффициенты, близкие к единице и зависящие от частоты и  $\mu$ .

Следует отметить, что полученные формулы справедливы при условии

$$\omega r_0 / v_S \leq 1,$$

которое для сейсмического диапазона частот и проведения работ в типичных сейсмогеологических условиях практически всегда выполняется. Для практических расчетов, в которых не требуется очень большая точность, коэффициенты  $a_m$  и  $a_R$  могут быть приняты равными единице. В этом случае получим следующие формулы для определения параметров грунта:

$$\begin{aligned} m_{np} &\approx (1 - \mu^2) \rho r_0^3, \\ K &= 1/C_H = 8 (1 - \mu^2) \rho v_S^2 r_0, \\ R_H &\approx 7 (1 - \mu^2) \rho v_S r_0^2. \end{aligned} \quad (1.13)$$

Полученные соотношения позволяют решить целый ряд задач, имеющих определенное практическое значение. В частности, по ним можно оценить резонансную частоту присоединенного объема грунта, определить относительную величину каждого из входящих в механическую цепочку элементов и т.д.

Например, резонансная частота будет

$$f_0 = \frac{1}{2\pi \sqrt{m_{np} C_H}} = \frac{v_S}{2\pi r_0} \sqrt{8}, \quad (1.14)$$

и для вышеприведенных данных получим  $f_0 = 68$  Гц.

Она достаточно высока, что позволяет рассчитывать на возможность возбуждения колебаний с весьма широкой полосой частот. Из (1.13) легко определяются относительные величины сопротивлений

$$K_H / m_{np} = 8 v_S^2 / r_0^2, \quad (1.15)$$

| Параметр        | Лед                  | Мел                   | Песок               | Мягкая глина            |
|-----------------|----------------------|-----------------------|---------------------|-------------------------|
| $C_H$ , м/Н     | $2,3 \cdot 10^{-10}$ | $0,79 \cdot 10^{-10}$ | $1,3 \cdot 10^{-9}$ | $1,2 \cdot 10^{-8}$     |
| $R_H$ , Н · с/м | $3,25 \cdot 10^6$    | $7 \cdot 10^6$        | $2,15 \cdot 10^6$   | $10^5 - 0,6 \cdot 10^6$ |
| $m_{пр}$ , кг   | 520                  | 770                   | 1240                | 1500                    |

$$R_H/m_{пр} = 7 \nu_S/r_0.$$

Соотношение (1.15) показывает, что для вибраторов, у которых плиты с  $r_0 \leq 1$ , присоединенная масса грунта играет существенно меньшую роль, чем его жесткость и сопротивление затухания.

В общем случае величины  $m_{пр}$ ,  $1/C_H$ ,  $R_H$  определяются физическими свойствами пород грунта. По данным [45] получены следующие оценки этих параметров.

Следует отметить, что к полученным значениям следует относиться осторожно, так как рассчитанные по ним резонансные частоты присоединенного объема грунта для ряда пород оказываются весьма высокими, что мало вероятно. Представляется, что значения  $m_H$  получены несколько заниженными.

Следует отметить, что упругость присоединенного объема грунта может быть найдена по приведенной ранее формуле (1.4).

Так, для квадратного штампа упругость грунта определяется соотношением

$$C_H = (1 - \mu^2) / (aE), \quad (1.16)$$

где  $\mu$  — коэффициент Пуассона;  $a$  — сторона квадрата.

Для грунта с  $E = 10^7$  Н/м<sup>2</sup>,  $\mu = 0,5$  и излучателя с  $a = 1$  м получим

$$C_H \approx 10^{-7} \text{ м/Н}.$$

Зависимость величин  $m_{пр}$ ,  $C_H$  и  $R_H$  от частоты носит скрытый характер. Для однородного упругого полупространства с постоянной скоростью  $\nu_S$  они должны быть постоянными на всех частотах. Однако в реальных слоистых средах, когда скорости поперечных волн возрастают с глубиной, значения  $C_H$  и  $R_H$ , определенные на разных частотах, могут не совпадать. Обусловлено это тем, что с изменением частоты изменяются длины возбуждаемых волн, а следовательно, и глубины проникновения усилий при возбуждении колебаний. Вследствие этого вертикальные размеры присоединенного объема грунта будут увеличиваться или уменьшаться и захватывать слои с различными скоростями поперечных волн, что и приведет к изменению этих величин. Экспериментальные работы подтверждают это положение [30]. Оно находит свое отражение в том, что при возбуждении колебаний вибратором с постоянной силой умень-

шение скорости смещения плиты источника на низких частотах гораздо больше, чем можно ожидать при постоянных значениях  $C_n$  и  $R_n$ .

При горизонтальных смещениях прижатой к поверхности земли плиты вибратора сопротивление присоединенного объема грунта может быть записано в той же форме, что и для вертикальных нагрузок на среду [31]:

$$Z_{m_{пг}}(\omega) = R_{нг} + j\omega m_{пг} + 1/(j\omega C_{нг}). \quad (1.17)$$

Компоненты сопротивления определяются соотношениями

$$\begin{aligned} R_n &= 8(1 - \mu^2)(3 - 2\mu^2)^{-1} \rho v_s r_0^2 a_r, \\ m_{пг} &= 3/4(1 - \mu)^2(3 - 2\mu^2)^{-1} \rho v_0^3 a_m, \\ K_{нг} &= 1/C_{нг} = 4^2(1 - \mu^2)(3 - 2\mu^2)^{-1} \times \rho v_s^2 r_0. \end{aligned} \quad (1.18)$$

где  $a_r$ ,  $a_m$  — коэффициенты, зависящие от  $\mu$  и близкие к единице.

Интересно оценить степень соответствия компонент импеданса при вертикальном и горизонтальном возбуждениях. Для этого определим отношения  $R_n/R_{нг}$ ,  $m_{пг}/m_{пг}$  и  $K_n/K_{нг}$ , считая  $a_m = a_r = 1$ :

$$\begin{aligned} R_n/R_{нг} &= 3 - 2\mu^2, \quad m_{пг}/m_{пг} = \frac{4}{3}(3 - 2\mu^2) \quad \text{и} \quad K_n/K_{нг} = \\ &= (3 - 2\mu^2)/2. \end{aligned} \quad (1.19)$$

Из полученных соотношений следует, что при  $\mu = 1/3$  компоненты сопротивления присоединенного объема грунта при вертикальных и горизонтальных движениях опорной плиты вибратора оказываются величинами одного порядка.

Заканчивая рассмотрение процессов, происходящих при передаче нагрузок грунту, следует отметить, что они носят довольно сложный характер. Экспериментальные работы, выполненные в разных районах, подтверждают это. Неравномерность амплитудно-частотных кривых системы вибратор — грунт необходимо учитывать как при проведении работ и выборе параметров управляющих сигналов, так и при разработке новых модификаций вибраторов с расширенными частотными параметрами.

### 1.3. МОДЕЛЬ ВИБРОСЕЙСМИЧЕСКОЙ ТРАССЫ

Выше было показано, что при взаимодействии вибратора с грунтом происходят искажения генерируемых сигналов. Такие же искажения имеют место и в процессе распространения волн в среде и их приема регистрирующими устройствами. Поэтому интересно проанализировать в целом происходящие явления и составить модель вибросейсмической трассы.

Вибрационные сигналы в среде формируются вибраторами с помощью электрических, управляющих сигналов, параметры которых известны и задаются экспериментатором. Реально возбуждаемым в среде является управляющий, исходный сигнал, профильтрованный механической системой вибратора и контактом вибратор – грунт. Его будем называть зондирующим. Зондирующий сигнал подчиняется общим законам распространения упругих волн.

Параметры зондирующих сигналов зависят от характеристик создающего его управляющего сигнала, а также от искажений последнего в процессе нагружения грунта. Поэтому в обобщенном виде зарегистрированную вибросейсмическую трассу с отраженными волнами можно представить в виде

$$a(t) = S(t) * F(t) * IR(t) + n(t), \quad (1.20)$$

где  $S(t)$  – управляющий сигнал;  $F(t)$  – совокупность фильтрующих факторов, включая систему вибратор – грунт и свойства разреза;  $IR(t)$  – импульсная характеристика среды (распределение коэффициентов по разрезу);  $n(t)$  – совокупность аддитивных помех;  $*$  – знак свертки.

Искажения зондирующего сигнала определяются обобщенным оператором фильтра  $F(t)$ , который можно представить в виде

$$F(t) = B(t) * M(t) * G(t) * P(t) * T(t), \quad (1.21)$$

где  $B(t)$ ,  $M(t)$ ,  $G(t)$ ,  $P(t)$  и  $T(t)$  – операторы фильтров, определяющих искажающее действие на управляющий сигнал, соответственно вибратора и системы вибратор – грунт, ВЧР, группы вибраторов, основной толщи пород, кроме ВЧР, приемного тракта.

Отметим, что свертка управляющего сигнала с оператором  $B(t)$  определяет зондирующий сигнал

$$S_2(t) = S(t) * B(t).$$

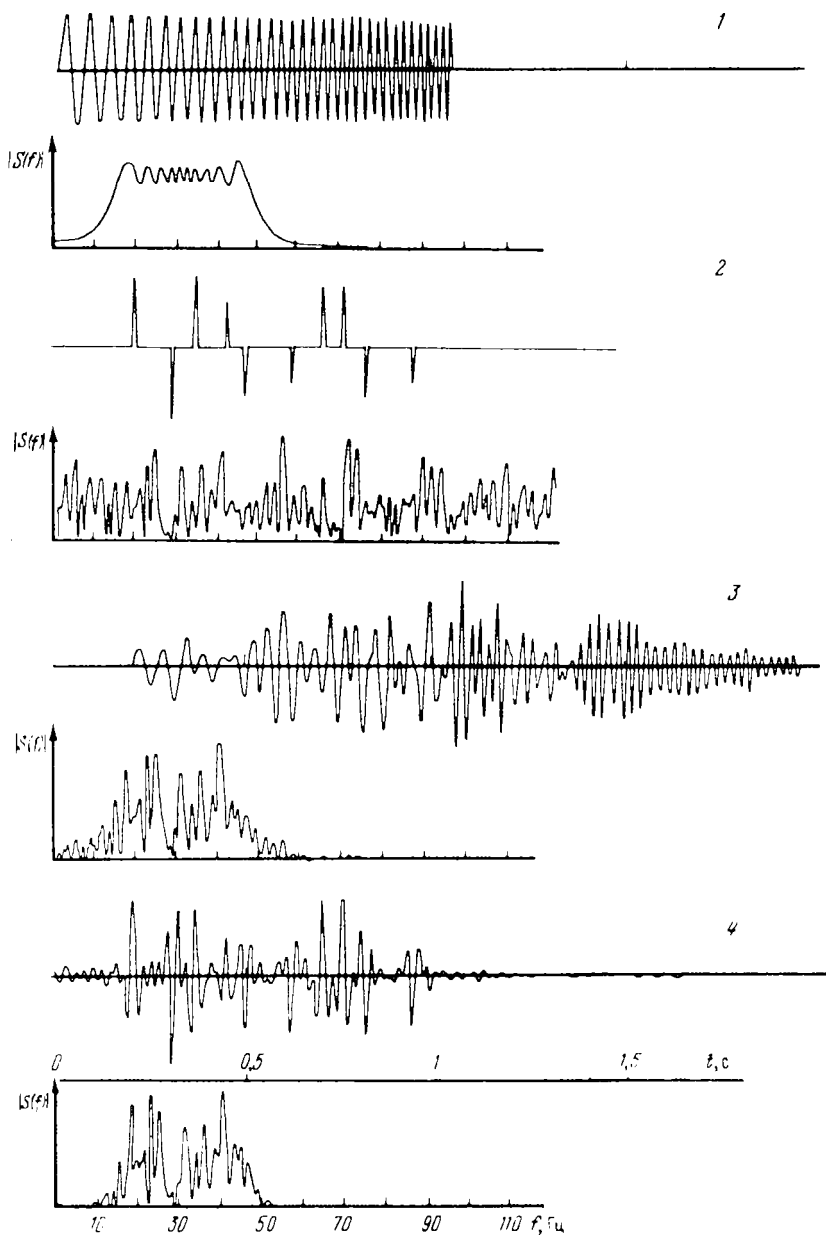
Поэтому вибротрасса может быть представлена в виде

$$a(t) = S_2(t) * M(t) * G(t) * P(t) * T(t) * IR(t) + n(t). \quad (1.22)$$

Корреляционная обработка предусматривает корреляцию вибротрассы (1.22) с управляющим сигналом. Поэтому прокоррелированная трасса будет представлена соотношением (1.20), в которое будет входить функция автокорреляции управляющего сигнала:

$$R(\tau) = rR(\tau) * IR(t) * B(t) + M(t) * G(t) * P(t) * T(t) + n_S(t), \quad (1.23)$$

где  $r_S(\tau)$  – ФАК управляющего сигнала;  $n_S(t) = S(-t) * n(t)$  – помехи, прокоррелированные с управляющим сигналом.



**Рис. 2.** Пример формирования синтетической виброграммы и коррелограммы:  
 1 — управляющий вибрационный сигнал ( $f_H \div f_K = 14 \div 50$  Гц) и его спектр; 2 — импульсная характеристика среды и ее спектр; 3 — виброграмма и ее спектр; 4 — коррелограмма и ее спектр

В частотной области трасса коррелограммы запишется так:

$$R(\omega) = r(\omega) \cdot IR(\omega) \cdot B(\omega) \cdot M(\omega) \times \\ \times G(\omega) \cdot P(\omega) \cdot T(\omega) + n_S(\omega). \quad (1.24)$$

Выражения (1.23 и 1.24) описывают во временной и частотной областях трассу коррелограммы в предположении присутствия на ней только отраженных волн (регулярные волны других типов не рассматривались).

Из (1.23 и 1.24) следует, что трасса коррелограммы может быть разделена на три компоненты: взаимодействие ФАК управляющего сигнала с функцией распределения коэффициента отражения по разрезу — информативная часть трассы; искажающее влияние системы вибратор — среда — регистратор на информативную часть трассы; нерегулярные помехи в полосе частот управляющего сигнала, также снижающие качество материалов (рис. 2).

В силу этих причин регистрируемые колебания отличаются по частотному составу от управляющего сигнала, что надо учитывать при проведении работ. Фильтрующие действия искажающих факторов различны. Наибольшее влияние на спектральный состав колебаний оказывают система вибратор — грунт и зона малых скоростей. Влияние других факторов меньше и некоторые из них могут быть учтены соответствующим выбором интерференционных систем, хорошим состоянием вибраторов, что рассмотрено в разд. 3.

Фильтрующее действие рассмотренных факторов может быть учтено применением нелинейных управляющих сигналов, скорость нарастания частоты у которых выбирается с расчетом компенсации искажений регистрируемых сигналов. С этой целью применяются также комбинированные управляющие сигналы, рассматриваемые ниже.

#### **1.4. СИГНАЛЫ, ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ В ВИБРАЦИОННОЙ СЕЙСМОРАЗВЕДКЕ, И ИХ КОРРЕЛЯЦИОННЫЕ ФУНКЦИИ**

##### **1.4.1. Корреляционные функции и их особенности**

Корреляционные функции в вибрационной сейсморазведке имеют первостепенное значение, так как именно они образуют массивы данных, которые идут в обработку для получения информации о разведываемых границах раздела и строении подземных толщ.

Теория корреляционных функций разработана достаточно подробно и изложена в ряде работ [2, 6, 32], поэтому ограничимся рассмотрением лишь их основных особенностей применительно к сигналам, используемым в вибрационной сейсморазведке.

Корреляционные функции определяют степень сходства двух или более сигналов. Они также характеризуют реакцию фильтра, согласован-

ного с некоторым сигналом  $a(t)$ , если на его вход подано колебание  $S(t)$ . Нормированное значение взаимной корреляционной функции (ФВК) двух сигналов  $a(t)$  и  $S(t)$  определяется интегралом [2], который аналогичен (1.1),

$$\bar{R}(\tau) = \frac{1}{\sqrt{E_a E_S}} \int_{-\infty}^{\infty} a(t) S(t + \tau) dt, \quad (1.25)$$

где  $E_a$  и  $E_S$  — энергии сигналов;  $\tau$  — временной сдвиг между сигналами.

Если сравниваемые колебания идентичны ( $a=S$ ) или фильтр и поступающий на его вход сигнал согласованы между собой, то функция взаимной корреляции превращается в автокорреляционную, которая определяет степень сходства сигнала с его сдвигаемой во времени копией:

$$\bar{r}(\tau) = \frac{1}{E} \int_{-\infty}^{\infty} a(t) a(t + \tau) dt, \quad (1.26)$$

где  $\tau$  — временной сдвиг между сигналом и его копией.

Так как длительность управляющих сигналов равна  $T$ , то область ненулевых значений ФВК и ФАК больше и равна  $2T$ .

Корреляционные функции являются симметричными функциями своего аргумента  $\tau$ . Для функций взаимной корреляции центр симметрии реализуется при таких  $\tau_i = \theta_i$ , при которых имеет место наибольшая степень сходства сравниваемых сигналов, а для автокорреляционных функций — при  $\tau=0$ . В этих точках функции (1.25) и (1.26) достигают своих наибольших значений [ $\bar{R}(\theta_i) \leq 1$  и  $\bar{r}(0) = 1$ ]. По мере удаления от этих  $\tau$  или  $\tau_0$  значения функций (1.25) и (1.26) уменьшаются и становятся равными нулю, а затем принимают отрицательные значения. В общем случае корреляционные функции представляют собой периодические функции вида  $\sin z/z$  с основным центральным и побочными максимумами, относительные значения, длительность и взаимное расположение которых определяются формой, частотой и протяженностью посылаемых в землю сигналов (рис. 3). Эти особенности корреляционных функций характеризуют возможности выделения и раздельной регистрации регулярных волн различной частоты и интенсивности на фоне различных помех. Они определяются амплитудой и периодом центрального максимума  $\bar{r}(\tau)$ , а также его относительной интенсивностью по отношению к побочным максимумам, которые образуют так называемый корреляционный шум, фон на коррелограммах ("импульсных" сейсмограммах).

Раздельная регистрация отраженных волн, или разрешающая способность метода, определяется шириной основного максимума корреляционной функции, равной интервалу  $\Delta\tau = 2\tau$ , между двумя ее первыми нулевыми значениями (см. рис. 3). Действительно, если отраженные волны следуют друг за другом с интервалом  $\Delta t > \Delta\tau$ , то они будут разре-



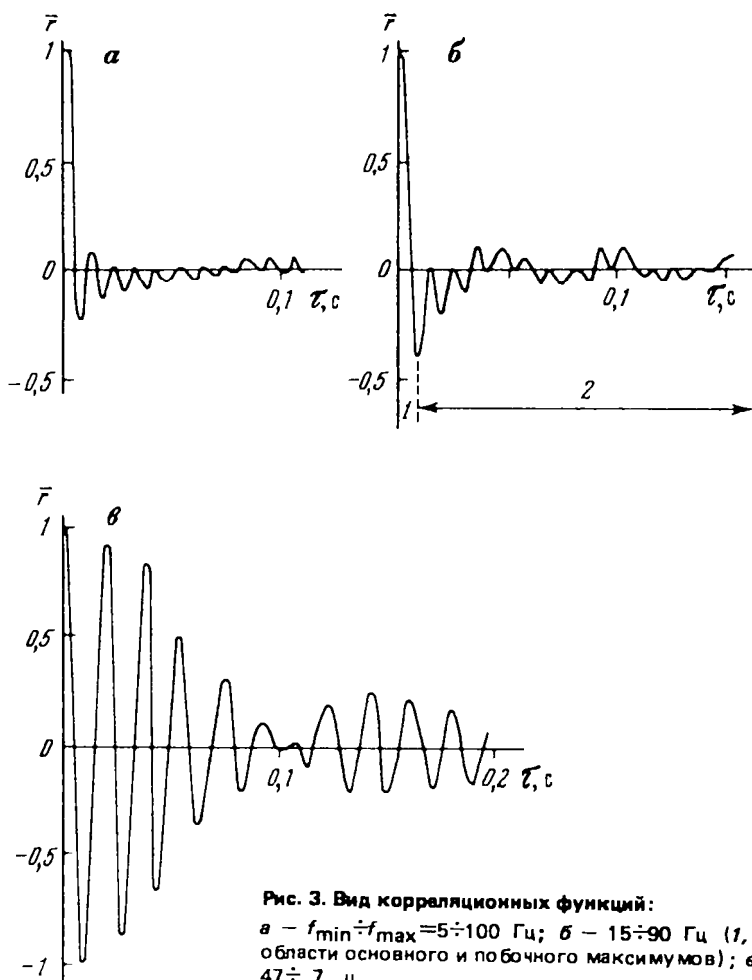


Рис. 3. Вид корреляционных функций:

*a* —  $f_{\min} \div f_{\max} = 5 \div 100$  Гц; *б* —  $15 \div 90$  Гц (1, 2 — области основного и побочного максимумов); *в* —  $47 \div 7$  Гц

шены на импульсных сейсмограммах. В противном случае они будут интерферировать между собой и образовывать некоторое суммарное колебание, в пределах которого невозможно выделить времена прихода каждой из отраженных волн.

Возможность регистрации отраженных волн различной интенсивности, или динамический диапазон вибрационной сейсморазведки, определяется уровнем побочных максимумов корреляционной функции. Действительно, если уровень корреляционных шумов, образованный приходом сильных волн, превышает интенсивность интерферирующего с этими шумами основного максимума от слабого отражения, то оно не сможет быть выделено на сейсмограммах.

Таким образом, ширина и интенсивность центрального максимума корреляционной функции, а также уровень корреляционных шумов определяют эффективность приема в вибрационной сейсморазведке. Поэтому естественно стремление к выбору таких сигналов, корреляционные функции которых в наибольшей степени удовлетворяли бы вышеуказанным требованиям.

Поиск лучших сигналов идет непрерывно и в настоящее время предложено и применяется несколько видов управляющих колебаний для ВСР. Однако наибольшее распространение получили квазигармонические управляющие сигналы, которые и рассматриваются первыми.

#### 1.4.2. Частотно-модулированные сигналы

В общем случае сигналы с изменяющейся во времени частотой могут быть представлены в виде

$$S(t) = A(t) \cos [2\pi \psi(t)t + \varphi(t)].$$

где  $A(t)$  — переменная во времени амплитуда сигнала;  $\psi(t)$  и  $\varphi(t)$  — функции, определяющие частоту сигнала и его фазу.

Для линейных частотно-модулированных (ЛЧМ) сигналов

$$\psi(t) = f_n + \beta t,$$

где  $f_n$  — начальная частота сигнала;  $\beta$  — скорость нарастания частоты.

Величина  $\beta$  определяется только параметрами сигнала:

$$\beta = \Delta F / T = (f_k - f_n) / T, \quad (1.27)$$

где  $\Delta F$  и  $f_k$  — полоса частот управляющего сигнала и его конечная частота.

Из (1.27) следует, что для управляющих ЛЧМ сигналов с заданными характеристиками скорость нарастания частоты постоянна. Во время излучения частота управляющего сигнала изменяется монотонно, без скачков. Это определяет тот факт, что каждая частота внутри заданного частотного диапазона встречается только один раз. При постоянной амплитуде  $A(t) = \text{const}$  ЛЧМ сигналы обеспечивают одинаковое излучение на каждой частоте.

Управляющие сигналы, скорость изменения частоты которых не остается постоянной во время излучения, относятся к нелинейным. Для них характерна неравномерная плотность излучения колебаний в пределах частотного диапазона сигнала. Этим обосновывается их применение в вибрационной сейсморазведке для компенсации тех искажений, которые имеют место при возбуждении колебаний и их распространении в среде.

В общем случае ЛЧМ сигналы записываются в виде

$$S(t) = A(t) \cos [2\pi (f_n t + \Delta F t^2 / 2T) + \varphi].$$

Сигнал  $S(t)$  является конечным и определен однозначно в пределах своей деятельности.

Спектральные особенности ЛЧМ сигналов, применяемых в радиолокации и вибрационной сейсморазведке, достаточно детально рассмотрены в ряде работ [2, 5, 15, 32, 33]. Сигналы с  $A(t) = \text{const}$  и  $B = \Delta F T \gg 1$  имеют практически прямоугольные спектры в полосе частот  $\Delta F$ . Причем с увеличением  $B$  спектр становится все более однородным, и его амплитуда может быть оценена по формуле

$$U(\omega) = \frac{A}{2} \sqrt{\frac{T}{\Delta F}}.$$

За пределами частотного диапазона управляющего сигнала его спектральные составляющие равны нулю. В области краевых частот амплитудные составляющие спектра убывают по гиперболическому закону  $1/f$ . Особенностью спектральных характеристик ЛЧМ сигналов с  $A(t) = \text{const}$  является то, что на частотах, близких к  $f_H$  и  $f_K$ , наблюдаются высокочастотные осцилляции амплитуд. Они обусловлены разрывами огибающей в начале и конце сигнала и соответствующим поведением интегралов Фурье. С увеличением полосы частот и уменьшением скорости их изменения уровень пульсации снижается и спектр становится более однородным [15]. Полное устранение их возможно путем сглаживания огибающей управляющего сигнала, которое широко используется в вибрационной сейсморазведке.

В подразд. 1.3 было показано, что информативная часть прокоррелированной трассы определяется автокорреляционной функцией управляющего сигнала и распределением коэффициентов отражения по разрезу. Поэтому рассмотрим более подробно ФАК ЛЧМ сигнала.

Нормированная автокорреляционная функция  $\bar{r}(\tau)$  сигнала  $U(t)$  с достаточной точностью описывается выражением [15, 19]

$$\bar{r}(\tau) = \frac{\sin(\pi \Delta F \tau (T - \tau) / T)}{\pi \Delta F \tau (T - \tau) / T} \times \cos \left\{ 2\pi \tau \left[ f_H + \frac{\Delta F (T - \tau)}{2T} \right] \right\}. \quad (1.28)$$

При временных сдвигах  $\tau \ll T$  выражение (1.28) преобразуется к виду

$$\bar{r}(\tau) = \frac{\sin(\pi \Delta F \tau)}{\pi \Delta F \tau} \cos(2\pi f_{cp} \tau), \quad (1.29)$$

где  $f_{cp} = (f_H + f_K) / 2$  — средняя частота управляющего сигнала. Выражение (1.29) представляет собой амплитудно-модулированное гармони-

ческое колебание с несущей  $\cos(2\pi f_{\text{ср}} t)$  и огибающей  $\sin(\pi \Delta F t) / (\pi \Delta F t)$ . Поэтому характер поведения автокорреляционной функции определяется интерференцией несущей и огибающей, которые представляют собой гармонические колебания с разными частотами, так как  $f_{\text{ср}} \neq \Delta F$ . В области нулевого значения  $t$  оба сомножителя принимают наибольшие значения, равные единице, образуя основной максимум автокорреляционной функции. По мере увеличения  $t$  несущая и огибающая расходятся вследствие различия законов их изменения, а также различия величин  $f_{\text{ср}}$  и  $\Delta F$ .

Нулевые значения несущей, а следовательно и автокорреляционной функции будут при  $\cos(2\pi f_{\text{ср}} \tau'_0) = 0$ ,  $2\pi f_{\text{ср}} \tau'_0 = k\pi/2$ , откуда

$$\tau'_0 = k/4f_{\text{ср}}, \quad (1.30)$$

где  $k=1, 3, 5, 7, 9, \dots, 2n-1$ .

При этом первое значение будет при  $k=1$  и  $\tau'_{01}=1/4f_{\text{ср}}$ .

Удвоенная величина ( $\tau'_{01}=1/2f_{\text{ср}}$ ) определяет ширину основного максимума автокорреляционной функции. Следовательно, регулярные колебания на коррелограммах будут иметь видимые периоды, тяготеющие к величине

$$T_{\text{в}} \approx 1/f_{\text{ср}}. \quad (1.31)$$

Из (1.31) следует, что, меняя  $f_{\text{ср}}$ , можно управлять частотой регулярных волн на коррелограммах, а следовательно и степенью их разрешения. В этом одно из основных достоинств и преимуществ вибрационной сейсморазведки на основе квазигармонических ЛЧМ сигналов.

В соответствии с [1, 32] спектры регулярных волн, определенные в конечном временном окне, будут иметь резонансный характер с максимумом, тяготеющим к  $f_{\text{ср}}$  [14]. Причем эта резонансность обусловлена физической природой автокорреляционных функций. В реальных условиях искажающее влияние рассмотренных выше факторов приводит к трансформации спектра управляющего сигнала, и частоты колебаний на коррелограммах отличаются от средних частот. Отметим, что эта разница частот может служить оценкой степени искажения частотного состава колебаний средой и процессами, происходящими при передаче нагрузок грунту.

Огибающая автокорреляционной функции меняется по закону  $\sin z/z$  и принимает нулевые значения при  $\pi \Delta F \tau''_0 = \pi m$ , откуда

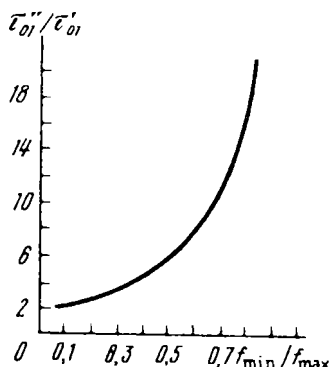
$$\tau''_0 = m/\Delta F, \quad (1.32)$$

где  $m=1, 2, 3, 4 \dots$ .

Первый нуль огибающей поступает при  $\tau''_{01}=1/\Delta F$ .

Для сигналов, применяемых в сейсморазведке, всегда выполняется условие

рис. 4 Зависимость  $\tau_{01}''/\tau_{01}' = f(f_{\min}/f_{\max})$



$$\tau_{01}' = 1/4f_{\text{ср}} < \tau_{01}'' = 1/\Delta F,$$

т.е. первое нулевое значение несущей наступает раньше нуля огибающей, и в пределах ее первого периода может быть несколько осцилляций несущей.

При  $\tau > \tau_{01}''$  кривая ФАК носит сложный характер, поскольку частоты несущей и огибающей не равны друг другу. Произведение сомножителей в (1.29) приводит к интерференционному характеру колебаний, вследствие чего в составе ФАК появляются компоненты с разными частотами.

Для оценки влияния параметров управляющих сигналов на форму ФАК проанализируем ее поведение в пределах основного максимума на участке  $\tau \leq 1/\Delta F$ . Из (1.30) и (1.32) следует, что отношение временных сдвигов, при которых огибающая и несущая принимают первые нулевые значения, равно

$$\tau_{01}''/\tau_{01}' = 4f_{\text{ср}}/\Delta F = 2(1 + f_{\min}/f_{\max})/(1 - f_{\min}/f_{\max}). \quad (1.33)$$

Для широкополосных управляющих сигналов  $f_{\min} \ll f_{\max}$  выражение (1.33) стремится к  $\tau_{01}''/\tau_{01}' \rightarrow 2$ . Это условие определяет наиболее компактный характер взаимно корреляционной функции, соответствующий случаю наибольшего возможного разрешения волн. В реальных условиях оно нереализуемо, поэтому рассмотрим характер поведения (1.33) при конечных значениях  $f_{\min}/f_{\max}$ . На рис. 4 приведен график  $\tau_{01}''/\tau_{01}' = f(f_{\min}/f_{\max})$ , из которого следует, что при отношении  $f_{\min}/f_{\max} \approx (0,2 \div 0,25)$ , соответствующем изменению частоты на 2–2,25 окт, значения  $\tau_{01}''/\tau_{01}'$  мало отличаются от своего минимального значения, равного 2. При больших значениях  $f_{\min}/f_{\max}$  кривая (1.33) резко идет вверх, что свидетельствует о снижении компактности автокорреляционной функции и увеличении числа осцилляций несущей в пределах одного периода огибающей. Характер поведения кривой позволяет выбрать область приемлемых величин  $f_{\min}/f_{\max}$ . На рис. 3 приведены кривые

$\Phi_{AK}$ , рассчитанные для управляющих сигналов с различными  $\Delta F_1, f_{\min}/f_{\max}$  и одинаковыми  $f_{cp}$ , которые иллюстрируют полученные соотношения. Так, для управляющих сигналов с  $f_H/f_K=4,25$  и 2,5 окт автокорреляционные функции практически идентичны друг другу. При этом ФАК сигнала с  $f_H/f_K=0,2$  окт значительно отличается от предыдущих за счет медленного уменьшения амплитуд несущей в пределах первого максимума огибающей. Анализ полученных соотношений показывает, что высокая разрешающая способность вибрационной сейсморазведки на ЛЧМ сигналах может быть достигнута лишь при использовании сигналов с полосой 2 окт и более и с максимально возможными  $f_{cp}$ . Отсюда понятно укоренившееся в практике вибрационной сейсморазведки требование: полоса частот управляющего сигнала должна быть не менее 2–2,5 окт.

Максимальные значения огибающей ФАК будет иметь в точках, расположенных между ее нулями, т.е. при

$$\pi \Delta F \tau_M'' = M\pi/2,$$

где  $M=3, 5, 7, 9 \dots$ .

Отсюда

$$\tau_M'' = M/2\Delta F. \quad (1.34)$$

Согласно (1.34) максимумы огибающей образуют последовательность чисел:  $|r_1(\tau)|=2/3\pi$ ,  $|r_2(\tau)|=2/5\pi$ ,  $|r_3(\tau)|=2/7\pi\dots$ , где индекс у  $r(\tau)$  определяет порядковый номер побочного максимума. По абсолютной величине  $r_1(\tau)=0,212$ ;  $r_2(\tau)=0,127$ ;  $r_3(\tau)=0,092 \dots$ , т.е. первый побочный максимум меньше основного на 14, второй — на 18, третий — на 21, четвертый — на 23 дБ и т.д. По мере удаления от основного максимума скорость спада амплитуд побочных разрастаний корреляционной функции уменьшается, с чем и связан сравнительно небольшой динамический диапазон вибрационной сейсморазведки. Отношение максимумов на временах  $\tau_1$  и  $\tau_2$  с достаточной точностью оценивается величиной  $A_2/A_1=20 \lg(\tau_1/\tau_2)$ . Область автокорреляционной функции в полосе временных сдвигов

$$-\frac{3}{2} \frac{1}{\Delta F} < \tau < \frac{3}{2\Delta F}$$

получила название ближней зоны. В ней сосредоточена основная (до 90 %) часть энергии ФАК.

Предельная разрешающая способность ВСР на ЛЧМ сигналах определяется двумя параметрами — шириной частотного диапазона и средней частотой. Чем больше эти параметры, тем выше предельная разрешающая способность. На рис. 5 приведены зависимости предельной разрешающей способности от  $f_{cp}$  и  $\Delta F$  для двух вариантов интерферирующих сигналов (однополярные коэффициенты и разнополярные). Кривые получены на основе обобщения многочисленных модельных тестов, представляющих

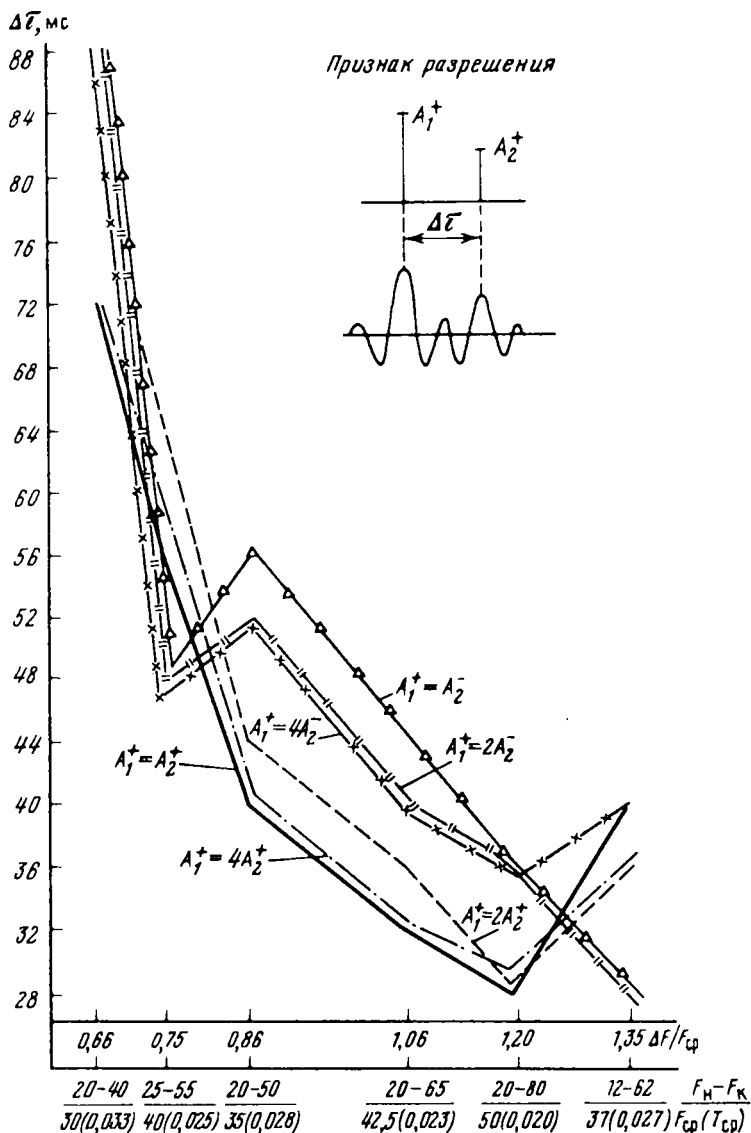


Рис. 5. Зависимость предельной разрешающей способности ВСП от параметров управляющего сигнала и разного соотношения амплитуд и полярностей коэффициентов.

$\Delta F = F_K - F_H$  — ширина диапазона;  $F_H, F_K$  — начальная и конечная частоты;  $f_{\text{ср}}$  — средняя частота;  $T_{\text{ср}} = 1/f_{\text{ср}}$ ;  $\Delta \tau$  — временной интервал между отражениями при их полном разрешении

собой свертку ФАК управляющих сигналов (с разными параметрами  $\Delta F$  и  $f_{cp}$ ) с заданной импульсной сейсмограммой (приложение 6), у которой от трассы к трассе постепенно увеличивалось временное расстояние  $\Delta t$  между коэффициентами. При этом тестировались синтетические коррелограммы, соответствующие однополярному и разнополярному вариантам коэффициентов отражений импульсной характеристики с разным соотношением амплитуд. По оси ординат отложены значения  $\Delta t$ , начиная с которых интерферирующие импульсы коррелограммы полностью разрешены (по критерию: промежуточная фаза не превышает 0,5 от максимальных значений составляющих интерференцию сигналов) и при дальнейшем увеличении  $\Delta t$  наблюдается также устойчивое их разрешение.

Отметим некоторые важные особенности поведения предельной разрешающей способности в зависимости от частотных параметров сигнала и конкретного распределения амплитуд и фаз коэффициентов, имитирующих отражения.

Для вибрационных сигналов с соотношением  $\Delta F/f_{cp} < 0,8$  сигналы разрешаются приблизительно при одном и том же  $\Delta t$  независимо от полярности и соотношения амплитуд коэффициентов отражения. Для больших значений  $\Delta F/f_{cp}$  наблюдается заметное расхождение значений времени  $\Delta t$  полного разрешения в зависимости от полярности и соотношения амплитуд  $A_1$  и  $A_2$ . Например, при  $\Delta F/f_{cp} = 1,06$   $\Delta t$  для разнополярного варианта с одинаковыми амплитудами ( $A_1^+$ ,  $A_1^-$ ) примерно на 12 мс больше, чем для однополярного варианта ( $A_1^+$ ,  $A_2^+$ ). Чтобы достичь такого же разрешения, как при однополярном распределении коэффициентов, необходимо применять сигналы с большим соотношением  $\Delta F/f_{cp}$  (для указанного примера для разнополярного варианта необходимо  $\Delta F/f_{cp} \approx 1,28$ ).

Расхождение значений  $\Delta t$  при фиксированном  $\Delta F/f_{cp}$  наблюдается и в зависимости от конкретного соотношения амплитуд соседних отражений.

Приведенные кривые дают подробное представление о предельной разрешающей способности ВСР для достаточно большого и наиболее употребимого в практике набора частотных параметров ЛЧМ сигналов. Они позволяют однозначно определить пределы разрешения сигналов в зависимости от их параметров. Зная пластовые скорости, можно оценить размеры геологического объекта исследований, которые могут быть полностью разрешены при данном частотном диапазоне сигнала, и наоборот, зная размеры объекта и скорости, можно рассчитать нужный частотный диапазон для его разрешения.

Отметим, что этот вывод справедлив только для управляющих сигналов, т.е. приведенные зависимости дают понятие о верхнем пределе разрешения. Для практических ситуаций он будет справедлив при условии, что удалось полностью выравнять спектр зондирующих и отраженных сигналов в заданном частотном диапазоне управляющего сигнала.



На практике из-за влияния, прежде всего, контакта вибратор — грунт зондирующий сигнал  $S_z(t)$  имеет более узкий спектр, чем спектр управляющего сигнала, в основном за счет ослабления высоких частот. Это приводит к тому, что реальная разрешающая способность ВСР ниже предельной.

Однако применение нелинейных сигналов и других методических приемов позволяет расширять спектр излучаемых и регистрируемых сигналов и тем самым повышать разрешающую способность ВСР.

Чтобы повысить реальную разрешающую способность ВСР по отраженным сигналам, необходимо прежде всего выравнять их спектр  $B(t)$ .

Область значений ФАК для  $\tau > |3/2 \Delta F|$  называется дальней зоной корреляционной функции. Амплитуды колебаний в дальней зоне спадают с небольшой скоростью. Медленно затухающие побочные максимумы корреляционной функции ограничивают динамический диапазон вибрационной сейсморазведки, затрудняют, а в ряде случаев делают невозможным выделение слабых полезных сигналов на фоне корреляционных шумов, обусловленных сильными отражениями и регулярными волнами-помехами. Причем ни увеличение числа одновременно работающих излучателей, ни повышение их энергии не приводит к увеличению динамического диапазона.

Динамический диапазон коррелограммы можно записать в виде

$$D_z = 20 \lg (\bar{A} / \sigma), \quad (1.35)$$

где  $\bar{A}$  — среднее значение амплитуд отражений в заданном окне;  $\sigma$  — среднеквадратичный уровень шумов.

В качестве шумов могут выступать как регулярные волны-помехи, так и случайные шумы (микросейсмь, кодирование, регистрация). Однако в работе [5] показано, что решающее влияние на ограничение суммарного динамического диапазона коррелограммы оказывают шумы корреляционного преобразования.

Введем обозначение динамического диапазона корреляционной функции [19]

$$D_k = 20 \lg [A(0) / A(\tau)], \quad (1.36)$$

где  $A(0)$  — максимальная амплитуда ФАК ЛЧМ сигнала;  $A(\tau)$  — текущая амплитуда ФАК.

Из формулы (1.36) видно, что в силу того, что уровень корреляционных шумов в целом сокращается со временем,  $D_k$  будет увеличиваться. Однако в зависимости от  $\tau$  он может иметь существенно различные значения в непосредственной близости от главного максимума ФАК [19].

Ограничение динамического диапазона регистрации, связанного с шумами корреляционного преобразования, проявляется в том, что корреляционные шумы от сильных (обычно первых, например поверхност-

ных) волн накладываются на меньшие по амплитуде последующие отраженные сигналы и тем самым маскируют их на сейсмограмме.

В работах [5, 1 i] показано, что кроме корреляционных шумов динамический диапазон вибросейсморазведки ограничивают так называемые случайные шумы или нерегулярные помехи (микросейсмы, аппаратные шумы и др.). В отдельных случаях [19] уровень нерегулярных помех может ограничивать диапазон вибросейсмических сигналов 30 дБ.

Существуют [19] и другие факторы, ограничивающие суммарный динамический диапазон вибросейсморазведки, однако они имеют второстепенное значение по сравнению с корреляционными и нерегулярными шумами. Тем не менее динамический диапазон ВСР — понятие, которое должно включать в себя только те свойства, которые присущи самому методу. В этом аспекте динамический диапазон ВСР ограничивается только собственными шумами корреляционного преобразования и шумами, обусловленными отклонением следования вибраторов от заданной программы, т.е. шумами, порождаемыми спецификой самого метода. Все остальные шумы (микросейсмы, шумы кодирования, случайные помехи и др.) являются общими причинами ограничения диапазона регистрации на коррелограммах и не имеют связи с технологией самого вибрационного метода.

Предельный текущий динамический диапазон ВСР можно определить как отношение (в дБ) максимального значения  $R(t)$  при  $t=0$  к значению  $R(t)$  управляющего сигнала при заданном сдвиге  $\tau$  (приложение 5):

$$D_n = 20 \lg [R(0) / R(\tau)]. \quad (1.37)$$

Предельный усредненный динамический диапазон ВСР

$$D_{n\text{ ср}} = 20 \lg [R(0) / \bar{R}(\bar{\tau})], \quad (1.38)$$

где  $\bar{R}(\bar{\tau})$  — среднее значение амплитуд корреляционных шумов в интервале усреднения  $\tau_1 \leq \tau \leq \tau_2$ .

Реальный текущий  $D_p$  и средний  $D_{n\text{ ср}}$  динамические диапазоны ВСР можно определить аналогично, с учетом замены  $R(\tau)$  функцией взаимной корреляции между управляющим  $S(\tau)$  и зондирующим  $S_z(\tau)$  сигналами.

Динамический диапазон ВСР обычно оценивают средними значениями нескольких следующих друг за другом участков  $\tau$ , при этом ширина интервала усреднения  $(\tau_{i+1} - \tau_i)$  сохраняется постоянной.

Оценки предельного среднего динамического диапазона ВСР, приведенные в работах [5, 20] для наиболее характерных управляющих ЛЧМ сигналов, показывают, что он не превышает 40–70 дБ ( $\tau=0,5 \div 4$  с), для отдельных случаев — 30–40 дБ.

Предельный текущий диапазон  $D_n$  может иметь существенно боль-

шие значения, чем  $D_n$  ср, однако, в среднем он отображает поведение среднего диапазона в пределах его оценки.

Для практики важное значение имеют реальные текущий и средний динамические диапазоны  $D_p$  и  $D_p$  ср, так как именно они показывают реальное соотношение шумов корреляции и амплитуд главных максимумов. Предельные  $D_n$  и  $D_n$  ср дают лишь верхнюю (максимальную) оценку диапазона ВСР в предположении, что управляющий и зондирующие сигналы не отличаются друг от друга. На самом деле  $D_p$  и  $D_p$  ср существенно меньше, чем их предельные аналоги из-за того, что зондирующий сигнал имеет фазовые и амплитудные искажения, вызванные влиянием контакта вибратор — грунт и несоответствием следования вибратора от заданной программы. Оценка реального динамического диапазона в отличие от предельного трудна, поскольку требует проведения специальных скважинных и полевых сейсмических работ.

В то же время уточнение этих вопросов было бы полезно для обоснования параметров создаваемых специализированных устройств регистрации и обработки, а также для выбора оптимальной методики наблюдений. Приведем экспериментальные результаты по оценке реального динамического диапазона ВСР на уровне виброграмм и коррелограмм. Исследования проводились по материалам работ вибросейсмических партий в Тюменской области, Якутии и Краснодарском крае.

Предварительно дадим некоторые определения. Динамический диапазон виброграммы  $D_B(t)$  определим как отношение усредненных амплитуд квазигармонических колебаний, вычисленных в скользящих во времени интервалах заданной длительности, к среднеквадратичному уровню микросейсмического фона  $\sigma_n$ . Динамический диапазон коррелограммы  $D_K(t)$  — как отношение усредненных амплитуд колебаний, вычисленных в скользящих во времени интервалах заданной длительности, к среднеквадратичному уровню суммарного фона помех  $\sigma_c$  на коррелограмме. Очевидно, что помехи  $\sigma_c$  представляют собой интерференцию шумов корреляционного преобразования, кодирования и микросейсмических колебаний. По аналогии с радиотехническими устройствами вводится понятие приведенного динамического диапазона  $D_{np}(t)$ , под которым понимается отношение усредненных амплитуд колебаний на коррелограмме, вычисленных в скользящих во времени интервалах заданной длительности, к среднеквадратичному уровню микросейсмического фона  $\sigma_m$  на виброграмме.

Введем обозначения:  $A_{Bj}$  — средняя амплитуда виброграммы в  $j$ -м временном окне;  $A_{Kj}$  — средняя амплитуда коррелограммы в  $j$ -м окне. Тогда согласно определениям

$$D_B(t) = 20 \lg (A_{Bj} / \sigma_n),$$

$$D_K(t) = 20 \lg (A_{Kj} / \sigma_c),$$

$$D_{np}(t) = 20 \lg (A_{Kj} / \sigma_m).$$

Значения  $\sigma_m$  определялись по виброграммам на временном интервале, предшествующем первым вступлениям:

$$\sigma_m = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n a_i^2}{n-1}},$$

где  $a_i$  — значения микросейсмического фона в отсчетных точках;  $n$  — количество точек в окне. Как правило, этот интервал выбирался равным 0,5 с. Значения  $\sigma_c$  определялись по такой же формуле, однако для оценки уровня шумов преобразования вычисления проводились на двух участках коррелограмм; предшествующем первым вступлениям и соответствующем концу регистрации коррелограммы.

В соответствии с данными выше определениями вычисления диапазонов виброграмм и коррелограмм проводились в фиксированных временных окнах. Для коррелограмм длина окна была равна 0,2 с, для виброграмм — 0,5 с. Увеличение ее объясняется желанием упростить вычисления, так как виброграмма, как правило, в 2–3 раза длиннее коррелограммы. Значения  $A_{Bj}$  определялись по формуле

$$A_{Bj} = \frac{1}{N_j} \sum_{k=1}^{N_j} |a_{Bjk}|,$$

где  $a_{Bjk}$  — значения экстремумов в отсчетных точках в  $j$ -м окне;  $N_j$  — число экстремумов в этом окне. Значения  $A_{Kj}$  определяются аналогично.

Вычисления выполнялись по распечаткам ЭВМ истинных амплитуд колебаний виброграмм и коррелограмм. На рис. 6 представлены кривые, характеризующие изменения  $D_B(t)$  для разных трасс одной и той же установки сейсмоприемников (Тюменская обл.) и разным (1–3) числе вибраторов. Параметры:  $F_{H-B} = 12 \div 48$  Гц;  $T_c = 10$  с;  $T_{рег} = 16$  с;  $\Delta x = 15$  м. Кривые в большей своей части повторяют друг друга, отличаясь на 4–10 дБ, что пропорционально различию амплитуд колебаний при возбуждении различным числом вибраторов. В начальной части графиков четко выделяются участки, соответствующие интенсивным поверхностным волнам, после которых наблюдается резкое уменьшение  $D_B(t)$  на 10–18 дБ. Далее кривые спадают относительно полого и на этом фоне отмечаются отдельные выбросы, соответствующие приходам отраженных волн. В конце сеанса вибрирования ( $t > 9$  с) спад кривых вновь увеличивается и кривые пересекаются, что обусловлено влиянием микросейсмического фона, независимого от числа работающих вибраторов. Отметим, что характер поведения кривых  $D_B(t)$  для разных районов одинаков, наблюдаются различия лишь в абсолютных значениях.

Поведение кривых  $D_K(t)$  (см. рис. 6) заметно отличается от кривых  $D_B(t)$ . Основное отличие состоит в пересечении между собой кривых  $D_K(t)$  на всем интервале регистрации независимо от числа работающих вибраторов. Это объясняется тем, что помехи  $\sigma_c$  определяются в основном корреляционными шумами, которые, как известно, пропорциональ-

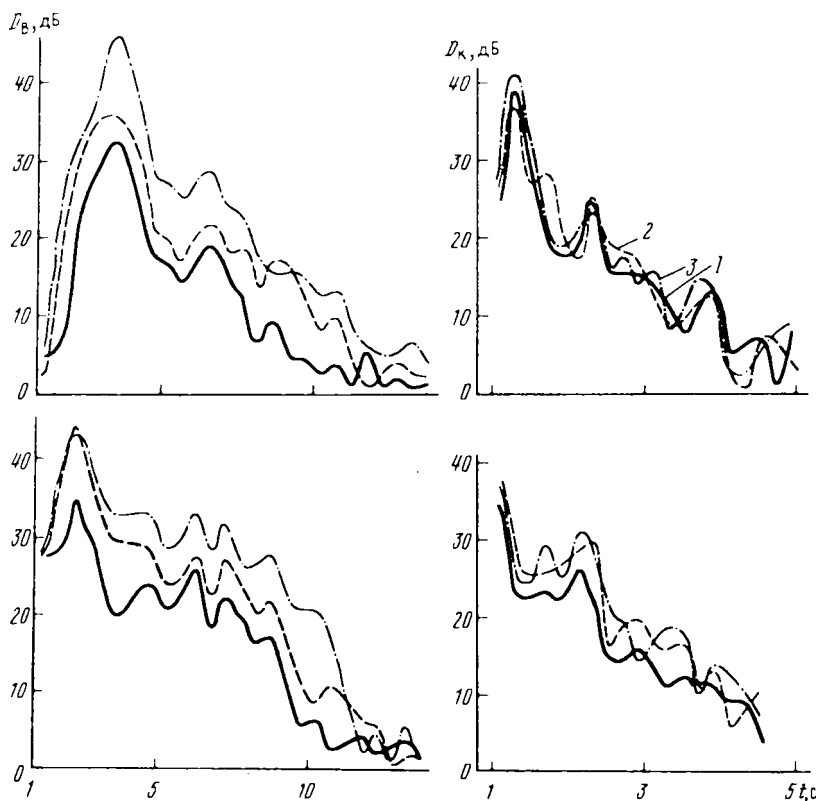


Рис. 6. Кривые изменения динамических диапазонов  $D_B(t)$  и  $D_K(t)$  для разных трасс при соответствующем числе вибраторов (1 – 3)

ны интенсивности порождающих их волн. Такими волнами являются интенсивные синфазные колебания в начальной части виброграммы. В то же время из сопоставления графиков рис. 6 следует, что максимальные значения  $D_B(t)$  на 2–7 дБ больше максимальных значений  $D_K(t)$ . Последнее означает, что в составе суммарного фона, относительно которого вычислялись значения  $D_K(t)$ , преобладают шумы преобразования. Таким образом, расширение динамического диапазона возможно лишь на основе снижения уровня побочных максимумов автокорреляционной функции. Для ЧМ сигналов полностью исключить их невозможно. Однако они могут быть уменьшены применением управляющих сигналов со сглаженными спектрами [6].

Рассмотрим этот вопрос подробнее. При этом будем исходить из того, что огибающая корреляционной функции и спектр соответствующего управляющего сигнала связаны между собой преобразованием Фурье. Это позволит получить достаточно строгие оценки для выбора опти-

мальных спектральных характеристик ЛЧМ сигналов. Учитывать краевые эффекты не будем.

**Сигналы с прямоугольным спектром.** Сигналы, спектры которых имеют прямоугольную форму вида

$$S_1(\omega) = \begin{cases} S_0 & |\omega| \leq \omega_{rp}, \\ 0 & |\omega| > \omega_{rp}, \end{cases}$$

в соответствии с обратным преобразованием Фурье имеют во временной области аналоги, которые определяются соотношением

$$K_1(t) = \frac{\sin \omega_{rp} t}{\omega_{rp} t}, \quad (1.39)$$

где  $S_0$  — нормировочный коэффициент,  $\omega_{rp}$  — граничная круговая частота.

Сопоставляя (1.29) с (1.39), видим, что они, в предположении  $t \leftrightarrow \tau$  и  $\pi \Delta F = \omega_{rp}$ , идентичны.

Поведение кривой (1.39) при различных  $t$ , а также ее максимальные и нулевые значения рассмотрены выше.

**Сигналы с трапецидальной огибающей спектра.** Управляющий сигнал с полосой частот  $\pi \Delta F = \omega_{rp}$  и трапецидальной огибающей представим в виде свертки двух вспомогательных функций  $S'(\omega)$  и  $S''(\omega)$ , каждая из которых имеет прямоугольную огибающую и граничные частоты  $\omega_1$  и  $\omega_2$ :

$$S_2^*(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} S_1(\theta) S_2(\omega - \theta) d\theta. \quad (1.40)$$

Если предположить, что  $\omega_1 = \omega_2$ , то получим сигнал с треугольной огибающей, для которого

$$K_3(t) = \left( \frac{\sin \omega t}{\omega t} \right)^2, \text{ или } K_3(\tau) = \left( \frac{\sin 2\pi \Delta F \tau}{2\pi \Delta F \tau} \right)^2, \quad (1.41)$$

т.е. уровень корреляционных шумов уменьшается обратно пропорционально квадрату полосы частот управляющего сигнала и благодаря этому существенно меньше, чем для сигналов с прямоугольным спектром. Однако энергия управляющего сигнала используется только наполовину, что ограничивает применение управляющих сигналов с такими огибающими. Достоинства сигналов с треугольным спектром могут быть частично реализованы на этапе обработки. При этом в землю посылаются ЛЧМ колебания с прямоугольной огибающей, а корреляция производится с опорным сигналом, имеющим треугольный спектр в заданном диапазоне частот.

Лучшие результаты по ослаблению корреляционных шумов можно получить при использовании управляющих сигналов, имеющих трапе-

цеидальную огибающую со сглаженными краями, которая реализуется путем свертки функций с прямоугольной и трапецеидально огибающими спектров. При этом уровень корреляционных шумов определяется величиной  $K/\omega_{\text{гр}}^3$ , где  $\omega_{\text{гр}}$  — граничная частота огибающей управляющего сигнала;  $K$  — коэффициент, существенно меньший единицы.

Таким образом, сглаживание спектра управляющего сигнала приводит к уменьшению уровня корреляционных шумов. Поэтому в вибрационной сейсморазведке на ЛЧМ сигналах повсеместно применяются управляющие сигналы с трапецеидальными огибающими, позволяющими снизить уровень корреляционных шумов при относительно небольшом уменьшении энергии, направляемой в грунт. Так, в вибраторах СВ-5-150 использован экспоненциальный закон нарастания и спадания уровня управляющего сигнала:

$$S(t) = A(1 - e^{-10.4t}), \quad 0 \leq t \leq 0,5 \text{ с};$$

$$S(t) = A, \quad 0,5 < t < T - 0,5 \text{ с};$$

$$S(t) = A e^{-10.4(T-t)}, \quad T > t > T - 0,5 \text{ с}.$$

Изменение формы управляющего сигнала возможно также путем применения специальных сглаживающих фильтров. Однако они широкого применения в вибрационной сейсморазведке не получили из-за потерь части полезной энергии посылаемых в землю колебаний.

Стремление к повышению разрешающей способности вибрационной сейсморазведки за счет расширения полосы частот регистрируемых колебаний и компенсации ослабления высокочастотных составляющих волн привело к использованию нелинейных управляющих сигналов, т.е. таких, у которых скорость изменения частоты в пределах полосы излучения колебаний не остается постоянной, а меняется по заданному закону (рис. 7). Уменьшая или увеличивая ее, можно соответственно повышать или уменьшать энергию посылаемых в землю волн разной частоты, что позволяет скомпенсировать нежелательные явления, которые имеют место при вибрационном возбуждении колебаний и которые были рассмотрены ранее. В частности, использование нелинейных управляющих сигналов дает возможность принципиально ослабить резонансные явления, наблюдаемые в системе плита — грунт, учесть поглощение высокочастотных составляющих волн и др. Расчеты показывают, что практически всегда по заданной амплитудно-частотной характеристике системы вибратор — грунт может быть вычислен такой нелинейный управляющий сигнал, который позволяет ее существенно сгладить в назначенной полосе частот. При этом нелинейные сигналы могут применяться для усиления как высокочастотных, так и низкочастотных составляющих колебаний.

Расчет нелинейного управляющего сигнала может производиться в

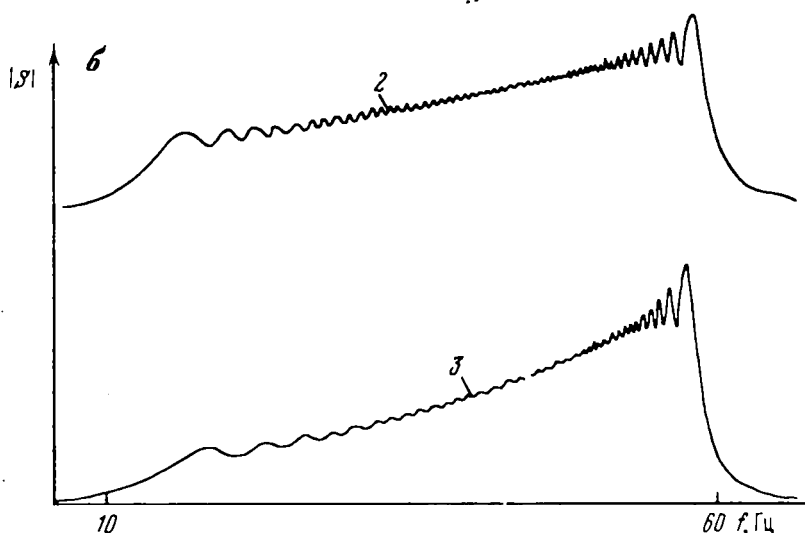
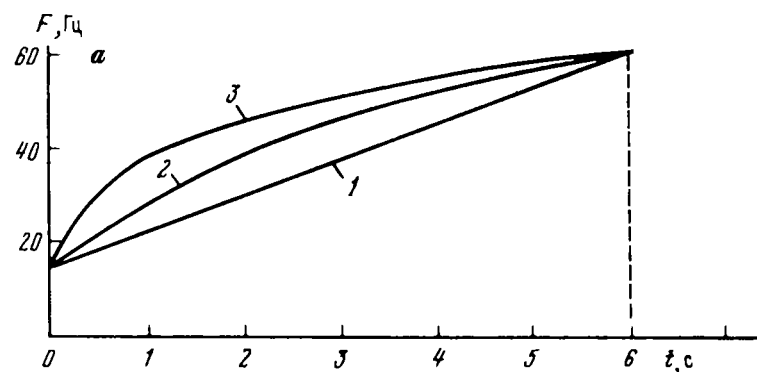


Рис. 7. Нелинейные логарифмические управляющие сигналы:

*a* — закон развертки частоты при разных параметрах крутизны  $R$  (1 — линейный, 2 — при  $R=1$ , 3 — при  $R=5$ ); *б* — амплитудные спектры для  $R=1$  (2) и  $R=5$  (3)

такой последовательности. Вначале выбирается закон изменения частоты во времени  $F(t)$ . Далее  $F(t)$  нормируют по частотному диапазону  $f_H - f_K$ , так, чтобы его начало соответствовало частоте  $f_H$ , а время  $T$  соответствовало частоте  $f_K$ . Затем  $F(t)$  интегрируют и переходят к круговой частоте  $\omega(t) = 2\pi f F(t) dt$ . Нелинейный сигнал с выбранным законом будет иметь вид  $S(t) = A \sin 2\pi f F(t) dt$ . Приведем пример формирования нелинейного логарифмического управляющего сигнала. Изменение частоты по логарифмическому закону соответствует выражению  $F'(t) = f(\ln t)$ . Нормируя его по частотному диапазону  $(f_H - f_K)$  с введением



параметра крутизны  $R$  (параметр, влияющий на сжатие логарифмической кривой во времени), получим закон изменения частоты (см. рис.7)

$$F(t) = f_n + (f_k - f_n) \ln(Rt + 1) / \ln(RT + 1). \quad (1.42)$$

Интегрируя  $F(t)$  и переходя к круговой частоте, получаем управляющий сигнал с логарифмическим законом изменения частоты  $F(t)$ :

$$S(t) = A \sin 2\pi \left\{ f_n t + \frac{\Delta F (Rt + 1) [\ln(Rt + 1) - 1]}{R \ln(RT + 1)} \right\}, \quad (1.43)$$

где  $\Delta F = (f_k - f_n)$ ;  $A$  — амплитуда.

Входными параметрами сигнала являются  $f_n$ ,  $f_k$ ,  $T$  и  $R$ , что удобно для практического использования. Параметр  $R$  определяет степень поднятия высоких частот в спектре управляющего сигнала (см. рис. 7). Чем больше  $R$ , тем больше энергия высоких частот. На практике крутизна  $R$  должна быть обратно пропорциональна степени затухания высокочастотных составляющих сигналов. Наилучший результат может быть получен тогда, когда обеспечивается точное выравнивание спектра отраженных сигналов. Программа формирования нелинейного сигнала (1.42) приведена в приложении 4. Следует отметить, что для реализации нелинейных управляющих сигналов необходимы специальные генераторы сигналов.

Одной из разновидностей нелинейных управляющих сигналов, которая может быть реализована на стандартном оборудовании, являются так называемые комбинированные управляющие сигналы [3, 46, 19]. Они состоят из двух или более стандартных ЛЧМ сигналов — сегментов, которые имеют или различные полосы частот, или длительности. Сегменты следуют друг за другом или непрерывно, или с временными интервалами для регистрации возбуждаемых ими колебаний. Спектры комбинированных сигналов образуются сложением прямоугольников, ширина которых равна частотному диапазону вибрации, а высота пропорциональна произведению длительности управляющего сигнала на его амплитуду. Их использование позволяет получать управляющие сигналы с различными спектрами и огибающими, а при необходимости уменьшать влияние помех с фиксированными частотами, например сетевых наводок и др.

Обработка получаемых материалов заключается в нахождении функций взаимной корреляции от каждого сегмента и последующем суммировании ФВК. В результате центральные, сигнальные части коррелограмм складываются синфазно, а боковые, в связи с различным частотным диапазоном сегментов комбинированного сигнала, — несинфазно, что обеспечивает ослабление помех преобразования. В предположении случайного распределения их минимумов и максимумов относи-

тельный уровень корреляционных шумов должен уменьшаться в  $\sqrt{n}$  раз, где  $n$  — число сегментов комбинированного управляющего сигнала.

Когда же необходимо полное разделение отражений и их корреляционных шумов от двух или нескольких сейсмических объектов, целесообразно применение относительно коротких управляющих сигналов, длительность которых должна быть меньше, чем время распространения волн между интерферирующими колебаниями. Это обосновывает использование управляющих сигналов малой длительности, которые, однако, менее эффективны в энергетическом отношении. Этот недостаток может быть компенсирован накоплением коротких сигналов. Поэтому комбинированные управляющие сигналы, состоящие из последовательности коротких сигналов, нашли определенное применение. В частности, когда слабые отражения со временем регистрации 1 с и более следуют за интенсивными преломленными волнами, эффективны комбинированные управляющие сигналы, состоящие из небольших по длительности (до 1 с) сегментов. В этом случае общая длительность корреляционной функции будет меньше 2 с, что обеспечит раздельную во времени регистрацию отраженных волн и корреляционных шумов от интенсивных преломленных волн. Значительное ослабление корреляционных шумов достигается при изменении полярности сегментов комбинированного сигнала в соответствии с законом дополнительных кодовых последовательностей, особенности которых будут рассмотрены далее. В этом случае общий комбинированный сигнал состоит из двух серий колебаний, следующих друг за другом с определенным временным интервалом, в течение которого происходит регистрация колебаний (6 с и более).

Обработка производится в такой последовательности. Сначала находятся функции взаимной корреляции между сериями комбинированного управляющего сигнала и соответствующими им зарегистрированными сигналами. Затем они складываются. При этом происходит удвоение интенсивностей основных максимумов и значительное ослабление корреляционных шумов вследствие того, что побочные максимумы ФВК в каждой серии оказываются в противофазе друг другу, и они вычитаются при сложении корреляционных функций. При этом на временных сдвигах, превышающих длительность сегмента управляющего сигнала, уровень корреляционных шумов может быть весьма небольшим. Возможны и другие разновидности комбинированных управляющих сигналов, построенных по принципу четвертичных кодовых последовательностей с изменением скорости и направления изменения частоты колебаний в пределах каждого сегмента.

Определенный интерес могут представлять амплитудно-модулированные ЛЧМ сигналы. При амплитудной модуляции, как известно, образуются комбинированные частоты, которые располагаются в обе стороны от центральной частоты и тем самым расширяют спектр основного колебания, обеспечивая возбуждения более широкополосных сигналов. Достоинством этого способа является возможность применения доволь-

но узкополосных управляющих сигналов, что облегчает условия эксплуатации вибраторов и повышает их надежность и синфазность работы. Недостатком — уменьшение общей энергии колебаний, посылаемых в среду.

Таким образом, управляющие сигналы на основе квазигармонических колебаний представляют собой довольно разветвленную группу сигналов, основное достоинство которых заключается в принципиальной возможности управления спектрами возбуждаемых и регистрируемых волн.

Благодаря этому, а также вследствие сравнительной простоты реализации они нашли наибольшее применение в вибрационной сейсморазведке. Тем не менее они являются не единственными управляющими сигналами. Наряду с ЧМ сигналами используются кодовые последовательности импульсов, основные разновидности которых рассмотрены ниже.

### 1.4.3. Однополярные кодовые последовательности

Однополярные кодовые последовательности (ОКП) применяются в вибрационной сейсморазведке сравнительно недавно. Однако они нашли определенное применение при разведке глубоких и мелких горизонтов, а также при изучении ВЧР. Такие управляющие сигналы представляют собой последовательности однополярных, одинаковых по амплитуде импульсов, следующих друг за другом с переменными временными интервалами. В общем случае последовательности импульсов могут быть представлены в виде

$$\{a_n\} = a_1, a_2, \dots, a_n,$$

где  $a_n$  — амплитуды посылаемых в землю сигналов.

Промежуток времени  $\tau_i$  между импульсами определяется соотношением

$$\tau_i = p(t) \tau_0,$$

где  $\tau_0$  — начальный, минимальный временной интервал;  $p(t)$  — переменная величина, определяемая временным законом следования импульсов в сигнале.

Практическое применение получили последовательности, у которых временные интервалы между импульсами подчинены или случайному закону, или линейно увеличиваются (уменьшаются) по аналогии с ЛЧМ сигналами. В соответствии с этим  $p(t)$  представляют собой или комбинацию случайных чисел, или числовые ряды с возрастающими или убывающими членами. В общем виде  $p(t)$  можно рассматривать как временную последовательность, элементы которой принимают значения 1 или 0 и следуют через одинаковые промежутки времени  $\tau_0$ . Например,

$\{a_n\} = 101001000100001 \dots$ . Длительности таких сигналов равны  $T = (N - 1) \tau_0$ , где  $N$  — общее число символов в посылке. На практике  $N$  выбирают достаточно большими, вследствие чего длительности посылок превышают времена прихода волн, отраженных от самых глубоких разведываемых горизонтов.

При таком возбуждении точки среды совершают не вынужденные, а собственные колебания. В связи с тем, что импульсы следуют через небольшие промежутки времени, которые соизмеримы с периодом собственных колебаний, в среде образуется сложное интерференционное поле, в котором невозможно выделить отдельные волны. По аналогии с ЛЧМ сигналами записи этого поля называются виброграммами. Модель вибротрассы, при дискретном вибрационном возбуждении описывается отражением

$$V(t) = x_{ев}(t) * K(t) * IR(t) * F(t) + n(t). \quad (1.44)$$

где  $x_{ев}(t)$  — единичное воздействие;  $K(t)$  — закон следования воздействий;  $IR(t)$  — импульсная реакция среды — распределение во времени коэффициентов отражений (отклик сред);  $F(t)$  — совокупность фильтрующих факторов геологического разреза;  $n(t)$  — совокупность аддитивных помех.

Обработка виброграмм производится также на основе нахождения степени сходства посылаемых в среду и зарегистрированных сигналов путем вычисления корреляционного интеграла. В результате корреляции происходит временное сжатие колебаний и виброграммы преобразуются в импульсные сейсмограммы — коррелограммы. Соответственно модель корреляционной трассы описывается выражением

$$R(t) = [x_{ев}(t) * K(t) * IR(t) * F(t)] * K(-t) + n(t) * K(-t). \quad (1.45)$$

Поведение корреляционных функций в области основного и побочного максимумов при ЛЧМ возбуждении и виброимпульсном возбуждении различное. Рассмотрим особенности ФАК виброимпульсных сигналов.

Если не принимать во внимание искажение сигналов в среде и влияние аддитивной помехи, то импульсные сейсмограммы определяются автокорреляционными функциями управляющих сигналов. Для импульсных последовательностей нормированные значения функции автокорреляции определяются соотношением [2]

$$R_m(\tau) = \frac{1}{N} \sum_{n=m+1}^N a_n a_{n-m}. \quad (1.46)$$

Значения  $R_m(\tau)$ , отложенные по оси  $t$  через интервалы  $\tau_0$ , образуют решетчатую функцию и для получения ФВК сейсмограммы необходимо

согласно (1.44) каждое значение  $R_m(\tau)$  свернуть с  $IR(t)$ . При этом, если период собственных колебаний среды

$$T_c \leq 4\tau_0,$$

то видимые частоты волн на коррелограммах определяются значениями  $T_c$ . При невыполнении этого условия возможно наложение соседних импульсов, что может приводить к зависимости частот волн на коррелограммах от параметра кода — частоты следования импульсов в посылке.

Автокорреляционные функции кодовых последовательностей и квазигармонических вибрационных сигналов в принципе идентичны друг другу [2, 9, 10, 20]. Они имеют основной и побочные максимумы, следующие друг за другом через определенные временные интервалы. Однако поведение корреляционных функций в области основного и побочных максимумов у них различное, так как при виброимпульсном возбуждении оно зависит, как было указано ранее, от собственных колебаний грунта. Это относится и к разрешающей способности виброимпульсной сейсморазведки, которая связана с поведением корреляционных функций в области основного максимума. При виброимпульсных посылках возможно обеспечить генерирование более высокочастотных колебаний, чем при импульсном возбуждении. Обусловлено это тем, что виброимпульсные излучатели развивают значительно меньшие по величине нагрузки, чем импульсные, что и приводит к разнице в частотном составе колебаний.

Разрешающая способность кодоимпульсного способа возбуждения зависит от двух факторов: ответной реакции грунта на единичное воздействие  $x_{ев}(t)$  и автокорреляционной функции кодовой последовательности  $IR(t)$ .

Управление спектрами сигналов при кодоимпульсном возбуждении, в отличие от квазигармонического возбуждения, не находится в прямой зависимости от параметров кода. Таким образом, можно констатировать следующее.

1. Спектр и форма возбуждаемых колебаний при кодоимпульсном источнике определяются в основном параметрами единичного воздействия.

2. Разрешающая способность кодоимпульсного метода не находится в прямой зависимости от частотного диапазона кода.

3. Спектр кода имеет существенно большую ширину, чем частотный диапазон кода, и характеризуется неравномерной сложной формой.

4. Эффективная часть спектра корреляционных импульсов зависит от соотношения и взаимного положения на частотной оси эффективной части спектра единичного воздействия и части спектра кода, ограниченной начальной и конечной частотой кода; чем больше относительно равномерная часть спектра кода совпадает со спектром единичного воздействия, тем спектры коррелограмм шире и импульсы компактнее.

5. При выборе параметров кода в полевых условиях необходимо

проводить спектральный анализ единичных воздействий и проводить тестирование ФВК и на основе сопоставительного анализа принимать решение о выборе оптимальных параметров управляющего кода.

Динамический диапазон регистрации, а следовательно, и возможность выделения слабых сигналов на фоне корреляционных шумов, определяются уровнем побочных максимумов автокорреляционных функций кодовых последовательностей. Для последовательностей с большим числом элементов ( $K \geq 15 \div 20$ ) максимальные относительные значения побочных максимумов не менее  $R_m(\tau) \approx 1/\sqrt{K}$  [2, 9]. При этом наблюдаются зоны разрастания — вспучивания корреляционных функций, в пределах которых уровень корреляционных шумов превышает величину  $1/\sqrt{K}$ . Обусловлено это тем, что при корреляционной обработке сигналов происходит наложение реальных сейсмических импульсов, приводящее к увеличению уровня помех преобразования. Условие отсутствия интерференции импульсов при корреляционной обработке кодовых последовательностей с линейно изменяющимися интервалами между импульсами [10]

$$\frac{K^2}{2} t_n < T, \quad (1.47)$$

где  $T$  — общая длительность посылки;  $t_n$  — длительность одиночного сигнала, т.е.

$$K < \sqrt{2T/t_n}.$$

При  $T=6$  с и  $t_n=0,01$  (два импульса с  $f=50$  Гц)  $K \approx 35$ , т.е. только для последовательностей с  $K < 35$  не будет наблюдаться наложение импульсов и уровень корреляционных шумов будет приблизительно равен  $1/\sqrt{K}$ .

Расчеты [10] показывают, что увеличение длительности посылок приводит к снижению уровня помех преобразования и к смещению областей вспучивания на большие времена. Это позволяет изменением длительности применяемых последовательностей уводить нежелательные зоны ФАК за пределы полезной записи. В табл. 2 приведены расчеты, иллюстрирующие это положение [10]. Ими можно пользоваться при выборе длительности последовательностей.

В общем можно утверждать, что в классе однополярных кодовых последовательностей нет сигналов, которые могли бы обеспечить уровень корреляционных шумов, меньший, чем  $1/\sqrt{K}$ .

Таким образом, однополярные кодовые последовательности имеют определенные ограничения по уровню корреляционных шумов. Исходя из полученных соотношений, для достижения динамического диапазона 40 дБ и более необходимы однополярные последовательности с числом импульсов  $N > 10000$ , что, естественно, вызывает определенные трудности в практической реализации столь длинных кодовых последовательностей и приводит к большим затратам времени на их возбуждение. Зна-

| Частота кода, Гц | $T_c$ | Протяженность<br>разрастания фона,<br>с | Время центра раз-<br>растания, с |
|------------------|-------|-----------------------------------------|----------------------------------|
| 10–20            | 3     | 0,45                                    | 1,6                              |
|                  | 6     | 0,45                                    | 3,2                              |
|                  | 9     | —                                       | 4                                |
| 10–45            | 1,5   | 0,3                                     | 0,6                              |
|                  | 3     | 0,6                                     | 1,2                              |
|                  | 6     | 0,65                                    | 2,4                              |
|                  | 9     | 0,75                                    | 3,6                              |
|                  | 15    | 0,7                                     | 1,9                              |
| 10–30            | 3     | 0,7                                     | 3,8                              |
|                  | 6     | 0,8                                     | 5,8                              |
|                  | 9     | 0,8                                     | 5,8                              |
| 15–50            | 1,5   | 0,35                                    | 0,65                             |
|                  | 3     | 0,4                                     | 1,35                             |
|                  | 6     | 0,4                                     | 2,7                              |
|                  | 9     | 0,55                                    | 4                                |

чительные перспективы расширения динамического диапазона вибрационной сейсморазведки и снижения уровня корреляционных шумов открываются при использовании знакопеременных кодовых импульсных последовательностей (ЗПКП) в качестве управляющих сигналов.

#### 1.4.4. Знакопеременные кодовые последовательности

В настоящее время известно довольно большое число знакопеременных импульсных последовательностей с низким уровнем корреляционных шумов. Среди них особенно перспективны дополнительные составные последовательности, которые позволяют увеличить динамический диапазон вибрационной сейсморазведки до уровня импульсной [9, 20]. Дополнительные последовательности состоят из серий посылок одинаковой длины, у которых импульсы располагаются через равные промежутки времени и принимают значения +1 или -1. Они являются эквидистантными последовательностями. Распределение знаков импульсов в каждой серии таково, что сумма их автокорреляционных функций равна нулю везде, кроме  $\tau=0$ , т.е.

$$r(\tau) + \bar{r}(\tau) = \begin{cases} 2 \text{ при } \tilde{m}=0, \\ 0 \text{ при } \tilde{m}=\pm 1, \pm 2, \dots, \pm (N-1), \end{cases} \quad (1.48)$$

где  $r(\tau)$  и  $\bar{r}(\tau)$  — нормированные значения автокорреляционных функций каждой из посылок, образующих составную последовательность.

Составные последовательности строятся таким образом, что число парных произведений импульсов из обеих серий посылок положительного и отрицательного знаков должно быть одинаковым. Если первая серия имеет вид  $\{a_n\} = 1, 1$ , то вторая должна быть  $\{a_n\} = 1, -1$ . При таком распределении положительных и отрицательных импульсов число парных произведений положительного и отрицательного знаков одинаково. Нетрудно показать, что значения автокорреляционных функций для этой простейшей последовательности будут равны соответственно 1, 2, 1 и  $-1, 2, -1$ , а их нормированная сумма будет равна 0, 2, 0, что согласуется с (1.48). Нарращивание дополнительных последовательностей производится на основе их композиции [2] путем последовательного присоединения к первой серии второй. При этом в первой строке новой серии знаки не изменяются, а во второй — выбираются на основе равенства числа парных произведений положительного и отрицательного знаков при условии, что в первой половине второй серии распределение знаков взято из первой серии предыдущей последовательности. Например, составная последовательность на четыре импульса в каждой серии будет иметь вид

$$\begin{aligned} \{a\} &= 1 \quad 1 \quad 1 \quad -1 \\ \{a\} &= 1 \quad 1 \quad -1 \quad 1 \end{aligned}$$

Функции автокорреляции каждой серии и их нормированная сумма:

$$\begin{aligned} r(\tau) &= -1 \quad 0 \quad 1 \quad 4 \quad 1 \quad 0 \quad -1, \\ \bar{r}(\tau) &= 1 \quad 0 \quad -1 \quad 4 \quad -1 \quad 0 \quad 1, \\ r(\tau) + \bar{r}(\tau) &= 0 \quad 0 \quad 0 \quad 4 \quad 0 \quad 0 \quad 0. \end{aligned} \tag{1.49}$$

Следовательно, сумма автокорреляционных функций равна нулю везде, кроме точки с нулевым сдвигом. По такому принципу могут быть построены последовательности на 8, 16, 32, 64 и т.д. импульсов, и для них будет выполняться условие (1.47), по которому отличные от нуля значения ФАК будут иметь место только при нулевом сдвиге. В соответствии с (1.2) это равносильно генерированию волн некоторой импульсной нагрузкой, что и обеспечивает достижение динамического диапазона, реализуемого при импульсном возбуждении колебаний.

В остальном дополнительные последовательности идентичны ОКП, особенности применения которых в невзрывной сейсморазведке были рассмотрены ранее. Возможности использования составных последовательностей были изучены на моделях, которые представляли собой синтетические виброграммы и коррелограммы, полученные путем свертки посылок составной последовательности из 32 импульсов с оператором, учитывающим реакцию среды и распределение коэффициентов отражений, с последующим нахождением ФВК и их сложением.

Расчеты были выполнены для моделей, имеющих одну и четыре от-



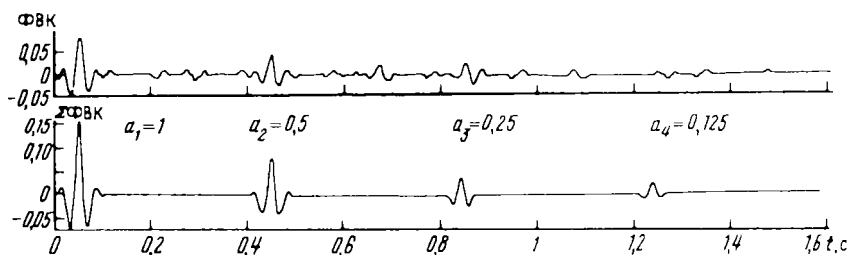


Рис. 8. Функция взаимной корреляции по одной из серий составной последовательности и суммы ФВК для двух последовательностей

ражающие границы раздела с коэффициентами отражений, равными соответственно 1; 0,5; 0,25 и 0,125. Реакция среды учитывалась тем, что каждый импульс последовательности свертывался с импульсом Пузырева, имеющим параметры  $F_{\text{в}}=25$  Гц, длительность  $T=100$  мс и затухание  $\alpha=500$  и 2000. В результате были получены модельные виброграммы, по которым находились импульсные сейсмограммы. При этом корреляция виброграмм проводилась с функциями каждой серии последовательности. Полученные по каждой серии коррелограммы затем суммировались, образуя конечные импульсные сейсмограммы.

Материалы моделирования дали идентичные результаты. Первичные коррелограммы по сериям последовательностей были осложнены шумами преобразования. Однако распределение их знаков было таким, что при суммировании они полностью уничтожались и на итоговых коррелограммах оставались только колебания, соответствующие их основному максимуму. В качестве примера результаты счета по одной из моделей с четырьмя отражениями приведены на рис. 8. Из него видно, что составная коррелограмма по одной из серий последовательности характеризуется наличием сигналов (отражений) и корреляционных шумов, обусловленных побочными максимумами ФВК. Уровень помех преобразования значителен. Вследствие этого последнее слабое отражение выделяется неуверенно на их фоне. Кроме того, в промежутках между сигналами выделяются всплески амплитуд, которые по интенсивности вполне могут быть приняты за регулярные сигналы.

После суммирования ФВК на коррелограмме остались лишь регулярные сигналы, соответствующие модельным. Восстановились форма записи и амплитудные соотношения волн, уверенно стало выделяться слабое последнее отражение. По полученным данным был оценен уровень корреляционных шумов, который во всем диапазоне временных сдвигов оказался близким к нулю.

Таким образом, результаты моделирования показали, что на основе применения дополнительных, составных последовательностей можно существенно расширить динамический диапазон вибрационной сейсморазведки. При этом корреляционная обработка должна проводиться с

функцией кода — распределением импульсов каждой последовательности.

Применение дополнительных последовательностей предполагает возбуждение положительных и отрицательных импульсов равной амплитуды. В реальных условиях возможны отклонения в работе излучателя и в условиях передачи нагрузок на грунт, которые могут приводить к возбуждению положительных и отрицательных импульсов разной интенсивности. Для оценки влияния этого эффекта на суммарный уровень корреляционных шумов были выполнены расчеты, в которых отношения амплитуд импульсов разной полярности равнялись 0,9; 0,7 и 0,5. Расчеты показали, что при этом на суммарных коррелограммах появляются шумы преобразования, уровень которых доходит до 7 % от основного максимума при отношении амплитуд разнополярных импульсов 0,5. При меньших различиях уровень шумов быстро снижается и становится весьма малым при отношениях амплитуд 0,9 и менее. Это обнадеживающий результат, поскольку в реальных условиях могут наблюдаться различия в амплитудах волн нагрузки и разгрузки. Не вызывает затруднений и возбуждение колебаний разной полярности. Для этого необходим статический прижим излучающей плиты к грунту с силой, несколько большей, чем нагрузки, развиваемые источником. Положительные воздействия реализуются при совпадении направлений действия динамической и статической сил, а отрицательные — при их несовпадении. В последнем случае плита как бы разгружается, становится легче, что и приводит к возбуждению колебаний обратного знака.

Практическая реализация знакопеременных последовательностей возможна на основе специальных источников, а также гидравлических вибраторов с переделанным генератором сигналов. К настоящему времени получены положительные результаты полевого опробования ЗПКП. Теоретические и экспериментальные исследования показывают, что применение составных, дополнительных последовательностей позволяет существенно ослабить корреляционные шумы и тем самым расширить динамический диапазон вибрационной сейсморазведки.

## 1.5. ОСОБЕННОСТИ КОДИРОВАНИЯ ВИБРОСЕЙСМИЧЕСКИХ ДАННЫХ

Ранее отмечалось, что особенностью вибрационной сейсморазведки является использование большого массива входных данных для нахождения одного значения функции взаимной корреляции. Совокупность значений ФВК определяет исходную информацию для последующей обработки. В вибрационной сейсморазведке имеет место нетипичная для разведочной геофизики ситуация, при которой результаты разведки — амплитуды колебаний для каждого дискрета времени — находятся суммированием значительной совокупности некоррелированных или слабокоррелированных между собой слагаемых. Достаточно отметить, что

одно значение функции взаимной корреляции при длительности управляющего сигнала  $T=10$  с находится как нормированная сумма 5000 и 2500 слагаемых при интервалах дискретизации 2 или 4 мс, а с учетом горизонтального и вертикального суммирования, широко применяемого в невзрывной сейсморазведке, число слагаемых увеличивается еще на 2–3 порядка.

В разведочной геофизике при регистрации сигналов всегда стоит задача снижения уровня нерегулярных помех и достижения максимально возможных отношений сигнал/помеха. Достигается это повторением наблюдений (грави-, магниторазведка), применением методики многократных перекрытий, группирования (сейсморазведка) и др. Эти процедуры обеспечивают повышение точности результатов, поскольку дисперсии ошибок обратно пропорциональны числу измерений. В вибрационной сейсморазведке суммирование является неотъемлемым элементом нахождения значений ФВК и поэтому при фиксированной точности результата исходные слагаемые могут иметь изначально более низкую точность, зависящую от числа слагаемых. Этим обосновывается возможность грубого представления исходных данных, т.е. применения малоразрядного, а в пределе — одnorазрядного знакового кодирования. Обоснованность такого подхода к представлению исходных данных оправдывается еще и тем, что в невзрывной сейсморазведке относительный уровень случайных шумов оказывается весьма большим и отношения сигнал/помеха на исходных записях  $\rho_{исх} < 1$ . В этих условиях также не очевидна необходимость кодирования исходной информации многим числом уровней, так как большинство из них будет задолжено на представление помех, а не полезных сигналов.

Отмеченные выше особенности вибрационной сейсморазведки делают перспективным применение малоразрядного (знакового) кодирования. Поэтому рассмотрим теоретические основы знакового кодирования и приведем материалы, иллюстрирующие возможность его применения в вибрационной сейсморазведке.

### 1.5.1. Основы знакового кодирования

Сущность знакового кодирования заключается в том, что поступающие на вход преобразователя аналог — код сигналы  $x(t)$  заменяются их знаками (полярностями). Для описания этого процесса используется функция  $\text{sgn}(x)$ , определяемая соотношением

$$\text{sgn}(x) = \begin{cases} -1 & \text{при } x(t) < 0 \\ +1 & \text{при } x(t) > 0. \end{cases}$$

Сейсмическая трасса, подвергнутая знаковому кодированию и дискретизации, представляет собой последовательность коротких прямоугольных импульсов равной интенсивности и длительности, следующих друг

за другом через одинаковые промежутки времени, определяемые частотой дискретизации. При знаковом кодировании амплитудные различия сигналов отсутствуют и динамический диапазон регистрации равен нулю.

Будем считать, что регистрируемые колебания представляют собой аддитивную смесь регулярных волн и нерегулярных шумов, для которых отношение сигнал/помеха  $\rho_0 < 1$ .

В связи с тем, что спектры полезных волн и нерегулярных помех перекрываются между собой, а  $\rho_0 < 1$ , то вся информация о наличии или отсутствии регулярных волн, оказывается заложенной в характере следования разнополярных импульсов единичной амплитуды. Когда на исходных сейсмограммах имеются лишь случайные помехи, а регулярные волны отсутствуют, то знаковые трассы представляют собой последовательности импульсов со случайным характером распределения их полярностей. При наличии регулярных волн и помех на знаковых трассах будет наблюдаться определенная закономерность в распределении импульсов разной полярности. При сложении знаковых функций скрытая случайными помехами регулярность исходных записей, обусловленная присутствием когерентных волн, начнет проявляться, что делает возможным их выделение на суммарных трассах в соответствии с принципами синхронного накопления обычных функций. Просуммированные функции являются уже многоуровневыми вследствие алгебраического сложения единичных значений амплитуд исходных колебаний. Например, при сложении двух знаковых функций на выходе сумматора амплитуды могут принимать значения от  $-2$  до  $+2$  и максимальное число уровней будет равно двум без учета знака. При сложении  $n$  функций диапазон изменения суммарных амплитуд составит уже  $2n$  (от  $-n$  до  $+n$ ), а максимальное число уровней возрастает без учета знака до  $n$ . Следует отметить, что суммарные амплитуды могут характеризоваться меньшим числом уровней, так как оно определяется, наряду с количеством слагаемых, исходным отношением сигнал/помеха, которое меньше единицы. Поэтому часть слагаемых будет иметь разные знаки, и они будут компенсировать друг друга.

Предположим, что знаковому преобразованию подвергается некоторый сигнал  $x(t)$ , состоящий из суммы регулярных колебаний  $a_c(t)$  и случайных помех  $a_n(t)$ . Каждая выборка сигнала  $x(t)$  определяется выражением

$$x(t) = \text{sgn} [a_c(t) + a_n(t)]$$

и в зависимости от знака суммы, стоящей в скобках, будет равна  $+1$  или  $-1$ . После  $n$ -кратного накопления оценка суммарной амплитуды может быть определена как алгебраическая сумма произведений числа складываемых сигналов на вероятность принятия ими положительных или отрицательных значений:

$$x_{\Sigma}(t) = nP \left\{ [a_c(t) + a_n(t)] > 0 \right. \quad (1.61)$$

$$n(1-P) \left\{ [a_c(t) + a_n(t)] < 0 = n(2P-1), \right. \quad (1.61)$$

где  $P$  — вероятность того, что аддитивная смесь регулярных колебаний и помехи положительна.

Так как величина  $P$  зависит от исходных отношений сигнал/помеха  $\rho_{исх}$ , то соотношение (1.61) определяет возможность и условие восстановления амплитудных различных сигналов на накопленных записях.

Действительно, для тех регулярных волн, для которых  $\rho_0 > 1$  и  $P < 1$ , суммарные амплитуды  $x_\Sigma$  будут меняться в пределах  $\pm n$  в зависимости от значений  $\rho_0$ , которые, в свою очередь, пропорциональны исходным интенсивностям волн. В тех случаях, когда  $\rho_0 > 1$ ,  $P = 1$  и суммарные амплитуды для всех волн будут одинаковыми ( $x_\Sigma = n$ ) независимо от их исходных значений.

Таким образом, необходимым условием восстановления амплитудных соотношений между регулярными волнами при знаковом кодировании входных данных является выполнение соотношения  $\rho_0 < 1$  для самой интенсивной волны. При обратных соотношениях будут происходить ограничение накопленных данных и искажение амплитудных соотношений между регулярными колебаниями.

Рассмотрим теперь работу аппарата восстановления амплитудных соотношений между регулярными волнами. В соответствии с (1.61) накопленная амплитуда зависит от вероятности  $P$ . Для нормального закона распределения помех  $P$  может быть определена как вероятность попадания случайной величины в некоторую область значений, ограниченную справа порогом, равным амплитуде регулярной волны  $a_{ci}$  [4, 7]:

$$P = \frac{1}{2} [1 + \Phi(a_{ci}/\sigma\sqrt{2})], \quad (1.62)$$

где  $\Phi(a_{ci}/\sigma\sqrt{2})$  — интеграл вероятности.

Подставляя (1.62) в (1.61), получим выражение амплитуды накопленной волны с индексом  $i$

$$x_{\Sigma i} = n\Phi_i(a_{ci}/\sigma\sqrt{2}) = n\Phi_i. \quad (1.63)$$

Из равенства (1.63) также следует ограничение накопленных амплитуд при  $\rho > 1$ .

Для некоторой другой волны  $j$ , характеризующейся амплитудой  $a_{cj}$ , можно написать аналогичное равенство

$$x_{\Sigma j} = n\Phi_j(a_{cj}/\sigma\sqrt{2}) = n\Phi_j. \quad (1.64)$$

Тогда отношение амплитуд двух суммарных волн будет

$$x_{\Sigma i}/x_{\Sigma j} = \Phi_i/\Phi_j.$$

Оно для  $a_{ci}/\sigma < 0,9$ ,  $a_{cj}/\sigma < 0,9$  и  $\sigma = \text{const}$  с погрешностью не больше 10 % преобразуется к виду

$$x_{\Sigma i}/x_{\Sigma j} = a_{ci}/a_{cj}. \quad (1.65)$$

Следовательно, отношение суммарных амплитуд пропорционально отношению исходных. При  $a_{ci}/\sigma > 0,9$  линейность нарушается и система знакового кодирования работает как АРУ. В этом случае для восстановления исходных соотношений амплитуд поля необходима нелинейная операция перехода от значений интегралов вероятностей к соответствующим значениям амплитуд волн.

Возможность системы знакового преобразования работать как АРУ может быть использована для ослабления интенсивных регулярных помех, таких как поверхностные, кратные отраженно-преломленные волны и др.

Для равномерного закона распределения вероятность попадания суммарной амплитуды в область значений  $\pm \sigma$  определяется соотношением [4, 8]

$$P = (a_c + \sigma) / 2\sigma. \quad (1.66)$$

Подставляя (1.66) в (1.61), получим

$$x_{\Sigma} = na_c/\sigma.$$

Отсюда отношение двух регулярных волн на накопленной трассе при  $\sigma = \text{const}$

$$x_{\Sigma i}/x_{\Sigma j} = a_{ci}/a_{cj}. \quad (1.67)$$

Соотношения (1.65) и (1.67) показывают, что накопление знаковых данных позволяет восстановить исходные амплитудные соотношения регулярных волн. При этом под накоплением следует понимать все операции суммирования данных: накопление, сложение по ОГТ, корреляционную обработку и др. Поэтому при знаковом представлении данных особенно эффективны системы, предусматривающие корреляцию и синхронное накопление сигналов. Их сочетание позволяет увеличить  $n$  до  $10^6 - 10^7$  и в еще большей степени снизить ошибки восстановления амплитуд при знаковом кодировании.

Сравнение результатов суммирования при полноразрядном и знаковом кодировании в предположении нормального и равномерного закона распределения помех показывает, что они близки друг к другу [4].

### 1.5.2. Полноразрядные и знаковые корреляционные функции

Корреляционные функции являются наиболее общим выражением алгоритмов, основанных на суммировании и накоплении данных.

Определим зависимость между этими функциями, вычисленными для двух случайных процессов, представленных в полноразрядной и знаковой формах и характеризующихся нулевыми математическими ожиданиями, нормальным законом распределения и одинаковыми дисперсиями или среднеквадратичными отклонениями. Ограничения эти несущественны, так как числовые характеристики шумовых помех, микросейсм в подавляющем большинстве случаев удовлетворяют нормальному закону распределения, который, как известно, является предельным и к которому приближаются другие законы распределения вероятностей.

Функцию взаимной корреляции двух нормальных случайных процессов  $x$  и  $y$  можно определить по их двумерной плотности вероятности

$$P(x_1, x_2) = \frac{1}{2\pi\sigma\sqrt{1-R_{1,2}^2}} \times \exp\left(-\frac{x_1^2 + x_2^2 - 2R_{1,2}x_1x_2}{2\pi\sigma\sqrt{1-R_{1,2}^2}}\right), \quad (1.68)$$

где  $x_1$  и  $x_2$  — случайные процессы с нулевым математическим ожиданием и равными среднеквадратичными отклонениями;  $R_{1,2}$  — функция взаимной корреляции.

Тогда вероятность совпадения положительных и отрицательных значений сигналов

$$\begin{aligned} P &= P(x_1 > 0, x_2 > 0 \text{ и } x_1 < 0, x_2 < 0) = \\ &= \frac{1}{\pi\sigma^2\sqrt{1-R_{1,2}^2}} \int_0^\infty \int_0^\infty \exp\left(-\frac{x_1^2 + x_2^2 - 2R_{1,2}x_1x_2}{2\pi\sigma\sqrt{1-R_{1,2}^2}}\right) dx_1 dx_2 = \\ &= \frac{1}{2} \left(1 + \frac{2}{\pi} \arcsin R_{1,2}\right). \end{aligned} \quad (1.69)$$

Отсюда коэффициент корреляции

$$R_{1,2} = \sin[\pi(2P - 1)/2]. \quad (1.70)$$

Из (1.70) следует, что значения полноразрядной функции взаимной корреляции однозначно определяются вероятностью совпадения знаков анализируемых сигналов. Используя соотношение (1.61), выражение (1.70) можно представить в виде

$$R_{1,2} = \sin(\pi R_{3n}/2), \quad (1.71)$$

где  $R_{3n}$  — знаковая функция взаимной корреляции.

Соотношение (1.71) показывает, что экстремальные и нулевые

значения полноразрядных и знаковых корреляционных функций совпадают между собой, т.е.  $R_{3n}=0$  и  $R_{1,2}=0$ , при  $R_{3n}=\pm 1$  и  $R_{1,2}=\pm 1$ .

В промежуточных точках  $R_{3n} \neq R_{1,2}$ , однако эти различия невелики и превышают 20 % лишь при  $R_{3n} \approx 0,78$ . Опираясь на это и принимая во внимание, что интерпретация сейсмических материалов основывается на выделении, прослеживании и определении амплитуд максимумов или минимумов осей синфазностей волн, многоразрядные корреляционные функции могут быть заменены их аналогами, вычисленными по входным сигналам, представленным в знаковой форме.

### 1.5.3. Помехоустойчивость знакового кодирования

При суммировании колебаний наряду с восстановлением амплитудных различий волн происходит увеличение отношения сигнал/помеха. Характер его изменения определяется корреляционными свойствами сигналов и помех, представленных в знаковой форме. В общем случае при накоплении данных выигрыш определяется известным соотношением

$$B = \sqrt{n/(1+\lambda)}, \quad (1.72)$$

где  $\lambda = \frac{2}{n} \sum_{l=1}^{n-1} (n-l) K(l)$ ;  $K(l)$  — нормированный коэффициент корреляции помех;  $n, l$  — число суммируемых воздействий и текущая разность их порядковых номеров.

Коэффициент корреляции, определяемый как нормированная сумма парных произведений значений знаковых функций с различными порядковыми номерами, зависит от корреляционных свойств помех и при достаточно больших  $n$  может быть оценен средней величиной

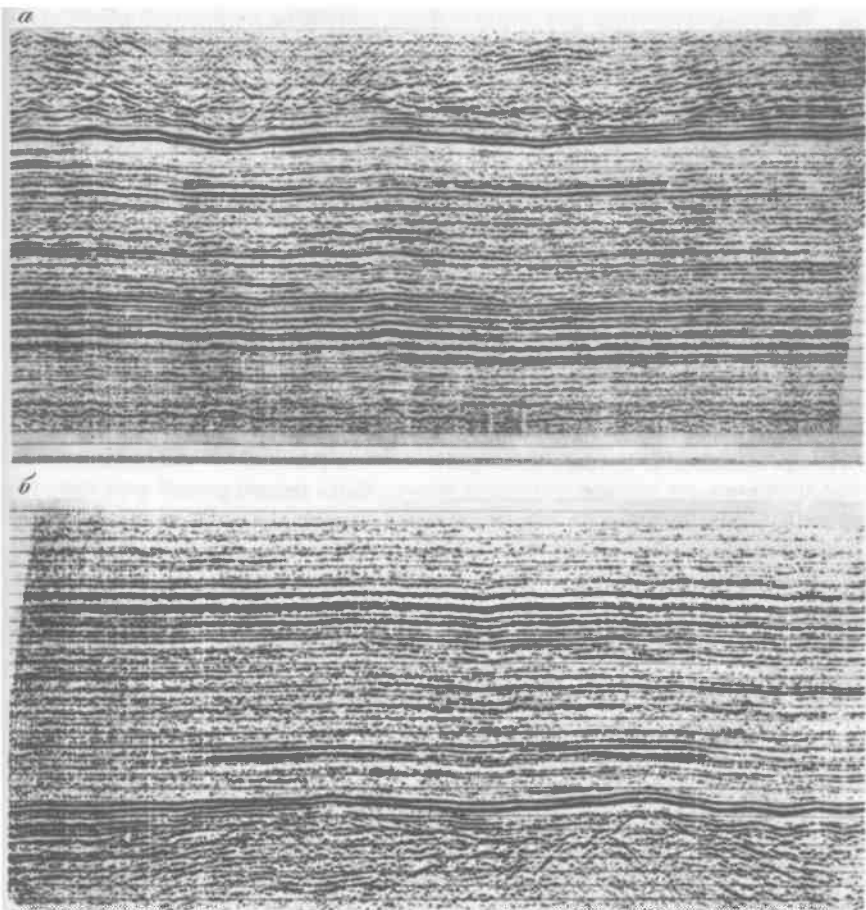
$$K(l) = 1/n. \quad (1.73)$$

Тогда, преобразуя формулу (1.72) и подставляя в нее (1.73), получим

$$\begin{aligned} \lambda &= (n-1)/n \approx 1, \\ B &= \sqrt{n/2} = 0,7 \sqrt{n}. \end{aligned} \quad (1.74)$$

Из (1.74) следует, что при знаковом кодировании, вследствие коррелированности помех, выигрыш в отношении сигнал/помеха оказывается в 1,4 раза меньше, чем при строго нерегулярных шумах. Это необходимо учитывать при применении знакового кодирования. Для компенсации получаемого проигрыша можно увеличивать или число накоплений, или длительность управляющего сигнала. Каждый из этих приемов реализуется весьма просто. Поэтому несколько более низкая помехо-





**Рис. 9. Фрагменты временных разрезов (ОГТх24) с ярким пятном при полноразрядном (а) и малоразрядном (б) представлении исходных данных**

устойчивость знакового кодирования не является препятствием для его использования в невзрывной сейсморазведке.

Возможности использования малоразрядного и знакового кодирования в сейсморазведке рассматривались рядом исследователей [21, 7]. Большинство из них достаточно высоко оценивают перспективы его применения при регистрации и обработке данных, принимая во внимание невысокие исходные отношения сигнал/помеха и широкое внедрение накапливающих систем и процедур при получении и обработке сейсмических материалов. Знаковое кодирование нашло применение в ряде аппаратных разработок (знаковый, просмотрный коррелятор, телеметрическая 1000-канальная станция "Geosouree-IV"), а также в некоторых программах скоростного анализа данных ОГТ.

Весьма интересные результаты были получены по данным обработки вибросейсмических материалов, представленных в полноразрядной и знаковой формах.

Были опробованы процедуры корреляции, скоростного анализа, коррекции статических поправок, горизонтального накапливания и др. [7]. Показано, что результирующие материалы, полученные по полноразрядным и знаковым исходным данным, или идентичны, или мало отличаются друг от друга. Обусловлено это низкими отношениями сигнал/помеха на входе и широким применением суммирования информации при реализации указанных выше процедур обработки. На рис. 9 приведены фрагменты временных разрезов по одному и тому же профилю, полученных при полноразрядном и четвертьбайтном представлении исходных суммируемых записей. Они практически идентичны. Более того, на них уверенно выделяется разрастание амплитуд волн (яркое пятно), что объясняется изменением отношения сигнал/помеха вдоль горизонта. Это указывает на значительные возможности малоразрядного кодирования, на основе которого может быть решен целый ряд практических задач, связанных со снижением стоимости сейсмического обораудования и повышением его надежности без снижения достоверности получаемых результатов.

## **2. ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА ВИБРАЦИОННОЙ СЕЙСМОРАЗВЕДКИ**

Технико-аппаратурный комплекс вибрационной сейсморазведки включает в себя средства возбуждения — вибрационные источники сейсмических колебаний — вибраторы с устройствами управления (генератор сейсмических сигналов и устройство радиосвязи с сейсмостанцией) и средства регистрации — сейсмические станции, способные осуществлять прием колебаний, их синхронное накапливание, запись вибrogramм на магнитную ленту и корреляционную обработку сигналов с визуализацией для оценки качества получаемых результатов.

### **2.1. КЛАССИФИКАЦИЯ ВИБРАЦИОННЫХ ИСТОЧНИКОВ**

Многообразие задач, стоящих перед сейсморазведкой и разнообразие сейсмологических условий предопределили применение в вибрационной сейсморазведке целой гаммы излучателей, отличающихся друг от друга характером, величиной и направлением прикладываемых к поверхности земли нагрузок, частотным диапазоном управляющих сигналов, транспортными базами и др.

К настоящему времени сложилась определенная классификация

вибрационных источников, основные элементы которой вытекают из следующих обстоятельств.

Первоначально в вибрационной сейсморазведке исключительное применение получили источники, возбуждающие непрерывные во времени квазигармонические колебания меняющейся частоты и переменной амплитуды (в начале и конце посылки). Однако по мере развития работ, расширения класса решаемых задач были предложены и реализованы на практике установки, создающие нагрузки в виде следующих друг за другом с частотой до 40 Гц импульсов. Они более просты по конструкции, чем классические вибраторы, и позволяют дополнительно решать некоторые частные задачи (изучение ЗМС, расчленение верхней части разреза и др.), реализация которых вибраторами, возбуждающими квазигармонические колебания, технически и экономически зачастую не оправдана. В последнее время эти установки получили определенное развитие и применение, увеличивая в целом возможности вибрационной сейсморазведки. Таким образом, по характеру возбуждаемых и прикладываемых к поверхности земли нагрузок вибрационные источники могут быть непрерывного и дискретного действия.

Первые генерируют усилия в виде непрерывных квазигармонических колебаний переменных частоты и амплитуды; вторые — в виде последовательностей одномерных или разнополярных импульсов, следующих друг за другом через разные или одинаковые промежутки времени. Число импульсов в одной последовательности (посылке) может быть значительным и достигать до 200 и более. Источники дискретного действия называются также кодоимпульсными или виброимпульсными.

Общим для обоих типов вибрационных источников является то, что все они возбуждают протяженные во времени нагрузки, длительность которых во много раз превышает периоды волн, регистрируемые при импульсном возбуждении, и достигает до 20 с, а в отдельных конструкциях вибраторов [31] даже до 5 мин.

Необходимость изучения отражающих и преломляющих горизонтов, залегающих в значительном диапазоне глубин (до 10 км и более) привели к использованию во взрывной сейсморазведке зарядов ВВ различной массы.

Соответственно в вибрационной сейсморазведке это вызывает необходимость применения излучателей, отличающихся друг от друга силовым параметром, а следовательно, амплитудами возбуждаемых колебаний. Он определяет энергопотребление источника, его массу, транспортную базу и другое оборудование. Поэтому силовой параметр — один из основных в классификации источников. По нему источники делятся на три класса: первый, второй и третий для освещения глубин до 10, 5 — 6 и 2 км соответственно. Следует отметить, что эта градация глубин весьма ориентировочна и она во многом зависит от наземных и глубинных сейсмологических условий в районе работ. Необходимость увеличения информации о физических свойствах пород привела к ис-

Таблица 3

| Основные параметры<br>вибрационных источников<br>непрерывного<br>действия | Первый класс              |                               |                                   | Второй класс              |                           | Третий класс              |                             |
|---------------------------------------------------------------------------|---------------------------|-------------------------------|-----------------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|-----------------------------|
|                                                                           | Вертикального<br>действия | Горизонтально-<br>го действия | Комбини-<br>рованного<br>действия | Вертикального<br>действия | Вертикального<br>действия | Вертикального<br>действия | Горизонтального<br>действия |
| Максимальное усилие,<br>кН, не менее                                      | 100                       | 100                           | 100                               | 60                        | 10                        | 10                        | 10                          |
| Масса оборудования,<br>кг, не более                                       | 8000                      | 8000                          | 8000                              | 5000                      | 2000                      | 2000                      | 2000                        |
| Рабочий диапазон ча-<br>стот, Гц, не менее                                | 5-150                     | 5-70                          | 10-70                             | 10-150                    | 20-250                    | 10-100                    | 10-100                      |

Таблица 4

| Основные параметры<br>вибрационных ис-<br>точников дискрет-<br>ного действия | Первый класс              |                                    | Второй класс                      |                                  |                                    | Третий класс                     |                                    |                                          |
|------------------------------------------------------------------------------|---------------------------|------------------------------------|-----------------------------------|----------------------------------|------------------------------------|----------------------------------|------------------------------------|------------------------------------------|
|                                                                              | Вертикального<br>действия | Горизонталь-<br>ного дейст-<br>вия | Комбини-<br>рованного<br>действия | Вертикаль-<br>ного дей-<br>ствия | Горизонталь-<br>ного дейст-<br>вия | Вертикаль-<br>ного дей-<br>ствия | Горизонталь-<br>ного дейст-<br>вия | Комби-<br>нирован-<br>ного дей-<br>ствия |
|                                                                              |                           |                                    |                                   |                                  |                                    |                                  |                                    |                                          |
| Максимальное<br>рабочее усилие,<br>кН, не менее                              | 100                       | 100                                | 100                               | 50                               | 50                                 | 10; 2,5*                         | 2,5*                               | 10                                       |
| Масса оборудо-<br>вания, кг, не более                                        | 8000                      | 8000                               | 8000                              | 5000                             | 5000                               | 2000; 500*                       | 500*                               | 2000                                     |
| Длительность<br>воздействия, мс,<br>не более                                 | 12                        | 12                                 | 12                                | 10                               | 10                                 | 8; 5*                            | 5*                                 | 8                                        |
| Частота следова-<br>ния воздействий,<br>Гц                                   | 5-35                      | 5-35                               | 5-35                              | 5-40                             | 5-40                               | 10-50;<br>10-70*                 | 10-70*                             | 10-50                                    |

\* Переносные и специальные источники для разведки мелких горизонтов.

пользованию наряду с продольными поперечных волн и созданию многоволновой сейсморазведки, базирующейся на применении волн обоих типов. Для этих целей разработаны источники продольных и поперечных волн, а также комбинированные излучатели, способные генерировать и те и другие колебания. Поэтому в классификацию источников введены установки вертикального (в), горизонтального (г) и комбинированного (к) действий.

По видам преобразуемой в усилие энергии вибрационные источники делятся на механические (эксцентровые), гидравлические и электрические. В вибрационной технике используются и другие виды преобразования энергии, например, пневматика, магнитострикция, но в наземной сейсморазведке они применения пока не нашли.

Основные характеристики вибрационных источников применительно к отечественным излучателям даны в табл. 3, 4.

## 2.2. ВИБРАЦИОННЫЕ ИСТОЧНИКИ СЕЙСМИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ

В настоящее время в наземной невзрывной сейсморазведке применяют три модификации вибрационных источников: механические (эксцентровые), гидравлические и электроиндукционные. Последние относят к вибрационным источникам дискретного действия, т.е. кодоимпульсные или виброимпульсные установки.

**Эксцентровые вибраторы** с приводом от двигателя внутреннего сгорания использовались на первых этапах развития вибросейсмического метода как в США, так и в нашей стране. В этих источниках действующая на поверхность грунта сила возникает за счет вращения грузов — эксцентриков. При этом число грузов, их расположение и направление вращения выбирают исходя из необходимости возбуждения продольных или поперечных волн. Достоинством эксцентровых вибраторов является то, что путем изменения направления вращения эксцентриков один и тот же вибромодуль может возбуждать как продольные, так и поперечные волны. Этот принцип реализован в одной из модификаций отечественного эксцентрового вибратора, входящего в виброкомплекс "Вибролокатор" [31]. В вибраторах этого типа развертка колебаний по частоте реализуется путем изменения скорости вращения эксцентриков, которое может осуществляться различными способами, требующими специального контроля и управления, что усложняет конструкцию излучателей.

Особенностью эксцентровых вибраторов является то, что развиваемая ими активная сила пропорциональна квадрату линейной скорости вращения эксцентриков. Благодаря этому с увеличением частоты сила резко возрастает, что приводит к необходимости или ограничения частотного диапазона возбуждаемых колебаний, или принятия специальных мер по уменьшению эксцентриситета грузов. По этим причинам ча-

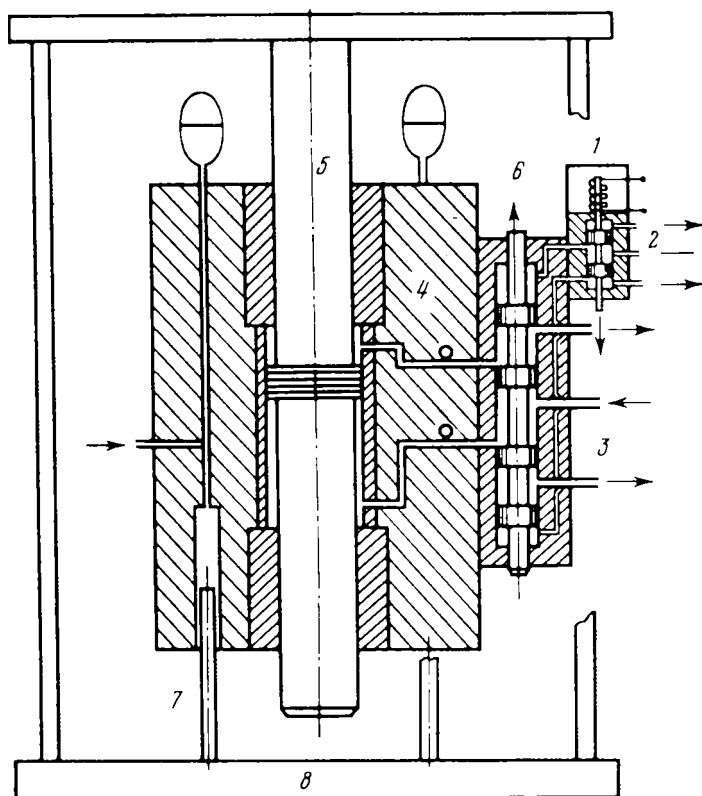


Рис. 10. Возбудитель вибрации с двухкаскадным электрогидравлическим преобразователем:

1 — электрогидравлический преобразователь; 2 — золотник первого каскада; 3 — золотник второго каскада; 4 — гидроцилиндр; 5 — поршень возбудителя вибрации; 6 — датчик положения золотника; 7 — гидроцилиндр подъема и опускания плиты; 8 — опорная плита; — — сливная линия; — — напорная линия

стотный диапазон эксцентриковых вибраторов ограничивается 60–80 Гц, и они в разведочной геофизике заметного применения не получили и здесь не рассматриваются.

**Гидравлические вибраторы**, которые получили наиболее широкое развитие и в нашей стране, и за рубежом, способны развивать значительные усилия, обеспечивают возможность возбуждения колебаний в широком диапазоне частот, сравнительно легко управляются и характеризуются высокими эксплуатационными характеристиками и значительной удельной мощностью. Рассмотрим принцип действия гидравлических вибраторов.

Рабочим, излучающим элементом гидравлического вибратора является вибровозбудитель (рис. 10), представляющий собой массивный

цилиндр двухстороннего действия 4, играющий роль инерционной массы, внутри которого помещен поршень 5, соединенный с опорной плитой источника 8, которая в процессе излучения колебаний прижимается внешней силой к поверхности земли. Чаще всего для этого используется масса транспортной базы источника, и чтобы плита не отрывалась от поверхности земли, статическая нагрузка на нее выбирается большей, чем сила, развиваемая излучателем. Поршень с опорной плитой приводится в движение путем попеременной подачи масла в верхнюю и нижнюю полости гидроцилиндра. Одновременно с нагнетанием масла из противоположной полости происходит его слив. Таким образом, действующая на поршень сила равняется произведению его площади на разность давлений над и под поршнем. При этом считается, что действующая на поршень максимальная сила постоянна на всех частотах. Величины нагнетательных и сливных отверстий меняются золотниковым механизмом в соответствии с величиной управляющего сигнала, чем и достигается возбуждение переменных во времени колебаний. При этом поршень и цилиндр совершают возвратно-поступательные движения, которые через плиту передаются грунту и возбуждают упругие волны в земле. В вибраторе продольных волн вибровозбудитель установлен вертикально, что и определяет направление приложения нагрузок к поверхности земли. При этом отрицательные нагрузки реализуются за счет действующей вверх силы и частичной разгрузки плиты.

Для возбуждения поперечных волн вибровозбудитель располагается горизонтально, обеспечивая передачу грунту касательных усилий. Плита на нижней поверхности имеет зубья и прижимается массой машины к поверхности земли для обеспечения необходимого контакта ее с грунтом.

Управление движением потоков жидкости в гидроцилиндре осуществляется электрогидравлическим преобразователем (ПЭГ), принципиальная схема которого показана на рис. 10. На большинстве отечественных вибраторов применяется двухкаскадный преобразователь с электромеханическим приводом.

Обязательным условием успешной работы гидравлического вибратора является движение опорной плиты, синхронное с изменением напряжения управляющего сигнала, подаваемого на ПЭГ. Это достигается специальной системой фазовой коррекции, включающей в себя датчики ускорения или скорости, расположенные на опорной плите и массе, датчики перемещения золотника и инерционной массы, а также электронные схемы анализа поступающих сигналов и управления, подправляющие движение опорной плиты в соответствии с фазой сигнала на ПЭГе.

Особенностью рассматриваемых вибрационных источников является то, что их амплитудно-частотные характеристики (АЧХ), определенные по записям сейсмоприемников, установленных в непосредственной близости от плиты излучателя на поверхности или в неглубоких



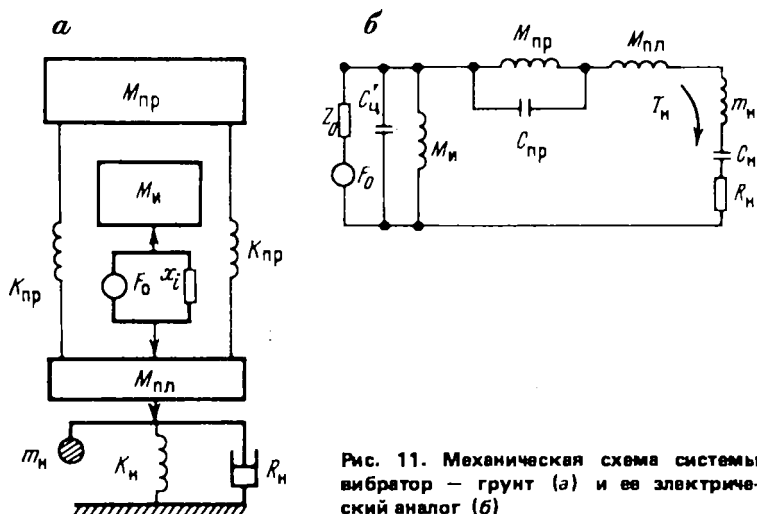


Рис. 11. Механическая схема системы вибратор — грунт (а) и ее электрический аналог (б)

скважинах, а также на значительных удалениях от нее, имеют резонансный характер с максимумом в полосе частот 25–35 Гц. Кроме того, очень часто наблюдается незначительный подъем амплитудно-частотных характеристик на частотах 60–80 Гц. Такое поведение АЧХ вибраторов обусловлено конструкцией источников колебаний, а также способами регистрации, принятыми в сейсморазведке.

В этой связи проанализируем работу вибратора, действующего в достаточно широкой полосе частот. При этом будем исходить из следующих положений, основные из которых можно считать экспериментально доказанными.

1. Вибратор во всем диапазоне частот передает грунту нагрузки с постоянной амплитудой силы  $F_0 = \text{const}$ , что определяет также постоянство амплитуды ускорения опорной плиты источника  $a_0 = \text{const}$ . Следует отметить, что выполненные в последнее время измерения показывают на то, что это условие не выполняется, что еще больше затрудняет анализ работы вибратора.

2. Амплитуды волн, возбуждаемые вибраторами и регистрируемые сейсмоприемниками, определяются скоростями перемещения частиц грунта.

3. Амплитудно-частотные характеристики вибраторов носят резонансный характер.

Принципиальная механическая схема вибратора представлена на рис. 11, а. Переменная по частоте сила  $F = F_0 \sin [\omega(t)t]$ , генерируемая переменным потоком жидкости, действует на инерционную массу  $M_{н}$  и поршень с плитой  $M_{пл}$ , выводит их из положения равновесия и передает грунту соответствующие нагрузки, которые и приводят к возбуждению

колебаний в среде. Для учета сжимаемости жидкости в гидроцилиндр введены упругие элементы  $C_{\text{ц}}$ , которые передают усилия на инерционную массу и поршень. При этом жидкость считается несжимаемой, а силами трения, действующими в рабочем цилиндре, пренебрегают. Сейсмической нагрузкой вибратора является грунт, модель которого рассмотрена в разд. 1.

Электромеханическая аналогия вибратора с грунтом приведена на рис. 11, б. Электрический генератор с внутренним сопротивлением  $Z_0$  нагружен на параллельно соединенные индуктивность  $M_{\text{и}}$  и емкость  $C_{\text{ц}} = 2C_{\text{ц}}$ , к которой последовательно подсоединены два контура, включающие в себя электрические аналоги прижима плиты и грунта сейсмической нагрузки ( $M_{\text{пр}}$ ,  $C_{\text{пр}}$ ,  $M_{\text{пл}}$ ,  $m_{\text{н}}$ ,  $R_{\text{н}}$  и  $C_{\text{н}}$ ). Электрический аналог имеет три контура, а следовательно и три резонансные частоты, на которых ток в цепи сейсмической нагрузки будет максимальным. Инерционная масса и упругость жидкости образует первый электрический контур с комплексным сопротивлением

$$Z_{\text{и}} = \frac{j \omega M_{\text{и}}}{1 - \omega^2 M_{\text{и}} C_{\text{ц}}},$$

который оказывает шунтирующее действие на генератор. Для его уменьшения необходимо, чтобы  $M_{\text{и}}$  и  $1/C_{\text{ц}}$  имели максимально возможные значения. Поэтому инерционная масса  $M_{\text{и}}$  должна быть значительной. Но она не может быть чрезмерной из-за ограниченных грузоподъемности транспортного средства и мощности насосной установки. Так, в вибраторах СВ-5-150 инерционная масса составляет 1800 кг и превышает массу опорной плиты источника.

Ток, протекающий через индуктивность  $M_{\text{и}}$ ,

$$I_{M_{\text{и}}} = F_{\text{вых}} / \omega M_{\text{и}},$$

где  $F_{\text{вых}}$  — выходное напряжение источника.

В соответствии с изменениями тока  $I_{\text{и}}$  ведет себя и скорость смещения инерционной массы  $M_{\text{и}}$ . На низких частотах она максимальна и уменьшается по мере роста частоты, что имеет место при работе вибратора.

Комплексное сопротивление  $Z_{\text{и}}$  этого контура носит частотно-зависимый характер с максимумом на частоте

$$\omega_{\text{рез}} = \sqrt{1/(M_{\text{и}} C_{\text{ц}})},$$

на которой  $Z_{\text{и}} \rightarrow \infty$ . На ней шунтирующее действие контура на генератор стремится к нулю, вследствие чего ток в цепи нагрузки повышается и сейсмический эффект вибратора увеличивается. С этим связан его второй резонанс, о котором говорилось выше. Оценим частоту резонанса. Для жидкостей, применяемых в гидравлических вибраторах,

$$C_{\text{ц}} = \frac{W}{ES^2},$$

где  $W$  — объем жидкости в полостях цилиндра и соединительных каналах;  $E$  — модуль упругости жидкости;  $S$  — площадь поршня.

Тогда для вибратора с  $W=500 \text{ см}^3$ ,  $E=15 \cdot 10^4 \text{ Н/см}^2$ ,  $S=100 \text{ см}^2$ ,  $M_{\text{пл}}=2 \cdot 10^3 \text{ кг}$   $\omega=390$  и  $f=62 \text{ Гц}$ , что согласуется с экспериментальными данными.

Второй контур образован упругостью пневмоопор и массой транспортного средства, прижимающего плиту к поверхности грунта. Эти величины выбирают такими, чтобы резонанс наблюдался на частотах, существенно меньших, чем минимальная частота управляющего сигнала, и равных 3–5 Гц. При этом упругости пневмоопор  $C_{\text{н}}$  выбирают такими большими, чтобы их емкостное сопротивление было существенно меньше индуктивного:

$$j\omega M_{\text{пр}} \gg 1/(j\omega C_{\text{пр}}).$$

Тогда ток, протекающий через индуктивность  $M_{\text{пр}}$ , будет стремиться к нулю, что равносильно очень хорошей амортизации транспортного средства вибратора и развязке его от колебаний рабочей плиты. Третий электрический контур образован последовательно соединенными массами плиты и грунта, а также его упругим и демпферным сопротивлениями. Ток в цепи нагрузки

$$I_{\text{н}} = F_{\text{вых}} / (Z_{\text{н}} + j\omega M_{\text{пл}}). \quad (2.1)$$

Знаменатель в выражении (2.1) имеет комплексный характер, что предопределяет зависимость его от частоты. В соответствии с изменением тока нагрузки будет меняться скорость колебаний плиты и при соединенного объема грунта, а следовательно, и интенсивность регистрируемых волн. Это имеет принципиальное значение в понимании особенностей излучения волн вибрационными источниками, так как они, работая в режиме постоянной силы  $F_{\text{вых}} = \text{const}$ , не обеспечивают равномерность характеристики по скорости, а следовательно, и по амплитудам волн, регистрируемых сейсмоприемниками. В последовательном контуре, состоящем из индуктивностей  $M_{\text{пл}}$  и  $m_{\text{н}}$ , емкости  $C_{\text{н}}$  и сопротивления  $R_{\text{н}}$ , возможен резонанс тока при равенстве индуктивного и емкостного сопротивлений. Он наступает на частоте

$$\omega_{\text{р}} = 1/\sqrt{(M_{\text{пл}} + m_{\text{н}})C_{\text{н}}}.$$

На резонансной частоте ток и скорость перемещения плиты достигают наибольшего значения

$$I_{\text{нр}} = F_{\text{вых}}/R_{\text{н}}.$$

По обе стороны от резонанса  $I_{\text{н}}$  падает по мере уменьшения или уве-

личения частоты. При этом на низких частотах спад тока определяется индуктивным сопротивлением  $\omega (M_{пл} + m_H)$ , а на высоких — емкостным  $(1/\omega C_H)$ .

Из полученных соотношений следует, что для системы вибратор — грунт с известными параметрами резонансная частота может быть определена. В частности, для вибратора с  $M_{пл}=1000$  кг и  $r=1$  м, работающего на грунте с  $\gamma=0,6$ ,  $\rho=2,5$  г/см<sup>3</sup> и  $v_S=40$  м/с, получим  $\omega_p=75$  и  $f_p=13$  Гц.

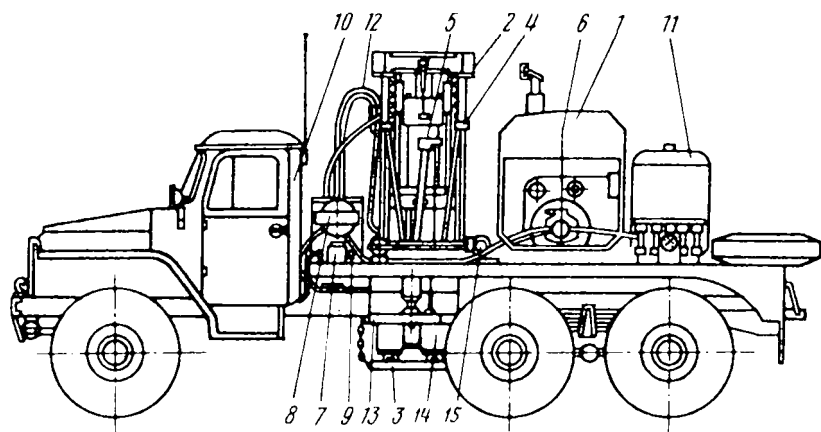
Значение резонансной частоты получилось несколько заниженным по сравнению с теми резонансными частотами, которые наблюдаются на практике. Но это может быть обусловлено неточным заданием исходных параметров. С другой стороны, зная частоту резонанса, можно определить инерционные и емкостные характеристики присоединенного объема грунта.

Таким образом, ток в цепи нагрузки, а следовательно, и скорость колебания плиты вибратора и присоединенного объема грунта, совершающего вынужденные колебания, не остаются постоянными, а изменяются, достигая максимума на частоте резонанса. Система вибратор — грунт образует своеобразный фильтр с определенной полосой пропускания, оказывающий существенное влияние на интенсивность возбуждаемых колебаний.

В связи с тем, что в сейсморазведке в настоящее время регистрируются скорости смещения частиц, амплитудно-частотные характеристики вибраторов должны носить резонансный характер, что полностью подтверждается на практике.

Наличие резонанса в низкочастотной части сейсмического диапазона является весьма нежелательным. Оно предопределяет низкочастотный характер регистрируемых колебаний, среди которых наибольшую интенсивность имеют поверхностные и другие волны, являющиеся в большинстве случаев помехами в наземной сейсморазведке. Это снижает качество получаемых материалов и разрешающую способность вибрационной сейсморазведки. По мере возрастания частоты эффективность работы вибраторов падает вследствие того, что энергия и импульс каждого полупериода квазисинусоиды уменьшаются пропорционально частоте. Поэтому скорости смещения плиты вибратора уменьшаются, что ведет к снижению интенсивности возбуждаемых колебаний.

Выше был рассмотрен принцип действия гидравлического вибратора. Для его нормального функционирования необходима целая серия вспомогательных устройств и механизмов, совокупность которых образует вибрационный источник сейсмических колебаний. Он должен быть автономным и обладать высокой проходимостью. Поэтому все разведочные вибраторы оснащены силовой установкой — двигателем внутреннего сгорания — и смонтированы на самоходных транспортных средствах повышенной проходимости. В последних зарубежных моделях вибраторов используются специализированные транспортные средства, оснащенные



**Рис. 12. Сейсмический вибратор СВ-5-150:**

1 — насосная станция; 2 — возбудитель вибрации; 3 — плита опорная; 4 — фиксаторы; 5 — гидроцилиндр; 6 — насос; 7 — коллектор; 8 — гидропнеumoаккумулятор; 9 — распределитель; 10 — блок управления, радиостанция, панель манометров; 11 — масляный бак; 12 — преобразователь электрогидравлический; 13 — плита; 14 — пневмоопоры; 15 — мультипликатор

ные одним двигателем, который обеспечивает работу излучателя и его движение по местности.

Особенности конструкции вибрационного источника рассмотрим на примере вибратора СВ-5-150, смонтированного на автомобиле повышенной проходимости "Урал-4320". Общий вид источника показан на рис. 12. Блоки управления вибратором, манометры, показывающие значения давлений в различных точках системы, и радиостанция размещены в кабине автомашины.

В состав вибрационного гидравлического источника входят гидравлическая, пневматическая и электрическая системы.

Гидравлическая система (рис. 13) обеспечивает полный рабочий цикл вибратора: опускание и подъем вибровозбудителя с опорной плитой на грунт, вывешивание задней тележки транспортного средства на плите для прижатия ее к грунту, подачу жидкости в рабочие полости цилиндра для возбуждения колебаний и перевод источника в transportable положение. Жидкость в гидросистеме приводится в движение и нагнетается насосом типа 1РНАС-125/320, который включает аксиально-поршневой насос высокого давления, механизм регулирования подачи и вспомогательный насос низкого давления.

Принцип действия основного насоса: в неподвижном корпусе вдоль ведущего вала и параллельно ему по окружности расположены девять поршней (плунжеров) с гидростатически разгруженными подпятниками, которые совершают возвратно-поступательное движение при враще-

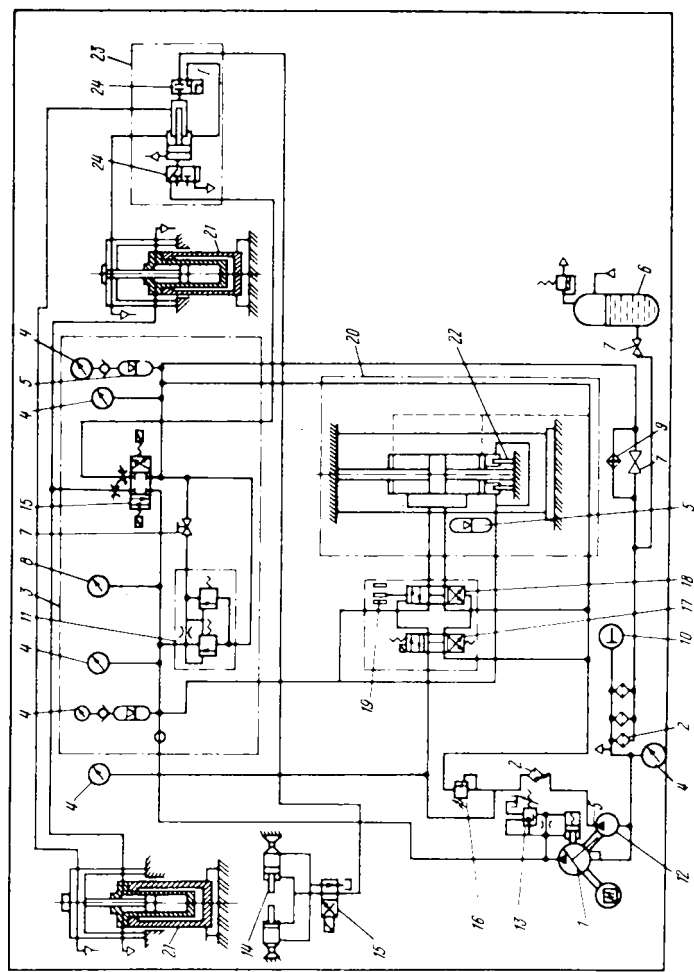


Рис. 13. Гидравлическая система:

1 — насос; 2 — фильтры масляные; 3 — коллектор; 4 — манометры; 5 — гидропневмоаккумуляторы; 6 — масляный бак; 7 — кран; 8 — реле давления; 9 — охладитель; 10 — термометр; 11 — клапан предохранительный разгрузочный; 12 — насос низкого давления; 13 — обратный клапан; 14 — цилиндры фиксаторов; 15 — гидрораспределитель; 16 — клапан предохранительный; 17 — первый каскад усилителя; 18 — второй каскад усилителя; 19 — ПЭГ; 20 — возбудитель вибраций; 21 — гидrocилиндр спуско-подъемного механизма; 22 — механизм взвешивания массы; 23 — мультипликатор; 24 — золотники мультипликатора

нии вала. Концы поршней выполнены в виде шаровых шарниров, подшипниками скольжения которых служат соответствующие опоры. Последние прикреплены к наклонной шайбе, которая может совершать возвратно-поступательные движения. С помощью устройства регулирования хода движения угол наклона шайбы может меняться в пределах  $\pm 15^\circ$  от среднего положения. От угла наклона шайбы зависит величина хода поршней и количество нагнетаемой рабочей жидкости, что позволяет регулировать ее расход в зависимости от частоты колебаний вибровозбудителя и поддерживать постоянным давление в гидросистеме. В этом особенность аксиально-поршневых насосов и именно поэтому они применяются в вибраторе. Рассмотрим принцип его работы. Будем считать, что стандартный сейсмический вибратор работает в режиме постоянной максимальной силы воздействия на грунт во всем частотном диапазоне возбуждаемых колебаний:

$$F = F_0 \cos \omega(t)t,$$

где  $F_0$  — амплитуда силы;  $\omega(t)$  — круговая частота колебаний;  $t$  — текущее время.

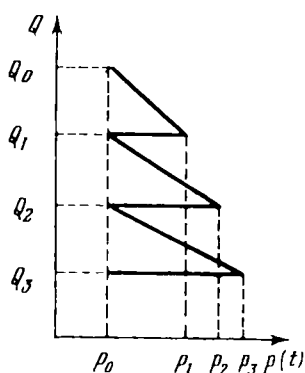
При этом амплитуда ускорения ( $a_0$ ) возбудителя вибраций также постоянна, а его максимальные скорости  $v_0$  и смещения  $s_0$  определяются соотношениями

$$v_0 = a_0 / \omega(t), \quad s = a_0 / \omega^2(t). \quad (2.2)$$

Из (2.2) следует, что перемещения поршня и инерционной массы возбудителя вибрации с ростом частоты уменьшаются и это приводит к соответствующему снижению расхода жидкости, нагнетаемой в полость гидроцилиндра. Чтобы при этом не происходило непредусмотренного увеличения давления в вибраторах, используются аксиально-поршневые насосы с регулируемым потоком, у которых произведение расхода жидкости на давление — величина постоянная. Схема работы насоса такова. Предположим, что на низшей рабочей частоте  $f_{\min}$  насос нагнетает наибольший объем жидкости  $Q_0$  под давлением  $p_0$ . На частоте  $f_i > f_{\min}$  расход жидкости уменьшится и станет равным  $Q_i$ . Соответственно давление жидкости возрастает до  $p_i$  (рис. 14). Регулирующий клапан насоса при увеличении давления жидкости в системе сместится и изменит положение наклонной шайбы. Это приведет к тому, что ход поршней, нагнетающих жидкость в систему, уменьшится, производительность насоса упадет и давление снизится до заданной величины  $p_0$ . Процесс регулирования происходит непрерывно во всем диапазоне частот возбуждаемых колебаний от  $f_{\min}$  до  $f_{\max}$ . Таким образом, в процессе излучения колебаний поддерживается постоянное давление жидкости при все уменьшающемся с частотой ее потоке.

Поток отфильтрованной рабочей жидкости под высоким давлением поступает (см. рис. 13) в коллектор 3, проходит через обратный клапан

Рис. 14. Схема работы насоса с регулируемым давлением



и далее разветвляется на линии, которые подходят к гидропневмоаккумулятору 5, распределительному золотнику 15, реле давления 8, предохранительно-разгрузочному клапану 11, к ПЭГу 19 и механизму вывешивания 22 инерционной массы.

В настоящее время в большинстве гидравлических вибраторов в качестве управляющего рабочего элемента используют гидроусилители золотникового типа или преобразователи электрогидравлические (ПЭГ). Особенность их заключается в том, что скорость движения выходного звена изменяется по определенному закону, в зависимости от входного управляющего сигнала. Отметим, что кроме функции слежения ПЭГ осуществляет усиление входного сигнала по мощности. На рис. 10 приведена схема двухкаскадного электрогидравлического усилителя вместе с возбудителем вибрации, на котором он монтируется.

Основными элементами ПЭГа являются золотники, которые управляют направлением потока рабочей жидкости за счет своего смещения относительно среднего положения. Перемещение золотника первого каскада осуществляется подвижной катушкой электромагнита, которая жестко связана с ним. Переменное напряжение меняющейся частоты подается на катушку электромагнита с выхода блока управления вибратора. Золотник первого каскада управляет потоком жидкости низкого давления, которое приводит в движение золотник второго каскада, который попеременно соединяет полости рабочего гидроцилиндра то с напорной линией высокого давления, то со сливом. Центровка золотников выполняется с помощью пружин и регулировочных винтов. Натяг центрирующих пружин золотника каскада регулируется с помощью втулок.

В отсутствие электрического управляющего сигнала на подвижной катушке ПЭГа золотник первого каскада под действием пружин находится в среднем положении. В этом случае масло попадает в торцевые полости золотника второго каскада, но так как давление в обеих полостях одинаково, золотник находится в равновесии, закрывая напорные



тинии. Если сигнал подается на обмотку ПЭГа, то он смещает якорь и связанный с ним распределительный золотник первого каскада гидроусилителя на величину, пропорциональную входному сигналу. Это приводит к изменению зазора в торцевых полостях распределительного золотника первого каскада и тем самым обеспечивает доступ рабочей жидкости в одну из торцевых полостей распределительного золотника второго каскада гидроусилителя. Под действием давления рабочей жидкости золотник смещается и через каналы соединяет одну из полостей гидроцилиндра с напорной линией, а другую — со сливом. При этом инерционная масса смещается на величину, пропорциональную входному сигналу. При перемещении золотника первого каскада гидроусилителя в противоположную сторону распределительный золотник второго каскада и инерционная масса смещаются в обратную сторону на величину, пропорциональную входному сигналу. Таким образом, инерционная масса перемещается с частотой и амплитудой, пропорциональными входному сигналу.

Общий коэффициент усиления гидроусилителя достигает 50—30 тыс., а иногда и больше. Для коррекции управляющего сигнала на золотнике установлен датчик положения золотника, состоящий из электромагнитной катушки и сердечника, соединенного гибкой связью с золотником второго каскада.

Достоинством гидравлических усилителей с подпружиненным золотником является их относительно легкая настройка за счет сжатия или отпуска пружин, которая выполняется с помощью регулировочных винтов. Однако регулировка пружин ведет не только к изменению интенсивности возбуждаемых колебаний, но и в определенной степени влияет на спектральный состав возбуждаемых колебаний.

В настоящее время в некоторых зарубежных и отечественных вибраторах стали применять гидроусилители типа сопло-заслонка. Такие преобразователи бывают двух- и трехкаскадные. Гидроусилитель типа сопло-заслонка показан схематически на рис. 15. Он состоит из сопел, которые вместе с подвижной заслонкой образуют два регулируемых щелевых дросселя, установленных на пути подвода жидкости. Такая дроссельная система является первым каскадом гидроусилителя (гидравлические дроссели устанавливают желаемую связь между пропускным расходом и перепадом давления до и после дросселя). Исполнительным механизмом гидроусилителя служит гидроцилиндр. Первый каскад управляет смещением золотника, который является вторым каскадом гидроусилителя и управляет непосредственно гидроцилиндром. Системы типа сопло-заслонка имеют то преимущество, что на входе может быть использован маломощный электрический командный сигнал от задающей электронной аппаратуры. Этот сигнал подается на электро-механический преобразователь в виде разности напряжений  $U_1$  и  $U_2$ , в результате чего происходит отклонение заслонки. До ее отклонения обе дросселирующие ветви имели одинаковые сопротивления и пропускали

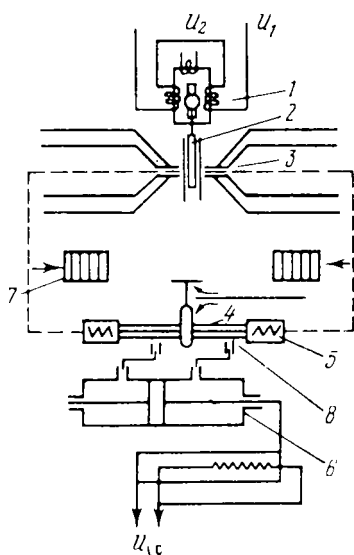


Рис. 15. Усилитель электрогидравлический типа сопло-заслонка:

1 — электромеханический преобразователь; 2 — подвижная заслонка; 3 — сопло; 4 — первый каскад; 5 — датчик обратной связи; 6 — гидроцилиндр; 7 — дроссель; 8 — золотник

одинаковое количество жидкости. Как только заслонка приближается к соплу, расход через него уменьшается. Расход другой ветви увеличивается. При этом возникает неравенство давления  $p_A$  и  $p_B$  в узловых точках ветвей. Эта разница давлений вызывает смещение золотника, что в конечном итоге приводит в действие гидроцилиндр.

Если в такой системе на выходе исполнительного механизма предусмотрен датчик обратной связи, сигнализирующий об исполнении поданной команды, то она представляет гидравлическую следящую систему.

В процессе работы инерционная масса может значительно перемещаться, особенно на низких частотах. Во избежание ударов инерционной массы о раму вибратора при колебаниях с большой амплитудой на торцах поршня гидроцилиндра установлены гидрозамки, с помощью которых гасится скорость перемещения инерционной массы.

Отработанная жидкость поступает в сливную полость коллектора. На нем размещен распределительный золотник с электромагнитным управлением, с помощью которого рабочая жидкость по команде с блока управления через клапан может попасть в поршневую полость мультипликатора, а из плунжерных полостей — в поршневые полости цилиндров подъема и опускания плиты.

В гидросистему введено несколько блокирующих цепей, предохраняющих ее от перегрузок при повышении давления более 21 и 5,5 МПа в цепях высокого и низкого давлений соответственно. Работоспособность гидросистемы критична к чистоте масла. Для его очистки установлены десятимикронные фильтры в линиях низкого давления, после теплообменника (масляного радиатора), и в линии управления, перед первым каскадом ПЭГа.

В вибраторе СВ-10/100 очистка масла производится на основной и напорной гидролиниях (за насосом в цепи высокого давления). Установка фильтров в линиях высокого давления позволяет эффективно очищать полный поток масла, но в этом случае требуются фильтры с усиленным корпусом, способным противостоять высокому давлению.

Важную роль в системе играет теплообменник — масляный радиатор, который служит для охлаждения рабочей жидкости гидросистемы и поддержания ее температуры в пределах 60—65 °С. Известно, что при высокой температуре вязкость жидкости снижается и увеличивается возможность появления утечек, а при низкой — вязкость жидкости становится больше, вследствие чего возрастают механические потери.

При чрезмерном повышении температуры и снижении вязкости жидкости возникает переход к граничному трению в нагруженных парах. При этом ускоряется процесс изнашивания уплотняющих колец и происходит деструкция жидкости. Теплообменники установлены на сливной магистрали.

Для удобства эксплуатации вибратора в различных режимах его работы, таких как профильные исследования, пробные запуски, наладочные работы и технологические включения, в конструкции источника предусмотрена соединительная муфта, которая соединяет или разъединяет двигатель насосной станции с насосом 1РНАС-125/320. Она позволяет экономить ресурс насоса, который составляет всего 6000 ч, и обеспечивает повышенную технологичность работы при эксплуатации в зимних условиях.

Для выравнивания потока жидкости в гидросистеме установлены гидроаккумуляторы, которые создают запас жидкости и отдают ее в систему в периоды кратковременного увеличения расхода.

Гидропневмоаккумулятор представляет собой закрытый металлический сосуд с двумя полостями для жидкости и воздуха, разделенными резиновой диафрагмой, снабженный клапаном и зарядным устройством для заполнения газовой полости азотом.

При работе вибратора объем газовой полости гидропневмоаккумулятора уменьшается, вследствие чего давление газа в ней повышается, достигая давления жидкости. При кратковременном понижении давления в гидросистеме газовая полость расширяется и вытесняет жидкость из соответствующей полости аккумулятора. Клапан, установленный в нем, предназначен для предохранения диафрагмы от выдавливания в отверстие штуцера и повреждения при полной разрядке. В гидросистеме СВ-5-150 установлено три гидроаккумулятора. По одному пятилитровому — в магистралях высокого давления и слива, и однолитровый — в гидроцепи механизма вывешивания возбудителя вибраций.

Спускоподъемное устройство предназначено для перевода вибраторов из транспортабельного положения в рабочее и обратно. В него входят электрические и механические узлы.

Механическая часть состоит из двух гидроцилиндров, корпуса кото-

рых закреплены внутри направляющих стоек, а штоки соединены с рамой вибратора. С помощью гидроцилиндров плита опускается на грунт, и через них и пневмоамортизаторы статическая нагрузка прикладывается к грунту. По окончании воздействия с их помощью плита поднимается в транспортабельное положение. Для надежного выполнения спускоподъемных операций необходима синхронная работа гидроцилиндров. Устройство синхронизации спуска — подъема плиты на некоторых зарубежных вибраторах и на первых моделях вибратора СВ-5-150 представляет собой канатную систему. Каждый канат закреплялся на опорной плите и через систему роликов пропусклся на противоположную сторону платформы вибратора, а вторым концом крепился к направляющей колонне. В процессе наладки с помощью соответствующих регулировок выравнивали натяжение канатов и тем самым обеспечивали синхронность движения штоков гидроцилиндров. Хотя это устройство и обладало достаточной надежностью, но было громоздким и требовало дополнительного обслуживания при работах в зимних условиях.

В новой модификации вибраторов синхронизация работы гидроцилиндров спуско-подъема плиты выполняется гидравлическим мультипликатором двойного действия. Его применение позволило избавиться от указанных недостатков. Кроме того, уменьшились габариты устройства, в связи с этим улучшился доступ к другим узлам, размещенным на платформе вибратора.

В систему подъема и опускания плиты входит также устройство фиксации возбудителя вибрации (ВВ), которое предназначено для удержания ВВ и опорной плиты во время транспортировки в верхнем положении. Перевод вибратора из транспортабельного в рабочее положение будет заблокирован, если рычаги фиксатора не выйдут из зацепления и не освободят ВВ.

Пневматическая система предназначена для создания подпора в гидросистеме вибратора и обеспечения необходимого давления в пневмоамортизаторах опорной плиты. Постоянство давления в пневмосистеме обеспечивается периодическим подсоединением ее к пневмосистеме автомашины вибратора.

Подпор жидкости в гидросистеме осуществляется подачей воздуха в масляный бак под давлением  $(0,3 \pm 0,1)$  МПа через редукционный пневмоклапан. Масляный бак заполняется жидкостью только на  $3/4$  своего объема, в связи с этим в верхней его части всегда есть свободное пространство для воздуха. В верхней крышке бака вмонтирован предохранительный клапан, отрегулированный на давление  $(0,7 \pm 0,1)$  МПа, для защиты сливной магистрали от случайного повышения давления, контроль которого ведется по манометру.

В отличие от аккумулятора в масляном баке нет разделительной диафрагмы, что повышает загазованность масла и ухудшает его рабочие параметры.

Пневмоамортизатор представляет собой резервуар с воздухом, подключенный к воздухопроводу и снабженный обратным ниппельным кла-



код — аналог, где преобразуется в синусоидальное напряжение переменной частоты с заданными параметрами.

Выходной сигнал преобразователя код — аналог 9 поступает на первый вход контроллера 8. На второй его вход подается напряжение, балансируемое ручным управлением 16 положением инерционной массы. Сигналы обратных связей по положению инерционной массы 11 и золотника 10 поступают соответственно на третий и четвертый входы контроллера ПЭГ 8. На выходе контроллера результирующий сигнал имеет вид

$$U_p = (K_1 U_3 + U_6 - K_2 U_{осм} - K_3 U_{осз}) K_4,$$

где  $K_1 - K_4$  — масштабные коэффициенты;  $U_3$  — напряжение задающего сигнала;  $U_6$  — напряжение балансировки;  $U_{осм}$  — напряжение обратной связи по положению массы;  $U_{осз}$  — напряжение обратной связи по положению золотника.

Сигнал  $U_p$  преобразуется в импульсный сигнал большой мощности, модулированный по ширине, и подается на обмотку управления ПЭГ 13. В результате взаимодействия магнитных полей подвижная катушка перемещается в соответствии с величиной и частотой тока.

Процесс преобразования задающего электрического сигнала в механические колебания опорной плиты сопровождается нелинейными и фазовыми искажениями. Это приводит к тому, что выходные механические колебания опорной плиты вибратора отличаются по фазе от электрического сигнала, поступающего на вход ПЭГ и содержат колебания высших гармоник. Использование обратных связей по положению массы и золотника уменьшает до некоторой степени нелинейные и фазовые искажения. Для достижения фазовой идентичности всех вибраторов в систему управления вибратором включены устройства фазовой синхронизации: цифровой регулятор фазы, фильтр следящий 7 и датчик виброскорости 12 опорной плиты 14. Перестройка фазы выходных колебаний вибратора осуществляется по внутреннему опорному сигналу, который благодаря стабилизации генератора задающего сигнала и синхронному запуску идентичен на всех вибраторах.

Колебания опорной плиты вибратора преобразуются в электрический сигнал датчика скорости 12, в качестве которого используется сейсмоприемник СВ-10Ц. Выделенный и усиленный сигнал первой гармоники виброскорости поступает на один из выходов цифрового регулятора фазы и сравнивается с внутренним опорным сигналом прямоугольной формы той же частоты. Сигнал ошибки после преобразования воздействует на фазовращатель и вызывает соответствующее изменение управляющего сигнала, которое и компенсирует ошибку по фазе. При работе системы фазовой синхронизации управляющий сигнал, поступающий на ПЭГ, всегда будет отличаться по фазе от опорного сигнала на величину фазовой ошибки, вносимой возбудителем вибрации на данной частоте:

$$\varphi_{упр}(f) \pm \Delta\varphi(f) = \varphi_{оп}(f),$$

где  $\varphi_{упр}(f)$  — фаза управляющего сигнала;  $\Delta\varphi(f)$  — фазовая ошибка возбудителя вибрации;  $\varphi_{оп}(f)$  — фаза опорного сигнала.

Цифровой регулятор фазы содержит также элементы, ускоряющие вход в синхронизм вибратора в начальный момент обработки управляющего сигнала.

Электронная часть электрической системы состоит из блока управления (БУ) вибратора и генератора сигнала развертки (ГСР), устанавливаемого в сейсмостанции (рис. 17–19). Рассмотрим принцип их действия.

Кодовый сигнал дистанционного запуска, вырабатываемый шифратором ГСР, принимается радиостанцией вибратора. По окончании этого сигнала дешифратор (рис. 17) вырабатывает импульс, который попадает с платы следящего фильтра на вход ФЗ ПКЧ.

Если опорная плита не опущена, то импульс запуска блокируется. Если она находится в рабочем положении, то выходной сигнал дешифратора даст разрешение на начало развертки. Синусоидальный сигнал переменной частоты, параметры которого задаются секциями программных переключателей, вырабатывается формирователем опорного и рабочего сигналов (в схемах ПКЧ и синхронизаторе). В отличие от ГСР в БУ опорный сигнал имеет прямоугольную форму, а рабочий, поступающий на переключатель "Амплитуда", — синусоидальную. Они не являются синфазными (при включенной системе фазовой синхронизации). Система фазовой синхронизации сдвигает фазу рабочего сигнала по отношению к опорному настолько, чтобы скомпенсировать фазовые искажения, вносимые электрогидравлическим преобразователем и силовым гидроцилиндром. Положим, что на какой-то частоте сигнал с датчика плиты сдвинут по фазе относительно управляющего сигнала на величину  $-\Delta\varphi$ , тогда система фазовой синхронизации сдвинет управляющий сигнал на величину  $+\Delta\varphi$ . Так как опорные сигналы всех вибраторов, входящих в комплекс, синфазны благодаря кварцевой стабилизации и одновременного запуска всех БУ, механические колебания комплекса оказываются идентичными.

Система обратной связи формируется в плате "Контроллер".

Рабочий сигнал переменной частоты с переключателя "Амплитуда" поступает на вход УС1, на второй его вход подается напряжение с потенциометра "Баланс", к третьему входу УС1, обозначенному знаком "—", что значит противофазность этого сигнала по отношению к сигналу со знаком "+", подведено напряжение канала обратной связи по положению массы. Разностный сигнал с выхода УС1 поступает на вход "+" УС2, на другом входе "—" действует напряжение канала обратной связи по положению золотника ПЭГа. Выходной сигнал УС2 широтно-импульсным модулятором ШИМ преобразуется в импульсную последовательность постоянной амплитуды, но переменной скважности. Чем больше сигнал на выходе УС2, тем более различия в скважности. Устройство оптоэлектронной развязки обеспечивает гальваническое разделение





Рис. 17. Электрическая схема блока управления (функциональная):

ФЗ — формирователь запуска; ТУ — триггер управления; ДПКД — делитель с переменным коэффициентом деления; БР1, БР2 — регистры буферные; ГК — генератор кварцевый; ПК1, ПК2 — преобразователи кодов; ПКЧ1, ПКЧ2 — преобразователи код — частота; СЧ1, СЧ2 — счетчики; РСЧ — счетчик риверсионный; БВ — вентили буферные; УУ — устройство управления; ЗУ — устройство запоминающее; УУОП — устройство управления опорной плитой; КСО — корректор ошибки скорости; ЦРФ — регулятор фазы цифровой; ПФ — переключатель фазы; УВ — вентиль управляемый; ПЗУ — устройство постоянное запоминающее; ЦАП — преобразователь цифро-аналоговый; РД — делитель регулируемый; УС1, УС2 — устройства сравнения; ШИМ — модификатор широтно-импульсный; УМДК — усилитель мощности дифференциальный ключевой; УН1, УН2 — усилители напряжения; УВЗ1, УВЗ2 — устройства выборки запоминания; ФСИ — формирователь стробирующих импульсов; ГНЧ — генератор несущей частоты; УМГНЧ — усилитель мощности генератора несущей частоты; УО — усилитель-ограничитель; АФНЧ — фильтр нижних частот активный; МВР — матрица весовых регистров; БУ — усилитель буферный;  $F_H$  — начальная частота;  $F_T$  — частота текущая;  $T_p$  — продолжительность развертки;  $\Delta F$  — приращение частоты;  $v_p$  — скорость развертки

---

и положению массы (ДМП) обеспечивает поддержание заданного положения инерционной массы и распределительного золотника возбудителя вибраций. Датчики ДПЗ и ДПМ, оба трансформаторного типа, отличаются друг от друга размерами и представляют собой катушку, внутри которой помещен сердечник. При центральном расположении сердечника ЭДС вторичных обмоток равны между собой и суммарная выходная ЭДС равна нулю, так как обмотки включены встречно. При смещении сердечника меняется индуктивность катушки и меняется ЭДС, характеризующая величину отклонения, а фаза (0 или  $180^\circ$  по отношению к фазе напряжения возбуждения) — сторону отклонения. Датчики питаются от ГНЧ, вырабатывающего синусоидальный сигнал около 7 кГц и строб-импульс для управления схемами выборки — заполнения УВЗ1 и УВЗ2.

Кроме этих двух датчиков, в систему обратной связи включен датчик виброускорения (сейсмоприемник, стоящий на плите), обеспечивающий фазовую синхронизацию. Эта система включает в себя цифровой регулятор фазы ЦРФ (плата "Синхронизатор"), буферный усилитель-ограничитель БУ, фильтр АФНЧ и усилитель УО (плата "Фильтр следящий").

Сигнал сейсмоприемника опорной плиты усиливается по напряжению усилителем БУ и поступает на вход АФНЧ, который выделяет первую гармонику сигнала сейсмоприемника, одновременно при этом фаза сигнала сдвигается на  $90^\circ$ . Далее в цифровом регуляторе ЦРФ сравнивается фаза опорного сигнала с фазой выходного сигнала УО и в случае расфазировки изменяется частота импульсов, заполняющих счетчик СЧ2, до тех пор, пока сдвиг фаз между этими сигналами не станет равным нулю.

Для уменьшения корреляционных шумов в блоке предусмотрено схемное решение для изменения амплитуды сигнала в начале и в конце развертки — "конус". Длительность изменяющегося участка выходного

напряжения может регулироваться подстроечным резистором и, как правило, не превышает 0,5 с.

Устройство управления опорной плитой (УУОП) обеспечивает передачу напряжения 24 В на электромагниты гидрораспределителя спуско-подъема в соответствии с положением переключателя "Плита". В схеме УУОП предусмотрена блокировка спуска возбуждателя вибраций в случае, если один или оба фиксатора находятся в закрытом положении. Схема УУОП содержит оптоэлектронные развязки силовых и информационных цепей.

Дешифратор радиозапуска вырабатывает импульс запуска цифрового генератора блока управления из кодовой посылки шифратора ГСР, передаваемой по радиоканалу.

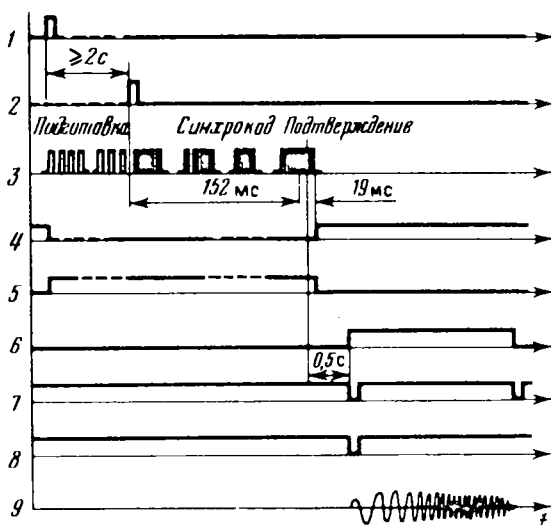
Генератор сигнала развертки (ГСР) предназначен для генерирования опорного синусоидального сигнала изменяющейся частоты и регистрации его на одном из каналов сейсмостанции, а также для синхронного запуска группы вибраторов.

Наличием в нем цифрового кварцевого генератора обеспечивается высокая стабильность начальной частоты опорного сигнала и скорость ее изменения.

Запуск группы вибраторов производится по радиоканалу сигналом с сейсмостанции, в которой размещается ГСР. Синхронность запуска обеспечивается применением кодированного сигнала с большей информационной избыточностью, обеспечивающей высокую надежность выделения полезного сигнала на фоне помех.

ГСР обеспечивает работу в одном из трех режимов: ручного запуска; дистанционного запуска; автономного запуска.

Режим ручного запуска применяется во время подготовки вибросейсмического комплекса к работе. Управление в этом случае осуществляется с его передней панели. При нажатии кнопки "Подготовка" (рис. 18) вырабатывается последовательность прямоугольных импульсов  $f=420$  Гц, которая поступает на вход модулятора радиостанции и излучается в эфир. Нажатием кнопки "Запуск" прекращается генерирование сигнала "Подготовка" и включаются сигналы "Синхрокод" и "Подтверждение". Совокупность этих трех сигналов образует сигнал радиозапуска "Подтверждение" имеет частоту 2,5 кГц и длительность собой посылку из 16 импульсов, заполненных колебаниями с частотой 1,68 кГц, следующих с частотой повторения 105 Гц. Последняя ступень радиозапуска "подтверждение" имеет частоту 2,5 кГц и длительность 19 мс. На время передачи сигнала радиозапуска замыкаются контакты реле, обеспечивающие перевод радиостанции на передачу. Одновременно с сигналом КК (корпус коммутируемый) напряжение +12 В через другую пару контактов выводится на контрольный разъем ГСР и может использоваться оператором сейсмостанции для переключения релейных цепей. Нажатие кнопки "Запуск" производится не ранее, чем через 2 с, после нажатия кнопки "Подготовка". В противном случае дешифраторы



**Рис. 18. Временная диаграмма ГСР:**

1 — подготовка дистанционная; 2 — запуск дистанционный; 3 — запуск; 4 — корпус коммутационный; 5 — переключаемый контакт; 6 — развертка; 7 — дистанционная отметка; 8 — командная отметка момента; 9 — сигнал развертки

блоков управления группы вибраторов не сработают и команда радио-запуска не будет воспринята. Во время передачи сигнала "Подтверждение" вырабатывается сигнал "Внутренний запуск", который обнуляет цепи цифрового генератора опорного сигнала. По сигналу "Развертка" через 0,5 с после обнуления начинает вырабатываться сигнал, аналогичный тому, который излучается БУ вибратора и регистрируется на одном из вспомогательных каналов станции в качестве опорного для корреляции с зарегистрированной виброграммой.

Перевод сейсмостанции в режим регистрации производит сигнал "Командная отметка момента" который по времени совпадает с передним фронтом огибающей сигнала развертки.

Режим дистанционного запуска используется при работе вибро-сейсмического комплекса в режиме накопления. Временные диаграммы работы ГСР в этом случае соответствуют работе в режиме ручного запуска. Отличие его лишь в том, что сигнал "Подготовка" производится автоматически самим ГСР после окончания сигнала предыдущего выпуска. Длительность паузы (временной интервал между окончанием сигнала "Подтверждение" предыдущего запуска и началом сигнала "Подготовка" последующего запуска) устанавливается кнопками "Циклический запуск". Эта пауза определяется суммой длительностей сигналов команд, показанных на временной диаграмме запуска, плюс 3—4 с.

В ГСР предусмотрена цепь дистанционного включения сигнала "Подготовка" сигналом с сейсмостанции.

Режим автономного запуска служит в основном для проведения наладочных работ, например, при настройке тракта радиозапуска, при проверке синхронности работы комплекта вибраторов и т.п. Работа в этом режиме обеспечивается нажатием кнопок АВТ и "Циклический запуск", а длительность паузы устанавливается набором кнопок "2", "4" и т.д., аналогично режиму дистанционного запуска. Запуск проходит полный цикл работы ГСР в сеансе с сигналами радиозапуска "Подготовка", "Синхроход" и "Подтверждение".

В ГСР со стороны станции может подаваться еще один сигнал — ЗКН (заданное количество накоплений). При подаче этого сигнала ГСР работает аналогично (см. выше), за исключением перевода радиостанции в режиме передачи без радиозапуска.

При включении шифратора он вырабатывает сигнал радиозапуска, поступающий на модулятор радиостанции. Этот сигнал предназначен для синхронного запуска БУ группы вибраторов. Во время передачи завершающей части сигнала радиозапуска "Подтверждение" шифратор формирует короткий импульс "Внутренний запуск", который через ФЗ (формирователь запуска), расположенный на плате "Преобразователь код — частота", устанавливает триггер управления (ТУ) в состояние, активизирующее работу основных устройств формирователя опорного сигнала. Элементы схемы формирователя опорного сигнала размещены на двух печатных платах "Преобразователь код — частота" и "Синхронизатор" (рис. 19). Работа формирователя опорного сигнала состоит в считывании значений синусоидальной функции, записанной в ПЗУ с частотой, определяемой положениями программного переключателя, и преобразовании этих значений в аналоговые при помощи цифро-аналогового преобразователя (ЦАП). Два из трех параметров сигнала развертки,  $\Delta F$  и  $T_p$ , заносятся в буферные регистры БР1 и БР2, что позволяет исключить влияние помех контактов переключателя.

Связь БР1 и БР2 с программными переключателя прерывается во время генерирования сигнала развертки, что дает возможность изменять положение переключателя в случае необходимости последовательного генерирования сигналов с разными параметрами.

Двоично-десятичные значения начальной частоты и ее приращения преобразуются в параллельный 8-разрядный двоичный код преобразователями кода ПК2 и ПК1 соответственно. Код начальной частоты записывается в старшие разряды 12-разрядного реверсированного счетчика РСч, выход которого соединен со входами преобразователя код — частота ПКЧ2. Он преобразует поступающие на его вход высокостабильные импульсы кварцевого генератора ГК в импульсную последовательность, частота которой пропорциональна содержащемуся в РС числу. Импульсы ГК поступают также на вход шифратора и используются для формирования сигнала радиозапуска.



При изменении числа, содержащегося в РС4, изменится частота выходных импульсов ПКЧ2, причем при работе РС4 в режиме суммирования или вычитания частота ПКЧ2 линейно возрастает или уменьшается с дискретностью 1/16 Гц. Направление счета задается знаковым разрядом переключателя.

Скорость изменения частоты выходных импульсов ПКЧ2, т.е. скорость развертки частоты, определяется частотой  $\nu_p$ , поступающей на счетный вход РС4 импульсов. Последние образуются делением частоты выходных импульсов ПКЧ1 (частота которых пропорциональна приращению частоты  $\Delta F$ ) на число, равное длительности сигнала  $T_p$ . Эту операцию производит делитель с переменным коэффициентом деления ДПКД2.

Таким образом, частота поступающих на счетный вход РС4 импульсов определяется выражением

$$\nu_p = K \Delta F / T_p,$$

где  $\Delta F$  — приращение частоты Гц;  $T_p$  — длительность сигнала, с;  $K$  — коэффициент пропорциональности.

Работой ПКЧ1 управляет параллельный двоичный код приращения частоты, который пока длится сигнал не изменяется.

Выходная последовательность импульсов ПКЧ2 усредняется счетчиком Сч1 и далее через элементы ИЛИ и ЦРФ поступает на вход счетчика Сч2.

Цифровой регулятор фазы предназначен для фазовой синхронизации сейсмического вибратора и при использовании синхронизатора в составе ГСР работает как пропускающий элемент (фазовая коррекция отключена). По этой же причине не используются в составе ГСР корректор скоростной ошибки КСО, запоминающее устройство ЗУ, также входящее в систему фазовой синхронизации вибратора.

Под действием приходящихся на вход Сч2 импульсов число, в нем содержащееся, изменяется периодически от 0000000 до 1111111.

С выхода ПЗУ снимается параллельный 8-разрядный код, соответствующий значению синусоидальной функции через  $\pi/2$ , который преобразуется в аналоговое напряжение синусоидальной формы цифроаналоговым преобразователем. Получение отрицательной полуволны напряжения происходит под воздействием старшего разряда Сч2, который обеспечивает переключение полярности выходного напряжения ЦАП.

Переключатель фазы "Фаза 0-90" обеспечивает установку сдвига фаз между входным сигналом синусоидальной формы и внутренним опорным сигналом прямоугольной формы (0 или 90°, по выбору оператора).

Делитель с переменным коэффициентом деления ДКПД1 формирует два потенциальных сигнала  $T_p$  и  $T_p - 0,5$ . Длительность первого равна установленному на передней панели значению  $T_p$  (в с), длительность второго на 0,5 с меньше. Сигнал  $T_p - 0,5$  используется для плавного

спада (конусность) амплитуды выходного сигнала. Через промежуток времени  $T_p$  ДПКД1 вырабатывает короткий импульс окончания развертки, который возвращает триггер управления ТУ в исходное положение, и генерирование опорного сигнала прекращается.

Передний фронт сигнала  $T_p$  дифференцируется и в виде короткого импульса "командная отметка момента" (КОМ) поступает на соответствующий контакт разъема "Регистратор".

Сигнал "дифференцированная отметка" — ДОТ, образуемый дифференцированием переднего и заднего фронтов сигнала  $T_p$ , может быть использован для контроля временных соотношений в работе вибросейсмического комплекса.

На лицевой панели блока управления установлен специальный электрический разъем, на контакты которого выведены электрические сигналы с датчика плиты, выхода следящего фильтра и выхода счетчика опорной развертки. Эти сигналы используются для проверок вибраторов и контроля их фазовой идентичности.

Таким образом, гидравлический вибрационный источник сейсмических колебаний представляет собой довольно сложный механизм, оснащенный электрическими устройствами управления и контроля, которые необходимы для обеспечения требуемых точностных и рабочих параметров.

В настоящее время вибрационные источники выпускаются в нашей стране и несколькими фирмами в США и ФРГ. Все они имеют общий принцип действия и отличаются развиваемыми усилиями, транспортными базами и деталями конструкции. В СССР изготавливаются две модификации вибраторов с усилиями 5—7 и 10 т, которые монтируются на автомобилях высокой проходимости. Зарубежные вибраторы характеризуются существенно большим числом модификаций, максимальные усилия которых меняются от 6—7 до 12—14 и даже 20—22 т [15, 29]. Кроме того, один и тот же вибратор может быть установлен на различных транспортных средствах: автомобиле, специальном автомобиле (багги), тракторе с резинометаллическими гусеницами и т.д. Наибольшее применение получили машины типа "багги", особенностью которых является использование гидромоторов для вращения колес транспортного средства. Такая конструкция источника позволяет использовать один рабочий двигатель для возбуждения колебаний и движения машины, что облегчает ее вес, делает более маневренной и экономичной. Кроме того, появляется возможность разместить вибровозбудитель в центре шасси и упростить его конструкцию, что положительно сказывается на рабочих характеристиках вибраторов. Практически все фирмы выпускают горизонтальные вибраторы для возбуждения поперечных волн. У этих источников возбудитель вибрации совершает колебательные движения в горизонтальной плоскости перпендикулярно оси транспортного средства. Усилия на грунт передаются через сменные клиновидные зубья, устанавливаемые на нижней поверхности плиты. Варьируя коли-

чеством зубьев и их формой, можно выбирать оптимальные условия возбуждения колебаний. Плита прижимается к грунту за счет вывешивания на ней транспортной базы как с целью вдавливания в грунт зубьев, так и для повышения сопротивления грунта напряжениям сдвига.

Наряду с горизонтальными вибраторами разработаны комбинированные установки, способные генерировать продольные и поперечные волны. Для этого на одной транспортной базе размещено два вибровозбудителя для последовательного возбуждения волн различного типа. Имеются также предложения по созданию комбинированных источников на основе одного возбудителя, обеспечивающего движение плиты или по вертикали, или по горизонтали, а также одновременно в двух направлениях.

В последнее время появились сверхмощные установки с усилиями 20–22 ТН и даже 24 ТН. Они имеют расширенный частотный диапазон (200–250 Гц) и модернизированную конструкцию вибровозбудителя с уменьшенным объемом гидрополостей, плитой, имеющей меньшие, чем обычно, площадь и массу. Кроме того, для расширения частотного диапазона возбуждаемых колебаний предложено передавать нагрузки на опорную плиту через упругие элементы, жесткость которых подобрана таким образом, что сохраняется первый основной резонанс и возникает второй на частоте 100 Гц. Заслуживает внимания идея вибратора [31], у которого между плитой и инерционной массой установлена пневматическая пружина переменной жесткости, способная обеспечить резонансный режим возбуждения колебаний в довольно широкой полосе частот. Упругие свойства нового элемента меняются путем закачки в него воздуха, подача которого регулируется датчиком перемещений и схемой сравнения. Сама идея резонансных вибраторов представляется многообещающей, так как кроме повышения КПД источника, работающего в таком режиме, может быть устранен фазовый сдвиг между действующей силой и скоростью смещения плиты во всем диапазоне частот. Однако реальных конструкций таких вибраторов пока неизвестно.

Другой отличительной чертой современных вибраторов является оснащение их разветвленными системами управления, контроля и диагностики. Обусловлено это все возрастающими требованиями к точности разведки, расширением частотного диапазона управляющих сигналов, а также переходом к решению все более сложных, в том числе неструктурных задач. В силу этих причин разработаны компьютеризированные системы управления и контроля работы вибраторов, которые определяют соответствие излучаемого сигнала заданному, осуществляют диагностику неисправностей блока управления, ведут непрерывный контроль за работой вибраторов в процессе отработки профиля с отключением источника при расхождении по фазе, превышающем пороговое значение, обеспечивают реализацию нескольких сигналов развертки — линейного, логарифмического, показательного и произвольного, задаваемого испол-



нителем, — и контролируют силу, развиваемую вибратором, предотвращая отрыв плиты излучателя от поверхности земли.

Такие системы отличаются практически полной взаимозаменяемостью плат блоков управления на сейсмостанции и на вибраторе, наличием нескольких скоростей фазовой коррекции излучаемого сигнала.

В системах контроля предусмотрена система радиоопроса каждого вибратора, в процессе которого сообщается об ускорении плиты, скорости ее смещения и опорном сигнале. Анализатор формы сравнивает амплитуду, спектр и время коррелируемого сигнала с их прогнозируемыми значениями, воспроизводит погрешности и сигнализирует об их обнаружении. Существуют переносные малогабаритные устройства, контролирующие работу вибратора. По сигналам с датчика плиты вибратора и блока управления определяются фазовые сдвиги между сигналами и уровень вибрации.

До последнего времени контролю силы, под которой подразумевают суммарную силу, развиваемую инерционной массой и плитой, не уделялось особого внимания. Обусловлено это было тем, что нагрузка на плиту была существенно больше усилий, развиваемых вибратором, в том числе и на частоте резонанса, и отрыв плиты от грунта был невозможен. С созданием вибраторов с одной двигательной установкой уменьшилась масса источников и появилась реальная возможность отрыва плиты на резонансной частоте (25—30 Гц), что весьма нежелательно из-за возможного резкого увеличения нелинейных искажений. Во избежание этого и разработано устройство, которое непрерывно определяет силу и сравнивает ее с заданным порогом. При повышении его вырабатывается напряжение, которое подается на первый каскад сервоклапана, уменьшая амплитуду перемещения золотника и силу, развиваемую вибратором. Правильность работы вибраторов проверяется также на вычислительных центрах по программам, предусматривающим получение следующих показателей: разностей фаз и энергетических спектров между опорным сигналом и сигналом датчика плиты вибратора, мгновенных частот, функций взаимной корреляции между опорным сигналом и сигналами от вибраторов, графиков нелинейных искажений и т.д.

По имеющимся данным наибольшее применение за рубежом получили вибраторы с усилиями 12—14 ТН. При выполнении специальных работ (ВСП, высокочастотное профилирование и др.) используют и сверхмощные установки на 20—22 ТН.

В целом объемы вибрационной сейсморазведки при работах на нефть и газ значительны, например в США они составили 60 %. Перспективы развития вибраторов связаны с увеличением их силовых характеристик, улучшением эксплуатационных параметров, повышением стабильности, расширением частотного диапазона, а также с оснащением микропроцессорными средствами управления, контроля и коррекции в зависимости от условий передачи нагрузок, обеспечивающими сохранение оптимальных параметров возбуждаемых колебаний.

Ранее указывалось, что в вибрационной сейсморазведке наряду с квазигармоническими получили применение кодовые последовательно-сти импульсов. На этой основе работает система "Mini-Sosie", которая дает хорошие результаты при изучении неглубоких горизонтов, в частности ЗМС, при работах с вибраторами. В этой системе в качестве источника используется серийный вибромолот для уплотнения грунта при строительстве. У него дроссельный рычаг переоборудован на большое перемещение заслонки, а на трамбовочной плите закреплен сейсмоприемник, сигналы от которого подаются на сейсмостанцию и регистрируются в качестве опорного. В процессе работы оператор, перемещая заслонку, меняет частоту следования ударов, обеспечивая их случайный характер; в среднем за 1 с производится 10 ударов. Энергия одного удара — 65 Дж. В течение одной посылки осуществлялось от 300 до 1000 и более воздействий.

Отечественным вибратором дискретного действия является серийно выпускаемый кодо-импульсный источник ИКИ-10/40 УХЛ. Этот излучатель преобразует электрическую энергию, накопленную в конденсаторной батарее, в механическую энергию ударной плиты, возбуждающей сейсмические колебания. Излучающим элементом источника является индукционно-динамический двигатель с трансформатором усилий гидравлического типа. Индукционно-динамический двигатель включает в себя ферромагнитный якорь с короткозамкнутыми кольцами и индуктором. В нижней части корпус двигателя закрыт гибкой мембраной, передающей усилия излучающей плите. Якорь преобразователя, являющийся силовым поршнем гидравлического трансформатора, движется вниз под действием электромагнитной силы, возникающей при передаче импульса тока в обмотку возбуждения индуктора от специальной схемы питания. Источник ИКИ-10/40 развивает усилия до 100 кН и возбуждает последовательности импульсов с частотой следования до 40 Гц. Питается он током от трехфазного генератора мощностью до 30 кВт через батарею конденсаторов энергоемкостью 500 Дж и смонтирован на шасси автомобиля ЗИЛ-131. Вследствие уменьшения силы единичного воздействия возбуждаемые ИКИ сигналы обогащены высокочастотными составляющими, по сравнению с колебаниями, генерируемыми мощными импульсными источниками ГСК, СИ и "Сейсморин". Источники этого типа просты по конструкции, дешевы и поэтому находят определенное применение в сейсморазведке.

### 2.3. СРЕДСТВА РЕГИСТРАЦИИ

В вибрационной сейсморазведке применяют специализированные станции, способные проводить накопление сигналов и корреляционную обработку данных, необходимую для оценки качества получаемых материалов.

| Технические характеристики                    | MDS-14,<br>телеметрическая (США)                                                               | SN-358<br>(Франция)                                                                               | MDS-10<br>(США)                                                       | MDS-16,<br>телеметрическая (США)                                                     |
|-----------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|
| Число сейсмических каналов                    | 24 (4; 2; 1; 0,5 мс)<br>48 (4; 2; 1 мс)<br><br>96 (4; 2 мс)<br><br>120 (4; 2 мс)<br>240 (4 мс) | 24 (4; 2; 1; 0,5 мс)<br>48 (4; 2; 1 мс)<br><br>96, 120 (4; 2 мс)<br><br>0,125; 0,25; 0,5; 1; 2; 4 | 24 (4; 2; 1 мс)<br>48 (4; 2 мс)<br><br>96 (4 мс)<br><br>0,5; 1; 2; 4; | 24—248 (1; 0,5 мс)<br>24—504 (2; 1 мс)<br>24—1016 (4; 2 мс)<br><br>0,5; 1; 2; 4      |
| Интервал квантования по времени, мс           | 0,5; 1; 2,4                                                                                    | 0,125; 0,25; 0,5; 1; 2; 4                                                                         | 0,5; 1; 2; 4;                                                         | 0,5; 1; 2; 4                                                                         |
| Число разрядов преобразователя аналог—код     | 14+1 (знаковый)                                                                                | 14+1 (знаковый)                                                                                   | 14+1 (знаковый)                                                       | 14+1 (знаковый)                                                                      |
| Частотный диапазон, Гц                        | 3—50                                                                                           | 3—2470;<br>3—1235;<br>3—617,5;<br>3—309;<br>3—154,5;<br>3—77                                      | 3—250                                                                 | 3—500                                                                                |
| Уровень шумов на входе (мкВ)эф                | —                                                                                              | 0,35—0,12 (0,125—4 мс)                                                                            | 0,2                                                                   | 0,2                                                                                  |
| Максимальный входной сигнал, (мВ)эф           | 1250—4000                                                                                      | 27,5—220                                                                                          | 1760                                                                  | 1250                                                                                 |
| Нелинейные искажения, %                       | —                                                                                              | 0,075                                                                                             | 0,1                                                                   | 0,1                                                                                  |
| Взаимное влияние между каналами, дБ           | —                                                                                              | —                                                                                                 | —80                                                                   | —80                                                                                  |
| Способ регулирования усиления                 | МАРУ                                                                                           | МАРУ                                                                                              | МАРУ                                                                  | МАРУ                                                                                 |
| Ступени усиления, дБ                          | 15х6                                                                                           | 15х6                                                                                              | 15х6                                                                  | 15х6                                                                                 |
| Фильтрация при записи, ФВЧ, частота среза, Гц | 6; 7,5;<br>9; 10,5;<br>12; 15; 18;<br>21; 25,5;<br>31,5; 37,5; 45;<br>55,5; 66;<br>79,5; 96    | 8; 10; 12,5;<br>16; 20; 25;<br>32                                                                 | 9; 12;<br>15 (18;<br>24; 30)                                          | 6; 12; 25,5;<br>55,5; 7,5; 15;<br>31,5; 66; 9; 18;<br>37,5; 79,5 10,5;<br>21; 45; 96 |
| Крутизна ФВЧ, дБ/окт                          | 12; 24; 36                                                                                     | 18; 36                                                                                            | 18; 36                                                                | 12; 24; 36                                                                           |
| Частота среза, ФНЧ, Гц                        | 39; 47; 55;<br>62; 78; 93;                                                                     | 77; 154,5;<br>309;                                                                                | 62,5; 125                                                             | 39; 47; 55; 62;<br>78; 93; 109;                                                      |

| Технические характеристики                                                      | MDS-14<br>телеметрическая (США)                              | SN-358<br>(Франция)                           | MDS-10<br>(США)                                 | MDS-16<br>телеметрическая (США)                           |
|---------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------|-------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------|
|                                                                                 | 109; 125;<br>156; 186;<br>216; 250;<br>312; 375, 437;<br>500 | 617,5; 1235;<br>2470                          | 125; 250;<br>250; 500                           | 125; 156; 187;<br>218; 250; 312;<br>375; 437; 500         |
| Крутизна, дБ                                                                    | 90                                                           | 70                                            |                                                 | 90                                                        |
| Режекторный<br>фильтр, Гц                                                       | 50 (60)                                                      | 50 (60)                                       | 50 (60)                                         | 50 (60)                                                   |
| Подавление, дБ                                                                  | —                                                            | —60                                           | —60                                             | —60                                                       |
| Формат маг-<br>нитной записи                                                    | Мульти-<br>плексный                                          | Мульти-<br>плексный,<br>демульти-<br>плексный | Мульти-<br>плексный,<br>демульти-<br>плексный   | Мультиплекс-<br>ный, демульти-<br>плексный                |
| Плотность<br>записи,<br>бит/мм                                                  | 64                                                           | 64; 256                                       | 64                                              | 64; 256                                                   |
| Линия свя-<br>зи наполь-<br>ный мо-<br>дуль —<br>регистра-<br>рующая<br>система | Волокон-<br>но-опти-<br>ческая                               | —                                             | —                                               | Два оптических<br>волокна;<br>проводная                   |
| Энергопотреб-<br>ление, Вт                                                      | —                                                            | 470 (96 ка-<br>налов)                         | 480 (48 кана-<br>лов)<br>580 (120 ка-<br>налов) | 750 мВт на ка-<br>нал ТМ, две<br>батареи 12 В;<br>5 А · ч |

Разработано два типа систем, различающихся по своим возможностям, структуре и аппаратурной реализации. К первому относятся системы, состоящие из станции для взрывной сейсморазведки, дополненной накопителем, коррелятором и генератором разверток вибросейсмического сигнала. Эти системы построены по жесткой структуре, обеспечивающей прием и усиление колебаний, редакцию помех, синхронное накопление, регистрацию виброграмм на магнитный носитель, корреляцию зарегистрированных сигналов и визуализацию коррелограмм.

Ко второму типу относятся программно-ориентированные системы переменной структуры, оснащенные микро-ЭВМ и спецпроцессорами и способные проводить накопление и корреляцию сигналов, спектральный анализ регистрируемых колебаний, их начальную обработку, а также глубокую диагностику состояния блоков станции и профиля [27]. Такие системы получили название компьютеризированных.

Во второй половине 70-х годов наметилась четкая тенденция к увеличению канальности станций, что привело к созданию сверхмногока-

| Технические характеристики                     | "Прогресс-3"                                                 | "Прогресс-2ВС"                                               | "Прогресс-96"       |
|------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------|---------------------|
| Период квантования, мс                         | 2; 4                                                         | 2; 4                                                         | 1; 2; 4             |
| Максимальное число каналов                     | 48                                                           | 48                                                           | 48; 96; 96          |
| Максимальная длительность записи, с            | От 1 до 31 секундами через 1 с и любая при остановке вручную | От 1 до 31 секундами через 1 с и любая при остановке вручную | 8; 16; 32           |
| При записи граничные частоты и крутизна среза: |                                                              |                                                              |                     |
| ФВЧ, Гц                                        | 28; 20; 14; 10                                               | 28; 20; 14; 10                                               | 28; 20; 14; 10      |
| крутизна, дБ/окт                               | 18±2                                                         | 18±2                                                         | 18±2                |
| ФНЧ, Гц                                        | 125; 62,5                                                    | 125; 62,5                                                    | 500; 250; 125; 62,5 |
| крутизна, дБ/окт                               | 36±2                                                         | 36±2                                                         | 72                  |
| Структура построения станции                   | Жесткая                                                      | Жесткая                                                      | Жесткая             |
| Диагностика                                    | Поблочная                                                    | Поблочная                                                    | Расширенная         |
| Канальность устройства отображения             | 24                                                           | 24                                                           | 48                  |
| Видеоконтрольное устройство                    | Монитор                                                      | СВКУ                                                         | Монитор             |
| Канальность видеоконтрольного устройства       | 24                                                           | 48                                                           | 48                  |
| Переключение коммутатора ОГТ                   | Вручную                                                      | Вручную                                                      | Автоматическое      |
| Проверка входных линий:                        |                                                              |                                                              |                     |
| автономная                                     | Нет                                                          | Нет                                                          | Имеется             |
| встроенная                                     | Имеется                                                      | Имеется                                                      | Имеется             |
| Начало промышленного внедрения                 | 1983                                                         | 1982                                                         | 1988                |

нальных регистрирующих систем, в которых многожильные линии связи станция — сейсмоприемники заменены телеметрическим каналом на основе проводной, оптической или радиосвязи. В табл. 5,6 приведены основные характеристики ряда сейсмостанций. Там же для сравнения по-

казаны параметры широко используемой станции разработки 70-х годов MDS-10. Обращает на себя внимание следующее. Число разрядов преобразователя аналог — код у всех сейсмостанций одинаково (14) и не меняется уже многие годы, хотя в прошлом была известна аппаратура "Сова-1" с 17-разрядным преобразователем [27]. Объясняется это тем, что, во-первых, такое число рядов в сочетании с MAPY обеспечивает достаточную точность регистрации и, во-вторых, повсеместно используется формат записи на магнитную ленту SEG-B, в который удобно вписывается именно 14 разрядов.

Станции MDS-14, MDS-15, SN-358 обеспечивают при частоте дискретизации  $\Delta t = 1$  мс регистрацию 48 каналами, а в более поздней телеметрической станции MDS-16 при сохранении таких же показателей по всем остальным параметрам регистрируются уже 500 каналов при  $\Delta t = 1$  мс, что заметно больше, чем у известных телеметрических сейсмостанций 70-х годов SN-348, GUS-BUS. Станции MDS-14, MDS-15, MDS-16 имеют набор фильтров ВЧ от 6 до 96 Гц с большой крутизной среза — 36 дБ. Такой широкий по сравнению с предыдущими станциями набор фильтров ориентирован именно на решение задач высокого разрешения (ВРС), так как позволяет "отрезать" мешающие поверхностные волны, спектр которых занимает полосы, зачастую превышающие 30 Гц.

В соответствии с частотами дискретизации все цифровые станции имеют широкий набор фильтров НЧ, однако в станциях SN-358 и MDS-14, MDS-15, MDS-16 срезы фильтров располагаются правее относительно стандартных положений — на частотах  $f = 1/3\Delta t$  вместо  $f = 1/4\Delta t$ . Например, 77 Гц вместо 62 Гц, 154 Гц вместо 125 Гц и т.д. Уверенного объяснения таких особенностей фильтров НЧ не существует. Предположительно объясняется это рекламными целями, так как фильтры НЧ выполнены цифровыми, а не аналоговыми, и поэтому нет особых трудностей в том, чтобы использовать промежуточные значения граничных частот. Существует также мнение, что такой набор срезов на промежуточных частотах  $1/4\Delta t$ , не приводя к заметному увеличению помех в виде "зеркальных" частот, расширяет полосу регистрации, что в общем случае полезно для целей ВРС.

Отечественная промышленность выпускает для вибрационной сейсморазведки станции первого типа в модификациях "Прогресс-3" и "Прогресс-2ВС", а с 1989 г. в модификации "Прогресс-96".

Основные технические характеристики станций "Прогресс" приведены в табл. 6. Не останавливаясь на описании самих станций, рассмотрим принцип действия и функциональные схемы устройств для накопления и корреляции сейсмических сигналов.

### 2.3.1. Накопители

Сейсмостанции "Прогресс-3" комплектуются накопителями НЦС-48, а "Прогресс-2ВС" — НСП 48/16. Основной особенностью их является то,

что поступающая информация запоминается [27, 32] в блоках твердотельной памяти, что существенно повышает стабильность и надежность работы накопителя.

Накопители НЦС-48 и НСП-48/16 работают по единому принципу, предусматривающему сложение сигналов, поступающих от каждого очередного воздействия с предыдущими, нормализацию и отбраковку данных (НЦС-48), а также выдачу их на магнитный регистратор для записи на ленту, на электростатическое печатающее устройство или на экран монитора для просмотра полученных материалов ("Прогресс-28С").

Накопитель НЦС-48 реализует следующие варианты суммирования данных: 1) накопление без нормировки и редакции; 2) накопление с нормировкой без редакции; 3) накопление без нормировки с редакцией; 4) накопление с нормировкой и редакцией.

Накопление без нормировки и редакции осуществляется в соответствии с формулой

$$x_{i, N} = \sum_{j=1}^N x_{ij}, \quad (2.7)$$

где  $x_{ij}$  — амплитуда  $i$ -й выборки сигнала при текущем  $j$ -м накоплении;  $x_{i, N}$  — амплитуда суммарной  $i$ -й выборки сигнала при  $N$ -кратном накоплении.

В этом варианте накопления происходит возрастание амплитуд регулярных синфазных колебаний, пропорциональное числу складываемых воздействий. При разном числе накоплений результирующие амплитуды волн будут отличаться друг от друга, что может вызвать определенные затруднения при динамической обработке данных.

Поэтому более обоснован режим работы накопителя с нормировкой просуммированных данных, который выполняется в соответствии с соотношением

$$x_{i, N} = (x_{i, N-1} + \frac{1}{2^P} x_{i, N}) / 2^{0^{(1)}}, \quad (2.8)$$

где  $x_{i, N-1}$  — амплитуда  $i$ -й выборки при  $N-1$  накоплении;  $P$  — целая часть логарифма по основанию 2 от числа накоплений  $N$  ( $P = [\log_2 N]$ ); делитель в (2.8) определяется из условия: если  $N \neq 2^k$ , то  $2^0 = 1$ , если  $N = 2^k$ , то  $2^1 = 2$ ;  $k$  — натуральный ряд ( $k = 0, 1, 2, 3, \dots$ ).

Принцип нормировки данных в накопителе следует из соотношения (2.8). Необходимо только учитывать, что показатель степени  $P$  изменяется на единицу только после того, как прошло накопление, равное двум в целой степени. Счет числа накоплений осуществляется в счетчике нормировки, в который каждый раз добавляется единица после того, как число накоплений превысило  $2^k$ .

При такой организации работы накопителя пронормированные амплитуды регулярных волн при числе накоплений  $N=2^P$  равны их интенсивностям при единичном воздействии. Для промежуточных накоплений

пропорциональные амплитуды будут отличаться от единичных, но не более чем в 2 раза (6 дБ). Характер работы накопителя с нормировкой покажем на следующем примере, считая, что амплитуды соответствующих выборок сигналов для всех накоплений равны между собой ( $A_i = x_{i,1} = x_{i,2} = \dots = x_{i,N}$ ).

При первом возбуждении

$$x_{i,1} = A_i.$$

Второе накопление выполняется в обход правила (2.8) без нормировки входного сигнала:

$$(A_i + x_{i,2}) : 2 = A_i.$$

При третьем возбуждении

$$(A_i + x_{i,3}/2) : 2^0 = 1,5 A_i.$$

При четвертом возбуждении

$$(1,5 A_i + x_{i,4}/2) : 2^1 = A_i.$$

При пятом возбуждении

$$(A_i + x_{i,5}/4) : 2^0 = 1,5 A_i.$$

При шестом возбуждении

$$(1,25 A_i + x_{i,6}/4) : 2^0 = 1,5 A_i.$$

При седьмом возбуждении

$$(1,5 A_i + x_{i,7}/4) : 2^0 = 1,75 A_i.$$

При восьмом возбуждении

$$(1,75 A_i + x_{i,8}/4) : 2^1 = A_i$$

и т.д.

Приведенный пример подтверждает ранее высказанный тезис о том, что пронормированные суммарные амплитуды волн по своим значениям отличаются от единичных не более чем в 2 раза.

В процессе регистрации данных, который в невзрывной сейсморазведке занимает существенно большее время, чем во взрывной, возможно появление интенсивных помех, обусловленных движущимся транспортом, порывами ветра и другими причинами. Поэтому в рассматриваемом накопителе предусмотрен режим работы с редакцией шума, который позволяет устранять из принимаемых сигналов кратковременные (несколько десятков миллисекунд) импульсные помехи с амплитудами, существенно превышающими средние значения амплитуд регуляр-



ных волн, и со случайными временами их появления на записях. Обусловлено это тем, что при конечном числе накоплений и ограниченном динамическом диапазоне устройств регистрации собственно синхронное суммирование оказывается малоэффективным для необходимого ослабления этих помех. Подобного рода помехи особенно опасны при вибрационном возбуждении, поскольку длительность регистрации, как правило, в 2–3 раза превышает время приема колебаний при импульсном возбуждении и поэтому вероятность их появления в процессе записи становится больше.

Алгоритм редакции помех основан на сравнении амплитуд выборок сигналов, поступающих в накопитель при каждом накоплении. Его практическая реализация для первых двух воздействий несколько отличается от реализации для последующих.

Для первых слагаемых вычисляются поотсчетные разности между первым и вторым накоплениями

$$\Delta x_i = x_{i, 2} - x_{i, 1}. \quad (2.9)$$

Одновременно производится усреднение модулей величин  $\Delta x_i$  по числу выборок, равному целой степени числа 2. Интервал усреднения  $L$  должен значительно превышать длительность импульсной помехи для того, чтобы исключить возможное влияние ее на средние значения амплитуд, которые характеризуют нормальный уровень шумов:

$$\overline{\Delta x} = \frac{1}{L} \sum_{i=1}^L |\Delta x_i|. \quad (2.10)$$

Показателем наличия импульсной помехи в одном из двух слагаемых будет выполнение условия

$$|\Delta x_i| > K \overline{\Delta x}, \quad (2.11)$$

где  $K$  — коэффициент, определяющий порог обнаружения импульсной помехи по отношению к среднему уровню шумов.

Для определения воздействия с высоким уровнем шумов производится оценка выборок в области, предшествующей импульсной помехе, и по их значениям выделяется то накопление, которое отягощено помехой и которое нужно отбросить. При этом в память накопителя вместо суммы двух воздействий заносится то, в котором отсутствует импульсная помеха.

Выделение зашумленных участков трасс для последующих возбуждений производится по несколько иному правилу в соответствии с соотношением

$$|x_{i, N} - x_{i, N-1}| \geq |K \overline{\Delta x} + K_1 x_{i, N-1}|, \quad (2.12)$$

где  $K_1$  — коэффициент, определяющий порог работы редактора по отношению к амплитудам синфазных колебаний.

Если условие (2.12) выполняется, то выборка  $x_{i, N}$  не пропускается в арифметическое устройство, а вместо нее используется результат предыдущего накопления  $x_{i, N-1}$ .

Работа накопителя в режиме нормировки и редакции выполняется в соответствии с условиями (2.8) и (2.12).

Функциональная блок-схема накопителя НЦС-48 показана на рис. 20. Накопитель состоит из следующих основных элементов: входного регистра; арифметического устройства АУ с внутренним тестом, оперативного запоминающего устройства ОЗУ с устройством управления оперативной памятью УОЗУ, редактора для исключения импульсных помех УПИП, устройств управления накопителем УУН и режимами его работы УУР, а также выходного регистра.

Входной регистр служит для приема данных с информационных шин станции и хранения их в течение времени, определяемого временной диаграммой работы накопителя.

Арифметическое устройство предназначено для суммирования и нормализации данных в соответствии с выбранным режимом работы накопителя. Оно включает в себя компаратор К, устройство выравнивания порядков УВП, сумматор мантисс СМ, устройства нормализации УН и особых случаев УОС, а также регистратор результатов РР.

Арифметическое устройство обеспечивает сложение данных в режиме с плавающей запятой и реализует формулу

$$Z = x + y = S^{P_x} \cdot q_x + S^{P_y} q_y = S^{P_x} (q_x + q_y S^{-(P_x - P_y)}),$$

где  $S$  — основание характеристики;  $q$  — мантисса числа;  $P$  — порядок числа;  $S^P$  — характеристика числа.

При этом предполагается, что  $P_x > P_y$ . После выполнения операции сложения (2.7) производится нормализация суммы в соответствии с (2.8).

Разряды слагаемых с общей информационной шины накопителя поступают на компаратор, в котором определяется число с большим порядком, а также разность порядков слагаемых  $\Delta P$ . Разряды и знак мантиссы меньшего из слагаемых чисел поступают на вход УВП, в котором осуществляется сдвиг вправо разрядов его мантиссы на значение  $\Delta P$ . Мантиссы обоих слагаемых суммируются в СМ и нормализуются в УН. Соответствующее изменение порядка суммы, определяемое числом сдвигов влево разрядов мантиссы при ее нормализации, выполняется в УОС. Там же осуществляется деление суммарного сигнала на два при работе накопителя в режиме нормировки (2.8), а также соответствующая нормировка входных сигналов.

Редактор накопителя осуществляет анализ и обработку входной информации в соответствии с соотношениями (2.9) — (2.12).

Обмен информацией между блоками и устройствами накопителя осуществляется посредством общей информационной шины. В связи с

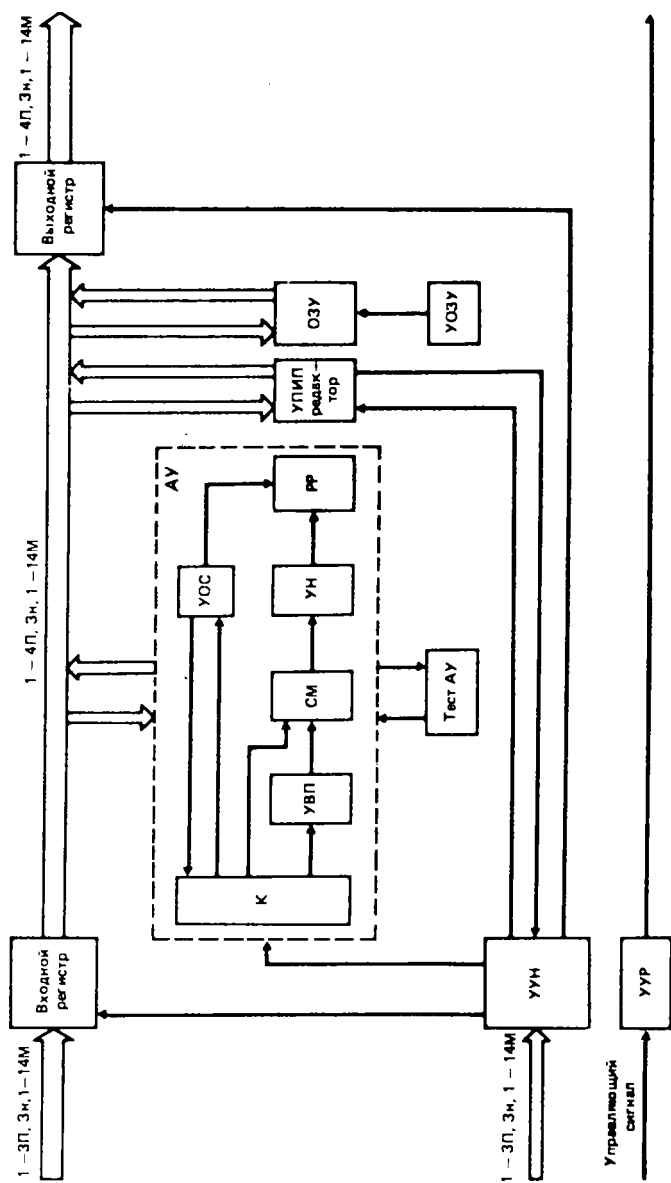


Рис. 20. Функциональная схема накопителя НЦС-48

этим входной регистратор АУ, УПИП и ОЗУ имеют выходы с тремя состояниями, управление которыми осуществляется комбинацией двух сигналов.

Оперативная память накопителя состоит из запоминающего устройства и схемы управления. Память ОЗУ рассчитана на хранение 7,86432 Мбит данных, размещенных на 24 платах (ТЭЗах). Память формируется на основе микросхемы К565РУ3А емкостью 16384 бит. Каждое слово состоит из 19 информационных (4 разряда порядка, знак, 14 разрядов мантиссы) и одного контрольного разрядов. Выдача информации из накопителя осуществляется с помощью выходного регистра.

Накопитель имеет два основных режима работы: запись и вывод.

В режиме записи накопитель принимает и синхронно суммирует цифровые коды сейсмической информации при многократном повторении воздействий с записью промежуточных сумм в оперативную память, выдает команды на включение источников, а также контролирует выполнение заданного числа накоплений в цикле.

В режиме вывода возможны три варианта выдачи информации:

вывод слагаемых — информация со входа накопителя поступает транзитом на его выход;

вывод промежуточных сумм — на выход накопителя подается промежуточная сумма, полученная после выполнения числа накоплений, высвечиваемых на цифровых индикаторах "Число накоплений";

вывод результата — на выходные информационные шины накопителя подается результат, полученный после выполнения заданного числа накоплений. Одновременно включаются регистратор и блок воспроизведения станции. Вывод информации может быть однократным и многократным.

Накопитель НСП-48/16 был разработан для станции "Прогресс-2ВС". В нем не предусмотрены операции нормировки и редакции помех, что ухудшает его эксплуатационные характеристики по сравнению с НЦС-48. Однако следует учесть, что он был первым отечественным накопителем на твердотельной памяти, используемым на полевых работах уже с 1981 г.

### 2.3.2. Корреляторы

Обязательной процедурой при проведении вибросейсмических исследований является корреляция зарегистрированных и управляющего сигналов. Как правило, процедура эта выполняется дважды: в поле — для визуального экспресс-анализа первичных материалов; на ВЦ — для получения импульсных трасс и их последующей обработки.

Корреляцию в поле осуществляют устройства, которые можно разделить на экспресс-корреляторы и высокоточные корреляторы.

Первые представляют собой достаточно компактные, быстродействующие и экономичные устройства, что достигается уменьшением ка-

нальности по сравнению с канальностью сейсмостанции, уменьшением разрядности представления входных данных и сокращением рабочих форматов арифметических устройств.

Высокоточные корреляторы разрабатываются с учетом представления материалов в форме, пригодной для последующей обработки на ЭВМ. Результаты корреляции записываются на магнитную ленту в мультиплексном или демультиплексном форматах. Такие корреляторы существенно уменьшают расход ленты и экономят затраты машинного времени больших ЭВМ. Как правило, в компьютеризированных станциях используют высокоточные корреляторы, организованные на основе спецпроцессоров, управляемых бортовыми ЭВМ. Вместе с тем корреляция в поле при отсутствии должного контроля за работой вибраторов, качеством получаемого материала и при ограниченных возможностях коррекции сигналов может привести к невозможности исправления исходных данных, что отрицательно скажется на конечных результатах.

В цифровой технике вычисление корреляционных функций реализуется на основе временных или спектральных преобразований. В спектральной области оно производится, как правило, путем быстрого преобразования Фурье (БПФ), что обеспечивает, по сравнению со сверткой, выигрыш по числу арифметических операций.

При БПФ для массива данных длиной  $N$  отсчетов необходимо  $Q = 5N \log_2 N$  арифметических операций. С учетом обратных преобразований число операций для вычисления ФВК в спектральной области составляет  $2Q$ . На вычисления во временной области требуется  $r = 2MN$  операций, где  $M$  — длина ФВК.

Выигрыш в числе операций при реализации способа БПФ имеет место при условии

$$\eta = r/Q = 2M/5 \log_2 N > 1,$$

т.е.  $M > 2,5 \log_2 N$ .

В вибросейсмической развертке это соотношение выполняется, так как в среднем  $N = 3000 \div 4000$  отсчетов, а  $M = 800 \div 1200$ . При  $N_{ср} = 3500$  и  $M_{ср} = 1000$  выигрыш составит  $\sim 35$ .

Несмотря на столь значительный выигрыш в числе операций, реализация алгоритма БПФ в полевой аппаратуре затруднена, так как этот алгоритм требует относительно высокой точности представления выходных и промежуточных результатов, т.е. большой разрядности представления входных и промежуточных слов. Это неизбежно ведет к заметному увеличению элементов памяти и арифметических устройств, а также к снижению быстродействия. Кроме того, при реализации БПФ труднее совмещаются разные этапы вычисления функции (конвейерный принцип обработки сигналов), чем при реализации алгоритма свертки. Поэтому все экспресс-корреляторы строятся на вычислении функции  $R_k$  во временной области, т.е. на основе алгоритма свертки.

В дискретном представлении алгоритм корреляции (1.1) записы-

Таблица 7

| R         | Слагаемые ФВК |               |               |               |               |                       |                   |                       |
|-----------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|-----------------------|-------------------|-----------------------|
|           | 1             | 2             | 3             | 4             | 5             | N-1                   | N                 | N+1                   |
| $R_1$     | $S_1^{x_1}$   | $S_2^{x_2}$   | $S_3^{x_3}$   | $S_4^{x_4}$   | $S_5^{x_5}$   | $S_{N-1}^{x_{N-1}}$   | $S_N^{x_N}$       | $0 \cdot x_{N+1}$     |
|           |               |               |               |               |               |                       |                   | $0 \cdot x_N + M$     |
| $R_2$     | $0 \cdot x_1$ | $S_1^{x_2}$   | $S_2^{x_3}$   | $S_3^{x_4}$   | $S_4^{x_5}$   | $S_{N-2}^{x_{N-1}}$   | $S_{N-1}^{x_N}$   | $S_N^{x_{N+1}}$       |
|           |               |               |               |               |               |                       |                   | $0 \cdot x_N + M$     |
| $R_3$     | $0 \cdot x_1$ | $0 \cdot x_2$ | $S_1^{x_3}$   | $S_2^{x_4}$   | $S_3^{x_5}$   | $S_{N-3}^{x_{N-1}}$   | $S_{N-2}^{x_N}$   | $S_{N-1}^{x_{N+1}}$   |
|           |               |               |               |               |               |                       |                   | $0 \cdot x_N + M$     |
| $R_4$     | $0 \cdot x_1$ | $0 \cdot x_2$ | $0 \cdot x_3$ | $S_1^{x_4}$   | $S_2^{x_5}$   | $S_{N-4}^{x_{N-1}}$   | $S_{N-3}^{x_N}$   | $S_{N-2}^{x_{N+1}}$   |
|           |               |               |               |               |               |                       |                   | $0 \cdot x_N + M$     |
| $R_5$     | $0 \cdot x_1$ | $0 \cdot x_2$ | $0 \cdot x_3$ | $0 \cdot x_4$ | $S_1^{x_5}$   | $S_{N-5}^{x_{N-1}}$   | $S_{N-4}^{x_N}$   | $S_{N-3}^{x_{N+1}}$   |
|           |               |               |               |               |               |                       |                   | $0 \cdot x_N + M$     |
| .....     | .....         | .....         | .....         | .....         | .....         | .....                 | .....             | .....                 |
| $R_{M-1}$ | $0 \cdot x_1$ | $0 \cdot x_2$ | $0 \cdot x_3$ | $0 \cdot x_4$ | $0 \cdot x_5$ | $S_{N-M+1}^{x_{N-1}}$ | $S_{N-M}^{x_N}$   | $S_{N-M-1}^{x_{N+1}}$ |
|           |               |               |               |               |               |                       |                   | $S_N^{x_N} + M$       |
| $R_M$     | $0 \cdot x_1$ | $0 \cdot x_2$ | $0 \cdot x_3$ | $0 \cdot x_4$ | $0 \cdot x_5$ | $S_{N-M+2}^{x_{N-1}}$ | $S_{N-M+1}^{x_N}$ | $S_{N-M}^{x_{N+1}}$   |
|           |               |               |               |               |               |                       |                   | $S_N^{x_N} + M$       |

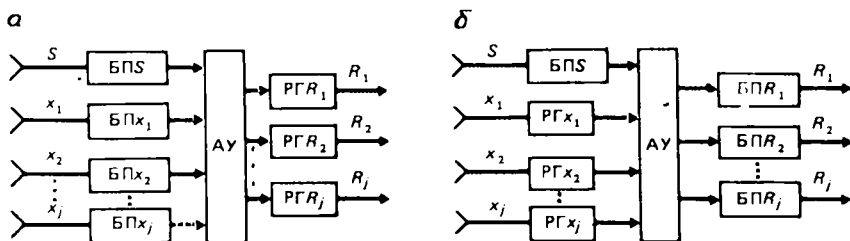


Рис. 21. Структурные схемы многоканальных корреляторов последовательного (а) и параллельно-последовательного (б) типов:

БПС — память опорного сигнала; БПх — память сейсмических каналов; АУ — арифметическое устройство; РГ R — выводящие регистры корреляционных функций

вается в виде

$$R_k = \frac{1}{N} \sum_{i=k}^{N+k-1} x_i S_{i+k-1}, \quad (2.13)$$

где  $i=1, 2, \dots, N$ ;  $k=1, 2, \dots, M$ ;  $N$  — число выборок управляющего сигнала;  $M$  — число выборок коррелограммы (ФВК);  $x_i$  — текущая выборка виброграммы;  $S_{i+k-1}$  — соответствующая выборка управляющего сигнала;  $R_k$  — текущее значение коррелограммы (ФВК).

Выражение (2.13) для одного канала без нормирующего множителя  $1/N$  может быть представлено в виде матрицы размером  $(N+M) \times M$ , в которой суммы парных произведений, расположенные по строкам матрицы, образуют значения функции взаимной корреляции (табл. 7).

Возможно несколько способов получения  $R_k$  [23].

1. Последовательное вычисление значений  $R_k$  строка за строкой. При этом выборки управляющего сигнала перемножаются со всеми отсчетами виброграммы и парные произведения складываются. В этом случае в памяти коррелятора должны находиться все выборки управляющего сигнала, что ограничивает его длительность или требует памяти соответствующего объема.

2. Одновременное, параллельное вычисление всех значений, которое предопределяет наличие арифметических устройств, равное числу выборок ФВК или строк корреляционной матрицы. Сложность такого решения очевидна.

3. Комбинированный способ вычисления  $R_k$ , заключающийся в определении столбцов корреляционной матрицы и последовательном подсуммировании полученных значений по ее строкам.

В корреляторах, выполненных на основе последовательной структуры (рис. 21), функция  $R_k$  вычисляется последовательно отсчет за отсчетом. Эти устройства имеют на входе блоки памяти опорного сигнала БПС и  $j$  блоков памяти регистрируемых колебаний БПх ( $j$  — число одновременно обрабатываемых одним арифметическим устройством ка-

| Коррелятор, сейсмостанция, страна    | Назначение    | Структура построения         | $N$ —число одновременно обрабатываемых каналов; $\Delta t$ —интервал дискретизации, мс | Максимальная длительность оператора $T_{оп}$ , с |
|--------------------------------------|---------------|------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------|
| MW-1102, DFS-IV, США                 | Просмотр      | Последовательная             | $N=12$ ;<br>$\Delta t=2$ ; 4                                                           | $4096 \cdot \Delta t$                            |
| ЦК-2, СМОВ-0-24, СССР                | Просмотр      | То же                        | $N=1$ ; $\Delta t=2,4$                                                                 | $< 12$                                           |
| ДС-2400, MDS-10, США                 | То же         | —"                           | $N=24$ ; $\Delta t=2$ ; 4                                                              | $4096 \cdot \Delta t$                            |
| ДС-6000, США                         | —"            | —"                           | $N=60$ ; $\Delta t=2$                                                                  | $8192 \cdot \Delta t$                            |
| СК-24, "Прогресс-3", СССР            | —"            | Параллельно-последовательная | $N=24$ ; $\Delta t=4$                                                                  | Неограниченная                                   |
| ЗКП-01, "Прогресс-2ВС" СССР          | —"            | Последовательная             | $N=48$ , $\Delta t=4$                                                                  | 16                                               |
| HRC-21000, MDS-16, США               | Высоко-точный | То же                        | $N=1016$ ; 504; 248;<br>$\Delta t=4$ ; 2; 1; 0,5                                       | 1—97 через 1 с                                   |
| CS-2502, SN-358, Франция             | То же         | Параллельно-последовательная | $N=508$ ; 254; 124; $\Delta t=4$ ; 2; 1                                                | Неограниченная                                   |
| Суммирующий коррелятор "Pelton", США | —"            | То же                        | $N=24 \div 60$ ;<br>$\Delta t=1 \div 8$ ступенями в 1 мс                               | $8000 \cdot \Delta t$                            |

Примечания. 1. Корреляторы MW-1102 и ЦК-2 с аналого-цифровым преобразованием, остальные — с цифровым. 2. Корреляторы HRC-21000 и MDS-16 — вычисление в частотной области. 3. Корреляторы CS-2502 и SN-358 — свертка во временной области.

налов). Объемы всех блоков памяти одинаковы и определяются принятым числом отсчетов  $N$  управляющего сигнала, т.е. его максимальной длительностью. Арифметическое устройство поочередно в течение интервала выборки (такта)  $\Delta t$  подключается к каждому из  $j$  блоков входной памяти каналов и к соответствующему регистру памяти, в который заносится очередной отсчет корреляционной функции  $R_k$ .

В корреляторах параллельной структуры в качестве входной каналной памяти используются регистры памяти на одну выборку и выходной блок памяти и все  $M$  выборок, достаточных для отображения функции  $R_k$ . В таких корреляторах вычисления проводятся одновременно



| Длительность корре-лограммы, с | Форматы (представление) |            | Потребляемая мощность, Вт, не более | Емкость памяти, тыс. бит |        | Возможность накоп-лений корре-лограм от разных воз-действий | Время обра-ботки одного кадра, мс |
|--------------------------------|-------------------------|------------|-------------------------------------|--------------------------|--------|-------------------------------------------------------------|-----------------------------------|
|                                | На входе и АУ (разряд)  | На выходе  |                                     | На канал                 | Всего  |                                                             |                                   |
| Неограниченная                 | 8×8                     | Аналоговое | 360                                 | 32,8                     | 426    | Не имеется                                                  | Равно времени выборки             |
| 12                             | 4×4                     | То же      | 100                                 | 15,4                     | —      | То же                                                       | То же                             |
| Неограниченная                 | 8×8                     | —"         | 700                                 | 65,6                     | 852    | —"                                                          | —"                                |
| То же                          | 8×8                     | —"         | 500                                 | —                        | —      | —"                                                          | —"                                |
| 4,096                          | Порядковый              | Аналоговое | 350                                 | 4,1                      | 480    | Имеется                                                     | 3,6                               |
| Неограниченная                 | Знаковый                | То же      | 70                                  | 4,1                      | 200    | Не имеется                                                  | 3,7                               |
| 99— $T_{оп}$                   | 32×32                   | Цифровое   | 3500                                | 760                      | 760000 | Имеется                                                     | Равно времени выборки             |
| 1500· $\Delta t$               | 32×32                   | То же      | 6500                                | —                        | —      | То же                                                       | То же                             |
| 1000· $\Delta t$               | 12×8                    | —"         | Нет данных                          | Нет данных               | —"     | —"                                                          | —"                                |

для всех отсчетов выходной функции  $R_k$ , но для этого каждому выходному отсчету должно соответствовать свое арифметическое устройство.

При такой организации выходная память представляет из себя накапливающий сумматор, выполненный на базе ОЗУ объемом в  $M$  слов, где  $M$  — длина функции  $R_k$ .

Параллельно-последовательные корреляторы совмещают в себе особенности последовательной и параллельной структур. Такие устройства содержат  $j$  блоков памяти выходных данных БПС объемом  $M$  слов, блок выходной памяти БП управляющего сигнала (оператора) объемом  $N$  слов и  $j$  входных регистров РГх. В течение каждого такта одним АУ производится вычисление  $M$  промежуточных отсчетов функции  $R$ , которые накапливаются в выходной памяти БПР. В корреляторе подобной структуры для вычисления каждого отсчета  $R$  необходимо иметь отклик коррелятора  $S^*(-x_n)$  на отсчет  $x_n$  и накопленную сумму откли-

ков на предыдущие  $N - 1$  отсчетов входных данных. Недостатком корреляторов с последовательной структурой является необходимость иметь большую по объему входную память, что ограничивает длительность управляющего сигнала.

Общий недостаток корреляторов параллельной и комбинированной структур — необходимость использования суммирующей выходной памяти, сложной по организации.

В связи с указанным условием  $M < N$ , что, как правило, реализуется на практике, и при одинаковых входных и выходных форматах данных, более обоснованной с точки зрения аппаратных затрат представляется параллельно-последовательная структура построения коррелятора.

В мировой практике известны корреляторы первого и третьего типов. Данные по ним приведены в табл. 8. Их анализ показывает, что структура построения коррелятора не определяет ни его назначения, ни его возможности. Так, наиболее мощные корреляторы HRC-21000 и CS-2502 построены на основе разных структур. Но, очевидно, прослеживается тенденция уравнивания канальности корреляторов с канальностью сейсмостанций, а также вычисления функции  $R_k$  в полноразрядных форматах, чтобы результаты корреляции в поле заносить на магнитную ленту.

Коррелятор-накопитель CS-2502 оперирует с сигналами, представленными во временной области. Параллельно-последовательная структура коррелятора позволяет обрабатывать комбинированные управляющие сигналы, накапливая коррелограммы от отдельных воздействий, обрабатывать кодо-импульсные посылки и накапливать отдельные импульсные возбуждения при максимальной длительности записи 6 с.

Реализацию параллельно-последовательной структуры построения коррелятора рассмотрим на примере коррелятора СК-24 [22], последовательной структуры — на примерах устройств ДС-2400 ЗКП-01.

В корреляторе СК-24 вычисление парных произведений производится по столбцам, составленным из одинаковых по порядковым номерам текущих выборок  $x_i$  с подстановкой в сомножители вместо недостающих значений управляющего сигнала  $S$  нулей. Это позволяет при фиксированном объеме памяти БПС производить корреляцию с неограниченным по длительности оператором. Из корреляционной матрицы следует, что значения управляющего сигнала в текущем столбце отличаются от соответствующих значений в предыдущем столбце наличием одной новой выборки. Это позволяет вычисления для группы каналов проводить одним арифметическим устройством (АУ) последовательно, по мере поступления выборок  $x_i$ . Каждый отсчет  $x_i$  перемножается с  $M$  выборками управляющего сигнала  $S_{i-k}$ , хранящимися в памяти ПС. Полученные вдоль столбцов произведения  $x_i S_{i+k-1}$  построчно (по горизонтали) суммируются с ранее подсчитанными промежуточными ( $R_k$ ) значениями ФВК, воспроизведенными из оперативной памяти (ОП). Новые

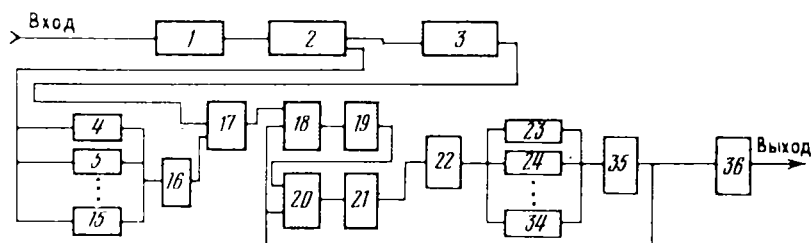


Рис. 22. Функциональная схема экспресс-коррелятора СК-24 (унифицированный модуль на 12 каналов):

1 — блок согласования входных данных; 2, 22 — демультиплексоры; 3 — память управляющего сигнала; 4 — 15 — входные регистры; 16 и 35 — коммутаторы каналов; 17 — сумматор порядков; 18 — уравниватель порядка слагаемых парных произведений; 19 — логический дешифратор; 20 — сумматор мантисс частичной суммы и текущей выборки; 21 — нормализатор суммы; 23—34 — блоки памяти результатов; 36 — выходное печатающее устройство

значения промежуточных сумм

$$R_k'' = R_k' + x_i S_{i-k+1},$$

записываются в ОП по тем же адресам, что и  $R_k'$ . Таким образом, в процессе поступления данных в коррелятор для каждой выборки  $S_{i-k+1}$  и одной выборки виброграммы  $x_i$  в каждой точке (адресе) происходит накопление отдельных значений ФВК и тем самым формируется коррелограмма длительностью  $M$  и отсчетов для каждой исходной трассы. Такая организация вычислений позволяет проводить накопление коррелограмм, что представляется весьма удобным и полезным при работе с управляющими сигналами, различными по частотному составу и длительности.

В связи с тем, что длительность управляющего сигнала всегда меньше длительности виброграммы и что объем памяти ПС ограничен, в корреляторе СК-24 предусмотрено ее обновление, т.е. после ее заполнения каждый вновь поступивший отсчет заносится в ПС взамен "отработавшего". Таким образом, с каждым новым кадром (кадр данных — цифровые отсчеты по 24 сейсмическим каналам и управляющему сигналу, относящиеся к одному моменту времени) память ПС обновляется на один отсчет и в ней остаются только те значения сигналов, которые необходимы для обработки очередного столбца. Такая организация вычислений позволяет при ограниченной емкости памяти ПС вести корреляцию в реальном масштабе времени с управляющим сигналом неограниченной длины. В корреляторе СК-24 принята 12-канальная организация структуры оперативной памяти и арифметического устройства.

Функциональная схема коррелятора СК-24 приведена на рис. 22. Отсчеты значений  $x$  и  $S$ , выдаваемые сейсмостанцией из блока логики, поступают в преобразователь форматов, который преобразует эти дан-

ные во внутренний порядковый формат, состоящий из четырех двоичных разрядов, разряда знака и нормализованной мантиссы, представленной одним старшим разрядом. Наличие одноразрядной мантиссы подразумевается, а все вычисления проводятся с порядком и знаком.

В этом формате сейсмические данные записываются во входную буферную память (БП), а управляющий сигнал в память ПС емкостью 1024 отсчета. Буферная память разделена на две половины емкостью 24 выборки каждая. После приема  $i$ -го кадра данных в первую половину буферной памяти проводится корреляция входных данных с теми значениями управляющего сигнала, которые находятся в памяти ПС. В это же время во вторую половину БП идет прием данных ( $i + 1$ ) кадра. При поступлении следующего кадра половины буферной памяти меняются ролями. Таким образом, буферная память обеспечивает прием непрерывно поступающих данных от станции, их кратковременное хранение и покадровую подачу в два арифметических устройства для обработки каждого столбца матрицы для всех 24 каналов. При вычислении каждого столбца в АУ последовательно подаются из памяти ПС все ( $N=1024$ ) выборки управляющего сигнала. Туда же подаются из оперативной памяти ранее вычисленные значения  $R'$ . По окончании вычислений значения ФВК выводятся через коммутатор и регистр вывода в блок воспроизведения станции.

Умножение текущего значения сейсмических данных  $x_i$  на соответствующее значение  $S$ , согласно порядковому представлению сомножителей, заменяется сложением их порядков. Полученный результат умножения суммируется с ранее накопленным значением ФВК, которое считывается из ОП коррелятора. Сложение производится с плавающей запятой, что требует выравнивания порядков слагаемых. После суммирования производится нормализация результатов. Для выполнения указанных действий порядки перемножаемых чисел поступают на сумматор порядков, с выхода которого снимается сумма порядков, соответствующая произведению  $x_i S_{i+k-1}$ . Далее определяется разность порядков полученного произведения и промежуточного значения  $R'$ . Дешифратор вырабатывает единицы, соответствующие коду разности порядков, и подает их на вход сумматора мантисс, на другой вход которого поступает мантисса промежуточной суммы  $R'$ . Новая сумма нормализуется и этот результат через демультимплексатор записывается в соответствующий блок оперативной памяти. Выходной формат коррелятора — 4 разряда порядка, знаковый разряд и 14 разрядов мантиссы.

Время обработки одного кадра составляет 3,6 мс. При  $N=1024$  за 1 с каждое АУ выполняет  $3,4 \cdot 10^6$  операций в секунду. Такое высокое быстродействие обеспечивается конвейерным принципом организации работы АУ. Операция вычисления ( $R$ ) разбивается на ряд микроопераций: суммирование мантисс чисел, нормализация и т.д. Схемы, выполняющие микрооперации в такте, разделены регистрами, в которые заносятся значения операндов и в которых фиксируются результаты.

Оперативная память коррелятора объемом 480 Кбит, выполненная на микросхемах К565РУ1А динамического типа, разделена на два идентичных блока, каждый из которых работает со своим АУ. Все основные операции — корреляция, вывод, обнуление ОП — проходят на фоне регенерации памяти. После окончания корреляции следует автоматический вывод коррелограмм в канал воспроизведения.

Сейсмостанции "Прогресс-2ВС" оснащаются знаковым просмотрным коррелятором ЗКП-01, особенностью которого является то, что он оперирует не с числами, соответствующими значениям зарегистрированных и управляющих сигналов, а с их знаковыми аналогами.

Для двух сигналов, представленных в знаковой форме, нахождение ФВК сводится к определению числа совпадения полярностей, знаков на интервале, равном длительности управляющего сигнала. Поэтому значения функции взаимной корреляции находятся как вероятность совпадения знаков двух функций (см. подразд. 1.5) :

$$R = 2P(t) - 1, \quad (2.14)$$

где  $P(t)$  — вероятность совпадения знаков управляющего и зарегистрированных сигналов.

Для дискретных функций, представленных  $N$  отсчетами, оценка ФВК

$$\hat{R}_K = \frac{2P}{N} - 1 = \frac{2}{N} \left( P - \frac{N}{2} \right). \quad (2.15)$$

В выражении (2.15) величину  $2/N$  можно рассматривать как масштабный множитель, который для управляющего сигнала заданной длительности является постоянным и который можно опустить. Поэтому оценку ФВК получим в виде

$$\hat{R}_K = P - N/2. \quad (2.16)$$

В соответствии с (2.16) для определения ФВК необходимо посчитать число совпадений знаков опорного сигнала и сейсмической информации на интервале корреляции и из него вычесть постоянную составляющую, равную половине числа выборок управляющего сигнала.

В корреляторе ЗКП-01 реализован первый последовательный способ нахождения ФВК, который при знаковом представлении сигналов предпочтительнее остальных. Кроме того, он не требует запоминания промежуточных сумм функций взаимной корреляции.

Блок-схема коррелятора показана на рис. 23. Основой коррелятора является арифметическое устройство 3. Для сокращения времени обработки оно выполнено 48-канальным с параллельной обработкой всех каналов, которая контролируется устройством управления 6. Информация с блока логики 1 станции поступает в демультиплексор 2, где знаковые разряды распаковываются по 48 каналам, заполняя память АУ. В корреля-

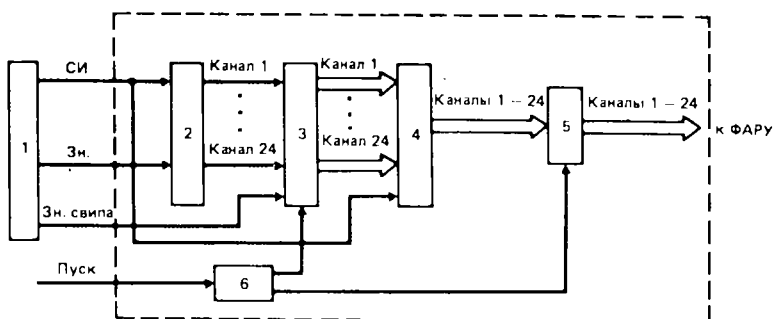


Рис. 23. Блок-схема знакового экспресс-коррелятора ЗКП-01

ляторе принят режим работы с последовательной организацией памяти (см. рис. 21), при котором в течение времени одной выборки просматриваются все ячейки памяти опорного сигнала и сейсмической информации одновременно по 48 каналам. Совпадение знаков подсчитывается канальными счетчиками, и 12 старших разрядов подаются на мультиплексор 4 коррелятора. На этом в АУ заканчивается вычисление одного значения ФВК и сейсмическая информация сдвигается на интервал дискретизации для вычисления следующего значения ФВК. Вычитание постоянной составляющей  $N/2$  производится вычитателем 5 в общем канале за мультиплексором, так как она определяется числом выборок опорного сигнала и неизменна для всех каналов.

Работа коррелятора организована таким образом, что демультимплексация, корреляция, мультиплексация и вычитание постоянной составляющей совмещены во времени. В то время как в АУ выполняется вычисление значения ФВК с номером  $k$ , в ДМ осуществляется демультимплексация данных с индексом  $k + 1$ , а в блоках 4 и 5 упаковывается и вычитается постоянная составляющая из результатов обработки информации с номером  $k - 1$ .

Получение 48-канальных импульсных сейсмограмм производится в реальном масштабе времени с задержкой на длительность управляющего сигнала. Уменьшение объема информации за счет использования только знака позволило сделать коррелятор весьма компактным и экономичным по питанию.

Сравнение результатов корреляции, выполненных СК-24 и ЗКП-01 по одним и тем же исходным данным, показывает, что первые вступления более четко прослеживаются по данным СК-24, что же касается выделения последующих волн, то при правильно подобранных параметрах воспроизведения различия в выделении осей синфазности несущественны.

Перспективы развития отечественной аппаратуры для невзрывной сейсморазведки связаны с увеличением ее канальности, созданием корреляторов с регистрацией результатов на магнитной ленте для станции

“Прогресс”, использованием запоминающих устройств большой емкости с малым временем обращения и повышением надежности устройств для накопления и корреляционной обработки данных.

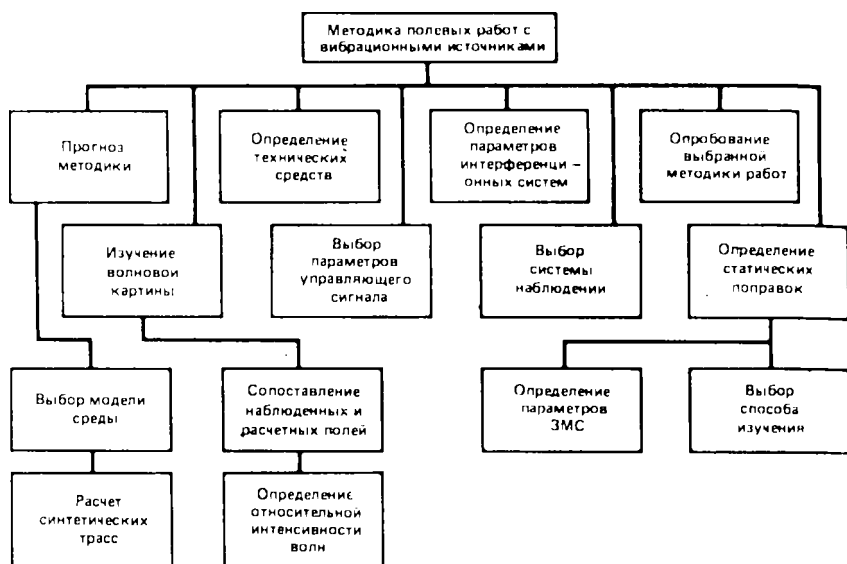
### 3. МЕТОДИКА ПОЛЕВЫХ РАБОТ

В общем комплексе сейсморазведочных работ с вибрационными источниками колебаний выбор и обоснование методики полевых работ — один из ключевых этапов, во многом определяющий качество получаемых материалов и результаты съемки. Методика полевых работ строится с расчетом обеспечения максимально возможных отношений сигнал/помеха на исходных полевых записях, которые были бы достаточными для выделения и прослеживания целевых волн на временных или глубинных разрезах. При выборе полевой методики принимаются во внимание следующие факторы: геологические и методические задачи, особенности вибраторов как источников сейсмических колебаний (ограниченность амплитуд возбуждаемых колебаний и возможность генерирования волн заданной формы в определенной полосе частот), поверхностные и глубинные сейсмологические условия, обстановка в районе работ (условия передвижения транспорта по профилям, свобода размещения вибраторов на пунктах возбуждения колебаний, уровень микросейсм и промышленных помех, близость населенных пунктов, дорог и т.д.), а также результаты предыдущих работ с невзрывными источниками.

На основании анализа всех этих данных определяются содержание и объем опытных работ и выбираются основные элементы методики.

Значительная роль при их проведении отводится изучению особенностей наблюдаемых волновых полей, а также расчету, опробованию и оценке параметров интерференционных систем, систем наблюдений, управляющих сигналов и т.д. с учетом характера решаемых задач и особенностей строения объектов разведки. При этом желательно иметь или составить тонкослоистую сейсмогеологическую модель изучаемых геологических комплексов, чтобы обоснованно подойти к выбору полосы частот возбуждаемых колебаний. К настоящему времени накоплен достаточно большой опыт проведения работ с вибрационными источниками, показывающий возможность успешного решения вопросов по выбору оптимальной полевой методики, обеспечивающей получение качественных результатов в районах, характеризующихся самыми различными сейсмологическими и наземными условиями (см. разд. 5).

Последовательность этапов проведения работ и выбора элементов полевой методики показана на рис. 24.



**Рис. 24. Схема выбора и обоснования полевой методики**

### **3.1. ВОЛНОВЫЕ ПОЛЯ, ВОЗБУЖДАЕМЫЕ ВИБРАЦИОННЫМИ ИСТОЧНИКАМИ, И ИХ ОСОБЕННОСТИ**

Под действием сосредоточенной, переменной во времени вертикальной силы на поверхности земного полупространства возбуждаются объемные (продольные и поперечные) и поверхностные волны. При этом около 60 % энергии идет на образование поверхностных волн, 20–25 % — поперечных и только 7–10 % — продольных. Излучение энергии в среду происходит в соответствии с характеристикой направленности источников. Для продольных волн она имеет вид окружности, центр которой лежит на вертикальной оси, совпадающей с направлением действия силы, а верхняя ее точка соприкасается с местом приложения нагрузки к земной поверхности. Для поперечных волн характеристика направленности имеет более сложный вид с максимумами излучения под углами, определяемыми отношениями скоростей распространения продольных и поперечных волн. Экспериментальные характеристики близки к теоретическим, что было показано на опытах в ряде районов [15, 26].

Вибрационные источники являются поверхностными излучателями, поэтому возбуждаемые ими волновые поля типичны для невзрывных наземных установок [15, 19, 32]. На монтажах коррелограмм-сейсмограмм при одиночных посылках вибраторов регистрируется довольно сложное волновое поле, в котором преобладают поверхностные волны.



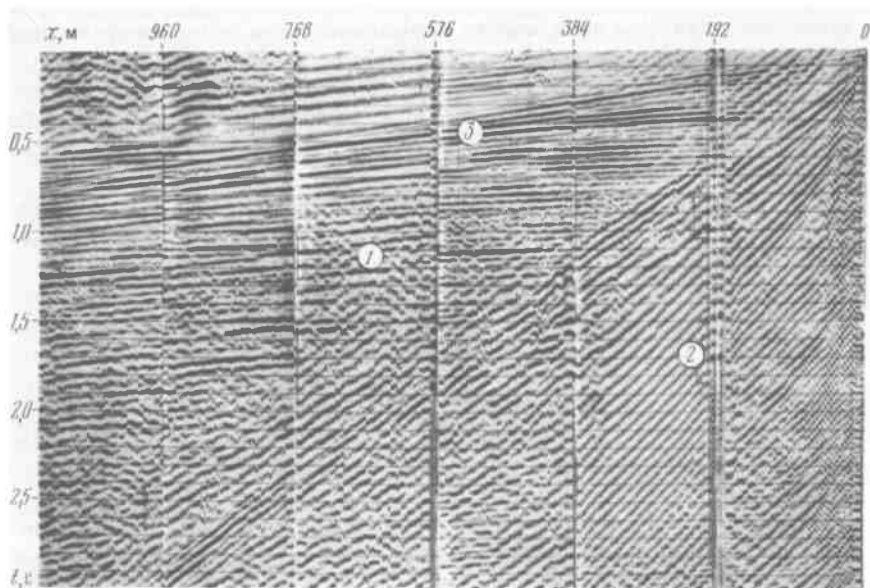


Рис. 25. Типичное волновое поле, возбуждаемое вибрационным источником

Наряду с ними при наличии неглубоко залегающей преломляющей границы выделяются и объемные преломленные, отраженные и отраженно-преломленные волны.

В общем волновые поля от вибрационных источников характеризуются следующими особенностями (рис. 25).

Непосредственно от пункта возбуждения в виде расходящегося цуга очень интенсивных колебаний следятся поверхностные волны 2 с кажущимися скоростями  $v_k = 0,2 \div 1$  км/с и видимыми частотами, определяемыми низкочастотной частью управляющего сигнала. Выделение на их фоне отраженных волн 1 обычно невозможно, что делает необходимым применение специальных методических приемов для временного, частотного и пространственного их разделения и разрешения.

Как правило, поверхностные волны имеют максимумы спектров на частотах до 15–18 Гц, поэтому для их ослабления достаточно эффективно смещение вверх полосы частот управляющих сигналов. С увеличением расстояния от пункта возбуждения наблюдается снижение интенсивности и видимых частот поверхностных волн, вследствие чего соответствующие им импульсы растягиваются во времени, занимая все большую область на плоскости годографа.

В первых вступлениях на монтажах выделяются преломленные волны 3, связанные с неглубокими горизонтами разреза. В ряде случаев они могут быть помехами, препятствуя прослеживанию отраженных волн на больших удалениях от пунктов возбуждения. Преломленные

волны представлены практически прямолинейными осями синфазностей с кажущимися скоростями  $v_k = 1,2 \div 2,5$  км/с и видимыми частотами 20—30 Гц. Интенсивность преломленных волн существенно ниже, чем поверхностных, и по мере удаления от пункта возбуждения они или слабо затухают, или сменяются преломленными волнами от более глубоких горизонтов.

В районах с наличием верхней преломляющей границы, залегающей на глубинах до 0,5—0,8 км, в окне между поверхностными и преломленными волнами регистрируются достаточно низкочастотные отраженно-преломленные волны с кажущимися скоростями  $v_k = 4 \div 5$  км/с. Интенсивность их значительна и они мешают прослеживанию отраженных волн.

Наряду с регулярными волнами на вибросейсмических записях регистрируются и нерегулярные — случайные помехи (микросейсм). При корреляционной обработке уровень их существенно снижается, тем не менее весьма часто они появляются и на коррелограммах, снижая надежность прослеживания отраженных волн и уменьшая отношение сигнал/помеха.

Микросейсм имеют в основном ветровое и промышленное происхождение и обусловлены колеблющимися деревьями и растительностью,двигающимся транспортом и пешеходами, а также интерференцией объемных и поверхностных волн. Кроме того, шум на профиле создают работающие вибраторы и другая техника. Большая часть энергии микросейсм сосредоточена в сейсмическом диапазоне частот, и она попадает в полосу частот управляющего сигнала. Уровень микросейсм зависит от целого ряда внешних факторов и резко меняется в течение суток, времен года и т.д. Чаще всего радиус корреляции микросейсм невелик и не превышает реализуемых на практике расстояний между сейсмоприемниками в группе. Тем не менее в процессе работ для эффективной борьбы с микросейсм необходимо определять их интенсивность и в пространстве, и во времени.

На волновых зондах отраженные волны представлены малоинтенсивными колебаниями с высокими кажущимися скоростями,  $10 \div 15$  км/с  $\leq v_k \leq \infty$ , и видимыми частотами, зависящими от вида управляющего сигнала и его параметров, поглощающих свойств разреза и условий взаимодействия вибратора с грунтом. Видимые частоты отраженных волн при стандартных ЛЧМ сигналах располагаются в основном в полосе 20—40 Гц. Интенсивность отраженных волн меняется в довольно широких пределах, оставаясь, как правило, меньше интенсивности помех. В связи с этим наиболее благоприятной областью для выделения и прослеживания отражений является поле годографа, заключенное между поверхностными и преломленными волнами.

В целом волновые поля, возбуждаемые вибрационными и импульсными невзрывными источниками, при визуальной оценке представляются идентичными, отличаясь в некоторой степени видимыми частотами, временами регистрации волн и характером записи. Однако между ними

есть принципиальные отличия, обусловленные различной природой колебаний, прослеживаемых на коррелограммах и сейсмограммах импульсного возбуждения, а также специфическими особенностями вибрационной сейсморазведки. Трассы на коррелограммах представляют собой последовательности значений функций взаимной корреляции зарегистрированных и управляющего сигналов, — в идеале нуль-фазовые колебания. Трассы на импульсных сейсмограммах отражают собственные колебания точек среды в месте расположения сейсμοприемников, и они являются минимально-фазовыми. Вследствие этого моменту прихода отражений соответствуют на коррелограммах экстремальные значения функции взаимной корреляции, а на импульсных сейсмограммах — вступления волн, которые из-за фона помех зачастую не выделяются, и отраженные сигналы коррелируются чаще всего по последующим интенсивным фазам, что делает возможным их прослеживание на фоне помех. Поэтому времена прихода волн на коррелограммах и сейсмограммах не совпадают между собой, что необходимо учитывать при анализе и сопоставлении данных, а также при увязке материалов вибрационной и импульсной сейсморазведки.

Возможны также различия частотных составов волн, так как колебания на коррелограммах тяготеют к средним частотам управляющих ЛЧМ сигналов, которые могут отличаться от собственных частот колебаний частиц грунта, совершаемых под действием интенсивных импульсных нагрузок. Спектры регулярных волн, определенные в конечном временном окне на коррелограммах, носят резонансный характер, обусловленный в основном структурой ФВК, видимая частота основного максимума которой при отсутствии поглощения и других помех соответствует средней частоте управляющего сигнала.

При рассмотрении особенностей волновых полей вибрационной сейсморазведки следует отметить существование специфических помех, обусловленных нелинейными искажениями в системе вибратор — грунт, особенно на низких частотах при значительных перемещениях излучающей плиты, и побочными максимумами корреляционных функций. Помехи, вызванные нелинейными искажениями, имеют частоты, кратные основным частотам управляющего сигнала. Наиболее интенсивными оказываются составляющие (гармоники), имеющие удвоенную частоту. Например, сигнал развертки с частотой 48–10 Гц будет сопровождаться гармониками в полосе 96–20 Гц. В результате на сейсмограммах, помимо основных волн, будут наблюдаться гармонические составляющие — волны-спутники, образующие длительные, неразрешенные цуги относительно более высокочастотных колебаний. Для сигналов с полосой частот более одной октавы времена вступления волн-спутников относительно основного колебания определяются формулой [15]

$$t_H = \frac{(\eta - 1) T f_{\min}}{f_H - f_K}, \quad t_K = \frac{(\eta - 1) f_{\max} T}{2(f_H - f_K)}, \quad (3.1)$$

где  $t_n, t_k$  — начальное и конечное время регистрации волн-гармоник;  $T$  — длительность опорного сигнала;  $\eta$  — номер гармоники;  $f_{\max}, f_{\min}, f_n$  и  $f_k$  — максимальная, минимальная, начальная и конечная частоты управляющего сигнала.

Амплитуда гармоник достигает максимума на времени

$$t \approx (t_n + t_k) / 2.$$

Из (3.1) следует, что при сигналах с разверткой в сторону высоких частот ("вверх") времена вступлений волн-спутников будут отрицательными, т.е. они будут наблюдаться на сейсмограммах до вступления основных волн. При работе с сигналами с разверткой в сторону низких частот ("вниз") величина  $t_n$  становится положительной и волны-спутники будут накладываться на записи полезных отражений и интерферировать с ними.

В вибрационной сейсморазведке при  $T \leq 16$  с чаще всего применяют управляющие сигналы с разверткой "вверх", несмотря на то, что более устойчивым для вибраторов является режим с разверткой "вниз". В этом случае необходимо выбирать такую длительность  $T$  управляющего сигнала, при которой волны-спутники имели бы времена  $t$ , большие времен прихода целевых волн.

Побочные максимумы корреляционных функций представлены на записях или осями синфазностей, параллельными сильным волнам, прослеживаемым в начальной части сейсмограмм, или шумами, повышающими интенсивность нерегулярных помех. Суммирование по ОГТ снижает шумы корреляционного преобразования на временных разрезах в  $k\sqrt{n}$  раз, где  $n$  — кратность ОГТ, а  $0,5 \leq k \leq 0,7$ .

Таким образом, волновые поля вибрационной сейсморазведки характеризуются определенными чертами сходства и отличия от полей импульсной сейсморазведки. Это делает необходимым их изучение при постановке работ с вибраторами даже в том случае, если ранее на этой площади проводилась разведка с импульсными источниками. Объемы и содержание опытных работ по изучению волновых полей определяются для каждого района индивидуально в зависимости от решаемых задач, сейсмологических условий и результатов предыдущих исследований.

### 3.2. ВЫБОР ПАРАМЕТРОВ УПРАВЛЯЮЩИХ СИГНАЛОВ

В настоящем параграфе основное внимание уделено линейно-частотно-модулированным управляющим сигналам, получившим наибольшее применение в вибрационной сейсморазведке.

Обоснованный выбор характеристик управляющих сигналов имеет исключительно важное значение, от него во многом зависит эффективность проводимых работ, полнота и однозначность получаемых результатов.

Параметры квазигармонических управляющих сигналов выбирают, руководствуясь общетеоретическими представлениями об особенностях их корреляционных функций и результатами опытных работ, выполняемых в конкретных сейсмогеологических условиях. В подразд. 3.1 было показано, что для обеспечения хорошей разрешенности результирующих записей на коррелограммах и значительного динамического диапазона в сочетании с высоким отношением сигнал/помеха необходимо применение широкополосных сигналов с относительно высокими средними частотами, имеющими большую длительность и сглаженные огибающие. Близки к оптимальным сигналы, у которых частоты меняются не менее чем на 2—2,5 окт, что обеспечивает быстрый спад амплитуд в пределах основного максимума корреляционной функции. Однако практическая реализация таких сигналов очень часто сопряжена с определенными трудностями, обусловленными ограниченными возможностями источников и регистрирующей аппаратуры, сетевыми наводками и др.

Кроме того, использование сигналов с прямоугольными, равномерными спектрами в заданной полосе частот не приводит к желаемым результатам: максимумы спектров отраженных волн имеют частоты меньшие, чем средние частоты управляющих сигналов, так как колебания, возбуждаемые вибратором и регистрируемые сейсмоприемниками, имеют различные частотные характеристики, особенно в области высоких частот. Вызвано это следующими причинами:

- 1) наличием резонансных явлений в вибраторе и в системе вибратор — грунт;
- 2) поглощением высокочастотных составляющих волн в процессе распространения волн;
- 3) регистрацией скоростей смещения волн, а не их ускорений, т.е. видом преобразователя колебаний.

Совместное влияние этих факторов приводит к тому, что амплитудно-частотные спектральные характеристики волн (АЧХ), зарегистрированные даже в непосредственной близости от излучающей плиты вибратора, имеют четко выраженный резонансный характер (рис. 1). При этом преобладающее влияние на форму АЧХ оказывают резонансные явления, а остальные факторы сказываются на частотах, больших резонансных.

Резонансный характер имеют также спектры волн, регистрируемых при профильных работах, о чем указывалось ранее.

Для примера на рис. 26 приведены обобщенные спектральные характеристики прямых и отраженных волн, зарегистрированных при работах с вибраторами в районе северо-западной периферии Астраханского свода. Прямые (проходящие) волны имеют максимум на частоте ~40 Гц. Отраженные волны, относящиеся к горизонтам палеозойского комплекса отложений, имеют резонанс в полосе частот 20—35 Гц, и их спектры характеризуются более узкой эффективной шириной за счет поглощения волн в среде.

Резонансный характер взаимодействия вибратора с грунтом обуслов-

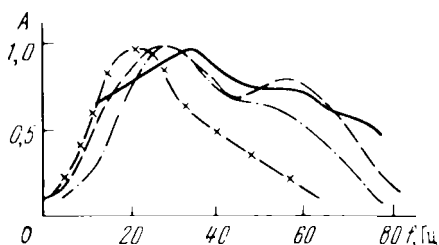


Рис. 26. Спектры волн, зарегистрированных в одном из районов Прикаспийской впадины (по материалам Астраханской ГЭПГО "Центргеофизика")

лен физическими процессами, происходящими при передаче нагрузок, и для большинства вибраторов наблюдается в левой части сейсмического диапазона, что подтверждено экспериментальными работами, выполненными в различных районах [29].

Вопросы поглощения волн в реальных средах изучались рядом исследователей [26], и поэтому они здесь не рассматриваются. Отметим лишь, что наибольшее влияние на частотный состав регистрируемых волн оказывает верхняя часть разреза, особенно зона малых скоростей, через которую волны в наземной сейсморазведке проходят дважды.

Зависимость частотного состава регистрируемых волн от вида преобразователя объясняется следующим.

Используемые в сейсморазведке сейсмоприемники являются датчиками скоростей смещения частиц грунта, что приводит к зависимости выходного напряжения от частоты регистрируемых волн при вибрационном возбуждении колебаний.

Действительно, вибратор работает в режиме

$$a = a_0 \cos \omega t,$$

где  $a_0$  — амплитуда ускорения. При этом амплитуда скорости будет частотно-зависимой величиной

$$v_0 = a_0 / \omega,$$

что и объясняет уменьшение напряжения на выходе сейсмоприемника по мере увеличения частоты управляющего сигнала. Очевидно, что для пространства  $v_0$  ускорение и сила, развиваемая вибратором, должны линейно возрастать с частотой.

Для повышения реальной разрешающей способности необходимо расширять спектры зондирующих сигналов путем целенаправленной закачки в среду волн требуемого частотного состава. В этом отношении вибрационная сейсморазведка на ЧМ сигналах уникальна по своим возможностям и существенно превосходит импульсную невзрывную сейсморазведку. Выравнивание спектров регистрируемых сигналов производится путем использования на стадии полевых работ нелинейных (составных или комбинированных) управляющих сигналов, а при обработке — путем выравнивания, "арирования" записей и их "весовой"

фильтрации. Параметры нелинейных управляющих сигналов выбирают на основании анализа результатов опытных работ, определения спектров зарегистрированных колебаний и их отличий по частоте от управляющих сигналов.

Динамическая разрешенность вибросейсмических данных определяется возможностью выделения полезных волн на фоне помех, наиболее сильными из которых зачастую являются шумы корреляционного преобразования, и зависит от фона корреляционных шумов в "дальней" области корреляционной функции. Снижение уровня этих шумов — один из главных путей повышения динамической разрешенности.

Предельный динамический диапазон ВСМ

$$D_n = 20 \lg [r(0) / r(\tau)] \quad (3.2)$$

где  $r(0)$  и  $r(\tau)$  — автокорреляционная функция управляющего сигнала при нулевом и конечном временных сдвигах.

Реальный динамический диапазон  $D_p$  получают аналогично (3.2) путем замены ФАК на ФВК между управляющим и регистрируемым сигналами. Реальный динамический диапазон всегда меньше предельного.

Увеличение динамического диапазона ВСМ достигается использованием ряда методических приемов: снижением уровня регулярных помех (поверхностных волн) путем выноса пунктов возбуждения, группированием источников и приемников, использованием комбинированного возбуждения, а также использованием ВЧ фильтров на записи, применением АРА и др.

К настоящему времени уже накоплен значительный опыт проведения работ с вибрационными источниками, который позволяет сформулировать основные положения по выбору параметров управляющих ЧМ сигналов.

Наименьшая частота управляющего сигнала  $f_{\min}$  должна быть выше собственной частоты применяемых сейсмоприемников не менее, чем на 1—2 Гц, достаточно стабильно и синфазно возбуждаться группой вибраторов, соответствовать спектру наиболее низкочастотной целевой отраженной волны и, по возможности, обеспечивать ослабление низкоскоростных поверхностных волн-помех.

Одновременное выполнение этих требований не всегда оказывается возможным. Поэтому в каждом конкретном случае, исходя из характера волновой картины и спектров полезных и мешающих волн, принимаются решения о выборе минимальной частоты управляющего сигнала. Например, при интенсивных поверхностных волнах целесообразно несколько увеличить минимальную частоту сигналов для ослабления помех. Напротив, при разведке глубоких границ раздела, отраженные волны от которых обогащены низкочастотными составляющими, приходится уменьшать частоту сигнала, добиваясь необходимого ослабления низкочастотных помех другими методическими приемами.

Наибольшая частота управляющего сигнала  $f_{\max}$  должна быть ниже

среза аляйсингового фильтра сейсмостанции, который определяется интервалом дискретизации (62,5 Гц при  $\Delta t=4$  мс, 125 Гц при  $\Delta t=2$  мс и т.д.), обеспечить необходимую полосу частот управляющего сигнала, по возможности 2–2,5 окт, для получения достаточно разрешенных записей на коррелограммах. Выполнение последнего условия также связано с определенными трудностями. Поэтому в отдельных случаях приходится идти на некоторое уменьшение полосы управляющего сигнала. Практическое применение получило несколько способов определения частотного диапазона управляющего сигнала. Они основаны или на переборе управляющих сигналов различного частотного состава, или на применении широкополосных управляющих сигналов и фильтрации зарегистрированных колебаний.

Отметим один из способов, особенностью которого является возможность его апробации на этапе проектирования до проведения полевых работ. Он сводится к построению синтетических трасс по данным акустического каротажа. В качестве исходного задающего импульса используются автокорреляционные функции управляющих сигналов с различными начальными и конечными частотами. Ими моделируются трассы коррелограмм соответствующих управляющих сигналов. Сравнивая их, можно определить оптимальный по полосе частот опорный сигнал для прослеживания и разрешения требуемых отражающих горизонтов. При определенных достоинствах этот способ огрaчен тем, что в районах исследований часто отсутствуют данные акустического каротажа, и тем, что он практически не учитывает влияния ВЧР.

Важное значение в вибрационной сейсморазведке имеет выбор длительности сигнала. Вместе со средней частотой управляющего сигнала она определяет количество посылаемой в среду энергии, а следовательно, глубину разведки и помехоустойчивость по отношению к микросейсмическому фону. Ограничивают длительность стремление к повышению производительности работ, технические возможности и допустимые объемы данных, которые могут быть восприняты накопителями сейсмостанции и обрабатываемыми ЭВМ. В большинстве случаев длительность сигналов выбирается в пределах 6–16 с, что обеспечивается существующими техническими средствами.

При использовании управляющих сигналов с разверткой "вниз" применяют сигналы относительно большей длительности, чтобы волны-спутники регистрировались за пределами областей регистрации полезных отражений. Для снижения уровня корреляционных шумов повсеместно используют управляющие сигналы со сглаженными спектрами, что достигается плавным увеличением и уменьшением амплитуд колебаний в начале и конце посылки за время 0,25–1 с. Увеличение этого интервала нежелательно, так как оно приводит к уменьшению энергии, передаваемой излучателем грунту.

В последнее время начал применяться один из видов нелинейных управляющих сигналов — комбинированные сигналы, посылки или раз-



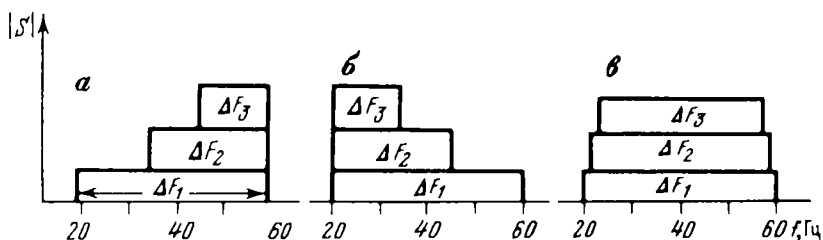


Рис. 27. Комбинированные управляющие сигналы для повышения временной разрешенности волн (а), увеличения глубины разведки (б) и уменьшения корреляционных шумов (в)

вертки для сглаживания и исправления формы огибающей, исключения излучения колебаний на частотах помех, а также для увеличения доли излучаемой энергии в заданном частотном диапазоне. Сегменты комбинированных сигналов выбираются, исходя из задач и конкретных условий проведения работ, на основе линейно-частотно-модулированных сигналов. Например, при сетевых наводках комбинированный сигнал может состоять из двух сегментов с граничными частотами 18–48 и 52–80 Гц.

Методика комбинированных разверток заключается в том, что обработка каждого физического наблюдения проводится не одним вибрационным сигналом с неизменными параметрами во всем цикле возбуждения, а с помощью трех и более сигналов, различающихся по частотному диапазону и (или) длительности, чаще первое. Каждая развертка или сумма одинаковых разверток (режим накопления) составляет отдельную виброграмму. В результате на каждом пункте возбуждения получают столько виброграмм, сколько различных по параметрам разверток использовалось при возбуждении.

На этапе обработки каждая виброграмма коррелируется со своим управляющим сигналом и затем коррелограммы от разных разверток, относящиеся к одному пункту возбуждения (ПВ), суммируются, образуя результирующую коррелограмму.

Частотные диапазоны и длительности разверток выбираются в зависимости от поставленных задач: компенсация частотно-зависимого поглощения, увеличение глубинности или уменьшение фона корреляционных шумов. Так, при решении задач, связанных с разрешением волн, частотные диапазоны отдельных разверток, составляющие весь цикл возбуждения на каждом ПВ, выбираются таким образом, чтобы сформировать суммарный сигнал с повышенной спектральной плотностью на высоких частотах (рис. 27).

Использование разверток с разными длительностями также может явиться дополнительным средством увеличения энергии на высоких частотах, если максимальную длительность применить к развертке, имеющей наибольшее значение  $f_n$ .

При необходимости увеличения глубинности разведки частотные

диапазоны отдельных разверток выбираются так, чтобы сформировать сигнал с асимметричным суммарным спектром и с концентрацией энергии на низких частотах (см. рис. 27). И в этом случае одна из разверток должна быть наиболее широкополосной, с учетом возможностей вибраторов возбуждать низкие частоты.

В случае необходимости уменьшения фона корреляционных шумов, что, как правило, связано с повышением глубинности исследований, и выделения малоамплитудных отражений частотный диапазон выбирается таким образом, чтобы сформировать симметричный ступенчатый спектр (см. рис. 27). При этом ширина ступенек выбирается в пределах 1–5 Гц. Оптимальная ширина ступенек — 2–3 Гц. При формировании ступенчатого спектра сужение разверток приводит к обратному действию — разрастанию корреляционных шумов. Однако это разрастание в определенной степени компенсируется треугольной формой спектра.

Следует отметить, что ширина ступенек имеет однозначную связь с уровнем фона корреляционных шумов (с местоположением участков наибольшего подавления шумов) и на практике оптимизируется на основе знания волновой картины и моделирования суммарных управляющих сигналов на уровне ФАК. Относительное ослабление корреляционных шумов с помощью этого варианта может составлять от 10 до 20 дБ.

Отработка профиля по методике комбинированных разверток может проводиться различно. Один из вариантов предусматривает следующий цикл операций. Группа вибраторов на каждом пункте возбуждения ПВ производит  $n_1$  воздействий с параметрами развертки  $\Delta F_1 = f_{\kappa 1} - f_{\pi 1}$  и  $T_1$  и на сейсмостанции регистрируют виброграмму  $v_1$ . Затем та же группа вибраторов на том же ПВ производит  $n_2$  воздействий с иными параметрами сигнала  $\Delta F$  и  $T_2$  и на сейсмостанции регистрируют виброграмму  $v_2$  и т.д. Таким образом, каждому пикету ПВ соответствует  $n$  виброграмм  $v_1, v_2, v_3, \dots, v_n$ . Общее число воздействий (накоплений) на каждом ПВ, как правило, выбирают равным числу накоплений при работе с одной широкополосной разверткой, т.е.  $n = n_1 + n_2 + n_3 + \dots + n_i$ .

После обработки  $n$  воздействий группа вибраторов перемещается на другой ПВ и в той же последовательности отрабатывает цикл возбуждений. Возможна также реализация этой методики и при перемещении вибраторов на базе группирования  $D$ .

Наиболее технологически оправдана методика комбинированных разверток, включающая три развертки одинаковой длительности. Число накоплений для каждой из них ( $n_1 = n_2 = n_3$ ). В принципе могут быть использованы и другие сочетания параметров управляющих сигналов и числа их накоплений.

Экспресс-анализ комбинированных разверток в поле можно проводить на станции "Прогресс-3", выполняя суммирование коррелограмм, соответствующих виброграммам от разверток с разными параметрами ( $v_1, v_2, \dots, v_n$ ). При этом возможно контрольное воспроизведение от-

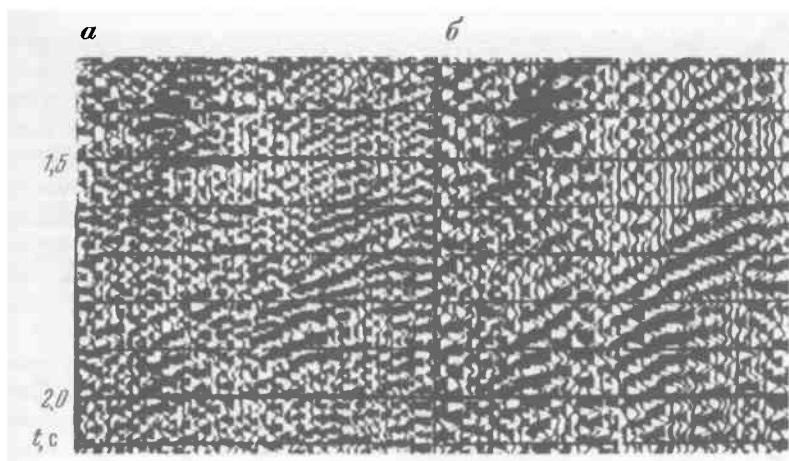


Рис. 28. Пример повышения разрешенности целевых волн (по данным ВУГРЗ)

дельных коррелограмм по команде ВПС и без нажатия кнопки "Сброс" (Прогресс-3). Опыт применения способа комбинированных управляющих сигналов показывает, что при правильно выбранных сигналах он обеспечивает получение материалов лучшего качества, чем при стандартных ЛЧМ сигналах.

В качестве иллюстрации эффективности применения методики комбинированных разверток для повышения временной разрешенности целевых отражений на рис. 28 показаны коррелограммы, полученные по стандартной методике (б) и по комбинированной методике (а). В случае комбинированных разверток видимая частота интерферирующих целевых отражений ( $t=1,5 \div 2$  с) вдвое выше, чем при стандартном сигнале, а достигнутое сжатие импульсов позволяет детализировать зоны интерференции.

На рис. 29 сравниваются временные разрезы, характеризующие возможности методики комбинированных разверток (МКР) для повышения геологической информативности вибросейсмической разведки в районах восточного борта Прикаспийской впадины (Жаназол-Синельниковская площадь) и в прибортовой зоне Днепровско-Донецкой впадины.

С целью улучшения прослеживаемости нижнепермских ( $P_1$ ) подсолевых отложений использовалась комбинация разверток с концентрацией суммарной энергии в низкочастотной части исследуемого диапазона  $\Delta F_1 + \Delta F_2 = (16 \div 62) + (16 \div 25)$  Гц. На фрагменте исходного разреза, полученном с широкополосным сигналом  $\Delta f_1 = 16 \div 62$  Гц, наблюдается потеря прослеживаемости отражений от кровли ( $t=1,8$  с) и подошвы ( $t=1,9$  с) аргиллитов и песчаников артинского яруса  $P_{1\text{ар}}$ . Неустойчиво следует отражение  $t=2$  с, связанное с границей верхнекамен-

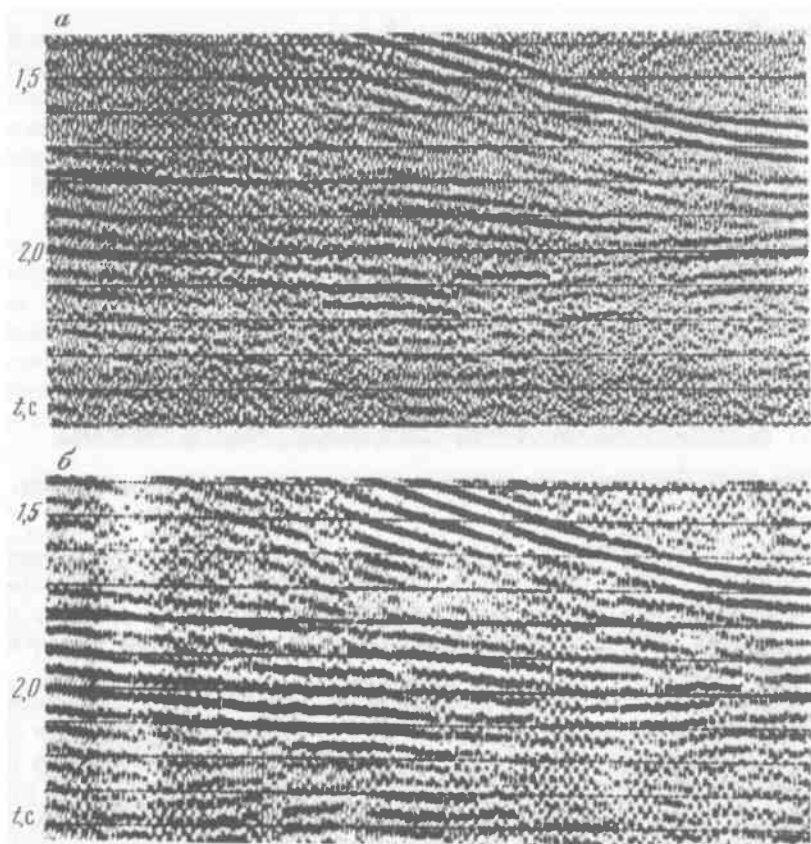


Рис. 29. Пример улучшения прослеживания целевых волн:  
 а — стандартный сигнал; б — комбинированные развертки

ноугольных и нижнепермских терригенных отложений сакмарского яруса  $P_1$ . На разрезе, соответствующем МКР, устойчиво прослеживаются отмеченные целевые отражения в пределах всего разреза. Более динамически выражено отражение от кровли галогенной толщи кунгурского яруса  $P_1k$  на времени  $t \approx 1,4 \div 1,5$  с. Вместе с тем на этом разрезе оси синфазности более многофазны и низкочастотны, что вызвано сужением и смещением эффективной части суммарного спектра в низкочастотную область.

Приведенные примеры подтверждают тот факт, что одновременное решение задач увеличения глубинности и повышения временной разрешенности затруднено.

Методика комбинированных разверток более трудоемка, чем стандартная, и на стадии обработки, так как требует многократной корреля-

ции, уравнивания разночастотных коррелограмм или разрезов, для чего необходимо многократное тестирование. Кроме того, увеличивается расход магнитной ленты. Однако достигаемое повышение качества материала, особенно по критериям временной и динамической разрешенности, оправдывает дополнительные затраты, связанные с использованием методики комбинированных разверток. Следует также отметить, что в настоящее время предложены способы работ с комбинированными управляющими сигналами, не требующие увеличения расхода магнитной пленки. Дальнейшее развитие методики вибрационной сейсморазведки связано с нелинейными управляющими сигналами.

Параметры кодовых последовательностей выбирают, в основном исходя из необходимости получения компактных корреляционных функций с минимально возможными амплитудами побочных максимумов. Интервалы времени между импульсами выбирают, как правило, в пределах частот линейных частотно-модулированных сигналов, что обеспечивает получение компактных корреляционных функций с четко выраженным основным максимумом. Число импульсов в последовательности принимают достаточно большим для повышения отношений сигнал/помеха и снижения уровня корреляционных шумов. Число импульсов доходит до 300–500, что при средней частоте их следования 30 Гц дает общую длительность управляющего сигнала  $T \approx 10 \div 17$  с. В одной из импортных модификаций вибрационной сейсморазведки, основанной на использовании ручных вибротрамбовок ("Mini-Sosie"), средняя частота следования импульсов составляет 10 Гц, число импульсов — до 8000, что дает длительность управляющего сигнала  $T \approx 15$  мин [34].

При использовании дополнительных составных кодовых последовательностей интервал следования импульсов постоянный и равный 15 и 20 Гц. Число импульсов в каждой серии выбирается, как правило, равным 64 или 128, что составляет длительность 4–9 с. При нехватке энергии или очень низких отношениях сигнал/помеха возможно увеличение числа импульсов до 256 при сохранении частоты их следования.

### 3.3. ВЫБОР ОСНОВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ПОЛЕВОЙ МЕТОДИКИ

Современная методика вибрационной сейсморазведки достаточно многообразна и в ее арсенале имеется целый ряд приемов и средств, направленных на повышение качества материала и увеличение отношений сигнал/помеха. Для их успешного применения необходимо знание волновых полей в районе проведения работ, а также особенностей использования различных методических приемов при вибрационном возбуждении колебаний.

#### 3.3.1. Изучение волновой картины

Волновые поля, возбуждаемые вибрационными источниками, изучаются отдельными зондированиями, расположение которых на площади

исследований определяется разнообразием сейсмогеологических условий. Как правило, в районе работ отрабатывается от одного до трех зондирований. В основном работы выполняются в два этапа. На первом — изучаются волны-помехи, а на втором — полезные волны. При получении достаточной информации о параметрах мешающих колебаний ограничиваются первым этапом, выполняя второй в процессе профильных работ.

Колебания возбуждаются одним или двумя вибраторами в точках, отстоящих друг от друга на длину расстановки. Длительность управляющего сигнала выбирается равной 8–16 с, а частотный диапазон — максимально широким и ограничивающимся собственной частотой применяемых сейсмоприемников и частотой среза ФНЧ станции, определяемой принятым интервалом дискретизации сигналов. Накопление посылок при изучении низкоскоростных помех, как правило, не применяется. Для выделения полезных волн на фоне помех возможно накопление 8–10 сигналов. Опробуют также комбинированные управляющие сигналы для определения их влияния на характер волновой картины и на расширение спектров регистрируемых волн.

Колебания принимаются закрепленными расстановками одиночных приборов или групп приборов, расположенных перпендикулярно к линии профиля, шаг между ними 5–10 м при изучении низкоскоростных помех и 30–60 м при изучении отраженных волн. Протяженность зондирования в большинстве случаев принимается равной глубине разведки или несколько меньше ее, в зависимости от характера распределения помех и их интенсивностей на различных удалениях от пункта возбуждения.

Обработка материалов первого этапа заключается в анализе наблюдаемой волновой картины, выделении зон распространения волновых помех и областей, свободных от них, а также в определении кинематических и динамических характеристик волн. Очень важно определение спектрального состава волн для оценки степени их затухания и получения исходных материалов для выбора параметров комбинированных сигналов.

Наряду с регулярными помехами изучаются и нерегулярные. На основании этих данных рассчитываются интерференционные системы, выбираются параметры накопления, система наблюдений, кратность профилирования и т.д.

На полученных результатах основывается методика работ второго этапа. Колебания возбуждаются и принимаются группами вибраторов и сейсмоприемников с рассчитанными параметрами в режиме синхронного накопления колебаний. Управляющие сигналы выбирают так, чтобы они обеспечили освещение разреза на заданную глубину с максимально возможным разрешением целевых волн. Как правило, опробуется несколько управляющих сигналов различной длительности, в том числе и комбинированные. Объемы работ второго этапа колеблются в доста-

точно широких пределах: от нескольких стоянок, выполняемых в различных точках площади, до прохождения профилей с различными интерференционными системами, управляющими сигналами, системами наблюдений и т.д. При этом методические приемы должны быть достаточно контрастными, чтобы имелась возможность оценить их влияние на характер получаемых материалов. Работы весьма трудоемки, однако, они позволяют получить достаточно обширную информацию для обоснованного выбора методики исследований при профильных наблюдениях. Обработка материалов второго этапа должна быть максимально полной, с получением временных разрезов (при отработке профилей), спектральных характеристик волн, оценок качества отражений, степени их прослеживаемости и отношений сигнал/помеха.

По этим данным выбирается оптимальная методика профильных работ, которая уточняется и, если возникает необходимость, корректируется в процессе их выполнения. Учитывая значительные затраты времени на обработку материалов, целесообразно опытные работы проводить заранее, в сезоне, предшествующем выходу с разведкой на новую площадь. Это позволит повысить эффективность работ и качество отработки профилей.

### **3.3.2. Группирование источников и приемников колебаний**

Интерференционные системы вследствие поверхностного возбуждения колебаний играют в вибрационной сейсморазведке исключительную роль, обеспечивая ослабление поверхностных волн и снижение динамического диапазона регистрируемых колебаний, а также подавление нерегулярных помех и повышение отношений сигнал/помеха, что имеет особое значение при использовании относительно слабых невзрывных источников. Поэтому выбору и обоснованию параметров интерференционных систем уделяется в вибрационной сейсморазведке большое внимание. Теория группирования освещена достаточно полно в технической литературе, и при заданных параметрах волн-помех по таблицам, графикам и формулам всегда можно определить оптимальные характеристики интерференционных систем.

Тем не менее при работах на ЛЧМ сигналах имеются определенные особенности применения интерференционных систем:

квазигармоническое возбуждение колебаний позволяет без ограничений пользоваться характеристиками направленности группирования, рассчитанными для гармонических колебаний;

при выборе размеров баз групп не следует подавлять полезные волны в верхней части изучаемого диапазона частот, это может привести к недопустимому ослаблению и без того слабых высокочастотных составляющих отраженных волн.

Параметры интерференционных систем могут быть определены по следующим простым формулам:

длина базы группы

$$D = A v_{\text{к max}} / f_{\text{min}},$$

расстояние между элементами в группе

$$\Delta x = v_{\text{к min}} / (f_{\text{min}} + f_{\text{max}}),$$

число элементов в группе

$$n = D / \Delta x + 1,$$

где  $v_{\text{к max}}$ ,  $v_{\text{к min}}$  — максимальная и минимальная кажущиеся скорости волн-помех;  $f_{\text{min}}$  и  $f_{\text{max}}$  — минимальная и максимальная частоты управляющего сигнала;  $A$  — коэффициент, равный единице при равномерных группах и 1,5 — при треугольных.

Определенные таким образом параметры группы обеспечивают падение спектральных составляющих волн-помех в полосу их непропускания. При этом полезные волны с минимальными кажущимися скоростями и максимальными частотами должны располагаться в пределах основного максимума характеристики направленности на уровне не ниже 0,7. Для определения допустимой базы можно пользоваться или соотношением

$$D_d \leq v_{\text{к отр}} / 4f_{\text{max}},$$

( $v_{\text{к отр}}$  — минимальная кажущаяся скорость отраженной волны), или соответствующими палетками. Из значений  $D$  и  $D_d$  принимается минимальное.

*Пример.* Предположим, что вибратор работает в полосе частот 20–120 Гц, поверхностные волны имеют  $0,3 \text{ км/с} \leq v_{\text{к}} \leq 1 \text{ км/с}$ . Минимальная кажущаяся скорость отраженной волны  $v_{\text{к отр}} = 20 \text{ км/с}$ . В соответствии с приведенными формулами равномерная группа сейсмоприемников для ослабления поверхностных волн должна иметь параметры:  $D = 1000/20 = 50 \text{ (м)}$ ,  $\Delta x = 300/140 \approx 2 \text{ (м)}$ ,  $n = 26$ ,  $D_d = 20\,000/480 \approx 42 \text{ (м)}$ ,  $D \geq D_d$  и база группы выбирается равной 42 м. При ее реализации или несколько сокращается число сейсмоприемников, или уменьшается шаг между ними.

Степень ослабления регулярных волн-помех группами с оптимально рассчитанными параметрами определяется поведением характеристик направленности в полосе непропускания и, в частности, амплитудами промежуточных максимумов. Интенсивность этих максимумов при числе группируемых элементов  $n > 10$  стабилизируется и практически не уменьшается при их увеличении. Расчеты показывают, что в среднем равномерные группы с  $n > 10$  ослабляют помехи на 14 дБ, а треугольные — на 23 — 24 дБ. Экспериментальные данные подтверждают эти оценки. Таким образом, простое увеличение числа группируемых элементов не приводит к пропорциональному ослаблению волн-помех, и в тех случаях, когда нужна большая степень их ослабления, применяют интерференционные системы на возбуждения и приеме колебаний, обеспечивая подавление помех на 37 — 38 дБ.



Повсеместно в вибрационной сейсморазведке используют значительное число сейсмоприемников в группе ( $n > 15 \div 20$ ), что оправдано необходимостью ослабления нерегулярных, шумовых помех, а также усреднения условий приема колебаний. В практике работ с вибрационными источниками наибольшее распространение получили равномерные группы сейсмоприемников, параметры которых рассчитываются на ослабление волн-помех с кажущимися скоростями  $v_k \leq 1000$  м/с. Чаще всего применяются линейно ориентированные группы с расстояниями между сейсмоприемниками 2,5–3,5, базами до 60–70 м, что обеспечивает ослабление поверхностных волн во всей полосе частот управляющих сигналов. При необходимости группирования большого числа приборов, в частности, вследствие сильного фона микросейсм, применяют разнообразные конфигурации групп, в том числе составленные из параллельных линейных рядов со сдвигом одного ряда относительно другого, определяемым или удобствами организации расстановки, или необходимостью дополнительного подавления волны-помехи. Приборы в группах, если их больше 10–12, как правило, электрически соединяют параллельно-последовательно.

Треугольные группы пока широкого применения не получили из-за трудности их реализации и необходимости использования повышенного числа сейсмоприемников. В этой связи несомненный интерес представляют аппаратные разработки, реализующие различные схемы комбинированного группирования и позволяющие использовать один сейсмоприемник в нескольких группах с треугольным или колоколообразным распределением чувствительности при минимальных взаимных влияниях.

Для дополнительного усиления полезных колебаний и ослабления регулярных волн-помех применяют группирование источников колебаний, параметры которых рассчитывают на подавление волн с  $v_k > 1000$  м/с. Наиболее широко используют равномерные и неравномерные группы с расстояниями между точками возбуждения 10–20 м и базами, равными или большими баз групп сейсмоприемников. Наиболее просто реализуются составные интерференционные системы, у которых приемники колебаний образуют равномерные группы, а источники — треугольные. Выше отмечалось, что такие системы могут обеспечить ослабление волн-помех до 40 дБ: что весьма важно, учитывая высокие уровни поверхностных волн.

Практическая реализация разночувствительных групп источников колебаний зависит от числа одновременно работающих на профиле установок. При проведении работ с одним источником в каждой точке группы выполняется различное число посылок, в соответствии с принятой схемой группирования, которые накапливаются в сейсмостанции. При использовании нескольких излучателей возможны более технологичные схемы наблюдений, позволяющие сократить время отработки физической точки и повысить качество получаемых материалов. Реализация

интерференционных систем группами источников в отличие от групп сейсмоприемников может быть однопозиционной и многопозиционной, т.е. изменяющейся в процессе отработки каждой физической точки. Однопозиционная методика основана на размещении группы вибраторов на всей базе интерференционной системы и отработке всего числа синхронных накоплений при неизменном их положении, многопозиционная методика — на перемещении группы вибраторов в пределах базы интерференционной системы. Последняя предпочтительней, так как она позволяет создать эффективные группы с неравномерным распределением чувствительности при ограниченном числе источников.

В случае линейных систем с равномерным распределением чувствительности число позиций  $P=1, 2, 3, \dots$ , обрабатываемых в пределах базы группирования, определяется из равенства  $P=n_{\text{инт}}/N$ , где  $n_{\text{инт}}$  — рассчитанное число элементов интерференционной системы на базе  $D$ ;  $N$  — число группируемых источников.

В случае линейных систем с неравномерным распределением чувствительности число позиций

$$P = \frac{n_{\text{инт}} - (N - \Delta L / d)}{\Delta L / d},$$

где  $d$  — расстояние (шаг) между элементами интерференционной системы источников на базе  $D$ , необходимое для получения заданного отношения сигнал/регулярная помеха;  $\Delta L$  — сдвиг (шаг) между позициями, кратный  $d$ .

Вышеуказанная зависимость пригодна и для описания многопозиционных методик с площадными группами, но в этом случае под  $N$  следует понимать число проекции источников на линию профиля при одной позиции.

Число воздействий на каждой позиции  $n_p = n_{\text{опт}}(N)/P$ , где  $n_{\text{опт}}(N)$  — выбранное оптимальное количество накоплений на каждом пункте возбуждения, зависящее от числа одновременно работающих установок и уровня нерегулярных помех.

Многопозиционная методика реализации интерференционных систем находит все большее применение и уже успешно используется в ряде организаций, обеспечивая получение лучших по качеству материалов.

На рис. 30 приведены разрезы, иллюстрирующие эффективность многопозиционной методики группирования. На разрезе А заметно лучше выделяются горизонты в девоне на временах 2—3 с. Более четко прослеживаются и вышележащие горизонты.

Теоретические оценки и имеющийся опыт показывают, что весьма эффективными оказываются группы вибраторов с квазитрапециедальным распределением чувствительности. Они реализуются путем многократного переезда источников (после каждого возбуждения) при автоматическом режиме работы сейсмостанции. Но частые переезды приво-

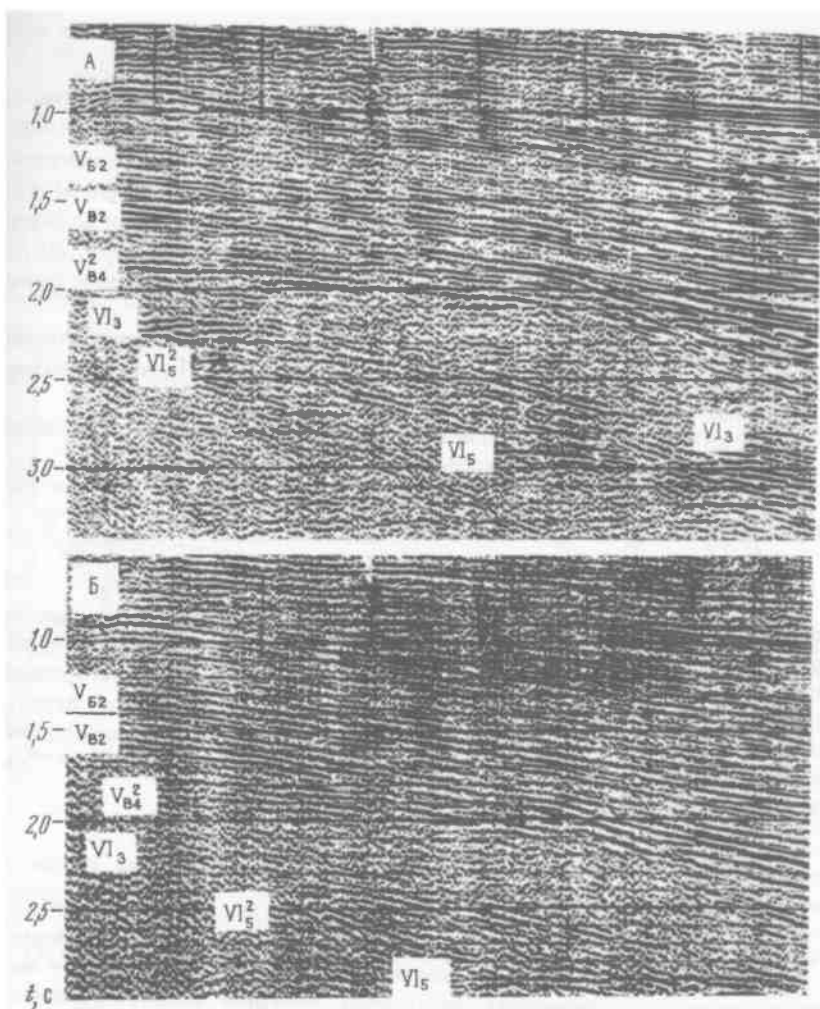


Рис. 30. Сопоставление материалов, полученных по многопозиционной (А) и однопозиционной (Б) методикам группирования источников (по данным ВУГРЗ ПГО "Укргеофизика")

дят к повышенному износу техники и поэтому могут быть оправданы в крайних случаях.

Многопозиционная методика с ограниченным числом перемещений на базе группирования достаточно просто реализуется в полуавтоматическом режиме работы сейсмостанции с остановом после выполнения промежуточного числа накоплений на каждой позиции, что несколько затрудняет работу оператора и незначительно снижает производительность труда. Но эти недостатки компенсируются повышением качества

материала, что особенно проявляется при использовании двух-трех вибраторов.

Для удобства обозначения параметров групп источников последние представляют кодами, состоящими из пяти цифр, обозначающими следующее: первая — число источников  $N_1$ ; вторая, третья — число накоплений  $n$ ; четвертая — число позиций  $P$ ; пятая — коэффициент  $q = \Delta L / d$ , где  $d$  — рассчитанное расстояние между источниками на базе  $D$ , необходимое для получения заданного отношения сигнал/регулярная помеха,  $\Delta L$  — исходное расстояние между источниками в группе, определенное с учетом значений  $d, P, N$ .

Например, код 51222 соответствует системе, работающей с 12 накоплениями; код 40431 отвечает системе, реализующей группу с неоднородной чувствительностью.

База интерференционной системы источников  $D$  в принятых обозначениях описывается зависимостью  $D = \Delta L [d(n-1) + (n-1)]$ .

Время  $T$  отработки одного физического наблюдения (ФН) по описанной методике подсчитывается по формуле

$$T = Pt_{\text{оп}} + (\gamma + n)(T_{\text{упр}} + T_{\text{набл}}) + (P-1)t_{\text{пер}},$$

где  $t_{\text{пер}} = \Delta x / v$ ;  $t_{\text{оп}}$  — время опускания и подъема плиты на каждой позиции;  $T_{\text{упр}}$  и  $T_{\text{набл}}$  — длительность управляющего сигнала и "время слушания";  $v$  — средняя скорость движения вибраторов вдоль профиля с позиции на позицию, м/с;  $\gamma$  — коэффициент, определяющий затраты времени на контрольное воспроизведение,  $\gamma=1$  при воспроизведении 24 каналов,  $\gamma=2$  при воспроизведении 48 каналов (сейсмостанция "Прогресс").

### 3.3.3. Синхронное накопление воздействий

Синхронное накопление применяется для подавления нерегулярных помех и осуществляется одновременно с группированием источников в процессе отработки каждой физической точки. Регистрирующая аппаратура позволяет проводить достаточно большое число накоплений, однако на практике оно редко превышает 8–16 из-за достаточно быстрого снижения эффекта накапливания с ростом их числа и значительных затрат времени. Более того, на практике при небольшом уровне помех стремятся уменьшать число накоплений. При накоплении посылок и одновременной работе нескольких вибраторов особое внимание следует уделять их идентичной и одновременной работе. Обусловлено это тем, что при наличии фазовых и амплитудных расхождений вся система начинает работать как низкочастотный фильтр, уменьшая интенсивность высокочастотных составляющих в спектре отраженных волн, что имеет особо важное значение в связи со стремлением применять высокочастотные управляющие сигналы. Эти вопросы рассмотрены в работе [12].

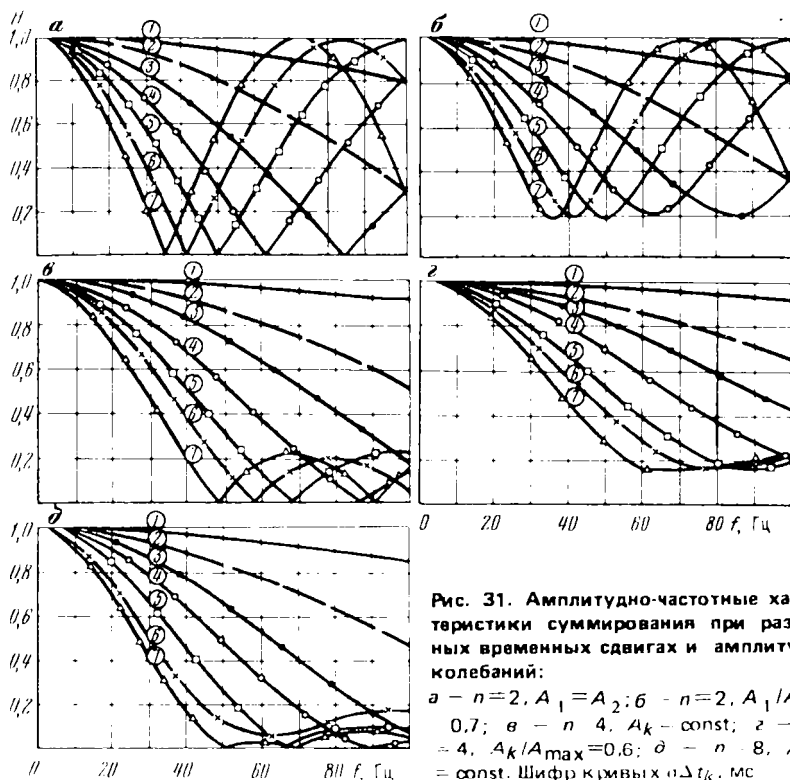


Рис. 31. Амплитудно-частотные характеристики суммирования при различных временных сдвигах и амплитудах колебаний:

а —  $n=2$ ,  $A_1=A_2$ ; б —  $n=2$ ,  $A_1/A_2=0.7$ ; в —  $n=4$ ,  $A_k=\text{const}$ ; г —  $n=4$ ,  $A_k/A_{\text{max}}=0.6$ ; д —  $n=8$ ,  $A_k=\text{const}$ . Шифр кривых  $\sigma \Delta t_k$ , мс

На основе моделирования показано, что неидентичность суммируемых компонент приводит к частотным искажениям сигналов на коррелограммах и ограничению их по частоте. Зависимость между спектрами единичного и суммарного сигналов определяется соотношением

$$P(f) = \sum_{k=1}^n A_k \exp(-2\pi j f \Delta t_k), \quad (3.3)$$

где  $f$  — частота колебаний;  $\Delta t$  — временной разброс между суммируемыми сигналами;  $n$  — число сигналов;  $A_k$  — амплитуды сигналов, их можно рассматривать как амплитудно-частотные характеристики  $H$  суммирования. На рис. 31 приведены некоторые из них, рассчитанные для входных параметров: среднеквадратичное отклонение разброса времен при суммировании  $\sigma \Delta t_k = 1, 2, 3, 4, 5, 6$  и  $7$  мс и изменение амплитуд сигналов от  $A_k = \text{const}$  до  $A_k/A_{k \text{ max}} = 0.6$ . Анализ полученных кривых показывает, что при одинаковых амплитудах суммируемых сигналов увеличение разброса по времени приводит к сужению полосы пропуска-

ния фильтра, которое по уровню 0,7 от максимума характеризуется величинами:

|                                   |       |       |       |       |       |       |
|-----------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| $\sigma \Delta t_k$ , мс. . . . . | 2     | 3     | 4     | 5     | 6     | 7     |
| Частоты, Гц . . . . .             | 70–76 | 46–53 | 35–41 | 28–30 | 22–26 | 19–21 |

Наличие временных сдвигов между суммируемыми колебаниями приводит также к искажению формы импульсов на коррелограммах.

Результаты моделирования показывают, что если суммируемые управляющие сигналы имеют одинаковую амплитуду, но сдвинуты по времени, то интенсивность центрального максимума и его частота на коррелограммах уменьшаются следующим образом:

|                                       |           |           |           |           |          |           |
|---------------------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|----------|-----------|
| $\sigma \Delta t_k$ , мс              | 1         | 2         | 3         | 4         | 5        | 7         |
| Изменения амплитуды, во сколько раз   | 1,02–1,03 | 1,05–1,08 | 1,13–1,18 | 1,20–1,27 | 1,4–1,27 | 2,07–2,14 |
| Уменьшение частоты на $\Delta f$ , Гц |           |           | 1–2       | 6–7       | 6–7      | 8–9       |

При этом наибольшие искажения формы импульсов на коррелограммах наблюдаются при сложении двух сигналов (группирование двух вибраторов).

Таким образом, амплитудная и временная неидентичность складываемых сигналов приводят на высоких частотах к искажениям, следствием которых являются снижение уровня соответствующих составляющих волн и усложнение формы колебаний. Поэтому стремление работать на высоких частотах должно быть подкреплено соответствующими техническим состоянием оборудования и аппаратуры, а также методическим уровнем работ (размеры баз, идентичность условий возбуждения и приема колебаний и т.д.).

### 3.3.4. Системы наблюдений

В настоящее время наибольшее распространение в невзрывной (вибрационной) сейсморазведке получили многократные (12-24- и даже 48-кратные) системы наблюдений ОГТ. Кратность наблюдений, расстояния между пунктами возбуждения и приема колебаний, наибольшая длина ветви географов и другие параметры системы определяются задачами работ, глубиной разреза и сейсмогеологическими условиями в районе исследований [15, 19]. Необходимо иметь в виду, что применение повышенной кратности наблюдений предпочтительно в невзрывной сейсморазведке в связи с возможностью дополнительного ослабления нерегулярных помех. Кроме того, мобильные установки для невзрывного возбуждения открывают возможности широкого использования нестандартных расстановок криволинейных профилей, площадных

наблюдений, регистрации и возбуждения волн на взаимно перпендикулярных профилях и других модификаций пространственной сейсморазведки, реализация которых при взрывных способах генерирования волн затруднена или практически невозможна.

В связи с тем, что в области, примыкающей к пункту возбуждения, поверхностные волны имеют большую интенсивность, в невзрывной сейсморазведке применяются, как правило, фланговые, а при работе со спаренными станциями и центральные системы наблюдений с выносными относительно расстановки сейсмоприемников пунктами возбуждения. Вынос зависит от глубин залегания разведываемых горизонтов, областей регистрации целевых отражений и поверхностных волн и их частотного состава. Его выбирают на основании анализа результатов зондирования по изучению полезных и мешающих колебаний. Как правило, вынос составляет не менее 200—350 м, в отдельных случаях может достигать 1000 м. При этом следует иметь в виду, что выносом пункта возбуждения не удастся полностью избавиться от поверхностных волн и они всегда присутствуют на исходных записях. Поэтому наряду с группированием источников и приемников колебаний целесообразно применение управляющих сигналов со смещенным вверх диапазоном частот для ослабления поверхностных волн.

Практика выбора параметров систем наблюдений многообразна и целиком зависит от стоящих задач и сейсмогеологических условий. Конкретные примеры для отдельных районов приведены в разд. 5. Отметим лишь, что в районах со сложными сейсмогеологическими условиями и относительно низким качеством первичных материалов приходится идти на отработку избыточных систем наблюдений высокой кратности и уже на этапе обработки материалов выбирать оптимальные области регистрации целевых отражений и вынос пунктов возбуждения колебаний относительно расстановки сейсмоприемников. В тех случаях, когда необходимо проследивать глубокие и мелкие ( $t=0,5 \div 0,6$  с) границы, работы ведутся с минимальными (50—100 м) выносами.

Заканчивая рассмотрение вопросов, связанных с выбором и обоснованием параметров наблюдений, необходимо отметить, что методика проведения работ с вибрационными и другими невзрывными источниками характеризуется массовым применением различных накапливающих систем, направленных на повышение исходных отношений сигнал/помеха. Это усложняет ее и делает более громоздкой по сравнению с методикой взрывной сейсморазведки. Для оценки сложности методики предложен коэффициент накопления

$$K = n_1^2 n_2 n_3 n_4 \sqrt{\Delta F T},$$

где  $n_1$ ,  $n_2$ ,  $n_3$  и  $n_4$  — соответственно число группируемых источников и приемников колебаний, количество накоплений и кратность ОГТ;  $\Delta F$  и  $T$  — полоса частот и длительность управляющего сигнала. Коэффициент накопления имеет определенный физический смысл, отражая сте-

пень ослабления помех и выигрыш в отношении сигнал/помеха, и характеризует степень сложности используемых методических средств при проведении работ.

### 3.4. ПОМЕХОУСТОЙЧИВОСТЬ ВИБРАЦИОННОЙ СЕЙСМОРАЗВЕДКИ

Помехоустойчивость вибрационной сейсморазведки складывается из способности отдельных ее методических приемов и технических средств ослаблять мешающие колебания и усиливать полезные регулярные волны. Причем при работах с вибраторами особое внимание приходится уделять подавлению нерегулярных помех, шумов. Поэтому под помехоустойчивостью вибрационной сейсморазведки будем понимать ее возможность ослаблять именно эти мешающие колебания. При ее оценке целесообразно рассматривать предельно достижимую, или по терминологии В.А. Котельникова, потенциальную помехоустойчивость, и фактическую, реализуемую на практике.

Потенциальная помехоустойчивость вибрационной сейсморазведки определяется комплексом методических приемов суммирования и накопления данных, а также корреляционной обработки вибрационных сигналов. Оценим максимальный выигрыш в относительной интенсивности полезных волн, который может быть получен при их применении. Будем исходить из того, что полезные волны представлены регулярными сигналами, а помехи — нерегулярными, случайными значениями волнового поля, имеющими нулевое математическое ожидание и конечное значение дисперсии (среднеквадратичного отклонения  $\sigma$ ). При этом помехи имеют аддитивный по отношению к регулярным сигналам характер. Тогда регистрируемые колебания в каждый момент времени могут быть представлены суммой полезного сигнала  $a_i$  и помехи  $b_i$ .

$$x_i = a_i + b_i.$$

Для них исходные отношения сигнал/помеха

$$\rho_0 = a / \sigma.$$

При накоплении производится синхронное по отношению к регулярным волнам сложение колебаний. В результате на выходе суммирующего устройства будем иметь накопленный сигнал

$$x_{\Sigma} = \sum_{i=1}^n x_i = na + \sum_{i=1}^n b_i,$$

где  $n$  — число накоплений.

Отношение сигнал/помеха после накопления

$$\rho_{\Sigma} = na / \sqrt{D(\sum_{i=1}^n b_i)}, \quad (3.4)$$

где  $D(\sum_{i=1}^n b_i)$  — дисперсия помех.



Дисперсия помехи определяется статистическими свойствами помех. При некоррелированных помехах дисперсия суммы равна сумме дисперсий и (3.4) преобразуется к виду

$$\rho_{\Sigma} = na / \sqrt{\sum_{i=1}^n D(b_i)}. \quad (3.5)$$

Если считать, что дисперсия помех одинакова, то

$$\rho_{\Sigma} = na / (\sqrt{n\sigma}) = \sqrt{n\rho_0}. \quad (3.6)$$

В тех случаях, когда помехи коррелированы между собой, выигрыш в отношении сигнал/помеха уменьшается и

$$\rho_{\Sigma} = \sqrt{n/(1+\lambda)} \rho_0, \quad (3.7)$$

где  $\lambda$  — коэффициент, пропорциональный коэффициенту корреляции помех.

При некоррелированных помехах их коэффициент корреляции равен нулю и (3.7) переходит в (3.6). Если коэффициент корреляции не равен нулю,  $\rho_{\Sigma}$  определяется свойствами помех. Помехоустойчивость корреляционной обработки может быть оценена на основе определения энергетических соотношений между полезными и мешающими колебаниями (Ю.П. Лукашин).

Отношение сигнал/помеха на выходе коррелятора

$$\rho_{\Sigma_K} = \sqrt{2Y/W_0}, \quad (3.8)$$

где  $Y$  — энергия регулярной волны;  $W_0$  — спектральная плотность мощности помех.

Энергия регулярной волны

$$Y = A^2 T/2, \quad (3.9)$$

где  $A$  — амплитуда колебаний;  $T$  — длительность управляющего сигнала.

Спектральная плотность помех связана с их среднеквадратичным значением на входе коррелятора соотношением

$$W_0 = \sigma^2 / \Delta F. \quad (3.10)$$

Подставляя (3.9) и (3.10) в (3.8), получим

$$\rho_{\Sigma_K} = \frac{A}{\sigma} \sqrt{T \Delta F} = \rho_0 \sqrt{T \Delta F},$$

где  $\rho$  — исходное отношение сигнал/помеха.

Это известное соотношение, которым широко пользуются при оценке помехоустойчивости корреляционного приема и при проведении работ с вибрационными источниками. Для вибраторов дискретного действия выигрыш в отношении сигнал/помеха определяется несколько иным путем. При корреляционной обработке кодовых последовательно-

стей коррелятор обеспечивает синфазное сложение регулярных волн и несинфазное — случайных колебаний, т.е. коррелятор работает как накопитель, обеспечивающий выигрыш в отношении сигнал/помеха, равный  $\sqrt{n}$ , где  $n$  — число импульсов в последовательности. Применительно к вибрационным системам

$$\rho_{\Sigma} = \rho_0 \sqrt{T f_{\text{ср}}},$$

где  $f_{\text{ср}}$  — средняя частота, определяющая число “ударов” в посылке, и  $T$  — длительность посылки.

Полученные оценки помехоустойчивости максимальны, так как они определены при идеальных условиях. Фактически помехоустойчивость невзрывной, в том числе вибрационной, сейсморазведки оказывается меньшей. Рассмотрим ее с учетом наиболее широко применяемых методических приемов. Одновременная работа  $n_1$  излучателей обеспечивает теоретическое увеличение интенсивности полезных сигналов по отношению к уровню помех в  $n_1$  раз. В реальных условиях вследствие некоторого рассогласования в их работе, неидентичных условий возбуждения на различных грунтах и других факторов выигрыш становится меньше теоретического:

$$B_1 = (0,8 \div 0,9) n_1. \quad (3.11)$$

Группа сейсмоприемников одинаковой чувствительности обеспечивает реальный выигрыш

$$B_2 = \sqrt{n_2 / (1 + \lambda)},$$

где  $n_2$  — число группируемых элементов;  $\lambda$  — коэффициент, определяемый степенью коррелированности помех.

В невзрывной сейсморазведке расстояния между сейсмоприемниками в группах, как правило, меньше радиуса корреляции нерегулярных помех в среднечастотной части сейсмического диапазона. Вследствие этого помехи в той или иной степени коррелированы между собой. Выигрыш может быть оценен величиной

$$B_2 = (0,6 \div 0,8) \sqrt{n_2}. \quad (3.12)$$

Выигрыш при синхронном накоплении посылок оценивается величиной

$$B_3 = q \sqrt{n_3}, \quad (3.13)$$

где  $n_3$  — число накоплений. Значения коэффициента  $q$  определяются синхронностью и амплитудной идентичностью вибраторов, которые зависят от технического состояния источников и условий возбуждения колебаний. В среднем  $q = 0,8$  и

$$B_3 = 0,8\sqrt{n_3}. \quad (3.14)$$

Таким образом, результирующее отношение сигнал/помеха, определяющее фактическую помехоустойчивость регистрации колебаний, может быть оценено величиной

$$B_{\Sigma} = (0,35 \div 0,60) n_1 \sqrt{n_2 n_3 \Delta F T}$$

или

$$B_{\Sigma} = (0,35 \div 0,60) n_1 \sqrt{n_2 n_3 f_{cp} T}.$$

### 3.5. ОПРЕДЕЛЕНИЕ СТАТИЧЕСКИХ ПОПРАВК ПРИ РАБОТАХ С ВИБРАЦИОННЫМИ ИСТОЧНИКАМИ

В наземной невзрывной сейсморазведке и особенно в ее импульсной модификации наибольшее распространение получили способы определения параметров ЗМС по временам прихода преломленных волн, соответствующих коренным породам и зарегистрированных на коротких отрезках профилей протяженностью 100–200 м. Они реализуются путем возбуждения колебаний излучателем по краям неравномерной расстановки сейсмоприемников. При простом строении ЗМС достаточно отработки двух встречных пунктов возбуждения колебаний. Возможно усложнение системы наблюдений за счет возбуждения колебаний с выносных пунктов возбуждения. Плотность расположения зондирований определяется строением района и рельефом поверхности земли и в среднем составляет одну точку на километр профиля.

Попытки использования этих способов в вибрационной сейсморазведке натолкнулись на целый ряд трудностей [19, 32]. Обусловлены они значительной интенсивностью корреляционных и шумовых помех от вибраторов, на фоне которых более слабые преломленные волны выделяются неуверенно. Опыт работ с вибраторами свидетельствует о том, что первые вступления удается, как правило, качественно проследить при помощи ЗМС, не превышающей 4–5 м. По мере ее увеличения наблюдается расширение веера низкоскоростных волн-помех за счет появления в разрезе дополнительных акустических границ. Например, уже при зоне мощностью 12–13 м поверхностные волны с максимальными кажущимися скоростями практически примыкают к первым вступлениям. Они отличаются повышенной интенсивностью и формируют при корреляционной обработке высокоамплитудный корреляционный фон, затрудняющий прослеживание вдоль первых вступлений. Существенно ослабить помехи преобразования, связанные с поверхностными волнами, можно путем смещения частотного диапазона разверток в область высоких частот. Однако такой способ пока широко не опробован.

При большей мощности ЗМС точность определения поправок оказывается недостаточной. Кроме того, из-за большой загрузки при

проведении основных работ вибраторы, как правило, не отвлекаются на изучение ЗМС. Поэтому в отечественной практике при работах с вибраторами или используются данные взрывной сейсмики по ЗМС, или проводятся специальные исследования с импульсными источниками.

В зарубежной практике изучение верхней части разреза, в том числе для определения статических поправок, производится методами отраженных или преломленных волн специализированной системой "Mini-Sosie" [34]. Они основаны на возбуждении случайной последовательности импульсов, число которых на одну сейсмограмму доходит до 3000 и более. Малая энергия воздействий и корреляционное накопление импульсов обеспечивает достаточно хорошую разрешенность записей и допустимый уровень шумов преобразований.

В практике работ возникает также необходимость определения поканальных статических поправок, которые могут определяться или путем интерполяции поправок, вычисленных в узловых точках, или по временам прихода преломленных волн, прослеживаемых в первых вступлениях на сейсмограммах ОГТ. При неплохом качестве материалов объем данных оказывается достаточным для построения мелкой преломляющей границы и определения аномалий времен, обусловленных неоднородностью верхней части разреза.

Не останавливаясь на теории этого способа и описании существующих программ обработки данных, в том числе по методу общей глубинной площадки (МПВ ОГТ), отметим, что основные трудности его применения связаны с низким качеством первых вступлений, которое обусловлено рядом причин, в том числе и применяемыми большими базами групп сейсмоприемников. Тем не менее этот способ в сочетании с изучением зоны малых скоростей в отдельных точках профилей имеет определенные перспективы, так как не требует дополнительных затрат времени на производство полевых работ, а при переходе на сверхмногоканальные регистрирующие системы и отказе от группирования сейсмоприемников повысится качество прослеживания волн в первых вступлениях.

#### **4. ОБРАБОТКА МАТЕРИАЛОВ ВИБРАЦИОННОЙ СЕЙСМОРАЗВЕДКИ**

Подавляющий объем вибросейсмических материалов получают с применением хорошо известного метода общей глубинной точки (ОГТ). Специфика ОГТ привела к созданию ряда пакетов обработки сейсмических данных, большинство из которых может быть использовано в вибрационной сейсморазведке. Тем не менее особенности ВСП требуют

включения в пакеты обработки импульсных данных дополнительных процедур и программных моделей. Рассмотрим технологию обработки материалов ВСП с акцентированием внимания на ее характерные особенности и специфику.

Обработку данных ВСП можно разбить на первичную и углубленную.

#### 4.1. ПЕРВИЧНАЯ ОБРАБОТКА ДАННЫХ

В этап первичной обработки входят процедуры, обеспечивающие редакцию данных, ослабление регулярных и нерегулярных помех, а также сжатие исходной информации — взаимную корреляцию зарегистрированных сигналов с управляющим (опорным). Все обрабатываемые процедуры этапа первичной обработки могут быть реализованы на экспедиционных (базовых) вычислительных центрах или в компьютеризированных полевых регистрирующих системах.

Помехи, искажающие полезные сигналы, делятся на генерируемые самими источниками и ими не возбуждаемые.

Первые — поверхностные и звуковые волны. Поверхностные волны ослабляются применением группирования источников, а также частотной и пространственной фильтрацией. Подавление звуковых волн не представляет собой проблемы при регистрации полевых записей вследствие использования выносных систем наблюдений.

К помехам, не возбуждаемым источником, относятся аддитивные помехи от линии электропередач, движущегося транспорта (промышленные помехи), окружающей среды (от ветра и дождя) и др.

Промышленные, сетевые помехи обычно легко ослабляются применением режекторного фильтра на 50 Гц в регистрирующей аппаратуре или в ЭВМ. В принципе режекторная фильтрация имеет свои отрицательные стороны, так как она вызывает появление нулей и крутых срезов в спектрах регистрируемых сигналов, искажающих форму импульсов. В вибрационном методе более оправдано исключение электрических помех путем применения управляющих сигналов, не включающих в свой частотный диапазон частоту 50 Гц.

Помехи от влияния окружающей среды носят произвольный, как правило, случайный характер и их довольно трудно выделить и устранить при обработке.

Помехи, обусловленные движущимся транспортом, — высокоамплитудные помехи (так как они часто на 30—60 дБ выше уровня полезного сигнала), получившие название “ураганных” [42]. Частотный анализ этих помех показывает, что они не абсолютно случайные и сильно ограничены по полосе частот (близки к монохроматическим). Однако определить или предсказать частоту от определенного вида транспорта невозможно, поскольку это зависит от его типа и скорости движения.

Рассмотрим основные способы подавления высокоамплитудных помех, реализуемые как в компьютеризированных сейсмостанциях, так

и на этапе машинной обработки первичной информации. Указанные способы можно разделить на две группы — подавление помех за счет уменьшения их амплитуд и устранение помех путем полного исключения участков трасс, содержащих высокоамплитудные помехи, в процессе их вертикального суммирования (накопления первичных записей).

Способ исключения помех можно использовать в аппаратурных системах суммирования, связанных с регистрирующей аппаратурой, или при машинной обработке исходных данных (виброграмм), зарегистрированных станциями с мгновенной регулировкой. В этом случае каждая выборка регистрируется на своем усилении, величина которого выбирается с таким расчетом, чтобы придать ей максимальное значение [42]. Шаг усиления равен 6 дБ. Таким образом, высокоамплитудные сигналы имеют низкий коэффициент усиления и наоборот. В процессе исключения помех определяются (фиксируются) выборки с низким коэффициентом усиления, которые относятся к высокоамплитудным помехам и в дальнейшем исключаются из процесса суммирования.

В первых образцах зарубежных регистрирующих систем, использующих такой способ подавления ураганных помех, применялась ручная установка оператором опорных напряжений для каждого канала и все входящие данные сравнивались с опорными усилениями и при необходимости исключались [42]. Желание исключить возможные ошибки, связанные с ручной установкой опорных усиления, при которой не учитывалось изменение во времени волнового поля, привело к созданию систем автоматического исключения помех.

Автоматические системы работают следующим образом [42]. На первом этапе устанавливаются опорные сигналы для каждого канала посредством специальной записи или первого управляющего сигнала в каждый день работы. Во время записи определяют минимальные входные усиления (ассоциируемые с выборками, значения которых самые высокие) для последовательных временных окон и эти усиления заносят в память. Длительность окон — в принципе произвольный параметр, но обычно ее выбирают равной 256 мс. Во время накопления сигналов (воздействий) усиление меняется на  $\pm 6$  дБ, если его минимальное значение не равно хранящемуся в памяти.

Поступающие на вход данные анализируются в последовательности временных окон и сравниваются с опорными усилениями для этих окон. Если входное усиление меньше опорного на 12 дБ, то все выборки в определенном временном окне (например, 120 мс) исключаются. Время исключения начинается снова, если следующий сигнал характеризуется усилением, меньшим чем в предыдущем интервале исключения. Пример этого автоматического процесса представлен на рис. 32.

Рассмотренный выше способ исключения помех на практике характеризуется достаточно высокой эффективностью, но не лишен недостатков. Основной из них заключается в том, что данные необходимо

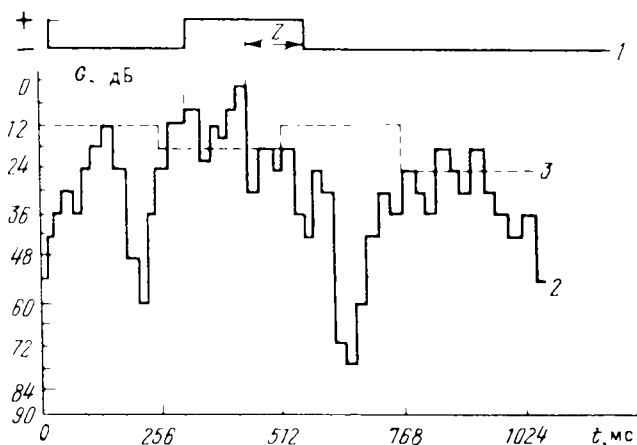


Рис. 32. Операционная система автоматического вырезания помех:

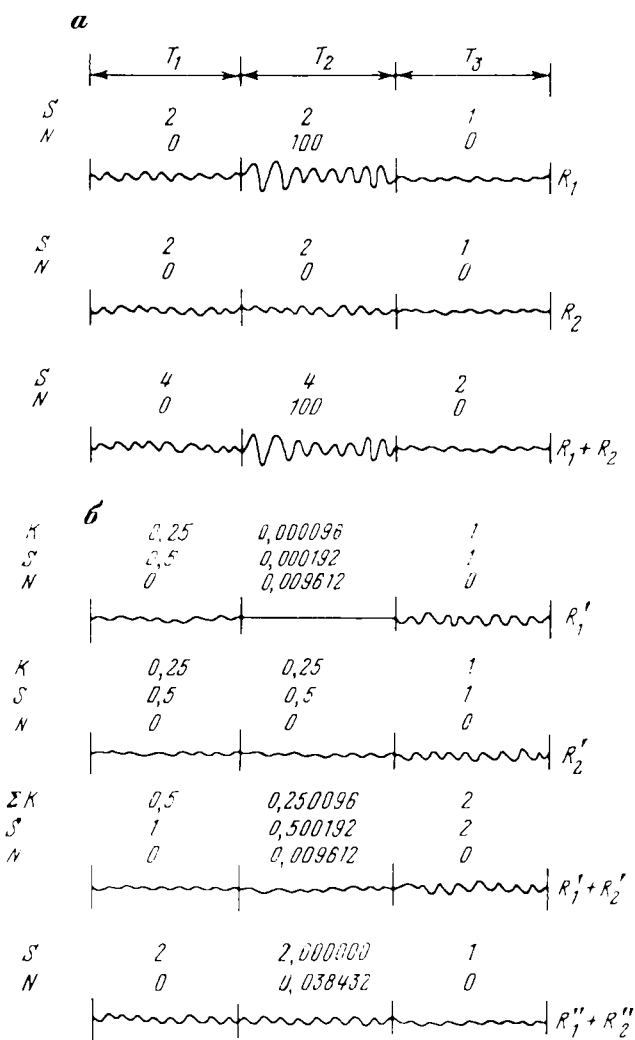
1 — кривая интервалов вырезания ("—" — не вырезается, "+" — вырезается); 2 — кривая входного усиления; 3 — кривая опорного усиления; G — усиление; z — временной интервал исключения выборок

разделить четко на помехи и полезную информацию и в соответствии с этим отбросить или принять их к дальнейшей обработке. В данном способе также не существует другой возможности ослабления помех, кроме полного отбрасывания их, как это делается с сильными помехами. В случае, когда помехи очень сильные, приходится либо отбрасывать слишком большое количество данных, либо, в противном случае, остаются данные, в разной степени искаженные помехами.

#### 4.1.1. Способ подавления (ослабления) высокоамплитудных помех

В отличие от способа исключения помех способ подавления позволяет сохранить первоначальные амплитуды сигналов. Он основан на суммировании вибрационных трасс с весовыми коэффициентами.

Алгоритм суммирования с весовыми коэффициентами на начальном этапе включает пересчет данных перед суммированием таким же образом, как в методе автоматической регулировки усиления (АРУ) [42], только в данном случае для вычисления коэффициентов используется вся энергия в пределах времени регистрации, а не только среднее значение, как в АРУ. Полная энергия в пределах интервала времени регистрации равна сумме квадратов амплитуд каждой выборки в этом интервале. Вычисляется трасса коэффициентов усиления. После суммирования пересчитанных записей соответствующие им трассы коэффициентов усиления также суммируются, затем окончательная составная запись нормализуется путем деления ее на коэффициенты усиления суммированных трасс. Таким образом восстанавливаются первоначальные изменения



**Рис. 33.** Схематическое изображение обычного вертикального (а) и весового (б) суммирования:

$R_1, R_2, R_1 + R_2$  — исходные трассы и их сумма;  $R_1', R_2', R_1' + R_2'$  — пересчитанные трассы и их сумма;  $R_1'' + R_2''$  — окончательная нормированная суммарная трасса;  $S, N$  — усредненные уровни сигнала и помехи во временных окнах;  $T_1, T_2, T_3, k$  — расчетные коэффициенты усиления для каждого окна;  $\Sigma K$  — сумма коэффициентов усиления

амплитуд на сейсмозаписи. Процесс подавления помехи способом весового суммирования показан на рис. 33.

В способе весового суммирования существует возможность исклю-



чения очень "спокойных" записей, содержащих слабые сигналы. Эти записи могут быть полностью исключены в результате процесса суммирования с весовыми коэффициентами. Это реализуется сравнением энергии на каждой записи с опорным уровнем энергии и исключением записи, если ее энергия меньше этого уровня. Опорный уровень энергии может постоянно редактироваться в течение рабочего дня с учетом изменения полевых условий или автоматически определяться на основе среднего взвешенного значения уровня на предшествующих записях, причем последующим записям придается больший вес.

В целом способ суммирования с весовыми коэффициентами эффективнее рассмотренных ранее способов хотя бы потому, что он позволяет получить наиболее близкую аппроксимацию оптимальной составляющей записи сохраняет первоначальные амплитудные соотношения входных сигналов.

#### **4.1.2. Способ частотного вырезания высокоамплитудных помех**

Как отмечалось ранее, высокоамплитудные помехи от движущегося транспорта являются сосредоточенными в смысле спектрального представления. Они имеют большую интенсивность в узком диапазоне частот. В частотной области наличие помех проявляется в резком возрастании уровня спектральной плотности на частотах их существования по отношению к общему уровню всего диапазона частот. Это обстоятельство можно использовать для создания специализированных алгоритмов и программ машинной обработки, позволяющих обнаруживать и подавлять помехи с ограниченным спектральным составом.

Практически такой способ борьбы с узкополосными помехами можно реализовать двумя путями (О.М. Сайгадчаная, 1981). Суть первого состоит в том, что виброграммы или коррелограммы с помощью преобразования Фурье переводятся в частотную область. После визуализации спектрограмм (сейсмограммы в спектральном представлении) определяют зашумленные участки спектра и составляют специальное задание, в котором указывают для каждой трассы участки обнуления. После обнуления спектрограмму с помощью обратного преобразования Фурье переводят во временную область. Но так как частотный интервал наложения помехи флуктуирует, со временем процесс обработки получается весьма трудоемким и нетехнологичным. Предпочтительнее второй путь, основанный на автоматическом поиске и обнулении зашумленных участков.

При этом естественно встает вопрос о выборе базового критерия, который позволял бы отличить помеху от сигнала. Помеха "ураганного" типа достаточно четко выделяется на фоне огибающей спектра трассы, однако отношение сигнал/помеха существенно зависит от частотного местоположения этой помехи — в области низких частот это отношение меньше, в области верхних — больше. По этой причине обнуление участ-

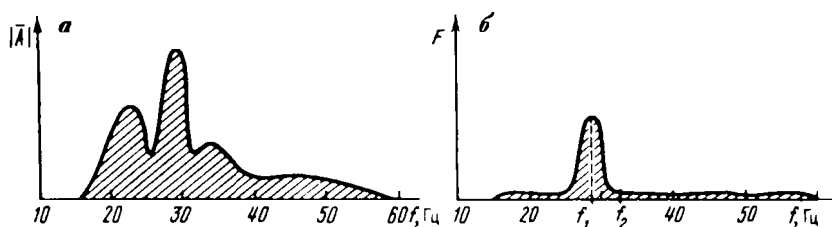


Рис. 34. Спектр коррелограммы (а) и функция  $F(f)$  — текущее среднее модуля спектра  $|A(f)|$  (б)

ков, на которых запись превышает определенный заранее заданный уровень, оказывается недостаточно эффективным, так как при этом либо ограничиваются по амплитуде полезные сигналы в области низких частот, либо происходит пропуск зашумленных участков в области верхних частот, где достаточно низкое отношение сигнал/помеха.

С целью автоматизации процесса можно использовать интегральные параметры сигнала и помех (О.М. Сайгадчаная, 1981), например функцию вида

$$F(f) = \frac{1}{\Delta f} \int_{f_1}^{f_1 + \Delta f} |\tilde{A}(f)| df, \quad f_n \leq f \leq f_v - \Delta f, \quad (4.1)$$

где  $|\tilde{A}(f)|$  — амплитудный спектр трассы;  $f_n, f_v$  — нижняя и верхняя частоты управляющего сигнала;  $\Delta f = f_2 - f_1$  — частотный интервал наложения помехи.

В качестве примера на рис. 34 изображена функция  $F(f)$ , соответствующая частотному представлению коррелограммы. Как видим, функция  $F(f)$  в области наложения помех представляет собой импульс, близкий к симметричному, с максимальным значением в начале зашумленного участка, т.е. на частоте  $f_1$ . При этом амплитуда  $F(f)$  по обе стороны от максимума достаточно быстро затухает и при  $f < f_1 - \Delta f, f > f_1 + \Delta f$  составляет не более 1/3 максимального значения. Отсюда следует, что можно относить к помехам участки  $f_1 \div f_1 + \Delta f$  на спектрограмме трассы, для которых выполняется условие

$$F(f_1) \geq K [F(f_1 - \Delta f) + F(f_1 + \Delta f)], \quad (4.2)$$

где

$$F(f_1) = \max |F(f)|, \quad K = 1,5.$$

Адаптивное подавление узкополосных высокоамплитудных помех может быть реализовано по следующей схеме.

1. В соответствии с формулой (4.1) вычисляется вспомогательная функция  $F(f)$ , равная текущему среднему модулю спектрограммы трассы.

2. Методом перебора и сравнения дискретных отсчетов находят все локальные максимальные значения функции  $F(f)$  и для этих значений проверяют условие (4.2). При выполнении этого условия соответствующие участки спектрограммы обнуляются в интервале  $f_1 \div f_1 + \Delta f$ .

Оптимизирующими параметрами описанного способа адаптивного частотного вырезания помех могут быть диапазон  $\Delta f$  и уровень помехи, которые подбирают тестированием на основе визуальной оценки результатов во временной области. Это позволяет более точно вырезать часть спектра, связанную только с помехой, и оптимизировать отношение сигнал/помеха на выходе фильтрации.

Способ адаптивного частотного вырезания успешно реализован при обработке вибросейсмической информации (частотная модификация ВСР), полученной с помощью вибролокатора в Тюменской области и других районах на профилях, проложенных из-за болотистого характера местности вдоль дорог с движущимся грузовым транспортом. Этот метод можно применять и в корреляционной модификации ВСР с учетом разницы в представлении первичной информации.

Наиболее целесообразно и оправдано применение методов частотного вырезания в тех случаях, когда по каким-либо причинам не выполнялось подавление ураганных помех на этапе вертикального суммирования.

#### 4.1.3. Центрирование вибросейсмических записей

Алгоритмы вычисления функций взаимной корреляции предусматривают предварительное центрирование исходных виброграмм. Это делается с целью снятия постоянной составляющей и наилучшего согласования разрядности представления выборок на виброграммах и коррелограммах. Во многих случаях практического применения операцию центрирования опускают, так как анализируемые виброграммы лишены постоянной составляющей или она настолько мала, что ею можно пренебречь. Тем не менее в вибрационной сейсморазведке в результате повсеместного использования вертикального накопления одиночных виброграмм зачастую наблюдается смещение нуля на коррелограммах после взаимной корреляции, что затрудняет восприятие и интерпретацию сейсмограмм. Если учитывать, что процедура центрирования проста в реализации и экономична во времени, естественно применять центрирование трасс виброграмм как обязательную процедуру перед выполнением взаимной корреляции. При этом, если свертка производится с управляющим сигналом, записанным с ГСР сейсмостанции, то полезно центрировать и сам опорный сигнал, потому что наличие постоянной составляющей последнего также может привести к появлению постоянной составляющей и перегрузке сигналов после взаимной корреляции на коррелограммах.

Обычно во всех обрабатывающих системах используют алгоритм

центрирования [19]

$$C_0(t) = C(t) - m_c(\Delta\tau), \quad (4.3)$$

где:  $m_c(\Delta\tau) = \frac{1}{\Delta\tau} \sum_{t-\Delta\tau/2}^{t+\Delta\tau/2} C(t)$  — оператор центрирования (среднее арифметическое исходной трассы  $C(t)$ , вычисленное в окне  $\Delta\tau$ ;  $C_0(t)$  — центрированная трасса.

Входной трассой  $C(t)$  может быть трасса виброграммы или корелограммы. Обычно интервал оператора центрирования (вычисления среднего) — от 1 до 2 с. Для ускорения процесса оператор центрирования может перемещаться и вычисляться не через каждый дискрет, а через установленный интервал (например, вдвое меньший  $\Delta\tau$ ).

#### 4.1.4. Взаимная корреляция вибросейсмических данных

Взаимная корреляция зарегистрированных виброграмм с опорным (управляющим) сигналом является основной и обязательной процедурой первичной обработки.

#### 4.1.5. Стандартная взаимная корреляция

Обычная взаимная корреляция вибросейсмических данных осуществляется во временной области путем нахождения взаимной корреляции двух сигналов, вычисляемой в дискретном виде:

$$K_j = \frac{1}{(N-1)\Delta\tau} \sum_{i=1}^N S_i V_{i+j-1}, \quad (4.4)$$

где  $K_j$  — обозначение корелограммы ( $j=1, \dots, M$ ;  $(M-1)\Delta\tau$  — длительность корелограммы);  $S_i$  — оператор корреляции, соответствующий опорному управляющему сигналу ( $i=1, \dots, M$ );  $(N-1)\Delta\tau = T$  — длительность сигнала;  $V_{i+j-1}$  — исходная виброграмма общей длительностью  $(N-1)\Delta\tau + (M-1)\Delta\tau$ ;  $\Delta\tau$  — шаг дискретизации.

Процесс взаимной корреляции сводится к вычислению при каждом сдвиге  $\tau=j\Delta\tau$ , начиная с  $\tau=0$  ( $j=1$ ), нормированной по  $T$  суммы попарных произведений отсчетов виброграммы  $V_{i+j-1}$  и опорного сигнала  $S_i$ . При этом интервал вычисления попарных произведений и суммирования равен длине оператора корреляции, т.е. длине опорного управляющего сигнала  $S_j$ ;  $T = (N-1)\Delta\tau$ .

На рис. 35 схематично представлен процесс взаимной корреляции на основе вычисления дискретного аналога (4.4). При сдвиге  $\tau=0$  ( $j=1$ ) (когда начало опорного сигнала и виброграммы совпадают) вычисляют первое значение корелограммы  $K_1$ . Фактически  $\tau=0$  ( $j=1$ ) является временным началом корелограммы и реально совпадает с нулевым

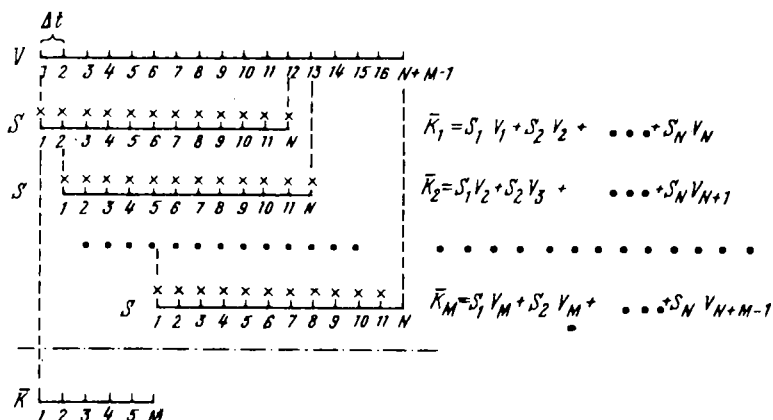


Рис. 35. Схематическое изображение цифровой процедуры взаимной корреляции виброграмм:

$V$  — виброграмма;  $S$  — управляющий сигнал (оператор корреляции);  $\bar{K}_1, \bar{K}_2, \dots, \bar{K}_M$  — нормированные значения коррелограммы при каждом сдвиге;  $\bar{K}$  — окончательная коррелограмма;  $\Delta t$  — шаг дискретизации; "х" — символ умножения

временем сейсмограммы. Затем последовательность опорного сигнала передвигают (относительно фиксированного положения виброграммы) на один отсчет (выборку) равный шагу дискретизации  $\Delta t$ , и вновь получают нормированную сумму попарных произведений, т.е. второе значение  $K_2$  ( $\tau = \Delta t$ ). Далее сдвигают опорный сигнал еще на один шаг дискретизации ( $\tau = 2\Delta t$ ) и получают следующее значение  $K_3$  ( $\tau = 2\Delta t$ ) и т.д. Процесс повторяется до тех пор, пока не будет вычислено значение  $K_M$  коррелограммы при заданном максимальном сдвиге  $\tau_{\max} = (M-1) \times \Delta t$ . Максимальное значение  $\tau_{\max}$  определяется временной глубиной разведки.

Таким образом, каждый отраженный сигнал на коррелограмме представлен корреляционным импульсом, отображающим частотный диапазон исходного управляющего сигнала. В первом приближении каждый коэффициент отражения на коррелограмме можно представить импульсом, являющимся автокорреляцией управляющего сигнала  $S(t)$  с амплитудой, равной амплитуде конкретного коэффициента отражения. Более точно, каждое отражение на коррелограмме представляет импульс, являющийся взаимной корреляцией между управляющим сигналом и его аналогом, зарегистрированным сейсмоприемником (см. подразд. 1.2).

Формула (4.4) обычно используется и для вычисления функции автокорреляции ( $r$ ) управляющего сигнала, когда изучаются его частотно-временные характеристики. В этом случае вместо  $V_{i+j-1}$  ставят сам сигнал  $S_{i+j-1}$  и тогда

$$r_j = \frac{1}{(N-1)\Delta t} \sum_{i=1}^N S_i S_{i+j-1} \quad \text{при } i, j = 1, 2, 3, \dots, N. \quad (4.5)$$

Сама процедура и последовательность вычисления  $r_j$  полностью совпадает с вычислением  $K_j$ , приведенным выше.

На рис. 2 приведен пример, иллюстрирующий процесс преобразования полевой виброграммы в коррелограмму. Хорошо видно, что только после корреляционной обработки появляется возможность выделения и разделения отражений, соответствующих заданным коэффициентам отражений.

Взаимная корреляция в принципе может быть реализована и в спектральной области. В этом случае используется основное свойство сверточных моделей — свертка во временной области эквивалентна перемножению комплексных спектров составляющих свертку сигналов

Свертка в спектральной области реализуется в следующем порядке. Вычисляется прямое преобразование Фурье (комплексно-сопряженный спектр) виброграммы и опорного сигнала. Далее комплексные спектры виброграммы  $V^*(f_i)$  и опорного сигнала  $S(f_i)$  поотсчетно перемножаются между собой:

$$K(f_i) = S(f_i) V^*(f_i). \quad (4.6)$$

Получив таким образом комплексный спектр коррелограммы, его обращают с помощью обратного преобразования Фурье во временную область и образуют результирующую коррелограмму. При вычислении и обращении комплексных спектров используют алгоритм быстрого преобразования Фурье, позволяющий существенно сократить время корреляции в частотной области.

Аналогично вычисляется в спектральной области и функция автокорреляции

$$r(f) = S(f) S^*(f), \quad (4.7)$$

где  $S(f)$  — комплексный спектр;  $S^*(f)$  — комплексно-сопряженный спектр управляющего сигнала.

Судя по конечному результату, существенной разницы между вычислениями функции взаимной корреляции во временной и частотной областях нет, однако, наиболее простым и экономически оправданным является первый вариант ее реализации, т.е. во временной области.

Отметим некоторые важные особенности стандартной взаимной корреляции. Эта процедура линейна и не искажает динамические соотношения импульсной характеристики среды. Она не изменяет в целом также спектральных характеристик отраженных сигналов (см. рис. 2) в пределах частотного диапазона исследований (за исключением добавок, связанных с наличием корреляционных помех), потому что опорный для

корреляции сигнал имеет огибающую, близкую к прямоугольной, а его частотный диапазон совпадает с диапазоном управляющего полевого сигнала. Процедура взаимной корреляции рассматривается как согласованная фильтрация.

Спектр виброграммы является широкополосным и включает спектры как полезных сигналов, так и помех. После корреляции спектр коррелограммы сужается до диапазона частот управляющего сигнала. Спектр помехи вне этого диапазона вследствие согласованной фильтрации, какой является взаимная корреляция, отфильтровывается и практически имеет нулевые значения.

#### 4.1.6. Весовая взаимная корреляция вибросейсмических данных

Стандартная вибрационная сейсморазведка использует в качестве управляющих сигналов линейно-частотно-модулированные (ЛЧМ) сигналы с постоянной амплитудой (за исключением краевых частей) в течение всего воздействия.

В этом случае опорный управляющий сигнал, с которым производится взаимная корреляция виброграмм, тоже имеет постоянную амплитуду (огибающую) и по всем параметрам соответствует управляющему сигналу, используемому при возбуждении сейсмических сигналов. В таком виде взаимная корреляция приводит к сжатию длительных отраженных сигналов в короткие корреляционные импульсы без какого-либо изменения амплитудно-спектральных характеристик первичных сейсмограмм в диапазоне частот управляющего сигнала.

В работах [8, 11] был предложен новый подход к взаимной корреляции вибросейсмических данных, получивший в дальнейшем название весовой корреляции. В отличие от стандартной весовую корреляцию можно использовать как средство повышения качества исходных данных уже при первичной их обработке.

Рассмотрим подробнее подход к сжатию вибрационных сигналов на основе весовой корреляции исходных виброграмм.

В общем виде управляющий ЛЧМ-сигнал (он же оператор корреляции) записывается в виде

$$S(t) = A(t) \sin[2\pi t (F_n \pm \Delta F t / 2T)], \quad (4.8)$$

где  $A(t)$  — огибающая сигнала;  $F_n$  — начальная частота возбуждения;  $\Delta F = F_k - F_n$  — диапазон частот;  $F_k$  — конечная частота возбуждения;  $T$  — длительность сигнала.

При стандартной методике и обработке сигналов  $A(t) = \text{const}$  при  $0 \leq t \leq T$ , за исключением интервалов конусности, составляющих 3–5 % от общей длительности сигналов.

Зададим огибающую  $A(t)$  в виде

$$A(t) = CA_k(t) \quad (4.9)$$

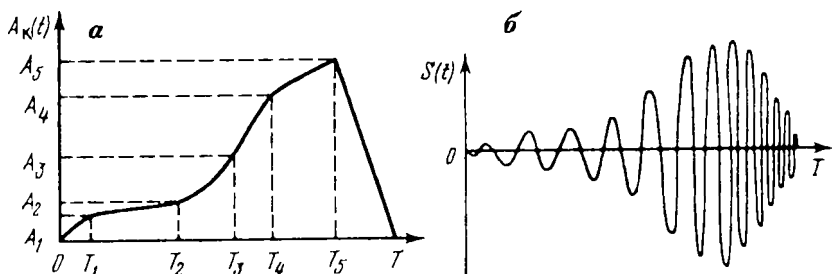


Рис. 36. Формирование огибающей  $A_K(t)$  (а) и опорного сигнала  $S(t)$  (б) в способе частотной корреляции.

$T_1, A_1; T_2, A_2; \dots; T_K, A_K$  — значения пар в узловых точках

где  $A_K(t)$  в течение  $0 \leq t \leq T$  изменяется по кусочно-непрерывному закону. При этом  $A_K'(t) = dA_K(t)/dt$  меняется только в заданных временных узловых точках  $0 < T_1 < T_2 < T_3 < \dots < T_K < T$ . Это условие эквивалентно линейной интерполяции значений  $A_K(t)$  между узловыми точками.

Константа  $C$  определяет только общий уровень огибающей.

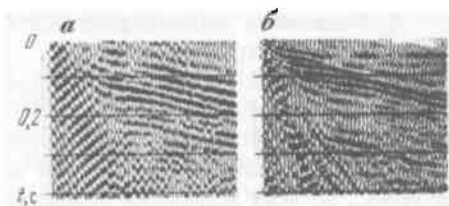
Общий вид кусочно-непрерывной огибающей  $A_K(t)$  приведен на рис. 36. Заданным временным узловым точкам  $T_n$  соответствуют фиксированные значения  $A_K(T_n)$ . Промежуточные значения  $A_K(t)$  между узловыми точками  $T_n$  вычисляются путем линейной интерполяции значений в узловых точках.

Если сделать управляемыми параметрами огибающей  $A(t)$  времена узловых точек  $T_n$ , значения амплитуд в них  $A_K(T_n)$ , а также общий уровень  $C$ , то с их помощью задавая конкретные значения, можно изменять форму управляющего сигнала [8], уменьшая или увеличивая амплитуды сигнала  $S(t)$  на разных частотах (см. рис. 36). При этом соответственно изменяется и амплитудный спектр сигнала  $S(t)$ . Такая реализация огибающей (амплитуды) несущего ЛЧМ-сигнала позволяет очень гибко изменять форму результирующего сигнала  $S(t)$  и его спектра, которую можно использовать для определенных целей при выполнении процедуры взаимной корреляции. При этом кусочно-непрерывным законом можно аппроксимировать практически любой вид изменения амплитуды сигнала (линейный, косинусоидальный, экспоненциальный, степенной, логарифмический и т.д.). В спектральной области весовая корреляция реализуется путем использования управляющего сигнала с кусочно-непрерывной огибающей (4.9): спектр сигнала будет иметь форму, определяемую конфигурацией самой огибающей. Изменяя с помощью задания в узловых точках определенных значений амплитуды форму управляющего сигнала и соответственно его спектр, можно изменять волновую картину и спектр результирующей коррелограммы. Такая процедура взаимной корреляции с применением в качестве опор-



**Рис. 37.** Применение весовой корреляции для увеличения временной и динамической разрешенности мелких отражений.

Корреляция: *а* — стандартная; *б* — весовая



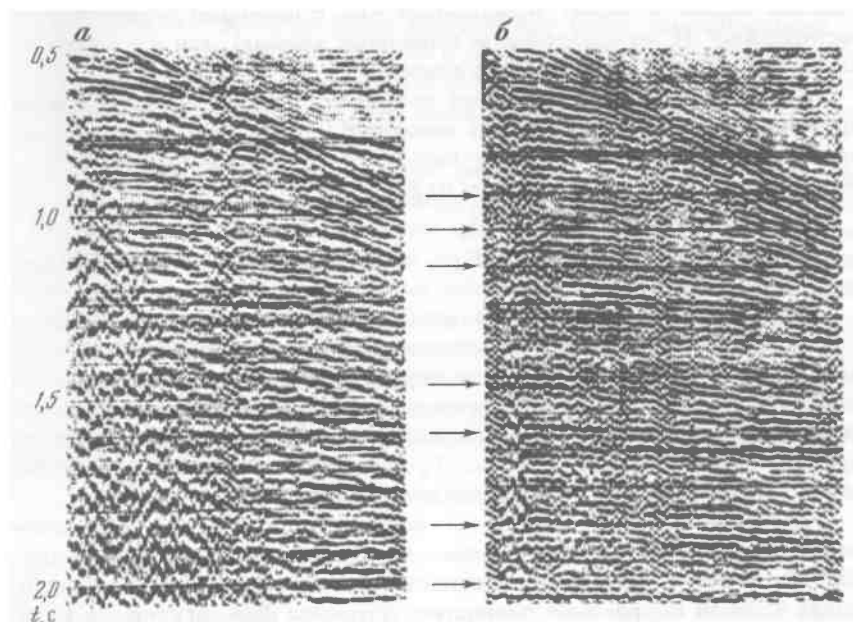
ного сигнала с изменяемой по кусочно-непрерывному закону амплитудой называется **весовой (взвешенной) корреляцией** [8]. Действительно, такой сигнал будет иметь разные веса (амплитуды) на разных частотах.

Дальнейший анализ возможностей весовой корреляции показал, что с помощью ее на этапе взаимной корреляции можно успешно решать следующие задачи.

1. Снижение фона корреляционных шумов на коррелограммах, выделение малоамплитудных отражений (рис. 37).

2. Уменьшение отрицательного влияния низкоскоростных волн-помех на прослеживаемость полезных отражений (рис. 38).

3. Выравнивание спектра отраженных сигналов и их временное сжатие.



**Рис. 38.** Выделение отраженных сигналов на фоне регулярных помех с помощью весовой корреляции.

Корреляция: *а* — стандартная; *б* — весовая. Стрелками обозначены целевые отражения

4. Вырезание неблагоприятных (зашумленных) интервалов частот, в том числе электрических помех.

5. Фильтрация участков спектра подобно полосовой фильтрации, фильтрации высоких и низких частот с различной (сложной) конфигурацией амплитудного спектра фильтра.

Следует отметить, что весовая корреляция, являясь линейной процедурой, во всех вариантах использования действует как нуль-фазовая фильтрация, которая не искажает фазовый спектр сигналов на коррелограммах, а изменяет только амплитудный спектр записи.

Весовая корреляция реализована в двух вариантах: с использованием синтетического управляющего сигнала и с использованием полевого управляющего сигнала [8]. В последнем варианте полевой управляющий сигнал домножается на огибающую (4.9) и в таком виде используется при корреляции. Основные задаваемые геофизиком параметры обработки по весовой корреляции следующие: для синтетического управляющего сигнала частотный диапазон  $\Delta F$ , длительность  $T$ , набор узловых точек  $T_1, A_1; T_2, A_2; \dots; T_k, A_k$  (для полевого управляющего сигнала — только выбор узловых точек).

Для весовой корреляции самым важным моментом является выбор и задание пар узловых точек. Выбор оптимальных пар зависит от конкретной задачи и может проводиться как с помощью ограниченного тестирования (с использованием априорных данных), так и с использованием результатов спектрального анализа.

Выбор времен узловых точек связан со знанием того, на каком времени в несущем ЛЧМ сигнале находится нужная частота (или интервал частот). Это время в силу линейного закона изменения частоты находится элементарным расчетом по формуле

$$T_n = (F_n - F_n) T / (F_k - F_n), \quad (4.10)$$

где  $F_n$  — искомая частота;  $F_n, F_k$  — начальная и конечная частоты сигнала;  $T$  — длительность сигнала.

При выравнивании спектра для более точного выбора значений  $T_n, A_n$  узловых точек можно использовать следующую методику. Огибающая исходного спектра после корреляции условно разбивается на  $k$  частей ( $k$  зависит от сложности формы спектра), после чего снимаются значения частот в этих точках. Далее по формуле (4.10) находятся времена узловых точек  $T_1, T_2, \dots, T_k$ . Амплитуды  $A_1, A_2, \dots, A_k$  выбираются обратными амплитудам спектра на частотах  $F_1, F_2, \dots, F_k$ .

Эффективность использования весовой корреляции в сравнении со стандартной на уровне полевых коррелограмм приведена на рис. 37, 38. Пример выделения малоамплитудных отраженных сигналов, когда весовая корреляция полностью устранила фон регулярных волн-помех, приведен на рис. 38. Отметим здесь, что обычная фильтрация высоких частот не дала такого хорошего результата по подавлению существующих волн-помех. Пример увеличения временной разрешенности отражений от границ известковой толщи дан на рис. 37.

#### 4.1.7. Арирование вибросейсмических данных

Различие характеристик и свойств первичных полевых записей (виброграммы и коррелограммы) дает возможность использовать автоматическую регулировку усиления (АРУ) до и после корреляции. Применение АРУ к коррелограммам не является новым вопросом. Так же, как и в импульсной сейсморазведке, использование АРУ при обработке вибрационных записей на уровне коррелограмм (импульсных сейсмограмм) позволяет поднять и привести амплитуды слабых сигналов к уровню сильных и тем самым обеспечивает возможность прослеживания глубоких отражений.

Относительно недавно появились предложения применять АРУ непосредственно к виброграммам [35]. В этой постановке в цифровом варианте процедура АРУ обнаруживает новые полезные свойства. "Арирование" виброграмм перед взаимной корреляцией позволяет улучшить прослеживаемость отражений на фоне регулярных волн-помех, а также за счет выравнивания спектра повысить временную разрешенность полезных сигналов.

Если произвести до корреляции арирование (применить АРУ) виброграмм, то можно добиться значительного выравнивания по амплитуде разночастотных гармоник длительных цугов отражений. Соответственно спектр таких сигналов будет существенно шире (выравненным), чем спектр сигналов без арирования. В результате такого эффекта отраженные сигналы на коррелограммах после корреляции будут иметь более компактный вид. Кроме того, может быть существенно снижен уровень регулярных волн-помех.

АРУ выравнивает суммарную амплитуду записи, поэтому на высоких частотах, где амплитуда поверхностной волны-помехи относительно понижена, больший удельный вес приобретает полезный сигнал. Кроме того, поскольку выравнивается не спектр, а сигналы на вибротрассе, на которой различные частотные составляющие разнесены по времени, результаты арирования могут быть различными при разном направлении частотной развертки управляющего сигнала. При сигналах с разверткой вверх может существенно улучшаться прослеживание горизонтов ниже первых вступлений помехи, при сигналах с разверткой вниз улучшение может наблюдаться преимущественно для волн выше первых вступлений низкочастотной помехи.

Наиболее употребимый алгоритм АРУ

$$x_i' = C \frac{\Delta T / \Delta t}{\sum_{j=-l/2}^{l/2} |x_{i+j}|} x_i, \quad (4.11)$$

где  $x_i$ ,  $x_i'$  — отсчеты входной и выходной трасс;  $\Delta T$  — размер временного окна АРУ (длина оператора);  $C$  — масштабный коэффициент.

Способ арирования виброграмм перед корреляцией успешно применяется при обработке как средство, улучшающее качество коррелограмм и суммарных разрезов, на ВЦ ряда производственных организаций. Отмечено, что данный способ дает наилучший эффект по прослеживанию и разделению отражений в совокупности с деконволюцией, которая применяется после АРУ и корреляции к результирующим коррелограммам. Единственным параметром, оптимизирующим результат обработки, является длина оператора АРУ  $\Delta T$ . По опыту обработки рекомендуется использовать  $\Delta T = 0,5 \div 1,5$  с.

Арирование виброграмм является нелинейной процедурой, как и обычное АРУ, что сказывается прежде всего на динамических соотношениях отраженных сигналов на коррелограммах после арирования. Так как оператор АРУ рассчитывается по участкам виброграмм, включающих интерференцию нескольких длительных смещений по времени цугов отражений, то естественно, что это может привести к существенным амплитудно-фазовым искажениям истинного соотношения динамических и фазовых характеристик интерферирующих сигналов. Несмотря на простоту и экономичность реализации, способ арирования трасс перед взаимной корреляцией может быть рекомендован в тех случаях, когда не ставится последующая задача динамической обработки данных.

#### **4.1.8. Технология первичной обработки вибросейсмических данных**

В подразд. 4.1.1 – 4.1.6 рассмотрены специфические процедуры первичной обработки вибросейсмической информации. Рассмотрим технологию первичной обработки, подразумевая под ней последовательность и порядок использования процедур, который является общепринятым при обработке материалов ВСП [19].

##### **1. Этап ввода**

1.1. Технология ввода виброграмм в обрабатывающую систему принципиально не отличается от ввода импульсных сейсмограмм, но в ряде случаев имеются ограничения по длительности вводимых данных.

Известно два подхода к технологии ввода данных:

- ввод и демультимплексация непосредственно в основной обрабатывающей системе; реализуется в обрабатывающих системах СЦС-3, СОС-ПС, COMMAND на отечественных ЭВМ типа ЕС, ПС-2000 и импортных;
- ввод и демультимплексация через препроцессорную систему; реализуется в обрабатывающих системах ОС-77, "Сейспак", SOS, CYBER, на отечественных ЭВМ типа СМ-2, М-6000, М-7000 и импортных.

Препроцессорные ЭВМ могут иметь ограничения на объем вводимых данных. Например, ЭВМ СМ-2 и М-7000 способны демультимплексировать виброграммы максимальной длительностью 30 с при шаге дискретизации  $\Delta t = 2$  мс ( $V = 15\,000$  слов), М-6000 ограничивается длительностью 10 с при  $\Delta t = 2$  мс ( $V = 5000$  слов).

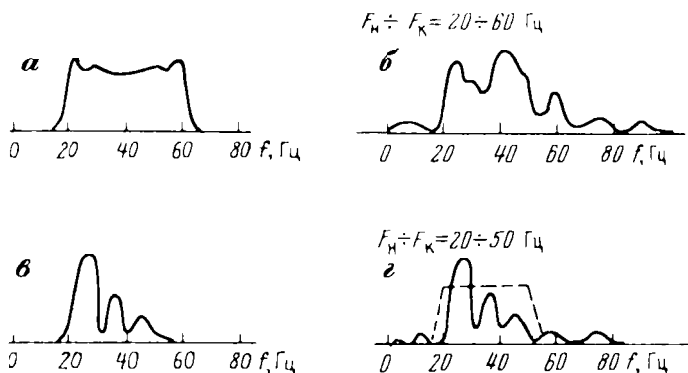


Рис. 39. Сравнение результатов спектрального анализа.

Спектры управляющего сигнала: а — неискаженного; б — искаженного. Спектры коррелограммы, если управляющий сигнал без искажений (в) и с искажениями (г). Пунктиром обозначены характеристики корректирующего полосового фильтра

1.2. Преобразование полевого формата слов в формат, используемый в обрабатывающей системе.

1.3. Синхронное накопление сигналов. Выполняется в том случае, если накопление не выполнено на полевой станции. При этом могут использоваться программы синхронного накопления с вырезанием ураганных помех или с весовым суммированием, если помехи обнаружены на исходных одиночных виброграммах.

1.4. Предварительная редакция виброграммы по рапортам операторов (обнуление бракованных трасс, изменение полярности и т.д.).

1.5. Визуализация виброграмм и трасс с управляющими сигналами для просмотра и оценки качества материалов и работоспособности вибраторов.

1.6. Спектральный анализ трасс с записью опорных сигналов выполняется для контроля качества посылаемых в среду управляющих сигналов и соответствия их заданным параметрам. Анализ проводится во временных "окнах", равных длительности управляющих сигналов.

## 2. Оценка качества полученного материала по виброграммам и результатам спектрального анализа

2.1. Проверка местоположения опорных сигналов на виброграммах и длительности виброграмм.

2.2. Уточнение длины управляющего сигнала и виброграммы для выполнения взаимной корреляции. Для этого по виброграммам визуально определяют их длительность, а также начало и конец опорного сигнала. Причем начало опорного сигнала должно совпадать с началом виброграммы.

2.3. Оценка качества управляющих сигналов во временной и спектральной областях (рис. 39). Проверяются наличие амплитудных и фазовых модуляций сигнала, равномерность амплитудного спектра, соответствие заданных и реальных параметров, скосы, полоса частот и др. Если данный управляющий сигнал не соответствует заданным параметрам, то он заменяется либо качественным сигналом с соседней виброграммы, либо модельным сигналом, генерируемым ЭВМ, с требуемыми параметрами.

2.4. Оценка необходимости центрирования виброграмм и управляющих сигналов. Центрирование особенно необходимо после проведения вертикального суммирования.

По виброграммам оценивается наличие смещения нуля вибротрасс и управляющих сигналов и выбирается длина "окна" центрирования (обычно 1–2 с).

2.5. Определение необходимости согласования динамических диапазонов полевых записей с разрядностью ЭВМ. Реализуется путем оценки разрядности виброграмм и согласования ее с максимальной разрядностью ЭВМ.

Нормирование полевых виброграмм производится по среднему абсолютному значению амплитуд выборок в задаваемом "окне" или в пределах всей трассы. В задании необходимо указать пределы "окна" нормирования и среднее значение амплитуд.

### *3. Процедуры корреляции*

3.1. Центрирование виброграмм и управляющих сигналов с выбранными по п. 2.4 параметрами.

3.2. Согласование диапазона виброграмм в соответствии с п. 2.5.

3.3. Арирование виброграмм и управляющих сигналов с целью улучшения прослеживания и разрешенности отражений. АРУ применяется в том случае, если не используется в дальнейшем динамическая обработка. Арирование виброграмм не является обязательной процедурой и используется в каждом конкретном случае по усмотрению.

3.4. Взаимная корреляция зарегистрированных колебаний с опорным сигналом.

При корреляции виброграмм, полученных с кодоимпульсными источниками, в качестве опорного сигнала могут выбираться: код источника в виде дельта-функций и код источника в виде меандров (меандр — короткий сигнал, заменяющий дельта-функцию). По опыту обработки лучший результат по разрешенности достигается в том случае, когда взаимная корреляция выполняется с опорным сигналом, представленным кодом в виде дельта-функций. В этом случае спектр сигналов на выходе корреляции будет более широким, чем при корреляции с кодом в виде меандров.

3.5. Нормирование откоррелированных трасс. Выполняется с целью согласования результатов корреляции с форматами последующих про-

цедур обработки. Указывается выходная разрядность коррелограммы или же принимается установочное значение.

3.6. Весовая взаимная корреляция зарегистрированных колебаний. Применяется взамен стандартной корреляции в случае необходимости подавления волн-помех и для повышения разрешенности и прослеживаемости, когда коррелограммы после стандартной корреляции не удовлетворяют требуемому качеству.

3.7. Полосовая фильтрация коррелограмм фильтром, частотная характеристика которого соответствует огибающей опорного сигнала. Выполняется с целью обнуления частотных составляющих за пределами диапазона опорного сигнала.

3.8. Визуализация коррелограмм. Выполняется для всех записей с целью контроля качества корреляции и проведения дополнительной редакции, выбора параметров фильтрации, мьютинга, выравнивания и т.д.

3.9. Спектральный анализ участков коррелограмм во временном интервале, соответствующем основным целевым отражениям. Объем анализа должен быть достаточным для выбора и обоснования параметров последующих фильтраций.

#### *4. Анализ результатов корреляции*

4.1. Оценка качества коррелограмм по разрешенности сигналов, прослеживаемости основных отражений и т.д. При этом используются программы для определения отношения сигнал/помеха, видимого периода колебаний, частотного состава основных отражений и др.

4.2. Определение необходимости амплитудного выравнивания коррелограмм по  $x$  и по  $t$  и выбор параметров выравнивания.

Выравнивание трасс выполняется главным образом с целью поднятия уровня слабых отражений и уравнивания амплитуд колебаний между трассами. Производится либо по всей длине записи, либо в определенных временных "окнах". Длина "окна" выравнивания и участки трасс коррелограмм, подлежащих выравниванию, выбираются обработчиком исходя из качества конкретного материала.

4.3. Дополнительная редакция записей, которая выполняется при наличии перевернутых полярностей, бракованных трасс или их участков.

4.4. Выбор параметров мьютинга (обнуление начальной части коррелограммы). Определяются параметры: длина участка обнуления (в мс) для первой и последней трасс в расстановке, а также расстояние (в м) между крайними трассами, интервал (в мс) для линейного перехода от нулевой амплитуды к амплитуде первых отражений.

Собственно процедуры в соответствии с пп. 4.2 и 4.4. выполняются на последующем этапе, которым, как правило, является этап предварительного суммирования.

При использовании процедур обработки, повышающих качество данных по критериям разрешенности, важно применять и умело использо-

вать результаты спектрального анализа. Это позволяет решать вопросы оптимизации используемых процедур на различных стадиях обработки.

Спектральный анализ при первичной обработке необходимо проводить в такой последовательности.

1. Анализ управляющих сигналов, записанных в поле на вспомогательных каналах. При этом делается монтаж амплитудных спектров управляющих сигналов со всех виброграмм профиля.

В случае записи управляющих сигналов в поле без искажений спектры всех сигналов должны иметь одинаковый вид (см. рис. 39). Краевые части спектра должны соответствовать значениям начальной ( $F_H$ ) и конечной ( $F_K$ ) частот управляющего сигнала, задаваемого в поле.

При значительном отклонении формы спектра из-за амплитудно-фазовых искажений от заданной (см. рис. 39, б) данный управляющий сигнал при корреляции рекомендуется заменить на сигнал с соседней виброграммы или на синтетический, который формируется специальными программными средствами. Если такой возможности нет, то виброграмму, относящуюся к данному управляющему сигналу, следует исключить из обработки (например, обнулить). Если обнаруживается значительное количество сигналов с искаженными спектрами, то взаимная корреляция профиля осуществляется с синтетическим управляющим сигналом со значениями параметров  $F_H$  и  $F_K$ , длительности  $T$  и конусности, которые устанавливались в поле.

При выборе параметров синтетического сигнала уровень его амплитуды  $A$  при полноразрядной корреляции следует устанавливать в пределах  $5000 \leq A \leq 10000$ .

2. Анализ коррелограмм. Здесь полезно делать монтаж временных интервалов, включающих основные целевые отражения для каждой десятой коррелограммы. Для анализа выбираются одна из близких и одна из дальних к ПВ трасс и три центральных трассы, на которых визуально наблюдается наилучшее выделение полезных волн. Если при взаимной корреляции использовались неискаженные управляющие сигналы, спектры сигналов на коррелограммах должны иметь вид, подобный показанному на рис. 39, в. При правильной корреляции спектр коррелограмм сосредоточен в частотном диапазоне  $F_H - F_K$ , за пределами которого его значения равны нулю.

Если за пределами  $F_H - F_K$  значения спектра не равны нулю (рис. 39, г), то это свидетельствует о том, что управляющий сигнал, с которым проведена корреляция, содержит частотно-фазовые искажения. Эти добавки к спектру не несут полезной информации, выступают в роли помех и их необходимо удалить из дальнейшей обработки. Это делается тремя путями: посредством корреляции с управляющим сигналом соседней виброграммы, корреляции с синтетическим управляющим сигналом или с помощью дополнительной полосовой фильтрации коррелограмм с параметрами, установленными по огибающей амплитудного спектра управляющего сигнала (см. рис. 39, пунктир).



3. Анализ коррелограмм (тестовых и реальных) после использования весовой корреляции или арирования виброграмм при применении стандартной корреляции производится с целью оценки эффекта выравнивания (расширения) спектров отраженных сигналов, степени подавления регулярных и случайных помех. В этом случае по усмотрению обработчика составляют монтажи в том же объеме, что и по п. 2 для профиля и для тестов, используя временные "окна", включающие целевые отражения.

По амплитудным спектрам более точно, по сравнению с временным представлением, можно оценить степень выравнивания спектра полезных сигналов и подавления регулярных помех, спектральные интервалы с преимущественным влиянием случайных помех. При этом уточняют для весовой корреляции амплитуды опорного сигнала в узловых точках, а для арирования виброграмм — длину оператора АРУ.

#### **4.1.9. Обработка материалов, полученных по методике комбинированных сигналов**

Обработка материалов, полученных по методике комбинированных разверток, сводится в основном к следующим операциям:

- корреляция каждой виброграммы  $V_i$  со своим управляющим сигналом, при этом может быть применена как весовая корреляция, так и арирование виброграммы;

- нормализация по энергии коррелограмм, относящихся к разным управляющим сигналам, перед суммированием (если суммируются временные разрезы, то их трассы также нормализуют);

- суммирование коррелограмм  $K_i$ , полученных с разными параметрами управляющих сигналов, но относящихся к одному и тому же ПВ, (или суммирование временных разрезов от разных разверток);

- более четкий учет статических и кинематических поправок, поскольку суммирование должно выполняться в широкой полосе частот. При этом коррекция статических и кинематических поправок производится непосредственно по суммарным коррелограммам (в случае суммирования коррелограмм);

- деконволюция применяется только к суммарным коррелограммам (или к суммарным трассам ОГТ), а не к каждой составляющей коррелограмме.

Отметим, что реализация МКР на этапе обработки представляется более технологичной и корректной при суммировании на уровне коррелограмм, так как в этом случае ввод поправок, их коррекция, суммирование по ОГТ, фильтрация производятся только для одного временного разреза.

Остальные операции первичной обработки виброграмм и коррелограмм сохраняются такими же, как и при стандартной методике.

#### 4.1.10. Новые подходы к первичной обработке вибросейсмических данных

##### *Следящая фильтрация*

Представляет интерес подход к повышению помехоустойчивости и динамической разрешенности вибрационной сейсморазведки в условиях высокого уровня шумов, представленный в работе [16]. В ней отмечается, что один из путей снижения относительного уровня корреляционных шумов, создаваемых интенсивными сейсмическими волнами, основан на использовании принципов следящей фильтрации при регистрации вибросейсмических сигналов. Возможность применения следящей фильтрации в вибрационной сейсморазведке при линейной модуляции частоты вибраций обусловлена существованием частотного сдвига  $\Delta F_i$  сейсмических волн относительно сигнала развертки, зависящего от времени их вступления  $t_i$  [16]:  $\Delta F_i = (\Delta F/T) t_i$ , где  $\Delta F$  — частотный диапазон вибраций;  $T$  — длительность вибраций.

Следящий фильтр, используемый для увеличения относительной интенсивности сейсмических волн в заданном интервале записи, должен иметь частотную характеристику, максимум которой перемещается по оси частот таким образом, что разность между ним и мгновенной частотой сигнала развертки сохраняется постоянной в процессе всего цикла вибраций. Ширина полосы пропускания следящего фильтра  $\Delta F_i$  выбирается так, чтобы полезные волны регистрировались без ослабления, а волны-помехи попали в область минимума частотной характеристики (рис. 40).

После прохождения сигналов через следящий фильтр относительная интенсивность сейсмических волн на записи изменяется, поэтому уровень корреляционных шумов, создаваемых интенсивными сейсмическими волнами, должен быть существенно уменьшен. В настоящее время разработаны программы для реализации следящей фильтрации во временной области при цифровой обработке вибрационных записей. Экспериментальные исследования на тестовых материалах показали эффективность и перспективность использования следящей фильтрации при первичной обработке вибрационных данных.

##### *Вычитание корреляционных шумов*

Известен подход к увеличению динамической разрешенности вибрационных данных за счет снижения уровня корреляционных шумов в дальней зоне путем их последовательного вычитания [20]. Суть способа состоит в том, что функция автокорреляции управляющего сигнала подводится под максимум сильной отраженной волны, нормализуется по максимальной амплитуде этой волны, а затем все значения ФАК, кроме главного максимума, вычитаются из коррелограммы. Эта процедура повторяется для других отраженных волн. Считается, что в результате

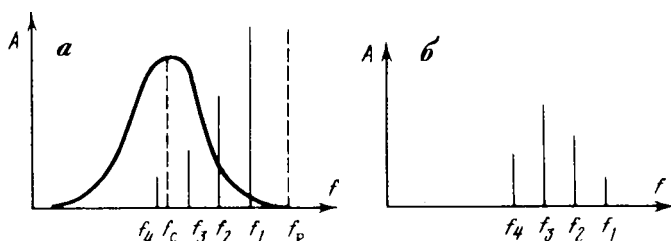


Рис. 40. Схема действия следящего фильтра:

*а* — переходная характеристика следящего фильтра в момент времени  $t_i$ ;  $f_p$  — мгновенная частота сигнала развертки в момент  $t_i$ ;  $f_1, f_2, f_3, f_4$  — амплитуды сейсмических волн в момент  $t_i$  на входе следящего фильтра;  $f_c$  — частота максимального значения характеристики следящего фильтра в момент  $t_i$ ; *б* —  $f_1, f_2, f_3, f_4$  — амплитуды сейсмических волн в момент  $t_i$  на выходе фильтра

вычитания существенно ослаблен фон корреляционных шумов, что приводит к увеличению динамического диапазона регистрации. В работе [20] дается алгоритм обработки и рекомендации по практической реализации, однако не приводятся примеры реализации способа на реальных материалах. Сомнительно, что такой способ дает точный результат при вычитании корреляционных помех без учета фильтрации, так как вследствие амплитудно-фазовых искажений из-за фильтрующего действия среды нет полного соответствия между ФАК управляющего сигнала и ФВК отдельного отраженного ЛЧМ сигнала с управляющим.

Возможность увеличения динамического диапазона на основе вычитания рассмотрена в работе [17]. Авторами предлагается отличная от [20] реализация такого подхода. Пусть  $V(t)$  — виброграмма. Ее можно представить в виде суммы функций  $A_i S(t - \tau_i)$ , где  $S(\tau)$  — управляющий сигнал;  $A_i$  — амплитуды;  $\tau_i$  — временные сдвиги. Алгоритм вычитания выглядит следующим образом. Вначале коррелируют виброграмму  $V(t)$  с управляющим сигналом  $S(t)$ . Выделяют главный экстремум превичной корреляции  $R^1_{\max}(\tau_1)$ . Предполагают, что этот экстремум соответствует присутствию сигнала  $A_1 S(t - \tau_1)$  на виброграмме. Величина  $\tau_1$  определяется по максимальному значению  $R_{\max}(\tau_1)$ . Оценку  $A_1$  получают из следующих рассуждений. Предполагают, что  $R_{\max}(\tau_1)$  — максимальное значение взаимной корреляции между управляющим сигналом  $S(t)$  и  $A_1 S(t - \tau_1)$ . Исходя из этого,  $A_1$  определяется как отношение  $R_{\max}(\tau_1)$  к максимальному значению автокорреляционной функции управляющего сигнала. Далее вычитают из виброграммы найденный сигнал  $A_1 S(t - \tau_1)$ . Получают виброграмму  $V_1(t)$ .

Далее таким же образом повторяют всю операцию для  $V_1(t)$  и повторяют ее до тех пор, пока не получают соотношение  $\max |S_n(t)| < \epsilon$ , где  $\epsilon$  — наперед заданное число, меньшее амплитуды слабых отражений на виброграмме.

Исключение наиболее сильных сигналов из виброграммы должно

привести соответственно к исключению корреляционных шумов сильных вступлений и на коррелограммах.

Модельные исследования такого алгоритма вычитания показали, что он обладает достаточной эффективностью. Во многих случаях достаточно применения лишь нескольких шагов итерации, позволяющих снять влияние наиболее сильных волн, присутствующих на синтетической виброграмме.

Приведенные способы вычитания корреляционных шумов дают результат на синтетических коррелограммах и виброграммах. Однако в реальных условиях их эффективность не так очевидна, так как регистрируемые отраженные сигналы имеют значительные амплитудно-фазовые искажения по отношению к управляющему сигналу из-за фильтрующего эффекта контакта вибратор — грунт, ВЧР и т.д. Сигналы, прошедшие фильтрацию, имеют существенно другие временные, амплитудные и частотные характеристики (справедливо как для самих сигналов, так и для корреляционных шумов). Это может привести к ошибкам при вычитании идеальных сигналов, вызванных несоответствием их реальным сигналам, и к отрицательному результату вычитания в целом. Может быть, поэтому отсутствуют на данный момент положительные результаты опробования представленных алгоритмов вычитания на реальных полевых материалах. Внедрение в практику обработки вибрационных данных подобных способов во многом зависит от дальнейшего их пересмотра с учетом фильтрующего эффекта и реальной формы зарегистрированных сигналов.

## 4.2. ЭТАП УГЛУБЛЕННОЙ ОБРАБОТКИ

Этап углубленной обработки вибрационных данных включает следующие основные процедуры: фильтрацию (обратная, полосовая, когерентная и др.), ввод статических и кинематических поправок, суммирование по ОГТ, коррекцию статических и кинематических поправок, миграцию. На рис. 41 приведен наиболее типичный стандартный граф

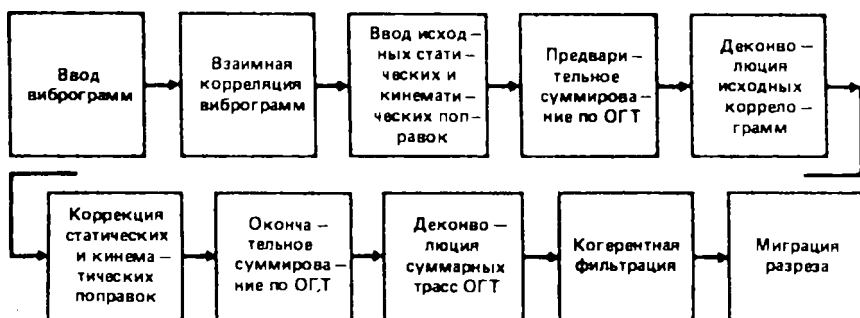


Рис. 41. Стандартный граф обработки вибросейсмических материалов

обработки вибросейсмических материалов. Естественно, что в зависимости от качества первичного материала и характера решаемых геологических задач граф обработки может расширяться и усложняться [19, 20], однако, приведенный перечень процедур обычно всегда присутствует при углубленной обработке вибросейсмических данных.

Основной перечень процедур углубленной обработки, последовательность и особенности их применения для данных ВСП и импульсного возбуждения совпадают и подробно описаны во многих работах [19, 32, 42]. Учитывая это, остановимся только на вопросах обратной фильтрации, так как при использовании именно этой процедуры наблюдаются наиболее существенные различия в обработке импульсной и вибрационной сейсморазведки.

#### **4.2.1. Обратная фильтрация вибросейсмических данных**

Обратная фильтрация используется с целью выравнивания спектра зарегистрированных данных в пределах частотного диапазона управляющего сигнала, что обеспечивает лучшее сжатие и разрешение исходных сигналов. В результате действия фильтрующих факторов вибрационные сигналы подвергаются большим частотно-фазовым искажениям, чем при взрывах, вследствие чего наблюдается значительное сужение спектров отраженных сигналов (особенно за счет затухания высоких частот) по сравнению с прямоугольным спектром управляющего сигнала. По этой причине импульсы на реальных коррелограммах отличаются от автокорреляционных импульсов управляющего сигнала. Различия в спектрах приводят к значительному снижению разрешающей способности ВСП по сравнению с теоретической (предельной).

Поэтому при стандартной технологии полевых работ возрастает роль обратной фильтрации, которая во многих случаях является наиболее эффективным средством повышения разрешающей способности метода.

Большое число публикаций, появившихся в последнее время в литературе по вопросам фильтрации сейсмических данных, свидетельствует о том, что теория и практика обратной фильтрации продолжают интенсивно развиваться. Предложено много различных алгоритмов и программ деконволюции. Наиболее полное описание новых способов обратной фильтрации и их сравнительный анализ приведены в работах [20, 39, 42].

В силу специфики используемых сигналов обратная фильтрация вибросейсмических материалов имеет свои особенности. Это определяет необходимость создания специализированных алгоритмов и программ деконволюции, наилучшим образом применимых к данным ВСП. Рассмотрим особенности обратной фильтрации при вибросейсморазведке на примерах наиболее перспективных способов ее реализации, а также на оценке ее возможностей.

В принципе возможны два пути виброрейсической деконволюции. Первый — применение деконволюции непосредственно к первично зарегистрированным виброграммам [48], второй — применение деконволюции к коррелограммам. Оценка функции, описывающей совокупность фильтрующих свойств, которым подвергается вибрационный сигнал в случае стационарности входного процесса (виброграммы), реализуется с помощью спектра мощности [48].

$$\Phi_B(\omega) = |F(\omega)|^2 \Phi(\omega), \quad (4.12)$$

где  $\Phi_B$  — спектр мощности виброграммы;  $\Phi(\omega)$  — спектр мощности стационарного случайного процесса  $V(t) = S(t) * IR(t)$ ;  $F(\omega)$  — спектр неизвестного линейного инвариантного фильтра  $F(t)$ .

Спектр мощности  $\Phi_B(\omega)$  идеальной виброграммы  $V(t)$  в ВСП представляют в виде

$$\Phi(\omega) = \Phi^{IRIR}(\omega) |S(\omega)|^2, \quad (4.13)$$

где  $\Phi^{IRIR}(\omega)$  — спектр мощности импульсной реакции среды  $IR$ ;  $S(\omega)$  — преобразование Фурье управляющего сигнала.

Из уравнений (4.12), (4.13) можно найти неизвестную функцию  $F(\omega)$ :

$$C|F(\omega)|^2 = \Phi_B(\omega) / |S(\omega)|^2, \quad (4.14)$$

где  $C = \Phi^{IRIR}(\omega)$  (так как  $IR$  имеет характеристики белого шума).

Уравнение (4.14) можно решить прямо в частотной области.

В работе [48] теоретическое решение (4.14) рассматривается в  $z$ -представлении. Показано, что обратный фильтр виброграмм в  $z$ -представлении имеет вид

$$1/F_0(z) = aS_0(z)C_0(z), \quad (4.15)$$

где  $S_0(z)$  — минимально-фазовый фильтр, чей амплитудный спектр идентичен амплитудному спектру управляющего сигнала;  $C_0(z)$  — минимально-фазовый фильтр сжатия;  $a$  — постоянный множитель.

Сам обратный фильтр  $1/F_0(z)$  является также минимально-фазовым.

При обратной фильтрации коррелограмм обратный фильтр в частотной области вычисляется из соотношения

$$C|F(\omega)|^2 = \frac{\Phi_B(\omega)}{|S(\omega)|^2 |S(\omega)|^2}. \quad (4.16)$$

В  $z$ -представлении идеальный обратный фильтр описывается выражением

$$1/A_0(z) = KS_0(z)S_0(z)C_0(z), \quad (4.17)$$

где  $K$  — также некоторый постоянный множитель.

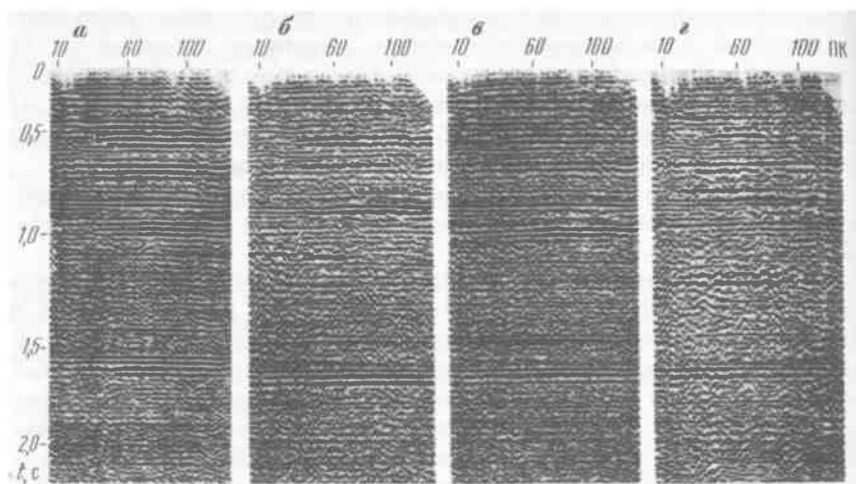
Другими словами, обратный фильтр в  $z$ -представлении описывается сверткой трех минимально-фазовых операторов. Оператор  $C_0(z)$  соответствует оператору фильтра сжатия, который получается из автокорреляции коррелограмм. Произведение  $S_0(z) S_0(z)$  соответствует свертке двух минимально-фазовых сигналов, чьи амплитудные спектры эквиваленты амплитудному спектру управляющего сигнала.

На практике определение обратного фильтра реализуется не с помощью  $z$ -преобразования, а с помощью метода Винера—Левинсона во временной области.

Применение деконволюции к виброграммам имеет цель расширить частотный диапазон зарегистрированных сигналов и приблизить их к частотному диапазону зондирующего сигнала, что обеспечит лучшее сжатие сигналов при корреляции. Но в этом случае требуется более сложный расчет операторов фильтра и заметно большие затраты машинного времени. Поэтому, как правило, деконволюция применяется к прокоррелированным трассам. В этом случае упрощается выбор параметров обратного фильтра и имеется возможность применить переменную во времени деконволюцию при достаточно ограниченном потреблении машинного времени. Иначе говоря, целесообразен и экономически оправдан второй путь — деконволюция коррелограмм. При этом обратный фильтр должен компенсировать суммарный фильтрующий эффект  $F(t)$  (системы контакт вибратор — грунт, ВЧР, фильтра среды и тракта регистрации).

Результатом деконволюции является выравненный в частотном диапазоне управляющего сигнала спектр отраженных волн. Отметим, что любая вибросейсмическая деконволюция (за исключением максимально энтропийной) позволяет расширять спектр сигнала только в пределах диапазона частот развертки. Естественно, чем уже этот диапазон, тем меньше эффективность ее применения. В этом состоит одна из трудностей применения обратной фильтрации, так как во многих случаях на практике для более уверенного прослеживания границ используют неширокополосные развертки. С другой стороны, корреляционная обработка обеспечивает лучшее отношение сигнал/помеха при вибрационном возбуждении, чем при взрывных и импульсных способах, и приводит к значительному повышению шумов на выходе деконволюции.

Возможно также и двойное применение обратной фильтрации, например к коррелограммам и суммарным трассам ОГТ. Использование обратной фильтрации вторично к суммарным трассам ОГТ имеет ограниченное применение, однако может оказаться полезным в тех случаях, когда имеется необходимость выравнить спектры просуммированных трасс. Особенности применения обратной фильтрации связаны с относительно узким (по эффективной части) спектральным составом колебаний и со сложным смешанно-фазовым характером сигналов на коррелограммах. Этим обусловлены трудности в выборе видов обратных фильтров и их параметров, а также необходимость многократного тестирования экспериментального материала.



**Рис. 42. Результаты применения различных деконволюций:**

**а** — минимально-фазовой; **б** — прогностической; **в** — нуль-фазовой при 20 % ном уровне добавляемого шума; **г** — нуль-фазовой при 5 % ном уровне добавляемого шума (по данным НФФ ВНИИГеофизики, 1985 г.)

На ранних стадиях внедрения ВСР к вибрационным материалам применялись программы деконволюции, разработанные с учетом взрывного, импульсного возбуждения. В этом плане наиболее применимыми оказались деконволюция сжатия, корректирующая обратная фильтрация, предсказывающая деконволюция [19]. Все эти программы основаны на общепринятых алгоритмах Винера — Левинсона [48], в которых обратный фильтр рассчитывается в предположении минимальной фазовости единичного отраженного импульса. Опыт использования этих программ показал возможность повышения временной разрешенности сигналов на коррелограммах и разрезах ОГТ. Однако во многих случаях наблюдается ухудшение результатов фильтрации по отношению к исходным материалам [11, 19]. Это объясняется двумя причинами. Реальные импульсы на коррелограммах, являясь в принципе смешанно-фазовыми, по форме ближе к теоретическому нуль-фазовому автокорреляционному импульсу, чем к минимально-фазовому, что ведет к значительным фазовым искажениям при применении минимально-фазовой деконволюции. С другой стороны, вибрационные сигналы испытывают резкое поглощение энергии высоких частот контактом вибратор — грунт и ВЧР, что приводит к преобладанию случайной помехи над полезным сигналом в области высоких частот (больше 40–50 Гц) и к существенному поднятию уровня шума после деконволюции (рис. 42). В этом случае приходится принимать компромиссное решение между разрешением и прослеживанием целевых отражений, выбирая оптимальные параметры регуляризации (которые определяют степень выравнивания спектра и отношение



сигнал/помеха на выходе обратного фильтра). Часто для снижения шумов после деконволюции как сжатия, так и предсказания применяют последующую полосовую фильтрацию (корректирующая обратная фильтрация), которая сужает эффект расширения спектра, но при этом снижает зашумленность трасс.

Установленным фактом является то, что сигналы после взаимной корреляции не являются минимально-фазовыми, а по форме ближе к нуль-фазовым сигналам [11, 19, 20]. В результате деконволюция сжатия с использованием минимально фазового оператора не будет эффективной. Она повлечет за собой усиление боковой полосы пропускания частот в левой части импульса. Возможны два пути преодоления этой трудности. Первый заключается в использовании предсказывающей деконволюции с оператором, выбранным для устранения ревербераций. Если длина интервала предсказания  $\theta$  включает наиболее значимую часть импульса (основной максимум до второго пересечения с осью  $t$ ), то основной пик не будет изменен обратной фильтрацией, а последующие вторичные максимумы, превышающие основной период импульса, будут устранены. Второй путь заключается в предварительном преобразовании исходных отражений на коррелограммах в импульсы с минимальной фазой перед деконволюцией. Это достигается сверткой трассы с оператором фильтра, чей амплитудный спектр эквивалентен исходному, а фазовый спектр получают с помощью преобразования Гильберта при известном амплитудном спектре. Минимально-фазовая деконволюция минимально-фазовых сигналов дает в результате импульсы с минимальной фазой. Следовательно, они будут иметь существенно более длинный задний фронт, чем у эквивалентного по амплитудному спектру импульса с нулевой фазой, что может затруднять выделение и разделение близкорасположенных интерферирующих отражений на сейсмическом разрезе.

Последние исследования в области разрешенности сейсмических сигналов показывают, что наилучшей разрешенностью обладают нуль-фазовые сигналы [40].

Сравним разрешающую способность минимально-фазового и нуль-фазового сигналов с одинаковыми амплитудными спектрами. На рис. 43 изображены два таких сигнала со спектром, типичным для ВСР или полосового фильтра. Минимально-фазовый сигнал является односторонним (равен нулю для отрицательного времени) и имеет значительный задний фронт вторичных импульсов. Начало импульса относится к нулевому времени. Нуль-фазовый сигнал — двухсторонний, симметричный и не имеет резко выраженного вступления. Нулевое время относится к максимальному значению главного пика. Количественная оценка разрешенности этих диаметрально противоположных по фазе сигналов показывает, что нуль-фазовый сигнал имеет существенно более лучшую разрешенность, чем минимально-фазовый, несмотря на то, что их амплитудные спектры одинаковы. Это объясняется тем, что нуль-фазовый сигнал

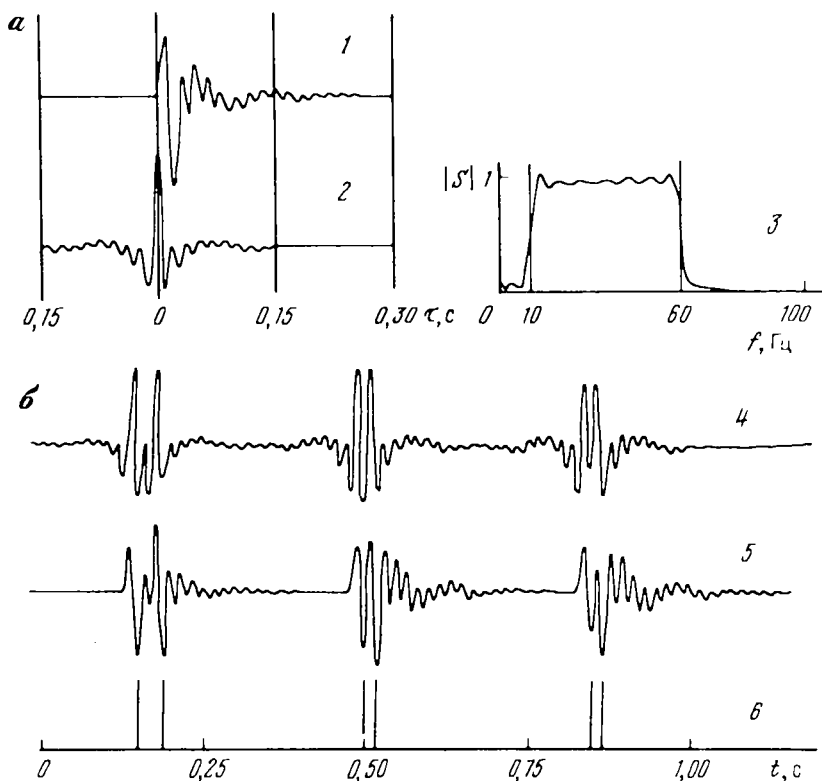


Рис. 43. Сравнение разрешающей способности:

*a* — минимально-фазового 1 и нуль-фазового 2 сигналов с одинаковыми амплитудными спектрами 3; *б* — синтетические коррелограммы с нуль-фазовым 4, минимально-фазовым 5 сигналами; 6 — заданная импульсная характеристика (распределение коэффициентов отражения)

имеет меньший по амплитуде уровень вторичных всплесков относительно максимума главного пика и меньший по длительности интервал их существования (интервал, где амплитуды вторичных импульсов составляют значительные величины). Оценка разрешенности по Беркхауту [40] (через длину сигнала, которая учитывает амплитуду и длительность существования вторичных всплесков) для данного примера показывает, что нуль-фазовый сигнал имеет длительность 8,3, а минимально-фазовый 25,9 усл. ед., т.е. первый почти в 3 раза короче последнего. Измерения разрешающей способности, которые включают только изолированные сигналы, до некоторой степени идеальны. Более правильной оценкой разрешающей способности сигналов является способность различать, с учетом типа сигнала, два и более отражений, которые перекрывают друг друга.

На рис. 43 изображены синтетические трассы, образованные сверткой последовательностей коэффициентов отражений с нуль-фазовым и минимально-фазовым сигналами. Все коэффициенты отражений равны по величине и знаку и расположены по парам. В парах коэффициенты отражений разделены между собой соответственно через 40, 20 и 16 мс. Так как каждый из сигналов имеет частотную полосу примерно 10–60 Гц, то первая пара отражений (более мелкая) разделяется лучше, чем последующие.

Перед количественным анализом этих сейсмограмм отметим некоторые очевидные качественные различия: 1) при свертке одинаковых коэффициентов отражений с нуль-фазовыми сигналами получаются те же самые одинаковые амплитуды отражений, в то время как амплитуды отражений при свертке с минимально-фазовыми сигналами различны; 2) максимумы отражений при нуль-фазовом сигнале по времени соответствуют временам коэффициентов отражений, а при минимально-фазовом сигнале максимумы отражений запаздывают; 3) уровень боковых максимумов в случае минимально-фазового сигнала настолько высок, что часто трудно выделить отражения из всей группы колебаний; 4) нуль-фазовые сигналы имеют нечеткое первое вступление по сравнению с минимально-фазовыми.

Каждая из двух сейсмограмм имеет два сигнала, соответствующие двум мелким отражениям. Для нуль-фазового сигнала здесь достигается полное разрешение, для минимально-фазового — условное разрешение. Для отражений при нуль-фазовом сигнале также можно довольно четко выделить два максимума. Однако выделить второе отражение на 0,52 мс для минимально-фазового сигнала очень трудно. Действительно, в этом случае уровень шумов на 30 % выше.

Самую глубокую пару отражений можно различить только на сейсмограмме с нуль-фазовым сигналом, хотя это сделать труднее. В то же время для любого из минимально-фазовых сигналов такое разделение двух отражений практически невозможно, так как все сливается в длинный зашумленный сигнал. Заметим, что для минимально-фазовой трассы (рис. 43,б) энергия боковых шумов в 3 раза больше энергии отражений.

Кроме того, нуль-фазовые сигналы позволяют определить глубину и пространственное расположение пластов.

По результатам, представленным на рис. 43,б, можно отметить несколько интересных свойств этих синтетических сейсмограмм. Времена отражений для нуль-фазовых сейсмограмм (оценка по пикам отражений) для всех примеров отличаются от времен идеальных отражений в пределах одной миллисекунды. Однако отставание времен отражений от идеальных времен для минимально-фазовых сигналов изменяется от 14 до 26 мс. Следовательно, в случае нуль-фазовых сигналов время между максимумами точно соответствует времени между отражениями. Для минимально-фазовых сигналов самые мелкие отражения отличают-

ся друг от друга по времени на 39–42 мс вместо 40 мс в идеальной сейсмограмме. Для средней пары отражения следуют друг за другом через 21–22 мс вместо 20 мс, как в идеальном случае, и самые глубокие отражения следуют друг за другом через 17–19 мс вместо 16 мс.

Вышеприведенные результаты позволяют сделать следующие важные практические выводы.

Минимально-фазовый сигнал имеет минимальную длину, относится только к классу односторонних функций. Двухсторонний нуль-фазовый сигнал, соответствующий тому же самому амплитудному спектру, что и минимально-фазовый сигнал, в действительности имеет лучшее разрешение. Это было проиллюстрировано на синтетических сейсмограммах. Нуль-фазовые сейсмограммы визуально имеют разрешение значительно лучшее, чем соответствующие минимально-фазовые сейсмограммы.

Кроме того, нуль-фазовые сигналы обеспечивают более точное определение времен отражений и, следовательно, глубины залегания отражающего горизонта. Нуль-фазовые сигналы обеспечивают еще и более четкое разделение близко расположенных отражающих горизонтов.

Эти выводы, в свою очередь, позволяют сделать несколько важных рекомендаций при использовании фильтраций вибросейсмической информации.

Близость по форме реальных вибрационных сигналов к нуль-фазовому, а также их лучшая разрешающая способность должны служить обоснованием для организации процесса обработки. Процесс полосовой и обратной фильтрации должен выполняться с помощью нуль-фазовых операторов. Это обеспечит лучшую разрешенность сигналов, разрешенность и точность в плане последующей интерпретации сейсмических разрезов.

Дальнейшее развитие практики обратной фильтрации привело к созданию программ, реализующих фильтрацию в предположении нуль-фазовой формы элементарного сигнала, а также фильтраций с заданной формой импульса, которая предварительно оценивается на основе анализа падающих волн или первых сильных отражений, а затем в результате расчета обратного фильтра приводится к нуль-фазовой [20, 39]. Опыт использования указанных деконволюций в производственных организациях показывает, что практически повсеместно наблюдается положительный эффект от применения к коррелограммам прогностической деконволюции. Деконволюция сжатия дает устойчивый эффект с нуль-фазовым оператором и менее эффективна с минимально-фазовым (см. рис. 42). Во всех случаях полезно применять последующую корректирующую нуль-фазовую полосовую фильтрацию.

Деконволюция с заданной формой импульса, предварительно оцениваемой по исходным данным или с учетом скважинных наблюдений, применяется значительно реже, так как точная оценка реальной формы зондирующего вибрационного сигнала затруднительна.

Эта фильтрация основана на решении уравнения Левинсона — Винера в предположении нуль-фазовой формы единичного сигнала. Наиболее просто нуль-фазовую деконволюцию сжатия реализовывать в частотной области. Идея алгоритма базируется на представлении трассы случайной последовательностью импульсов, имеющих одинаковую форму, но случайную амплитуду. Если совокупность времен вступления носит случайный характер, то выравнивание амплитудного спектра приведет к преобразованию трассы в набор импульсов, близких к дельта-функции. Оператор нуль-фазового обратного фильтра в частотной области (Э.В. Коленков и др., 1979)

$$G(f) = |\bar{S}(f)| / [|\bar{S}(f)| + 0,01N|\bar{S}_{\max}(f)|], \quad (4.18)$$

где  $|\bar{S}(f)|$  — сглаженный амплитудный спектр  $|S(f)|$  входной трассы;  $|\bar{S}(f)|$  — общий наибольший делитель для всех составляющих частот;  $|\bar{S}_{\max}(f)|$  — максимальное значение  $|\bar{S}(f)|$ ;  $N$  — процент добавляемого шума (параметр регуляризации).

Спектр выходной трассы рассчитывается как

$$S_B(f) = S(f)G(f), \quad \text{где } S(f) = \text{Re}(f) + i \text{Im}(f) -$$

комплексный спектр входной трассы. Обратное преобразование Фурье от  $S_B(f)$  дает выходную трассу во временной области. На сегодняшний день программы нуль-фазовой деконволюции реализованы в обрабатывающих системах СЦС-3, COMMAND, "Сейспак", ЭГБК ПС-2000.

Деконволюция сжатия, как правило, резко расширяет (поднимает) края спектра, что часто приводит к существенному возрастанию шумов. Степень выравнивания спектра в принципе регулируется с помощью параметра регуляризации  $N$ . Выбирая конкретные значения параметра регуляризации (обычно  $N \approx 5 \div 30\%$ ), можно ослабить эффект расширения спектра на краях и, следовательно, снизить зашумленность трассы на входе. Однако в этом случае уменьшается эффект расширения спектра и сжатия сигналов во времени (см. рис. 42). Обратный фильтр сжатия является критичным также к выбору длины окна обработки (так как от него зависит мощность шума), что оптимизируется процессом тестирования.

### Корректирующая обратная фильтрация

Применяется для оптимизации результата деконволюции по параметру сигнал/помеха. Корректирующая обратная фильтрация осуществляется двумя последовательно включенными фильтрами — фильтром сжатия (4.18) и согласованным полосовым фильтром. Последующая полосовая фильтрация может быть совмещена с деконволюцией сжатия в одной программе или же применяться автономно после деконволюции

сжатия. Для вибросейсмических данных оператор полосового фильтра должен быть нуль-фазовым. В корректирующей обратной фильтрации резкое возрастание шумов в результате действия фильтра сжатия при малом проценте добавляемого шума сглаживается согласованным полосовым фильтром. Это достигается выбором частотных параметров фильтра и крутизны левой и правой его сторон при предварительном тестировании.

### *Деконволюция с заданной формой сигнала*

Деконволюция с заданной формой сигнала использует информацию о форме сигнала источника, которая оценивается специальной программой определения формы сигнала.

В системе обработки СЦС-3 программа определения формы сигнала (программа Р 458) позволяет получить форму импульса источника, необходимую для деконволюции с заданной формой сигнала (программа S 303), и рассчитать по этому импульсу обратный оператор, обеспечивающий сжатие (Э.В. Коленков, М.К. Орлович и др., 1979). Форму исходного сигнала определяют на основе анализа первых вступлений.

Обычно оценка формы импульса с целью ее стабильности производится по выбранным участкам записей ближних каналов по всему профилю. Степень подобия импульсов определяется по усредненным значениям ФАК. Далее информация о форме сигнала передается на вход деконволюции с заданной формой импульса (S 303). Оператор фильтра на основе способа наименьших квадратов стремится преобразовать форму сигнала к дельта-функции или точно определенной форме нуль-фазового импульса. Желаемый вид импульса, к которому должен привести рассчитываемый оператор, задается пользователем. Он может быть нуль-фазовым или минимально-фазовым.

Описанная деконволюция успешно применяется при обработке сейсмических данных, полученных на море, и в принципе может использоваться при обработке вибрационных данных. В этом случае при оценке формы сигналов могут быть использованы первые вступления на коррелограммах. Наиболее точное определение формы сигнала может быть достигнуто при анализе коррелограмм, полученных по методике ВСП.

Возможен и другой путь деконволюции вибросейсмических данных, с учетом реальной формы сигналов на коррелограммах.

Вначале изучается форма сигналов по скважинным наблюдениям, в частности, по методике ВСП. По оцененной таким образом форме сигнала рассчитывается дисперсионный корректирующий фильтр, который на выходе фильтрации обеспечивает преобразование реального сигнала в нуль-фазовый. Далее таким фильтром обрабатываются трассы коррелограмм профильных наблюдений, в результате чего все сигналы становятся нуль-фазовыми. Затем применяют нуль-фазовую деконволюцию сжатия, обеспечивающую расширение спектра сигналов. В результате обработки в такой последовательности на выходе деконволюции бу-

дуг получены коррелограммы с нуль-фазовыми сигналами и тем самым достигнуты наилучшие их разрешение и точность привязки отражающих площадок.

Деконволюция с учетом истинной формы сигналов на коррелограммах, обеспечивающая нуль-фазовые сигналы на выходе, наиболее оптимальна и эффективна для вибрационных материалов (за исключением максимально-энтропийной), однако требует дополнительных издержек, связанных со специальными скважинными наблюдениями.

### *Прогностическая деконволюция вибрационных данных*

Теория прогностической деконволюции подробно рассмотрена в работах [27, 37, 39]. Отметим только ее главные особенности применительно к обработке вибрационных данных. Прогностическая деконволюция — особый вид фильтрации, основанный на том, что предсказуемая часть входной трассы обусловлена исходным сигналом и многократными волнами, а непредсказуемая часть — полезными отражениями. Основана на решении уравнения Винера — Левинсона во временной области. В ней используются корреляционные связи сигналов отражения и некоррелируемость случайного распределения коэффициентов отражений. Автокорреляция входной трассы несет информацию о временном положении и форме сигналов отражения и многократных волн-помех (ревербераций).

На основании решения уравнения Винера — Левинсона фильтр предсказания во временном представлении имеет вид

$$\sum_{\tau=0}^T G_n(\tau) r_B(t-\tau) = r_B(t+\theta), \quad (4.19)$$

где  $G_n(\tau)$  — фильтр предсказания;  $r_B(\tau)$  — ФАК входной трассы.

Отметим, что кроме фильтра предсказания в уравнение (4.19) входит только ФАК исходной входной трассы. Определив  $G_n(\tau)$  из (4.19), с помощью зависимости  $G_{оп}(z) = 1 - G_n(z)$  в  $z$ -представлении можно вычислить фильтр ошибки предсказания  $G_{оп}(\tau)$ . Если фильтр предсказания  $G_n(\tau)$  осуществляет предсказание значений самого сигнала или многократных отражений, то фильтр ошибки предсказания  $G_{оп}(\tau)$  реализует предсказание и вычитание этих значений. Если интервал предсказания выбирается слишком большим (больше длительности отраженного сигнала), то фильтр ошибки предсказания будет предсказывать и вычитать из исходной трассы волны-спутники или реверберации. Если  $\theta$  выбирать меньшим основной длительности отраженного сигнала, то фильтр ошибки предсказания будет предсказывать и вычитать последующую за  $\theta$  часть сигнала, сокращая его длительность. При этом  $\theta$  можно выбрать так, что  $G_{оп}(\tau)$  будет предсказывать и вычитать последующие вторичные максимумы (кроме главного) корреляционного сигнала на коррелограммах. В этом случае фильтр ошибки предсказания

сводится по действию к фильтру сжатия и обычно в таком режиме применяется при деконволюции вибрационных данных. Интервал предсказания при этом задается равным длине интервала ФАК ( $\tau$ ) входной трассы от нуля ( $\tau=0$ ) до первого или второго нуля-пересечения.

Фильтр ошибки предсказания критичен к выбору окна расчета и интервала предсказания, что оптимизируется при обработке. Несмотря на то, что при прогностической деконволюции не требуется учета фазовых свойств, существенное влияние на эффект фильтрации оказывает форма сигналов. Для материалов ВСП прогностическая деконволюция может давать лучший результат по сравнению с минимально-фазовой деконволюцией сжатия, так как она не требует задания формы оператора фильтра. Что касается нуль-фазовой деконволюции сжатия, то прогностическая деконволюция может давать одинаковый с ней результат. Так же, как и в случае деконволюции сжатия, после прогностической деконволюции с целью повышения отношения сигнал/помеха на выходе может применяться нуль-фазовая полосовая фильтрация. Положительный эффект от прогностической деконволюции, как и от деконволюций других видов, ограничен уровнем случайных шумов входной трассы.

В работе [37] рассмотрены новые подходы к использованию предсказывающей деконволюции, пути более корректного ее применения с учетом истинной формы сигналов на коррелограммах. Показано, что предсказывающая деконволюция, используемая для обработки вибросейсмической информации, выполняемая в предположении нуль-фазовости сигнала, приводит к появлению фазовых искажений в трассе. Хотя деконволюция повышает разрешенность и расширяет спектр сигнала, для детального стратиграфического анализа желательно точное определение фазового спектра импульсов. Обычно эта задача решается за счет использования фильтра фазовых сдвигов, который исправляет ошибки возникающие из-за предположения о нуль-фазовости источника. Исследуется вопрос о влиянии уровня случайного шума на точность определения фазовых сдвигов. Показано, что при различном уровне шума получаются различные результаты коррекции импульсов. При очень большом поглощении использование фазовой коррекции становится неэффективным из-за большого уровня случайных шумов. После применения фильтра инверсии перед прогностической деконволюцией фазовые сдвиги и соответственно результат деконволюции становятся независимыми от уровня белого шума. В этой ситуации предпочтительнее детерминистский подход (с заданием формы импульса), по сравнению со статистическим, однако, он требует знания спектральных характеристик сигнала и шума.

Так же, как и при первичной обработке вибрационных данных, для оптимизации обратной фильтрации необходимо применять спектральный анализ.

Для количественной оценки изменения временной разрешенности при использовании деконволюции и других процедур, расширяющих



спектр вибрационных сигналов, наиболее подходит формула (Г.Н. Гоненков, 1980)

$$\lambda = (1/\theta) S_1 / \sum_{i=2}^N S_i, \quad (4.20)$$

где  $\theta$  — ширина главного максимума ФАК участка трассы коррелограммы (или трассы ОГТ);  $S_1, S_2, \dots, S_i$  — площади главного и последующих побочных экстремумов ФАК (обычно  $N=4$ ). Данную формулу легко реализовать в виде отдельной программы в любой системе обработки (приложение 1). При этом необходимо ввести порог по амплитуде (на уровне 5–10 % от максимального значения ФАК), ниже которого побочные максимумы, имеющие амплитуду, меньшую заданного порога, не принимаются во внимание при расчете  $\lambda$ . Введение уровня порога (С.В. Колесов, А.Н. Иноземцев, 1985) обеспечивает устойчивость в оценке  $\lambda$  и не приводит к неправдоподобным результатам при оценке разрешенности вибросейсмических данных по формуле (4.20). Описание алгоритма оценки разрешенности с введением порога устойчивости и уточненным расчетом площадей  $S_1, S_2, \dots, S_i$  и  $\theta$  имеется в матобеспечении ЭВМ PLURIMAT во ВНИИ Геофизике.

#### **4.2.2. Новые подходы к деконволюции вибросейсмических данных**

В последнее время появились новые подходы к обратной фильтрации, которые могут быть применимы к вибросейсмическим материалам.

##### ***Минимально-энтропийная деконволюция (МЭД)***

В 1978 г. Вигинс предложил способ и алгоритм расчета фильтра деконволюции, использующий критерий минимума энтропии [47].

Основной результат МЭД — получение наименьшего числа интенсивных пиков, которые соответствуют исходной записи, а не расширение частотного спектра, как обычно. В отличие от стандартной деконволюции, в МЭД не требуются предположения о фазовых характеристиках сейсмического импульса и о том, что последовательность коэффициентов отражений имеет характеристики белого шума. Стандартная деконволюция обычно усиливает случайный шум. Максимально-энтропийная деконволюция ослабляет его. При расчете оператора МЭД, максимизирующего сжатие сигнала, происходит избирательное подавление составляющих частот с низким отношением когерентного сигнала к шуму. Это позволяет, в частности, лучше анализировать форму записи в области “яркого пятна” при динамической обработке.

Если, например, предсказывающая деконволюция отбеливает трассу на выходе и при этом разрушает данные о регулярных сигналах или максимизирует энтропию, то МЭД стремится преобразовать запись к

нескольким интенсивным пикам, разделенным между собой почти нулевыми записи. Такой подход максимизирует порядок организации данных или минимизирует энтропию сигналов, что отображено в самом названии деконволюции. Пики после МЭД соответствуют приблизительно наибольшим абсолютным отсчетам, так как начальное значение оператора — дельта-импульс. Пусть  $x_{ij}$  — входные сигналы, где  $i=1, \dots, N_S$  — число отрезков трасс или набор сигналов;  $j=1, \dots, N_t$  — число отсчетов в каждом наборе. Тогда на выходе МЭД будем иметь

$$y_{ij} = \sum_{k=1}^{N_t} f_k x_{ij-k}, \quad (4.21)$$

где  $f_k$  — оператор МЭД.

Расчет  $f_k$  основывается на максимизации соотношения  $V = \sum V_j$ , где  $V_j = \sum y_{ij}^4 / \sum_j y_{ij}^2$ . Величина  $V$  является суммой нормированных квадратов дисперсии отсчетов или нормой. Максимально возможные значения нормы  $V=1$  при наличии одного пика, остальные отсчеты — нулевые. С ростом числа ненулевых значений норма уменьшается. Таким образом, максимизация дисперсии приводит к наибольшему упрощению сигнала. При этом положение и полярность импульсов не влияют на величину дисперсии. Коэффициенты  $f_k$  находят из уравнения

$$\partial V / \partial f_k = \sum_j \partial V_j / \partial f_k = 0. \quad (4.22)$$

В матричном представлении уравнение (4.22) имеет вид  $Rf_k = q$ , где  $R$  — вектор автокорреляции входной трассы;  $q$  — вектор взаимной корреляции, который является взвешенной суммой функции взаимной корреляции возведенных в куб значений отфильтрованной трассы и значений входной трассы. Путем итеративного решения матричного аналога уравнения (4.22) находят коэффициенты фильтра  $f_k$  МЭД. Применение критерия  $V$  при расчете оператора МЭД обеспечивает только предельное упрощение выходной трассы по сильным отражениям. В статье [39] показано, что преимущество МЭД выражается в значительном улучшении отношения сигнал/помеха и малой чувствительности к уровню шумов. Применительно к вибросейсмическим данным МЭД может быть рекомендована как средство повышения динамической разрешенности и прослеживаемости опорных и наиболее сильных целевых отражений.

Обратная фильтрация МЭД программно реализована в обрабатывающей системе СЦС-З.

### *Деконволюция методом последовательных аппроксимаций*

В работе [43] предложена вычислительная процедура деконволюции во временной области методом последовательной аппроксимации. На первом этапе построения алгоритма вводятся следующие ограничения: фильтр должен быть нуль-фазовым, имеющим симметричную

функцию отклика; фильтр должен быть нормализован так, чтобы коэффициенты усиления на всех частотах были больше или равны двум. Для доказательства сходимости алгоритма предполагается допустимость разложения в ряд Фурье исходных данных и отклика фильтра. Исходными для работы алгоритма являются результат фильтрации  $\bar{G}$  и функция отклика фильтра  $F: \bar{G} = F * G$ . Процедура последовательной аппроксимации  $A_m$  неизвестных данных  $\bar{G}$  на  $m$ -м шаге представляется в виде  $A_{m+1} = A_m + G - F * A_m$  при  $A_1 = G$ . При  $m \rightarrow \infty \lim A_m \rightarrow G$ . В случае несимметричной функции отклика фильтра (не нуль-фазовый фильтр) предложен способ построения симметричного фильтра по заданной функции отклика произвольной формы. Описаны два метода — быстрой и медленной аппроксимации. Быстрый метод существенно лучше для восстановления частот, которые были ослаблены в исходных данных. Медленный метод хорошо подходит для подавления нежелательных частот. Предусмотрено переключение от одного метода к другому в процессе последовательной аппроксимации. Рассмотрены синтетические примеры предложенной процедуры.

### *Максимально правдоподобная деконволюция*

В работе [41] рассмотрена сейсмическая деконволюция, названная авторами максимально правдоподобной деконволюцией (МПД). В МПД одновременно оцениваются форма сигнала источника, статистика шума и производится деконволюция. При этом МПД и оценка падающего импульса возможны и для не минимально-фазовых сигналов, в частности, вибросейсмических. При реализации МПД используются переменная технология, максимально правдоподобные оценка и модель последовательности пиков отраженных сигналов (процесс Бернулли — Гаусса). Рассматриваются различные варианты, от почти полной априорной неопределенности оцениваемых величин до точного значения некоторых из них. Представленные результаты ограничиваются случаем одноканальных систем и представлением о неизменности во времени линейных импульсов. Так же, как и в случае МЭД, МПД на выходе упрощает разрез, повышая разрешенность и прослеживаемость сильных отражений, исключая слабые.

### *Деконволюция методом автоматического выравнивания спектров*

Коппенс и Мэри рекомендуют для повышения качества сейсмических материалов, включая данные ВСМ, использовать предложенный ими алгоритм автоматического выравнивания спектров регистрируемых сигналов [20]. Для компенсации поглощения необходимо приводить энергию высоких частот к уровню низких, но без фазовых искажений, причем нежелательно приводить весь диапазон к одному уровню (что часто бывает при обычной деконволюции), так как повышает

ся уровень шумовых компонент, не несущих полезную информацию. Первый шаг алгоритма заключается в вычислении модуля амплитудного спектра в каждой входной трассе для определения весовой функции, к которой потом приводится уровень высоких частот. Эта функция представляет собой величину, обратную длинноволновой составляющей спектра, которая может быть получена интерполяцией между средними значениями спектра в узких частотных диапазонах внутри выбранного частотного диапазона. Она может быть получена также применением к модулю спектра низкочастотного фильтра.

Спектральное выравнивание автоматически подстраивается к каждой трассе и не изменяет средней энергии во временной области. Это приводит к выравниванию спектральных характеристик поверхностных волн. Применение предлагаемого способа спектрального выравнивания особенно полезно проводить перед скоростной фильтрацией, что улучшает подавление поверхностных шумов при ее дальнейшем использовании. При выравнивании перед суммированием по ОГТ достигается эффект прослеживания и временного разрешения сейсмических границ. Эффективность применения спектрального выравнивания иллюстрируется многочисленными примерами.

### *Гомоморфная деконволюция вибрационных данных*

В зарубежных публикациях [38, 39] предложен способ обратной фильтрации, получивший название "гомоморфная деконволюция". В этом способе используется анализ данных в некоторой кепстральной области. Кепстр вибросейсмической трассы имеет вид [25, 47, 48]

$$\hat{K}^*(t) = -\frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \log[K^*(\omega)] e^{i\omega t} d\omega, \quad (4.23)$$

где  $K^*(\omega)$  — преобразование Фурье коррелограммы  $K^*(t)$ .

Вибрационный волновой импульс на коррелограмме представляется как  $V(t) = R(t) * F(t)$ , тогда

$$\log[K^*(\omega)] = \log[V(\omega)] + \log[IR(\omega)], \quad (4.24)$$

где  $V(\omega)$  и  $IR(\omega)$  — преобразования Фурье от  $V(t)$  и  $IR(t)$ .

Тогда кепстр коррелограммы можно переписать в виде

$$\hat{K}^*(t) = \hat{V}(t) + \hat{IR}(t), \quad (4.25)$$

где  $\hat{V}(t)$  — кепстр импульса вибросигнала, а  $\hat{IR}(t)$  — кепстр импульсной реакции среды.

Таким образом, последовательности данных, которые подвергаются сверткам во временной области, трансформируются в кепстры аддитивные в другой области, называемой  $q$ -представлением. При использовании малых времен в  $q$ -представлении  $\hat{K}^*(t)$  используется для оцен-

ки формы сигнала,  $\log[K^*(\omega)]$  рассматривается как сигнал, и "низкочастотное" содержание этого сигнала используется для оценки  $\log[V(\omega)]$  при  $|t| < T_0$  в кепстральной области, где  $T_0$  — "время среза" в  $q$ -представлении. Процесс аналогичен фильтрации нижних частот. Наибольшую трудность представляет вычисление фазовой кривой [48]. В предположении нуль-фазовой формы импульса на коррелограмме нуль-фазовый кепстр трассы имеет вид

$$\hat{K}_0^*(t) = -\frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \log|K^*(\omega)| e^{i\omega t} d\omega \quad (4.26)$$

или

$$\hat{K}_0^*(t) = -\frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \left\{ \log|V(\omega)| + \log|IR(\omega)| \right\} e^{i\omega t} d\omega. \quad (4.27)$$

Первый член (4.27) обозначает логарифм амплитудного спектра или нуль-фазовый кепстр волнового импульса и может быть найден путем низкочастотной фильтрации кепстра в  $q$ -представлении. Аналогично оценивается член  $|IR(\omega)|$ .

При допущении, что фаза  $\theta(\omega)$  вибросейсмической трассы идентична фазе импульсной реакции среды, импульсная характеристика может быть получена в результате обратного преобразования Фурье:

$$IR(t) = -\frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} |IR(\omega)| e^{i\theta(\omega)} e^{i\omega t} d\omega. \quad (4.28)$$

Спектр импульсной реакции среды, полученный в результате фильтрации кепстра, является выравненным спектром исходной коррелограммы.

В работе L. R. Lines, R. W. Claiton (1977) оценки  $IR(\omega)$  в частотном диапазоне свип-сигнала предлагается расширять с использованием авторегрессивного предсказания для выделения  $IR(t)$ . С помощью метода авторегрессивного предсказания заполняются неизвестные части спектра от нуля до найквистовых частот. Показана принципиальная возможность такого подхода. Однако позднее [38] появились данные о том, что гомоморфная деконволюция неустойчива по отношению к аддитивным помехам. Для ее практической реализации требуется минимальное отношение сигнал/помеха более 300—400.

Ясно, что в подавляющем большинстве материалы ВСМ обладают и намного меньшим отношением сигнал/помеха, что сильно затрудняет применение данной фильтрации. Не всегда правомерно и предположение о нуль-фазовом кепстре коррелограммы. Последующее расширение спектра с помощью авторегрессивного предсказания оказывается зависимым от результатов предварительной гомоморфной деконволюции, что также затрудняет реализацию этого подхода. Кроме того, гомоморфная деконволюция в реализации очень громоздка и трудоемка. Сомнительна также возможность расширения спектра от нуля до найк-

вистовых частот, так как при расчете и предсказании спектра используется достаточно узкий интервал частот и при очень длинном расширении происходит накапливание ошибок предсказания, что приводит к искажению результата.

Приведенные модельные результаты показывают принципиальную возможность таких подходов, однако практически нет убедительных примеров реализации способов на реальных материалах.

### *Максимально-энтропийная деконволюция*

Одним из направлений повышения разрешенности вибросейсмических данных при обработке является применение обратной фильтрации на основе расширения комплексного спектра вибросейсмических записей с помощью предсказания его недостающих значений [20].

До сих пор идея предсказания значений какого-нибудь процесса с определенной целью была реализована в алгоритмах и программах предсказывающей деконволюции (фильтр ошибки предсказания) [37]. В этом случае алгоритм предсказания применялся к сейсмическим записям (в том числе и вибросейсмическим) во временном представлении с целью подавления кратных волн или сокращения длительности сейсмического импульса. Алгоритм расчета фильтра ошибки предсказания использует критерий наименьших квадратов.

Использование аппарата предсказания возможно и применительно к задаче расширения комплексного спектра коррелограмм в силу приблизительно одинакового поведения двух случайных процессов: временного ряда (трасса во временном представлении) и спектрального ряда (преобразования Фурье от трассы). Следует отметить, что в случае предсказания значений спектра, в отличие от временных последовательностей необходимо рассчитывать и применять два формирующих фильтра, отдельно для действительной  $\text{Re}(\omega)$  и мнимой  $\text{Im}(\omega)$  частей спектра. Отличительной особенностью расширения спектра является также и то, что спектр желательно продолжать в область как низких частот, так и высоких, в то время как в фильтрах ошибки предсказания во временном представлении используется только одно направление предсказания.

В самом общем виде расширение комплексного спектра коррелограмм на основе предсказания осуществляется следующим образом [11, 20].

1. Делается прямое преобразование Фурье от сейсмической трассы.
2. Выделяются действительная и мнимая части комплексного спектра.
3. Рассчитываются формирующие (предсказывающие) фильтры отдельно для действительной и мнимой частей спектра.
4. Получаются недостающие значения спектра путем свертки рассчитанных фильтров предсказаний с соответствующими частями комплексного спектра.

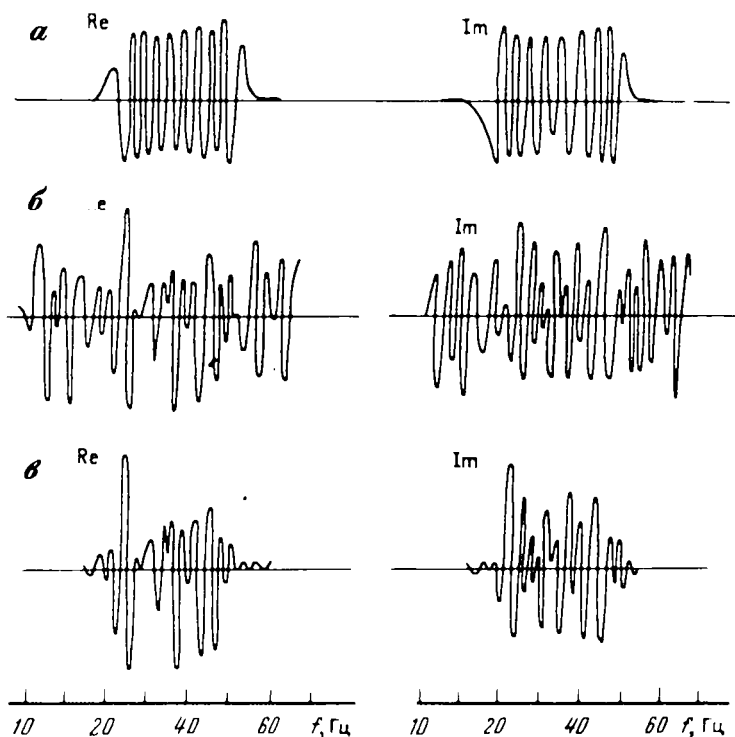


Рис. 44. Комплексные спектры:

а — управляющего сигнала; б — импульсной реакции; в — коррелограммы

Конкретный алгоритм расчета фильтра предсказания в принципе может базироваться как на критерии наименьших квадратов, так и на других критериях, принятых в теории фильтрации сейсмических сигналов.

При использовании критерия наименьших квадратов для предсказания значений спектра вибросейсмических данных потребуется вычисление четырех формирующих (предсказывающих) фильтров: фильтра предсказания вперед (перспективного) и фильтра предсказания назад (ретроспективного) для действительной части спектра и аналогичных фильтров для мнимой части. Если использовать для расчета фильтра критерий максимума энтропии (I. Burg, 1969), то для задачи расширения спектра коррелограмм потребуется вычислять только два фильтра (для действительной и мнимой частей), так как в этом случае один и тот же формирующий фильтр используется для получения предсказанных значений вперед и назад. Отметим, что точность предсказания по критериям наименьших квадратов и максимума энтропии приблизительно одинаковая.

Рассмотрим обратную фильтрацию вибросейсмических данных на основе расширения комплексного спектра коррелограмм за пределы возбуждаемых частот с помощью фильтра предсказания, рассчитанного по критерию максимальной энтропии [11].

Известно, что сейсмические трассы представляют собой последовательность случайных чисел с некоторыми статистическими характеристиками, характеризующими этот случайный процесс [27]. В широком смысле трассы представляют собой нестационарный случайный процесс, однако, если рассматривать участки трасс, то в достаточно узких окнах можно считать, что сейсмическая трасса является стационарным случайным процессом (математическое ожидание  $m$ , дисперсия  $D$  и автоковариация  $K$  независимы от времени) с нулевым средним. Именно условие стационарности трасс в окнах позволяет применять к временным рядам обратные фильтры.

Действительную и мнимую части преобразования Фурье корреляционной трассы в достаточно узком временном окне можно считать отрезками случайного процесса (с нулевым средним), стационарного по частоте. Это следует из того, что действительная и мнимая части комплексного спектра управляющего сигнала и импульсной характеристики среды тоже являются отрезками стационарного случайного процесса с нулевым математическим ожиданием. На рис. 44 показаны действительная и мнимая части комплексного спектра управляющего сигнала импульсной характеристики среды, а также коррелограммы, чей комплексный спектр является результатом перемножения спектров ФАК управляющего сигнала и импульсной характеристики среды. Случайный характер и стационарность действительной и мнимой частей комплексного спектра коррелограмм дают основание для применения формирующих фильтров к спектральному ряду с целью экстраполяции недостающих значений, как это делается применительно к вибросейсмическим трассам во временном представлении.

Не имея априорных представлений о характере поведения спектра коррелограмм за пределами частотной полосы возбуждения сигналов, естественно задаваться минимальными ограничениями на его продолжение (расширение). Считая действительную и мнимую части комплексного спектра коррелограмм стационарными случайными процессами, можно пытаться находить "недостающие" значения с максимальной неопределенностью (с наименьшей вероятностью), что соответствует условию максимизации энтропии этих процессов.

Идея использования критерия максимума энтропии была впервые предложена Бургом для вычисления спектров мощности отрезков реализаций случайных процессов. Спектр мощности по Бургу представляет собой марковский спектр вида

$$P(f) = P_{m+1} \Delta t / \left| 1 - \sum_{m=1}^m A_{m,n} e^{-2\pi i f n \Delta t} \right|, \quad (4.29)$$



где  $A_{m,1}, \dots, A_{m,m}$  — коэффициенты формирующего фильтра с единичным интервалом предсказания. Эти коэффициенты удовлетворяют системе уравнений порядка  $m+1$ :

$$\begin{vmatrix} K(0) & K(1) & \dots & K(m) \\ K(1) & K(0) & \dots & K(m-1) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ K(m) & K(m-1) & \dots & K(0) \end{vmatrix} \begin{vmatrix} 1 & P_{m+1} \\ -A_{m,1} & 0 \\ \dots & \dots \\ -A_{m,m} & 0 \end{vmatrix} = 0, \quad (4.30)$$

где  $K(i)$  — значения функции автокорреляции для  $i=0 \div m$ ,  $P_{m+1}$  — дисперсия ошибки предсказания;  $\Delta t$  — шаг дискретности по времени;  $f$  — частота, ограниченная пределами  $\pm 1/2\Delta t$  (найквистова частота).

Фильтр ошибки предсказания  $\{1, -A_{m,1}, \dots, A_{m,m}\}$  преобразует входной сигнал  $K(i)$  в белый шум с дисперсией  $P_{m+1}$ , т.е. на выходе фильтра ошибки предсказания получается последовательность ошибок предсказания, характеризующихся равномерным спектром мощности.

Уравнение (4.30) по внешнему виду напоминает систему уравнений для вычисления фильтра предсказания Робинсона (по методу наименьших квадратов и при вычислении коэффициентов фильтра реализует критерий максимальной энтропии). Для фильтра длиной  $m$  нужно иметь  $m+1$  значений функции автокорреляции отрезка случайного процесса. Для увеличения разрешенности спектра (4.29) необходимо каким-либо образом удлинить функцию автокорреляции. Получение значений формирующего фильтра  $A_{m,m}$  необходимой длины происходит итеративным путем. Используя фильтр  $\{A_{m,1}, \dots, A_{m,m}\}$  на  $m$  иначе, можно предсказать значение  $K_{m+1}$  и вычислить дисперсию  $P_{m+1}$ . Далее, расширяя матрицу (4.30) значениями  $K(i)$  и  $P_m$ , полученными на  $m$ -м шаге, можно определить новый фильтр  $\{A_{m+1,1}, \dots, A_{m+1,m+1}\}$  и вычислить  $K_{m+2}$  и  $P_{m+2}$ . Другими словами, в системе уравнений (4.30) порядка  $m-1$  следующий шаг итераций порядка  $m$  включает в себя определение  $m+2$  неизвестных:  $A_{m,1}, \dots, A_{m,m}; K_m; P_m$ .

Система (4.30) решается итерациями, по шагам увеличивается размерность матрицы от  $m-1$  и  $m$ . Для первого шага  $m=0$

$$P_0 = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N x_t^2, \quad (4.31)$$

где  $x_t$  — значения самого случайного процесса.

Получая необходимое количество значений фильтра  $\{A_{m+1,1}, \dots, A_{m+k-1}, A_{m+k}\}$ , вычисляют спектр мощности (4.29). Отметим некоторые особенности этих вычислений.

При нахождении коэффициентов фильтра  $A_{m,m}$  используются только значения самого процесса (временного или другого)  $x_t$ , без оценки автокорреляции  $K(i)$ .

Смысл симметричного алгоритма Бурга заключается в минимизации средней дисперсии ошибок предсказания вперед и ошибок предсказания назад (ретроспекция), так как при стационарности процесса  $x_t$  теоретические дисперсии ошибок перспективного предсказания и ретроспекции равны между собой. Поэтому эти выборочные дисперсии объединяют посредством приема математической статистики, найдя их среднее арифметическое.

Средняя выходная мощность (дисперсия) фильтра предсказания длиной  $m + 1$

$$\pi_m = \frac{1}{2} \frac{1}{N - m} \sum_{t=1}^m [(x_t - \sum_{k=1}^m A_m x_{t+k})^2 + (x_{t+m} - \sum_{k=1}^m A_m x_{t+m-k})^2] \quad (4.32)$$

минимизируется с подбором единственного параметра  $A_{mm}$ .

Для задачи вычисления фильтра предсказания по критерию максимума энтропии применительно к комплексному спектру коррелограмм не требуется вычислять спектр мощности  $P(f)$ , нужен сам формирующий (предсказывающий) фильтр  $\{A_{m,1}, \dots, A_{m,m}\}$ , который

можно найти вышеописанным рекурсивным путем решения системы уравнений (4.30).

Осуществление обратной фильтрации на основе расширения спектра по методу максимума энтропии вызвало целый ряд вопросов и потребовало поиска необходимых решений, позволивших довести этот способ до практической реализации с получением положительного эффекта.

Соответствующий комплекс программ носит название ФИЛМЕМ и включает в себя программы ПРЕФИЛ и ФИЛМЕМ [11, 20].

Программа ПРЕФИЛ осуществляет предварительное выравнивание комплексного спектра, а программа ФИЛМЕМ — предсказание его значений за пределы возбуждаемых частот с помощью фильтра, рассчитанного по методу максимума энтропии.

Рассмотрим подробно алгоритмы программ комплекса ФИЛМЕМ. Известно, что значения амплитудного спектра отраженных сигналов на коррелограммах, в отличие от прямоугольного спектра управляющего сигнала, существенно ослабляются, особенно на высоких частотах, из-за фильтрующих эффектов ВЧР и системы вибратор — грунт, а также поглощения при прохождении сигналов внутри среды. Реальные спектры существенно отличаются от прямоугольного, имеют максимальные значения в области низких частот и минимальные значения в области

высоких частот. В рамках модели вибрационной коррелограммы (подразд. 1.3) комплексный спектр коррелограммы является результатом перемножения комплексного спектра автокорреляции управляющего сигнала, фильтра среды и импульсной характеристики среды с аддитивным наложением комплексного спектра помех.

Отметим, что в идеальном случае, при отсутствии фильтрующего действия среды, комплексный спектр коррелограмм в силу прямоугольности спектра управляющего сигнала приближается в полосе возбуждаемых частот к комплексному спектру импульсной характеристики среды (за исключением добавок к спектру, вызванных корреляционными шумами). Следовательно, если скомпенсировать влияние фильтрующего действия среды, то можно приблизиться к спектру импульсной характеристики среды и экстраполировать ее в дальнейшем с помощью фильтра предсказания по методу максимума энтропии.

С этой целью для выравнивания спектра коррелограмм (компенсации поглощающего эффекта среды) в программе ПРЕФИЛ реализован алгоритм нуль-фазовой деконволюции в частотной области

$$G(\omega) = \sqrt{\tilde{r}(\omega)} / [|\tilde{r}(\omega)| + \lambda^2], \quad (4.33)$$

где  $\tilde{r}(\omega)$  — спектр мощности исходной коррелограммы в заданном окне, а  $\lambda^2$  — параметр регуляризации, вычисляемый по формуле

$$\lambda^2 = L^2 \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |\tilde{r}(\omega)|, \quad (4.34)$$

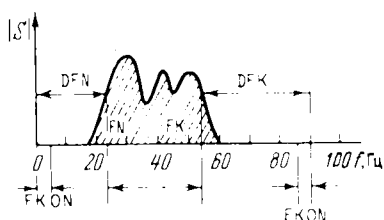
где  $L^2$  — отношение помеха/сигнал фильтруемой записи.

Из формулы (4.34) видно, что правая часть оценивается по самой записи, тем самым облегчается выбор и исключается произвол при определении величины  $\lambda$ .

Предварительная фильтрация исходной трассы  $x(t)$  в частотной области выглядит как умножение ее комплексного спектра  $\bar{x}(\omega)$  на  $G(\omega)$ . Действительная  $\text{Re}(\omega)$  и мнимая  $\text{Im}(\omega)$  части спектра, отфильтрованные фильтром  $G(\omega)$ , далее обрабатываются отдельно с помощью программы ФИЛМЕМ.

Алгоритм программы фильтрации с использованием метода максимальной энтропии — ФИЛМЕМ — выглядит следующим образом. Отфильтрованные фильтром  $G(\omega)$  действительная  $\text{Re}(\omega)$  и мнимая  $\text{Im}(\omega)$  части обрабатываются отдельно. Из них "вырезаются" части, соответствующие исходному интервалу для расчета формирующих фильтров, а также дальнейшего предсказания недостающих значений, и по этим частям вычисляются коэффициенты формирующих фильтров  $\{A_{m,i}\}^{\text{Re}}, \{B_{m,i}\}^{\text{Im}} (i=1 \div m)$ . Для их вычисления подключается программа FEM, реализующая алгоритм расчета коэффициентов на основе критерия максимума энтропии. После получения необходимого числа значений двух фильтров производится предсказание недостающих значений  $\text{Re}'(\omega)$  и  $\text{Im}'(\omega)$  за пределы исходного интервала путем свертки коэф-

Рис. 45. Основные параметры расширения спектра по программе ФИЛМЕМ



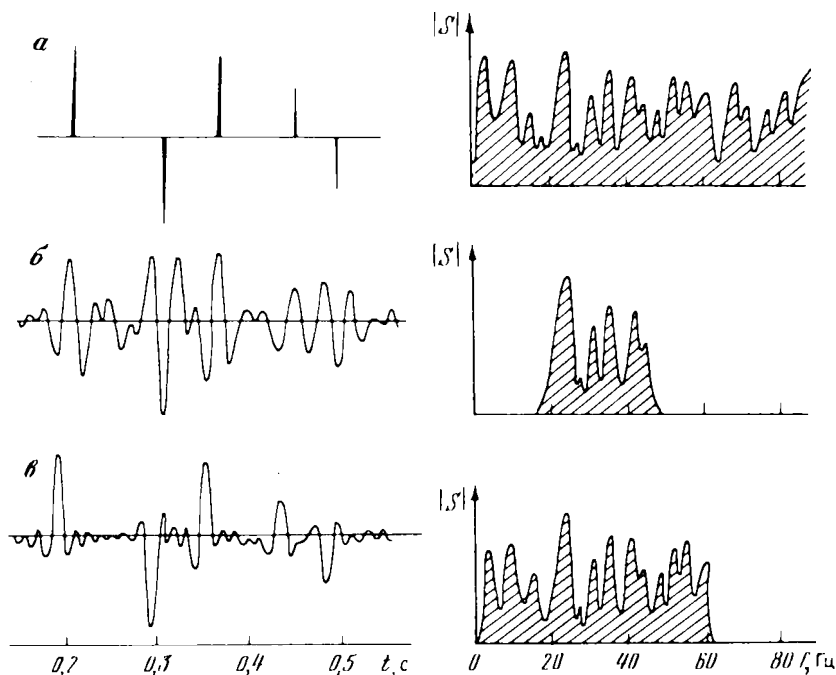
коэффициентов фильтров  $\{A_{m,i}\}^{\text{Re}}$  и  $\{B_{m,i}\}^{\text{Im}}$  с известными значениями  $\text{Re}^n(\omega)$  и  $\text{Im}^n(\omega)$  соответственно. При этом используются лишь значения спектра, соответствующие выбранному исходному интервалу.

Для предсказания вперед и назад используется один и тот же фильтр. Каждое предсказанное значение используется для дальнейшего предсказания в том же направлении. Пределы предсказания ограничиваются нулевой частотой слева и частотой Найквиста справа. Практически же диапазон частот после предсказания может быть уже, так как пределы расширения подбираются с учетом исходного частотного диапазона сигналов требуемой степени разрешенности и расширения динамического диапазона сигналов, а также особенностей самого алгоритма предсказания.

Для избежания краевых эффектов при обратном преобразовании Фурье необходимо сглаживание вычисленных значений  $\text{Re}'(\omega)$  и  $\text{Im}'(\omega)$  в пределах заданного интервала частот. Аподизация производится по косинусоидальному закону и осуществляется с помощью подпрограммы "Конус". Длина интервалов "конусности" слева и справа одинаковая и ее конкретное значение задается геофизиком (в Гц). Результат предсказания в таком виде подвергается обратному преобразованию Фурье во временную область, таким образом получают результирующую отфильтрованную выходную трассу.

Параметры обработки по комплексу ФИЛМЕМ выбираются исходя из конкретной решаемости задачи и регулируются геофизиком-обработчиком (рис. 45).

Основным параметром обработки для предварительной фильтрации является параметр регуляризации  $AL$ , характеризующий квадрат отношения помеха/сигнал фильтруемой записи. Основными параметрами расширения спектра путем экстраполяции являются граничные частоты  $FN$ ,  $FK$ , определяющие исходный для расчета фильтров и предсказания интервал (в Гц), и параметры  $DFN$ ,  $DFK$ , определяющие интервалы расширения в область низких и высоких частот (в Гц). Параметр  $FKON$  определяет интервал конусования краев расширенного по ФИЛМЕМ спектра перед обратным преобразованием Фурье (конусование краев введено для сглаживания спектрального ряда с целью устранения краевых эффектов). Оптимальные значения  $FKON$  находятся в пределах 4–10 Гц.



**Рис. 46. Расширение спектра синтетической коррелограммы по ФИЛМЕМ.**

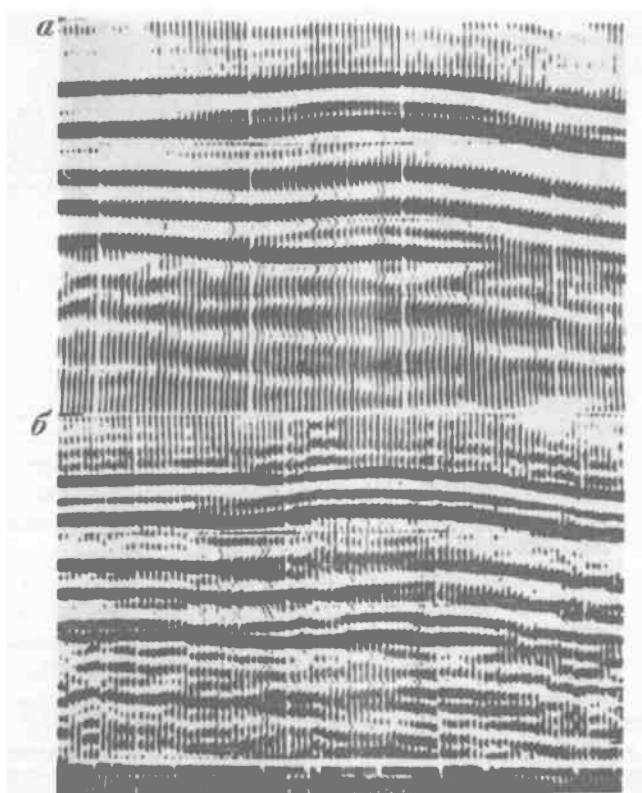
*а* — модуль импульсной сейсмограммы и ее спектр; *б* — соответствующая ей исходная коррелограмма и ее спектр ( $\Delta F = 20 \div 48$  Гц); *в* — коррелограмма и ее спектр после расширения по ФИЛМЕМ

Подробное описание входных параметров и их оптимальное задание можно найти в инструкции пользователя ФИЛМЕМ.

Характер повышения временной и динамической разрешенности с помощью ФИЛМЕМ виден на модельных примерах рис. 46. Увеличение временной разрешенности (с количественной оценкой разрешенности) в результате применения ФИЛМЕМ к реальным трассам, полученным в различных сейсмогеологических условиях, приводится на рис. 47, 48.

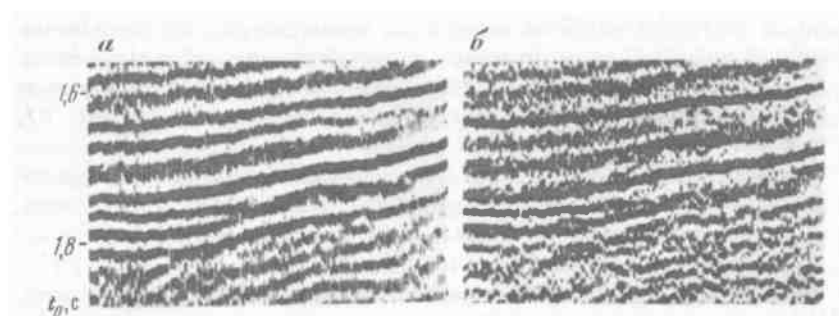
Комплекс ФИЛМЕМ устойчив к нерегулярным помехам и корреляционным шумам и не уменьшает отношение сигнал/помеха на выходе. Наилучшие результаты получаются при отношении сигнал/помеха на исходных записях в пределах от 2 до 10 и более.

Оптимальным исходным интервалом предсказания ( $FN - FK$ ) является интервал спектра, включающий его эффективную ширину (на уровне 0,75). Вследствие возможного накопления ошибок предсказания при длинах интервалов экстраполяции  $DFN$ ,  $DFK$ , превышающих длину исходного интервала ( $FK - FN$ ), рекомендуется задавать значения длин



**Рис. 47.** Повышение временной и динамической разрешенности целевых отражений в баженовской и тюменской свитах при использовании ФИЛМЕМ.

*а* — стандартная деконволюция; *б* — ФИЛМЕМ



**Рис. 48.** Улучшение прослеживания зоны выклинивания нижних ангидритов после использования ФИЛМЕМ.

*а* — стандартная деконволюция; *б* — ФИЛМЕМ (по материалам ПГО "Узбекгеофизика", граф обработки в обоих случаях одинаковый)

предсказания из соотношения  $DFN, DFK \leq |FK - FN|$ . При этом оптимальные длины  $DFN$  и  $DFK$  могут оказаться равными половине исходного интервала, т.е.  $(FK - FN)/2$ .

При правильном выборе параметров фильтрации по ФИЛМЕМ разрешенность вибросейсмических данных можно по количественной оценке увеличить до 2–2,5 раз по сравнению с данными без фильтрации. Стандартные программы увеличивают разрешенность в 1,3–1,5 раза. На рис. 47, 48 даны примеры повышения разрешенности вибросейсмических данных при обработке по ФИЛМЕМ в сравнении со стандартными программами деконволюции, имеющимися в различных пакетах обработки (СЦС-3, "Сейспак", CYBER и др.). Быстродействие комплекса программ ФИЛМЕМ на ЕС-1045 составляет 0,7 с на трассу.

Использование комплекса наиболее эффективно при решении следующих геологических задач: а) выделение рифовых объектов; б) детализация зон выклинивания; в) разделение границ пластов; г) детализация тонкослоистых разрывов; д) выделение геологических границ со слабо различающимися значениями плотностей и скоростей покрывающей и вмещающей толщ пород.

Для наиболее полного использования возможностей ФИЛМЕМ рекомендуется использовать варианты расширения спектра только в область высоких частот, либо только в область низких частот, а также в области высоких и низких частот одновременно.

Современная практика обработки вибросейсмических данных предусматривает применение процедур предварительной обработки вибrogramм, таких как подавление ураганных помех, центрирование, арирование, весовая корреляция и др. Это способствует существенному повышению качества данных уже на этапе первичной обработки. Кроме этого, необходимо совершенствовать процедуры первичной обработки, разрабатывать и развивать новые подходы (такие как следящая фильтрация, вычитание корреляционных шумов и др.).

Возможность повышения качества материала при первичной обработке данных позволяет более эффективно и экономично проводить углубленную обработку.

На основе сопоставительного анализа описанных выше вариантов деконволюции, условий их применимости, оценок возможностей, а также учитывая данные, приведенные в работах [20, 39, 48], можно сделать следующие основные выводы.

1. Обратную фильтрацию данных ВСП рекомендуется применять в возможно ранней стадии обработки. Это способствует эффективности и точности накопления на ОГТ.

2. Стандартная предсказывающая деконволюция приводит к устойчивым результатам при различных распределениях последовательностей коэффициентов отражений при изменении шумов в широких пределах.

3. Деконволюция сжатия может дать хороший результат в комплексе с последующей полосовой фильтрацией при нуль-фазовом обратном и полосовом фильтре.

4. Существенное улучшение динамической выразительности можно достичь при использовании минимально-энтропийной деконволюции.

5. Точность и эффективность любой деконволюции во многом зависит от развития способов оценок и учета реальной формы импульсов на коррелограммах. В тех случаях, когда форма импульса может оцениваться достаточно точно, например при скважинных наблюдениях, может быть построен обратный фильтр, применение которого к коррелограмме фактически восстановит геологический разрез.

6. Значительное повышение разрешения вибросейсмических сигналов по отношению к другим способам может быть достигнуто при использовании программ максимально-энтропийной деконволюции типа ФИЛМЕМ.

## 5. ПРИМЕНЕНИЕ ВИБРОСЕЙСМОРАЗВЕДКИ В РАЗЛИЧНЫХ СЕЙСМОГЕОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ

Вибросейсморазведка (ВСР) начала активно внедряться в практику сейсмических исследований с конца 70-х годов, когда появились первые серии промышленно изготовленных вибраторов и опытные работы показали эффективность их использования при решении геологических задач. На начало 1987 г. в целом по СССР было отработано невзрывной сейсморазведкой около 28 % общего объема, из них 12—14 % отработано с использованием вибраторов. Основные районы, где применяются вибрационные источники, геологические задачи и результаты работ приведены в табл. 9.

Таблица 9

| Район работ           | Геологические задачи                                                                                                               | Геологический результат                                                                                                                                                                          |
|-----------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Прикаспийская впадина | В прибортовых зонах изучение структурного плана глубоких горизонтов. Поиск и подготовка к бурению структур в подсолевых отложениях | Изучен структурный план подсолевых и надсолевых отложений в районах работ. В подсолевом комплексе по горизонтам $P_1$ и $P_2$ выявлено и уточнено строение ряда поднятий и структурных отложений |
| Узбекистан            | Поиск и разведка нефтегазоперспективных структур в осадочном комплексе отложений (пермь — неоген)                                  | Изучен структурный план разведываемых горизонтов, выявлены положительные структуры                                                                                                               |



| Район работ             | Геологические задачи                                                                                                                                                                  | Геологический результат                                                                                                                                                                                                                                    |
|-------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Туркмения               | Выяснение возможностей изучения сложно построенных мел-палеогеновых отложений                                                                                                         | Получена информация о строении пород неоген-четвертичного и мел-палеогенового комплексов                                                                                                                                                                   |
| Западная Сибирь         | Изучение структурного плана по отражающим горизонтам кайнозойско-мезозойского осадочного чехла и выделение зон развития образований доюрского промежуточного структурного этажа (ПСЭ) | Изучен и уточнен структурный план меловых и юрских отложений. В отложениях осадочного чехла выявлены локальные структуры и ряд приподнятых участков                                                                                                        |
| Восточная Сибирь        | Изучение структурного плана палеозойских отложений                                                                                                                                    | Освещено геологическое строение осадочного чехла вплоть до отложений нижнего кембрия                                                                                                                                                                       |
| Якутия                  | Изучение структурного плана палеозойских и венд-рифейских отложений, выявление и подготовка структур по сейсмическим отражающим горизонтам под глубоководное бурение                  | Уточнено геологическое строение значительной территории, перспективной на нефть и газ. Выявлены перспективные объекты общей площадью 940 км <sup>2</sup>                                                                                                   |
| Сахалин                 | Картирование неогеновых отложений и выявление структурных осложнений по отражающим горизонтам в верхнемиоценовых отложениях                                                           | Изучено геологическое строение Северного и Центрального Сахалина по отражающим горизонтам в отложениях неогена. На площадях в северо-восточной части Северного Сахалина выявлены и уточнены структурные осложнения в отложениях верхнемиоценового возраста |
| Прибалтика              | Опытно-методические работы с целью выработки методики полевых наблюдений при картировании нижнепалеозойских отложений и поиске малоамплитудных структур в отложениях ордовика         | Показана возможность решения геологической задачи средствами ВСМ                                                                                                                                                                                           |
| Днепро-Донецкая впадина | Изучение структурного плана надсолевых и подсолевых отложений в прибортовых зонах Днепровского грабена                                                                                | Уточнено геологическое строение районов исследований по отражающим горизонтам и отложениям перми, карбона и девона до глубин 3–3,5 км                                                                                                                      |

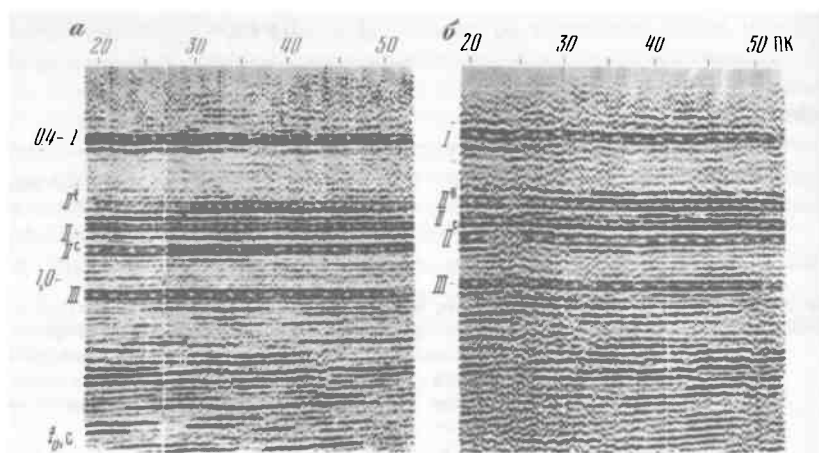


Рис. 49. Сравнение результатов взрывной (а) и вибрационной (б) сейсморазведки по одному из профилей северо-востока Русской платформы

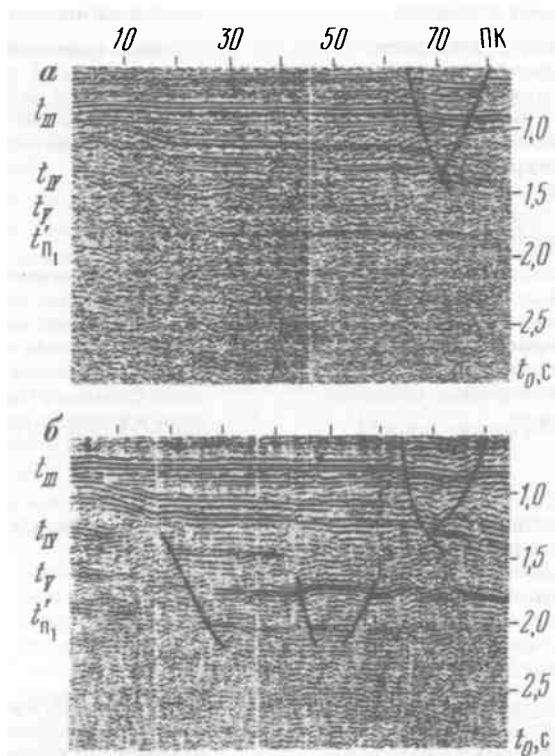


Рис. 50. Временные разрезы по одному из профилей Западной Якутии в зоне развития траппов, полученные при вибрационном возбуждении (а) и при использовании ЛДШ (б)

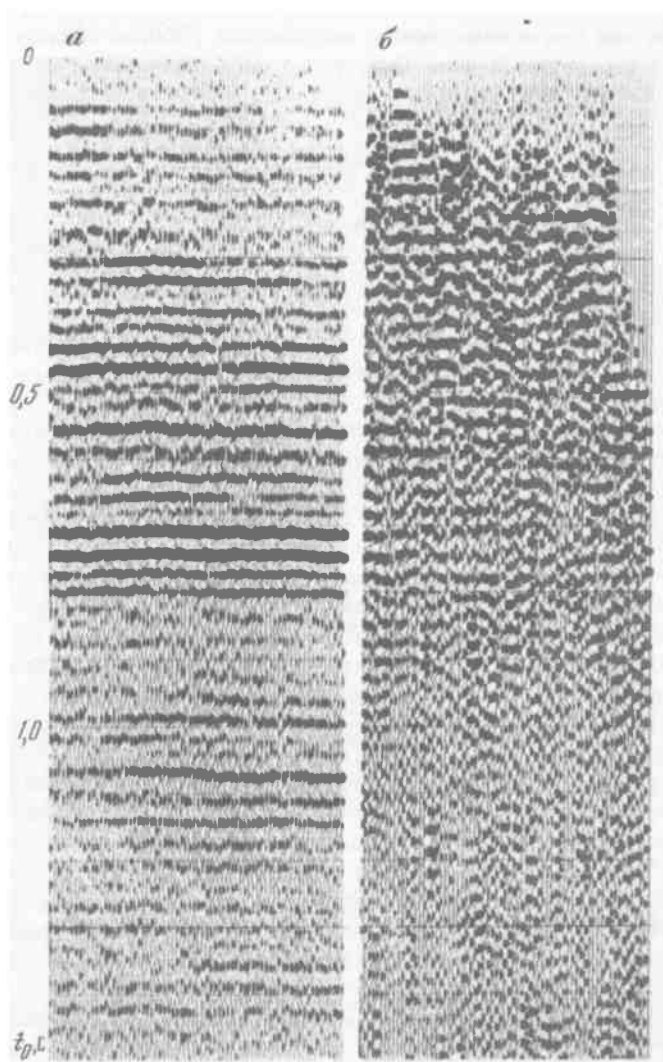


Рис. 51. Сравнение временных разрезов, полученных при возбуждении ГСК-10 (а) и вибраторами СВ-5-150 (б)

Как следует из таблицы, ВСП применяется практически во всех перспективных нефтегазоносных районах СССР, обеспечивая получение результатов, сопоставимых с данными взрывной сейсморазведки по глубинности исследований (рис. 49) и разрешенности записей. В ряде районов материалы вибрационной сейсморазведки оказываются существен-

но лучше, чем при использовании импульсных (Прикаспийская впадина, рис. 50) и взрывных (траппы Якутии, рис. 51) источников.

Рассмотрим примеры использования вибрационных источников в различных регионах СССР.

### 5.1. УЗБЕКИСТАН И ТУРКМЕНИЯ

Районы сейсмической разведки Западного Узбекистана характеризуются сложным геологическим строением и приурочены к Бухаро-Хивинской нефтегазоносной области. Стратиграфическое строение исследуемых площадей представлено толщей различных по литологическому составу пород.

Объектом разведки служат рифовые образования, залегающие на глубинах свыше 3 км и содержащие природный газ.

Материалы ВСП в Западном Узбекистане получены с использованием вибрационных источников СВ-5-150 и станций "Прогресс". Профильным наблюдениям предшествовали опытно-методические работы, выполняемые с целью определения оптимальных условий возбуждения и регистрации полезных сигналов. При производственных работах использовались следующие основные параметры ВСП: система наблюдений фланговая; кратность наблюдений 12; число накоплений 8–10; число вибраторов 3; база группирования 75–90 м с шагом 13–15 м; параметры управляющего сигнала — частоты 20–48, 20–45 Гц, время 7 с, вынос источника 700 м.

Исходные для обработки материалы характеризуются узким спектром колебаний, многофазностью отражений, в результате чего затруднено разделение целевых горизонтов при их малой мощности. Увеличение частотного диапазона посылаемых сигналов не приводит к увеличению разрешенности из-за сильного поглощения энергии за пределами 45–50 Гц. Применение стандартной деконволюции повышает качество материала, однако, этот эффект незначителен, что объясняется прежде всего узким диапазоном возбуждаемых частот.

Значимые результаты получены ВСП при работах в Судочьем прогибе, в Приаралье и на плато Устюрт. На временных разрезах, полученных здесь при возбуждении колебаний вибрационными источниками, прослеживается до 10 отражающих горизонтов, приуроченных к основным границам осадочной толщи в меловых, юрских и доюрских отложениях (рис. 52, 53, 54). Отождествление горизонтов проведено по совокупности данных глубоких разведочных скважин и взрывной сейсморазведки. Уверенная стратификация горизонтов затруднялась тем, что районы работ (особенно Судочий прогиб, практически не изученный сейсморазведкой) характеризуются недостаточным количеством глубоких разведочных скважин и исследований ВСП, а также сложной волновой картиной в приразломных и сводовых зонах. В таких областях происходит выкли-

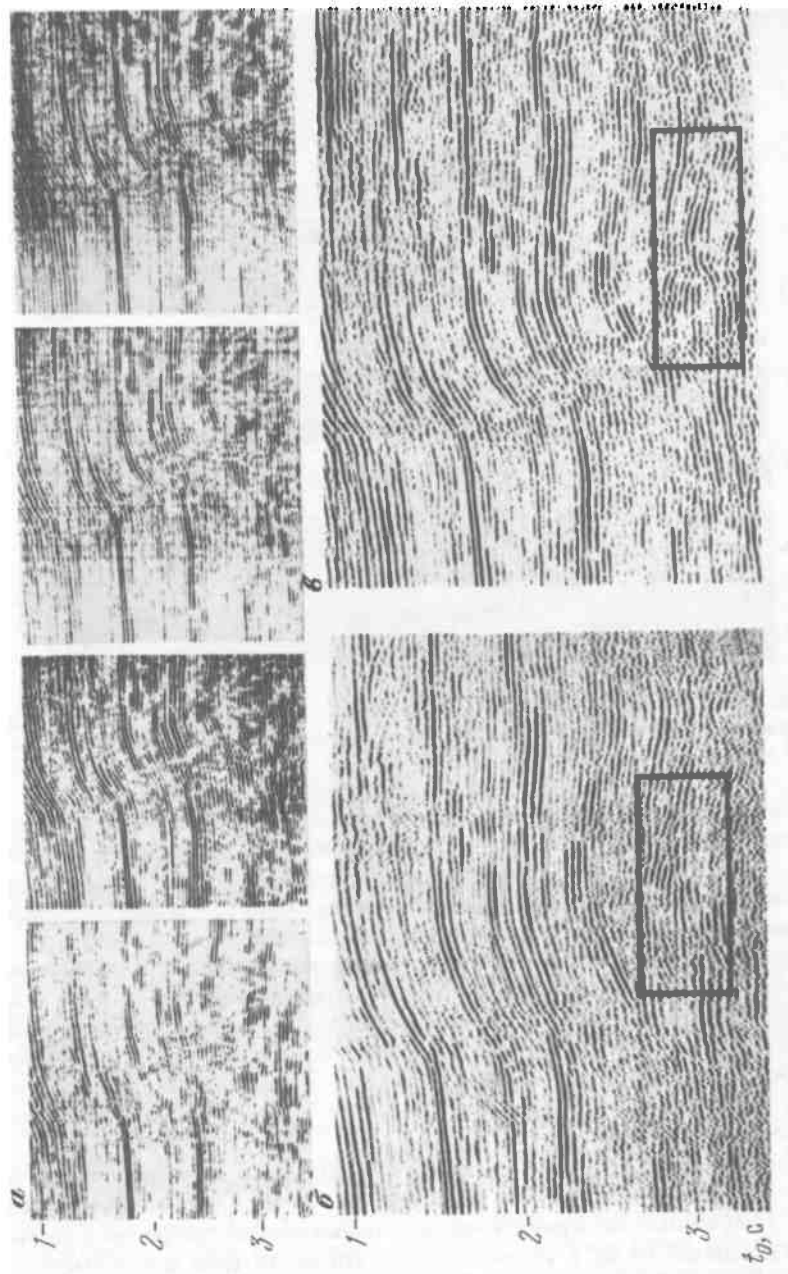


Рис. 52. Пример миграции данных ВСП по одному из профилей Приаралья:  
 а — перебор параметров процедуры миграции; б, в — разрезы до и после миграции соответственно

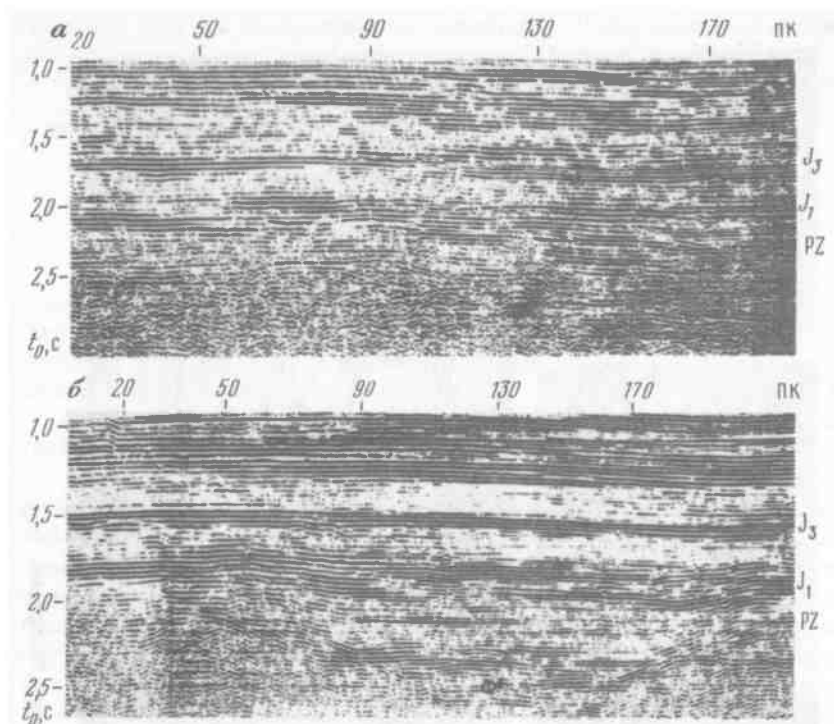


Рис. 53. Фрагменты временных разрезов, полученные по системам 24-кратного перекрытия на площади Урга (Аральское море) с импульсными (а) и вибрационными (б) источниками

нивание отдельных горизонтов, резкая смена литологического состава, приводящая к перераспределению фаз отражающих горизонтов (особенно в меловых и нижне-, среднеюрских отложениях). На большинстве разрезов выделены малоамплитудные дизъюнктивные нарушения с большей разрешенностью, характерной для разрезов ВСП.

Наиболее уверенно по площади прослеживаются опорный верхнеюрский отражающий горизонт на временах регистрации 1,5–1,8 с и нижне-, среднеюрские отражения на временах 2,2–2,4 с. Для отражающих горизонтов в меловой толще и в доюрском комплексе нет четкой динамической разрешенности и непрерывного прослеживания по площади, что делает более неоднозначными их отождествление и в целом геологическую интерпретацию.

Следует отметить, что ухудшение корреляции всех отражающих горизонтов (особенно в верхней части разреза, до 2 с) происходит на разрезах, полученных по криволинейным направлениям профилей с частыми и большими ( $\geq 40^\circ$ ) углами излома, что характерно для пойменных частей. Связано это с недоучетом погрешностей за счет изломов при об-

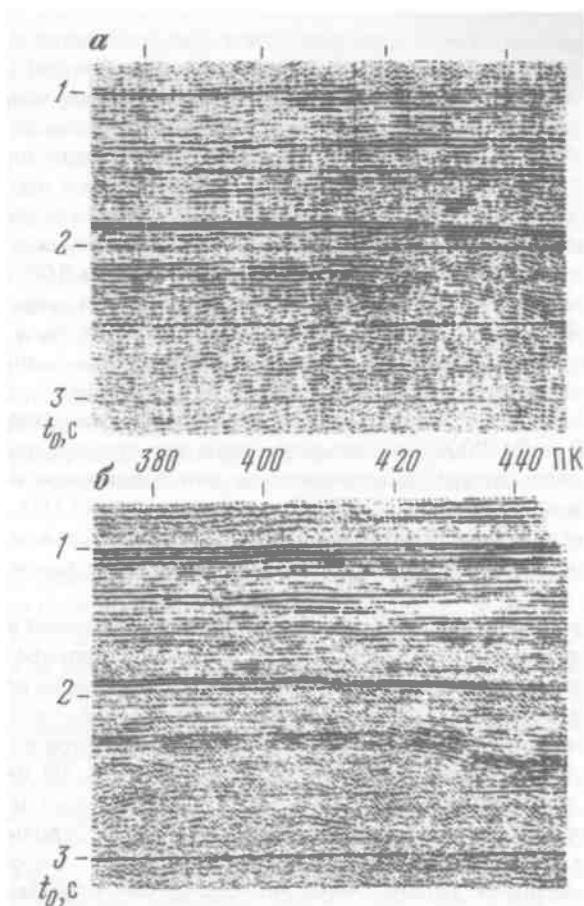


Рис. 54. Сопоставление временных разрезов ОГТ, полученных при взрывном (а) и вибрационном (б) возбуждениях (плато Устюрт)

работке по программе СЛАЛОМ-ЛАЙН даже при дополнительной коррекции кинематических поправок. В волновой картине это отражается в разрывах корреляции, "задирах" и перепадах горизонтов, появлении ложных структурных форм — перегибов, дизъюнктивных нарушений и т.д., что следует иметь в виду при геологической интерпретации криволинейных профилей. Особенно это важно для доюрского комплекса, где неуверенные и непротяженные горизонты разновозрастных пород с разными углами залегания могут привести к хаотической записи и принципиальной ошибке в интерпретации. Такая картина характерна для южной части поймы (Судочьего прогиба). Поэтому такие участки профилей не могут быть использованы для геолого-геофизического и сейсмостратиграфического анализа.

Сравнение временных разрезов, полученных с источниками ГСК, СВ-5-150 и при взрывном возбуждении (см. рис. 52–54) показывает в общем их качественную сопоставимость при изучении осадочной толщи. Отмечается большая разрешенность и динамическая выразительность разрезов ВСР в благоприятных условиях северной части плато Устюрт (см. рис. 54). На Аральской площади субпараллельные профили, обработанные с ГСК и СВ-5-150 в одинаковых поверхностных условиях (см. рис. 53), аналогичны по качеству прослеживания меловых и юрских горизонтов при несколько большей глубинности разрезов ВСР.

Следует отметить, что сопоставление результатов взрывной и невзрывной сейсморазведки на плато Устюрт не может быть достаточно корректным, так как при этих работах использовались разные модификации как регистрирующей аппаратуры (ВВСР – “Поиск”; ГСК, ВСР – “Прогресс-2” и “Прогресс-3”), так и обрабатывающих ЭВМ (ВВСР – БЭСМ-4, ВСР – ПС-2000) с различным набором спецпрограмм. Тем не менее, учитывая резервные возможности для повышения информативности и глубинности исследований с источниками СВ-5-150, можно сделать вывод о том, что работы вибросейсмическим методом позволяют успешно решать геологические задачи, стоящие перед сейсморазведкой в регионе.

Сейсмогеологические и глубинные разрезы отображают в целом геологическое строение осадочной толщи Судочьего прогиба и Куаныш-Косколинской тектонической зоны до глубин 2,5–4 км на плато Устюрт и до 4–8 км в Судочьем прогибе и Южном Приаралье – в наиболее погруженных частях, где прослеживаются протяженные горизонты в разновозрастных палеозойских отложениях (см. рис. 54). На фоне общего погружения горизонтов и увеличения мощности юрских отложений в северо-восточном направлении выделены новые (в Судочьем прогибе и Аральском море), подтверждены и уточнены известные структурные элементы (на плато Устюрт–Акчалак, Восточный Аламбек, Западная Кескала, Чингиз и др.), наиболее уверенно выделяемые по опорному верхнеюрскому горизонту и прослеживающиеся по нижне-, среднеюрским горизонтам.

На северной и восточной площадях Судочьего прогиба зафиксированы выклинивания осадочных отложений (нижне-, среднеюрских, палеозойских), которые характерны для выступов палеозойского фундамента, различные клиноформы, изменение динамических особенностей прослеживаемости основных отражающих границ, которые наблюдаются также на площадях плато Устюрт. Такие участки представляют несомненный интерес для поисков ловушек неструктурного типа (литолого-стратиграфических, клиноформных).

Наиболее важные структурные элементы, выделенные по данным ВСР: Тахтакаирский вал с амплитудой 1000–1500 м и протяженностью ~15–20 км; Аральская, Ургинская и Бердахская складки с амплитудами до 300 м.



По результатам материалов ВСР в совокупности с имеющимися геолого-геофизическими данными по Восточному Устюрту и Приаралью установлены новые тектонические зоны — Арал-Тахтакайская, представляющая собой валообразное сочленение Судочьего и Кабанбайского прогибов, и Раушан-Тахтакайская, расположенная в зоне сочленения юго-восточного борта Судочьего прогиба и Тахтакайского вала. Обе зоны представляют большой интерес для поисков как погребенных структур, так и неконтролируемых антиклиналями ловушек (НАЛ).

На плато Устюрт наиболее благоприятными сейсмогеологическими условиями для вибрационного возбуждения характеризуются площади центральной и северной частей плато (в пределах Куаныш-Косколинской тектонической зоны). Здесь для источников СВ-5-150 возможна постановка тонких задач (учитывая большую разрешенность метода и возможность использования "комбисви́па"), таких как выделение литологических неоднородностей, стратиграфических несогласий, клиноформ, расчленение горизонтов по частотному составу и скоростным параметрам и в целом изучение динамических особенностей возбуждаемых волн и выявление "ярких пятен". Такие задачи, в основном, должны решаться на этапе обработки на ЭВМ, но требуют получения высококачественного полевого материала.

При детальном работах на структурах для получения кондиционного материала и высокой точности построений необходимым условием является отработка всей площади одним типом источника (СВ-5-150 или ГСК-6), желательны постоянные параметры регистрации и возбуждения и обработка по единому графу.

В Туркменской ССР выполнены опытно-методические исследования ВСР для выяснения эффективности и возможности изучения сложно построенных мезозойских отложений. Исследования выполнялись на площадях Кум-Даг и Западный Зирик. Результаты работ оказались различными. На площади Западный Зирик, характеризующейся хорошими поверхностными условиями, увеличение кратности профилирования до 24 позволило получить достоверную сейсмическую информацию о разрезе осадочных пород неоген-четвертичного и мел-палеогенового комплексов в интервале времен до 2,5 с на юго-восточном участке и 0—3 с — на северо-западном. На площади Кум-Даг разрез осадочных пород освещен в лучшем случае до подошвы плиоценовых отложений.

Основные элементы методики работ с применением СВ-5-150 в Туркменской ССР следующие: 24-кратное прослеживание целевых горизонтов; полоса частот управляющего сигнала 20—60 Гц, длительность 10—12 с; группирование 21 сейсмоприемника на базе 50 м, база приема 2350 м; фланговая система отстрела с выносом пунктов возбуждения 300—600 м; группирование пяти установок на базе 50 м, число накоплений на одну физическую точку — не менее шести.

## 5.2. ПРИКАСПИЙСКАЯ ВПАДИНА

Для Прикаспийской впадины характерно развитие солянокупольной тектоники, что определяет сложность геологического строения и трудности подготовки в этих условиях объектов под глубокое бурение. Опробование здесь ВСР началось в начале 80-х годов, но промышленное внедрение относится к 1984–1986 гг.

В осадочном чехле Прикаспийской впадины выделяются три структурных этажа (подсолевой, солевой и надсолевой), различающихся как по условиям залегания, так и по составу пород.

К подсолевому структурному этажу относятся докунгурские образования ( $P_1$ ,  $C$ ,  $D$ ). В этой толще выделяются следующие отражающие горизонты:  $P_1$  — кровля подсолевых отложений, это основной сейсмический репер на всей территории Прикаспийской впадины;  $P_2$  — предположительно кровля среднего карбона ( $C_2$ );  $P_3$  — предположительно кровля додевонских отложений.

Подсолевой структурно-тектонический этаж является основным объектом нефтегазопроисловых работ. Изучение его структуры сейсморазведкой сопряжено с большими трудностями из-за искажающего влияния солянокупольной тектоники. Достигнутая точность структурных построений не позволяет зачастую достаточно детально изучить морфологию и структуру подсолевых отложений.

Исследования методом ВСР проводятся в юго-западной прибортовой части (Сарпинский прогиб и северо-западная переклиналь Астраханского свода), в восточной прибортовой зоне (Темирский выступ, площадь Жанажол) и в южной части Прикаспийской впадины в пределах Гурьевского сводового поднятия. Исследования нацелены на поиск и подготовку к поисковому бурению нефтегазоперспективных структур в надсолевом и подсолевом комплексах пород.

Объект исследований — целевые отражающие горизонты в верхнем и среднем структурно-тектонических этажах: кровля пород палеоцена, представленная группой отражений на временах 0,9–1,1 с; кровля пород нижнего палеогена, представленная группой отражений на временах 1,2–1,4 с, и кровля пород нижнего мела, представленная группой отражений на временах 1,5–1,7 с. Геологический интерес также представляет прослеживание отражений от пород юрского возраста, регистрирующихся на временах 2,1–2,5 с.

В результате обработки материалов в целом удается успешно решать задачи по надсолевому комплексу (рис. 55). Что же касается подсолевых отложений, то отражения от них не повсеместно надежно и непрерывно прослеживаются, что, возможно, связано с недостаточной энергией возбуждения. Для успешного решения геологических задач по подсолевому комплексу в пределах Западной, Северо-Западной бортовых зон Прикаспийской впадины необходима постановка опытно-методических работ с целью выработки оптимальной методики вибрационного воз-

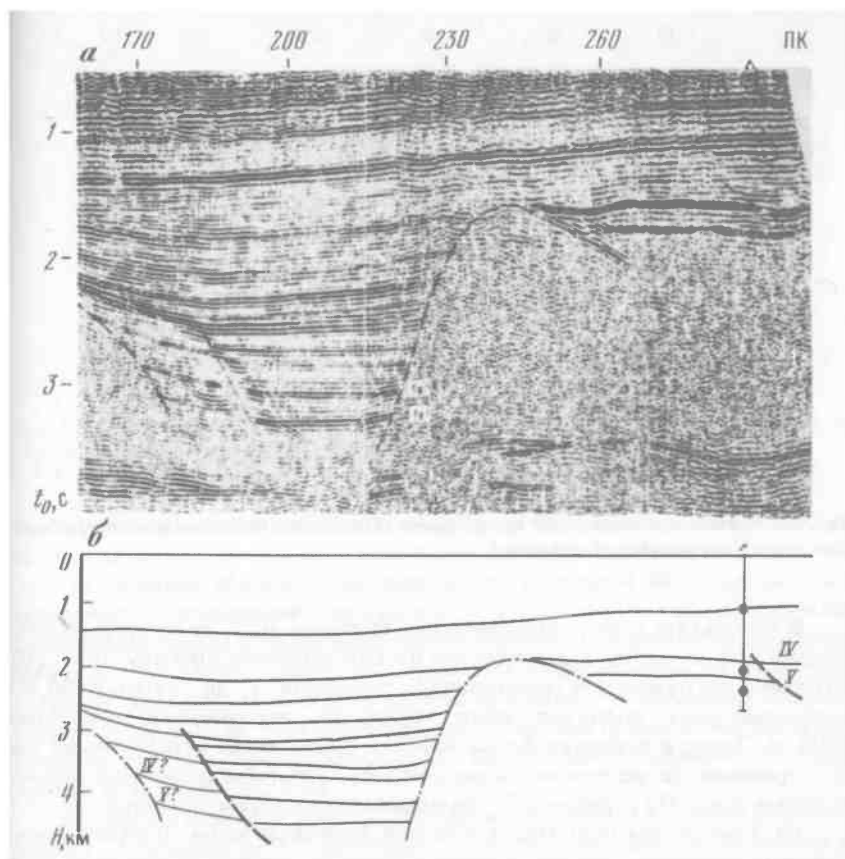


Рис. 55. Временной разрез ВСП (а) и глубинный разрез (б) по профилю (Сарпинский прогиб)

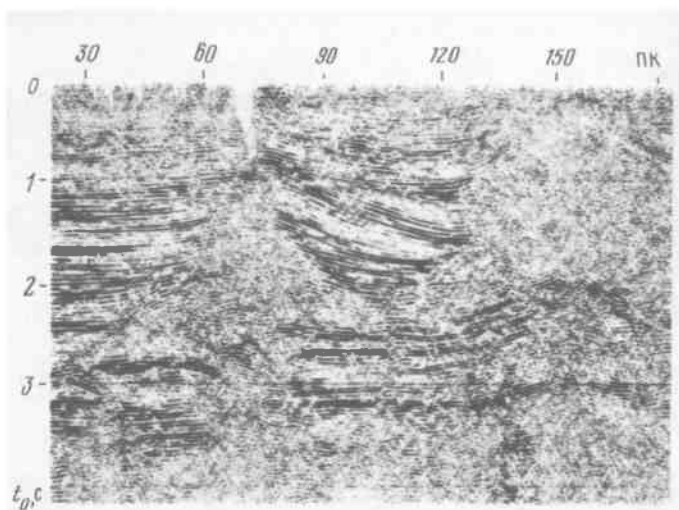
буждения упругих колебаний, обработки и интерпретации материалов.

В пределах северо-западной переклинали Астраханского свода работы ВСП проведены по следующей методике.

1. При возбуждении использовалась группа из пяти вибраторов СВ-5-150 на базе 100–125 м; накопление 12 воздействий; длина управляющего свип-сигнала 6 с, частотный диапазон 22–55 Гц.

2. При регистрации использовались "Прогресс-3" и "Прогресс-2ВС"; шаг дискретизации 4 мс; ФВЧ – 10–14 Гц; ФНЧ – 62,5 Гц; длина записи 11 с.

3. Система наблюдений – фланговая с 24-кратным перекрытием; вынос 300 м; длина расстановки 2350 м; взрывной интервал – 50 м; расстояние между каналами 50 м; группирование 21 СП СВ-10Ц на базе 50 м (или СВ-20).



**Рис. 56.** Временной разрез ВСП по профилю (Темирское поднятие восточной бортовой зоны Прикаспийской впадины)

В результате работ, выполненных методом ВСП, получен материал, близкий по качеству к материалам по Сарпинскому прогибу (рис. 56). Отмечено погружение к северо-западу горизонта  $P_1$  до глубин 5700 м и выявлена зона поднятия этого горизонта, ограниченная изогипсой 4800 м. Триас в пределах Астраханского свода имеет ограниченное распространение (в основном нижний отдел), заполняя отдельные межкупольные зоны. По горизонту  $T_1$  выявлена изолированная мульда.

На Темирском поднятии восточной бортовой зоны Прикаспийской впадины проведены работы с использованием как взрывного, так и вибрационного способа возбуждения волн. В том и в другом случае применялись фланговая система наблюдений с 24-кратным перекрытием, с расстоянием между пунктами возбуждений и пунктами приема 50 м.

При вибрационном возбуждении использовалась линейная группа из 3–5 вибраторов на базе 70–80 м с шагом между вибраторами 10 м. Число накоплений — восемь, вынос ПВ — 150 м. Свип-сигнал длительностью 10 с в частотном диапазоне 17–62 Гц. На приеме использована линейная группа из 24 СП типа СВ-10Ц на базе 80,5 м. Сейсмостанция "Прогресс-3". Обработка осуществлена как в системе СЦС-3, так и в системе СОС-СП. Применение корректирующей фильтрации на выходе и особенно адаптирующей нуль-фазовой деконволюции в системе СЦС-3 позволяет получать временные разрезы практически такой же разрешенности, как со взрывной сейсморазведкой.

Результаты проведенных работ свидетельствуют о принципиальной возможности применения вибрационной сейсморазведки для решения конкретных задач в сложных сейсмогеологических условиях восточной

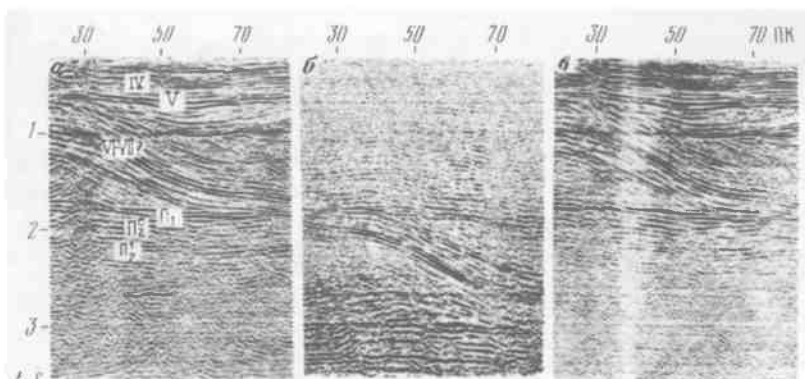


Рис. 57. Временные разрезы при использовании одиночных глубоких скважин (а), группы мелких скважин (б) и вибрационного (в) возбуждения волн

бортной зоны Прикаспийской впадины и получения информации, качественно сопоставимой с информацией взрывной сейсморазведки.

На площади Жанажол при разработке методики ВРС с целью более детального картирования продуктивной подсолевой толщи, представленной карбонатными и терригенными отложениями, опробовано и вибрационное возбуждение, наряду со взрывным возбуждением из одиночных скважин под ЗМС, а также из группы шнековых и шпуровых скважин глубиной до 2–6 м. При этом параметры систем наблюдений были одинаковые, только при вибрационном возбуждении применялся вынос пункта возбуждения 200 м.

Об эффективности разных способов возбуждения можно судить по рис. 57. Возбуждение из одиночных глубоких скважин с заложением заряда весом 7,2 кг под ЗМС на 1/4 длины прямой волны дает наилучшие результаты по степени разрешенности целевых отражений (рис. 57,а). Возбуждение из группы мелких скважин дает заметно худшие результаты как по разрешенности записи, так и по глубине освещения разреза (рис. 57,б). При вибрационном возбуждении (рис. 57,в) характер временного разреза по надсолевой толще сопоставим с данными возбуждения из одиночных глубоких скважин. Что касается подсолевой толщи, то здесь по разрешенности записи вибрационное возбуждение уступает взрывному. Последующими работами, направленными на оптимизацию вибрационного возбуждения с целью увеличения энергии отражений от подсолевых горизонтов, удалось улучшить и качественно, и количественно освещение подсолевой толщи (рис. 58).

В южной части Прикаспийской впадины работы ВРС проведены с линейным группированием 2–3 вибраторов СВ-5-150 на базе 100 м, накоплением 4–8 воздействий, длиной свип-сигнала 6 с, частотным диапазоном свип-сигнала 15–60 Гц. При регистрации использовалась ССЦ "Прогресс-3", длина записи составляла 11 с. Применялась фланговая система

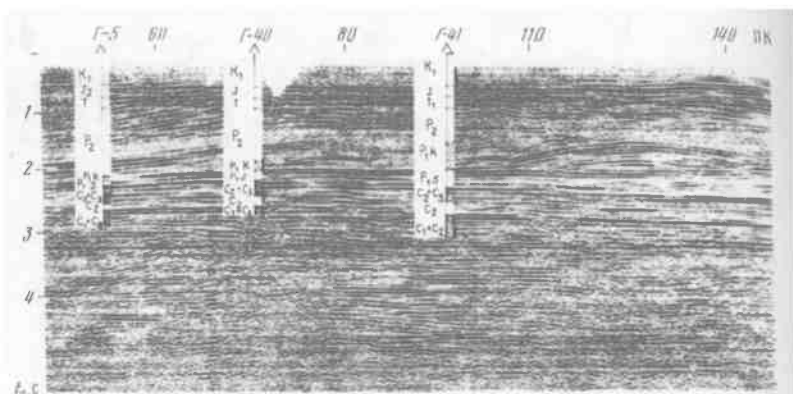


Рис. 58. Типичный временной разрез ВСП на площади Жанажол

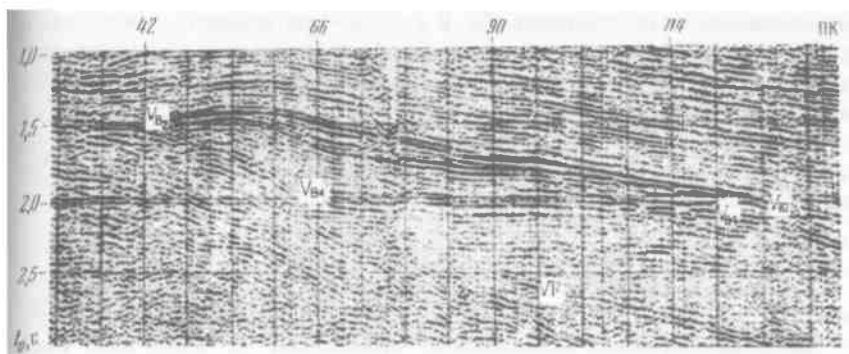
наблюдений с 24-кратным перекрытием, выносом ПВ 200 м, длиной расстановки 2350 м. Взрывной интервал составлял 50 м, расстояние между каналами 50 м. Группировалось 12–13 СП типа СВ-10Ц на базе 44–50 м. Обработка осуществлялась в различных системах.

Сравнение с данными взрывной сейсморазведки показывает, что при правильно выбранных параметрах возбуждения, регистрации и обработки материалов разрезы ВСП в целом сопоставимы с разрезами взрывной сейсморазведки. При этом обеспечивается достаточная глубина исследований по подсолевому комплексу отложений и динамическая выразительность отражений. Однако в присводовых частях узких куполов и под сводами, где на разрезах ВСП зачастую наблюдаются перерывы в корреляции подсолевых отражающих горизонтов, качество материалов ВСП остается худшим по сравнению с качеством материалов взрывной сейсморазведки при использовании глубоких скважин с заложением заряда под ЗМС. В то же время отмечается, что временные разрезы ВСП обладают динамически более разрешенной записью отраженных волн в надсолевом комплексе отложений.

### 5.3. ПРИБАЛТИЙСКАЯ СИНЕКЛИЗА И ДНЕПРОВСКО-ДОНЕЦКАЯ ВПАДИНА

В 1983 г. в пределах Прибалтийской синеклизы проведены работы по методике ВСП с целью изучения возможностей метода при решении геологических задач в данном регионе. Профильные результаты получены со следующими основными параметрами отработки: система наблюдений фланговая, шаг между ПП – 25 м, вынос источника 50 м, частотный диапазон управляющего сигнала 20–80 Гц, его длительность 10 с.

Разведочные задачи ВСП в данном регионе – детальное расчленение тонкослоистого разреза юрско-триасовых отложений, прослеживание



**рис. 59. Характер волновой картины на временном разрезе ВСП в неблагоприятных сейсмогеологических условиях ДДВ**

и расчленение пермских отложений, прослеживание отражений от силурских пород, а также расчленение и прослеживание отражений от кровли ордовика.

Полученные данные ВСП характеризуются невысоким качеством исходных записей и суммарных разрезов. На коррелограммах наблюдается высокий уровень шума. Отношение сигнал/помеха на суммарных разрезах колеблется в пределах 1–1,8.

Материалы ВСП обрабатывались с применением стандартной обратной фильтрации и с использованием специализированного комплекса ФИЛМЕМ на уровне суммарных разрезов.

Применение обратной фильтрации в условиях узкого диапазона частот отраженных сигналов и достаточно высокого уровня случайных шумов практически не дало положительного результата. Значительно поднялся уровень шумов, ухудшилась прослеживаемость отражений. Использование же комплекса ФИЛМЕМ к тем же материалам позволило существенно повысить временную и динамическую разрешенность записи. При этом следует отметить, что по всему разрезу в результате расширения спектра в область высоких частот значительно увеличилась видимая частота отражений. Расширение спектра и сжатие сигналов выявило погрешности введенных статических поправок, что делает целесообразным применение комплекса ФИЛМЕМ к исходным записям с последующей коррекцией статических поправок.

При работах методикой ВСП в ДДВ использовалось 6–8 вибраторов с расстоянием между ними 10 м. Система наблюдений была стандартной для этих районов, только использован вынос ПВ 200 м. Надо отметить, что проведенное сравнение с взрывной сейсморазведкой показало сходимость результатов, за исключением некоторых деталей в пользу одного или другого способа возбуждения в зависимости от местных условий. В некоторых районах получен материал (рис. 59), обеспечивающий решение геологических задач при повышении производительности и сни-

жении стоимости сейсморазведки. В других — детальность и надежность освещения разреза такие же сложные, как и при других способах возбуждения. Следует однако отметить, что методические возможности ВСР далеко не исчерпаны и полученные результаты надо рассматривать в качестве первой попытки использования вибрационных способов возбуждения в условиях Днепровско-Донецкой впадины и других районов Украины и Белоруссии.

#### 5.4. ЗАПАДНАЯ СИБИРЬ

Вибросейсмические исследования проводятся на территории Среднего Приобья в зимние периоды, начиная с 1979 г. Основанием для их постановки явилось отсутствие сейсморазведочных данных на обширной площади, находящейся в непосредственной близости от нефтяных месторождений Красноленинского свода и Средне-Назымского месторождения нефти, а также сложность поверхностных условий, затрудняющая проведение буровзрывных работ.

Перед ВСР ставилась геологическая задача детального расчленения неоком-юрских отложений и прослеживание отражающих горизонтов от палеозойских отложений. Для решения поставленной задачи выполнялись площадные и профильные исследования масштабов 1:100 000 и 1:200 000 с использованием следующих элементов методики: система наблюдений — фланговая, с 12–24-кратным перекрытием; вынос 500 м; интервал регистрации 500–2850 м; длительность свип-сигнала 10 с; частотный диапазон свип-сигнала 12–48 Гц; применялось группирование источников и приемников.

Исследования проводились по криволинейным профилям, что объясняется необходимостью обхода рек, озер, болот с большой мощностью торфяной подушки, где работа с тяжеловесными вибраторами невозможна. Полученные временные разрезы характеризуются хорошим и удовлетворительным качеством и дают достаточно полное представление о геологическом строении платформенного чехла.

Краткая характеристика отраженных волн от горизонтов осадочного чехла, по которым выполнена корреляция, приведена в табл. 10.

В интервале времени регистрации отраженных волн А и Б выделяются отражения, связанные с границами в отложениях нижней и средней юры (тюменской свиты). Для этих отражений характерны неустойчивость динамического облика по латерали, интерференция.

На временах, больших времен регистрации волн А, наблюдается сложное волновое поле, образуемое волнами с различными углами наклона осей синфазности, связанными, вероятно, с границами в образованиях второго структурного этажа и фундамента.

Ухудшение качества материала отмечается на участках со сложными поверхностными условиями (холмы с отметками рельефа 100 м и более,



| Индекс волны   | Стратиграфическая привязка | Прослеживаемость, % | Интервал времени регистрации, с | Форма записи                                                                               |
|----------------|----------------------------|---------------------|---------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------|
| Г              | Кровля уватской свиты      | 96                  | 0,9—1,2                         | Двухфазная, с разной интенсивностью фаз. Вторая фаза местами исчезает совсем               |
| М              | Кровля фроловской свиты    | 95                  | 1,6—1,8                         | Двухфазная, с более интенсивной и выдержанной второй фазой                                 |
| Б              | Кровля баженовской свиты   | 99                  | 2,0—2,3                         | Динамически выдержанная двухфазная, интенсивная                                            |
| T <sub>2</sub> | Низы тюменской свиты       | 7                   | 2,2—2,3                         | Однофазная, интенсивность меняется                                                         |
| А              | Подосва осадочного чехла   | 77                  | 2,4—2,6                         | Интерференционная, чаще однофазная с меняющейся интенсивностью, местами прослежена условно |

резкопересеченная местность). Разнообразие форм и свойств неоднородностей в ВЧР обуславливает и различную по площади точность окончательных структурных построений. Определить же, в какой мере ВЧР влияет на глубинный рельеф отражающих границ, не представляется возможным.

В результате работ построены структурные карты по отражающим горизонтам осадочного чехла — Г, М, Б, схемы — по T<sub>2</sub> и А. В отложениях осадочного чехла выявлены локальные структуры и ряд приподнятых участков. Так, на Урманной площади в пределах Елизаровского мегапрогиба в зоне его сочленения с Красноленинским сводом и Ханты-Мансийской впадиной в отложениях осадочного чехла выявлены структура и ряд приподнятых участков. Все локальные структуры подготовлены к поисковому бурению. На Южно-Амнинской площади в пределах Верхне-Амнинского вала Казымской моноклинали на площади 1600 км<sup>2</sup> изучен и уточнен структурный план меловых и юрских отложений Амнинского вала. В восточной части Молодежной площади впервые в Ханты-Мансийском районе освещены особенности геологического строения осадочного чехла и, в первом приближении, отложений второго структурного этажа юго-восточной зоны сочленения Красноленинского свода и Ханты-Мансийской впадины.

Следует отметить, что применение комплекса ФИЛМЕМ к материалам ЕСР в Западной Сибири существенно повысило детальность и информативность разрезов по сравнению со стандартными вариантами обработки с привлечением известных программ обратной фильтрации. При этом улучшилась прослеживаемость отражений от кровли баженовской свиты. Надежнее выделена граница между кровлей и подошвой баженовской свиты. Детальнее расчленены отражения от тонкослоистой пачки тюменских отложений.

## 5.5. ВОСТОЧНАЯ СИБИРЬ И ОСТРОВ САХАЛИН

В пределах Восточной Сибири работы с использованием вибрационного возбуждения проведены в Красноярском крае, Иркутской области и Якутии. Работы выполнены в различных условиях, на участках, осложненных траппами и свободных от них. Во всех случаях получены положительные результаты и явное преимущество вибрационного возбуждения перед возбуждением ГСК и взрывами как близ поверхности, так и в глубоких скважинах. Если в Красноярском крае возбуждение осуществлялось только отечественным вибролокатором, приспособленным к северным условиям, то в Иркутской области и в Якутии — отечественными и импортными вибраторами, установленными в специально оборудованные санные балки.

Профильные работы методом ВСР в Иркутской области выполнялись по автодорогам Братск — Усть-Илимск и Усть-Илимск — Копяево. Первая характеризуется высокоинтенсивным круглосуточным движением транспорта, имеет асфальтобетонное покрытие, неблагоприятно сказывающееся на эффективности работы вибраторов. Вблизи дорог проложены линии электропередач (ЛЭП-500), создающие интенсивные наводки. Система наблюдений — центральная, с 12–24-кратным перекрытием, с выносом ПВ 300 м. Расстояние между ПП 50 м, группирование 11 СП СВ-10Ц на базе 50 м (сейсмоприемники неприсоединенные). Расстояние между ПВ при 12-кратном профилировании составляло 100 м, при 24-кратном — 50 м. Регистрация осуществлялась 48-канальной ССЦ "Прогресс-2" с шагом дискретизации 4 мс, в режиме МАРУ с предварительным усилением 48 дБ, с ФНЧ с граничной частотой среза 62,5 Гц. На первый информационный канал записывался управляющий сигнал с ГСР сеймостанции, суммирование одиночных воздействий выполнялось в кольцевом регистраторе станции. Редакция шума не производилась, так как устройство редактирования в накопителе предназначено только для работы с импульсными источниками. Для возбуждения упругих колебаний использовалась группа из двух вибраторов на базе 20–30 м. Параметры возбуждения: число накоплений 6–8; длина свип-сигнала 10 с; частотный диапазон 15–45 Гц.

Обоснованием набора параметров возбуждения послужили ранее

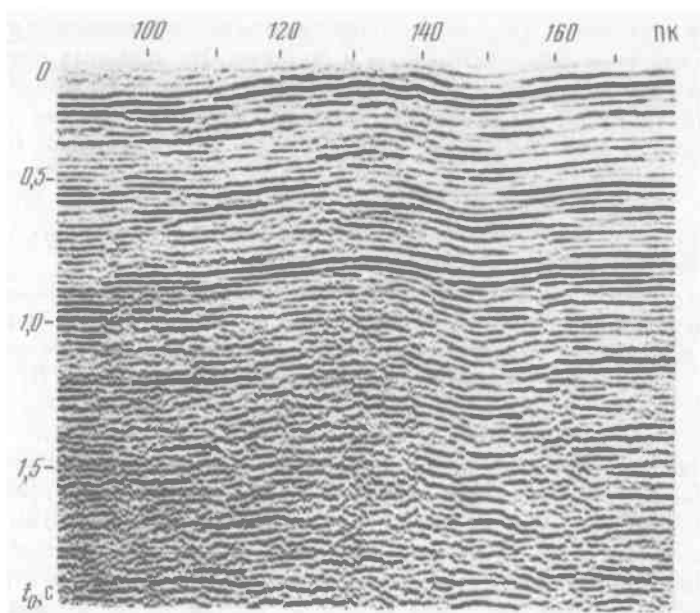


Рис. 60. Временной разрез ВСП, характеризующийся хорошим качеством прослеживания целевых отражений в условиях Иркутской области

выполненные работы в сходных сейсмогеологических условиях на правом берегу р. Ангары.

Автодорога Усть-Илимск — Копяево имеет твердое покрытие, движение автотранспорта хотя и круглосуточное, но интенсивность его существенно ниже, чем на трассе Братск — Усть-Илимск. Применение новых вибраторов, хорошая синфазность их работы и синхронность запуска — все это позволило надежно использовать группу из трех вибраторов с числом накоплений 4—5. Отсутствие помех 50 Гц позволило расширить частотный диапазон до 14—52 Гц. Материалы, полученные в результате полевых работ и обработки, характеризуются на 40—50 % удовлетворительным и хорошим качеством (рис. 60). Основные причины получения большого объема некачественного материала: сложные сейсмогеологические условия; исключительно высокий уровень промышленных помех; отсутствие в использовавшейся регистрирующей аппаратуре устройства редакции пиковых выбросов шума, предназначенного для работы с виброисточниками, без чего становится неэффективным накопление виброграмм при интенсивном движении автотранспорта по профилю; отсутствие просмотрового корреляционного устройства и, как следствие, невозможность оперативного контроля качества материала и эффективности применяемой методики.

Временные разрезы характеризуются довольно сложным волновым полем. Отражающие горизонты, особенно подсолевые, прослеживаются

иногда неуверенно, так как часто осложнены интерференцией с волнами-помехами типа дифрагированных и боковых. На временах около 0,2 с иногда прослеживается отражение в виде двухфазного импульса длительностью около 40 мс, соответствующее кровле и подошве пластового траппа в ВЧР. Примерно через 160–170 мс, на временах 0,3–0,4 с часто следится двух-, реже трехфазное отражение длительностью около 70 мс. По данным обработки зонда это отражение формируется выше кровли пород верхоленской свиты в ордовикских отложениях и приурочено, по-видимому, к усть-кутской подсвите.

На временах около 0,6–0,7 с прослеживается слабоинтенсивная фаза, соответствующая горизонту  $H_1$ , через 40–45 мс — более интенсивная фаза, стратиграфически приуроченная к верхам верхнеангарской подсвиты — горизонту  $H_2$ . Через 90 мс после интенсивной фазы ( $H_1$ ) повсеместно следится интенсивный двухфазный сигнал с периодом около 50 мс, однако связать его с горизонтом  $H_3$  не представляется возможным, поскольку первая фаза формируется выше кровли нижнеангарской подсвиты, а вторая — ниже. Далее, примерно через 50 мс, прослеживается сигнал, имеющий нечеткую форму. По привязке это, по-видимому, горизонт  $H_4$ . Через 40–50 мс наблюдается довольно характерный двухфазный импульс, более высокочастотный, чем вышележащие отражения. Вторая фаза этого импульса примерно соответствует кровле верхнебельской подсвиты и отнесена к горизонту К. Временной интервал между отражающими горизонтами  $H_1$  и К изменяется в пределах 268–280 мс. Глубже горизонта К на протяжении примерно 300 мс спорадически прослеживаются отражающие горизонты, не имеющие четко выраженной формы записи. Эти горизонты стратиграфически не привязывались. Примерно через 0,65 с после горизонта  $H_1$  на временных разрезах прослеживается пакет волн, имеющих довольно характерную форму записи. В пакете доминируют два отражения, отстоящие друг от друга на 100–110 мс. Верхнее отражение этого пакета по привязке скоростного зонда к скважине примерно соответствует кровле мотской свиты — горизонту Б. Это отражение иногда имеет вид двухфазного импульса длительностью 35–40 мс, тогда за кровлю мотской свиты принимается его вторая фаза. Следует отметить, что отражения от подсолевых горизонтов имеют более высокочастотный характер, чем пакет отражений  $H_1$  — К.

Исследования методов ВСР в Иркутской области показали:

- при производстве работ целесообразно применение совместного группирования источников и приемников на базе не более 100 м;
- увеличение числа вибраторов в группе позволяет расширить частотный диапазон в сторону высоких частот и улучшить качество материала;
- опробованная методика МПВ обеспечивает изучение ЗМС до глубины 70–80 м, при этом для возбуждения колебаний желателно использовать газодинамический источник ГСК-6.

В 1978 г. в юго-западной части Якутской АССР на территории Сред-

несибирского плоскогорья при сейсморазведочных исследованиях МОГТ применен вибросейсмический комплекс. Основанием для опробования ВСР были, с одной стороны, высокая нефтегазоперспективность этого региона, а с другой — трудоемкость бурения взрывных скважин в зонах широкого развития трапповых покровов. В тектоническом отношении площадь исследований расположена в переходной зоне от Вилейского траппового поля к Приленскому плато в пределах северо-восточной части Непско-Ботубинской антеклизы, Марнинской террасы и северо-западной прибортовой части Вилейской синеклизы.

Сейсмогеологические условия весьма сложные. Это вызвано, с одной стороны, неоднородным строением ВЧР, с другой — тонкослоистостью галогенно-карбонатной толщи пород нижнекембрийского возраста. Значительную роль в формировании волнового поля играют также разрывные нарушения, траппы и дайки. С ними связано большое количество дифрагированных волн и волн с отрицательными кажущимися скоростями. Кроме того, с зонами дробления связано полное исчезновение интерпретируемого материала и значительные разрывы осей синфазности. Это обусловило широкое применение методики многократных перекрытий, позволяющей повысить качество прослеживания целевых горизонтов за счет статистического эффекта. Целевыми горизонтами являются горизонты в палеозойских и венд-рифейских отложениях: А — чарская свита, ОА — олекминская свита, I — югдейская свита палеозойского возраста и KB — кровля харыстанско-курсовской свиты венд-рифейского возраста. Основным сейсмическим репером служит горизонт KB. Геологические задачи сейсморазведки МОГТ, в том числе метода ВСР, связаны с изучением структурного плана палеозойских и венд-рифейских отложений и подготовкой структур по сейсмическим отражающим горизонтам к передаче в глубокое бурение.

Методика работ ВСР: центральная 12-кратная система наблюдений с выносом ПВ на 200 м; расстояние между ПВ 100 м, между ПП — 50 м; группирование 3–4 вибраторов на базе 143 м и 167 м; группирование 24 СП на базе 90 м; частота управляющего сигнала 20–64 Гц и 20–80 Гц, длительность свип-сигнала 8 с; длина полезной записи 2 с; число накоплений 16.

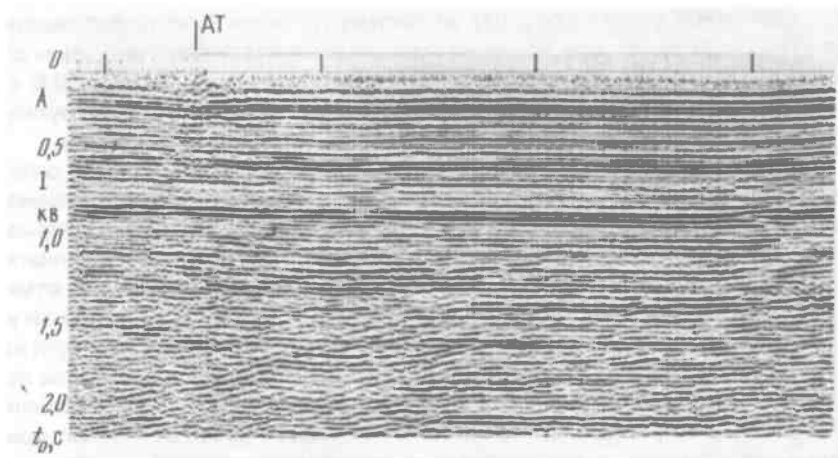
Результаты исследований методом ВСР показали высокую помехоустойчивость и высокую разрешающую способность вибросейсмического комплекса. Это обеспечило получение качественного материала не только в относительно простых сейсмогеологических условиях, но и в более сложных поверхностных условиях (траппы, переходные зоны, зоны вечной мерзлоты, зоны растеплений и т.д.), где по сравнению с результатами работ, полученными методами взрывной сейсморазведки, прослеживаемость отражающих горизонтов по материалам ВСР значительно более уверенная. Широкие технические и методические возможности ВСР комплекса позволили проводить работы в зоне интенсивных промышленных помех. Хорошее качество получаемого первичного материала.

ла с ВСК показало их конкурентноспособность с традиционными скважинными источниками. За годы работы методом ВСР в Якутии уточнено геологическое строение значительной территории, перспективной на нефть и газ; выявлено восемь перспективных объектов общей площадью 940 км<sup>2</sup>; уточнено строение Таас-Юряхского и Среднеботуобинского месторождений; подготовлено в глубокое бурение 562 км<sup>2</sup> площадей структуры АТЗ.

В плане широкого освоения отечественных вибраторов, принятом в 1983 г., были определены ближняя и дальняя задачи перспектив внедрения. Первая предусматривала доведение объемов работ к концу XII пятилетки до уровня объемов, выполняемых с импортными источниками, вторая — неуклонное их наращивание и доведение удельного веса в общем объеме сейсморазведочных исследований в регионе до 40 % к 1990 г.

В сезон 1985/86 года с вибросейсмическими комплексами СВ-5-150 — “Прогресс-3” работали уже три партии, две производственных и одна опытно-производственная. Площади работ: Лено-Анабарский прогиб, Предпатомский прогиб и Нижнеалданская впадина. Одна производственная партия работала на поисковом этапе, другая — на региональных исследованиях. Основное внимание опытно-производственной партии было нацелено на переоборудование вибросейсмических установок для работы в условиях Крайнего Севера. Переоборудование заключалось в основном в изготовлении и монтаже теплых кузовов — фургонных, обогревательных приборов, утеплений некоторых узлов, а также в изготовлении новой санной транспортной основы и монтаже на ней установок, предназначенных для работы в районах, характеризующихся особо сложными условиями передвижения. Переоборудование вибраторов производилось в нескольких вариантах: 1) на базе автомашины “Урал-375” с дополнительной установкой укрытия (кузова); 2) на базе тракторных саней с установкой укрытия (кузова) и передачей вибрации через плиту; 3) на базе тракторных саней с установкой укрытия (кузова) и передачей вибрации через полозья саней. Все варианты показали себя жизнеспособными, но последний представляется более перспективным.

Вибросейсмический комплекс с использованием вибраторов СВ-5-150 сегодняшней модификации не является универсальным во всех сейсмогеологических и производственных условиях. Большое значение приобретает обоснованный выбор районов применения этого типа источников. С геолого-геофизической точки зрения применение СВ-5-150 оправдано на тех площадях, где мощности сейсмического излучения вибраторов, с учетом присущих им ограничений, достаточно для получения целевых отражений от границ осадочного чехла. Такими площадями в пределах Якутии являются прежде всего районы развития крупных антеклиз, валов, сводов, седловин. К ним относятся Непско-Ботуобинская антеклиза, складки Анабарской и Алданской антеклиз, Сюнджерская



**Рис. 61.** Пример временного разреза ВСП, полученного в условиях Западной Якутии:  
**А, \*1, КВ** — целевые опорные отражения; **АТ** — местоположение алмазонасной трубки

седловина, Сунтарский свод и неглубокие впадины, осадочный чехол которых сложен высококонсолированными нижнепалеозойскими и венд-рифейскими, преимущественно карбонатными и гидрохимическими отложениями и характеризуется относительно неглубоким залеганием отражающих горизонтов, контрастными значениями коэффициентов отражений границ, слабым затуханием сейсмических волн. Кроме того, выход карбонатных пород на поверхность обуславливает отсутствие зоны мерзлоты. В то же время применение невзрывных источников типа СВ-5-150 во впадинах и прогибах, если они заполнены молодыми, слабоконсолированными отложениями, характеризующимися низкими коэффициентами отражений на границах и глубоким залеганием, нельзя пока считать методически оправданным. Этот вывод подтверждается данными работ, проводившихся в разные годы в районах с благоприятными и неблагоприятными условиями.

Проиллюстрируем эффективность применения переоборудованных для условий Севера отечественных вибраторов на примере одного из профилей Западной Сибири. Профиль отработан в районе Мирнинской площади с использованием следующих методических приемов: система наблюдений центральная с 12-кратным перекрытием; вынос ПВ 200 м; расстояние между пунктами возбуждений 100 м, а между пунктами приема — 50 м; возбуждение тремя вибраторами с расстоянием между ними 25 м; база группы 143 м; интервал переезда 6,25 м; частотный диапазон свип-сигнала 20–80 Гц; длительность развертки 8 с; на приеме — группа из 24 СП с последовательно-параллельным соединением на базе 90 м.

Временной разрез (рис. 61) иллюстрирует возможности вибрационной сейсморазведки при изучении мезозойских отложений, которым соответствуют опорные отражения А, I, KB на временах 0,2–0,5; 0,6 с; 0,8–0,9 с. Профиль пересекает алмазоносную кимберлитовую трубку, что отражается на временном разрезе цугом рассеянных от нее волн.

Значительные трудности при проведении сейсморазведочных работ возникают в районах, характеризующихся широким распространением покровных траппов. Это связано с тяжелыми условиями бурения взрывных скважин на участках покровных траппов, по буримости относящихся к 8–9 категории трудности. Кроме того, при выходах на траппы отмечается резкое усложнение волнового поля за счет увеличения зоны регулярных и нерегулярных волн-помех. Все это обусловило поиск других видов возбуждения, в частности, опробование и внедрение в качестве источника ЛДШ позволило отказаться от бурения взрывных скважин. В то же время при использовании ЛДШ на траппах резко возрастает уровень помех, типичных для источников поверхностного типа (преломленных, поверхностных, поперечных и обменных волн), что, естественно, ухудшает качество получаемых первичных сейсмических материалов. Кроме того, недостаточное количество возбуждаемой источниками энергии часто ведет к потере корреляции глубинных отражений и ухудшению их прослеживаемости. Внедрение вибрационного метода сейсморазведки позволило, в первую очередь, за счет реализации мощных интерференционных систем при возбуждении значительно улучшить прослеживаемость опорных горизонтов в зонах распространения трапповых покровов и получить интерпретируемые временные разрезы на таких участках, где применение предыдущих методик было малоэффективным (рис. 62).

В геологическом строении о. Сахалин принимают участие юрские, меловые, неогеновые и четвертичные отложения. Отложения неогена имеют широкое развитие на всей территории острова и являются объектом геологической разведки. Более древние мезозойские и палеозойские образования развиты на Восточно-Сахалинских и Западно-Сахалинских хребтах и представлены сильно метаморфизованными породами. К геолого-поисковым задачам они отношения не имеют.

Четвертичные отложения развиты поовсеместно и представлены песками, глинами, супесями, суглинками. Разрез осадочных отложений характеризуется непостоянством литологического состава по площади, тонкослоистостью чередующихся песков, глин и песчаников. Отраженные волны соответствуют совокупностям отдельных границ, тонкослоистых пачек пород. Отраженные волны выделяются на временах до 1,8–2,5 с. Опорных горизонтов на Сахалине нет.

На временных разрезах, полученных ВСП на Северном Сахалине, глубина освещения меньше, чем при взрывах из скважин, что объясняется малой энергией сигнала, возбуждаемого вибраторами. В Тымовской впадине (Центральный и Северный Сахалин) условный горизонт З,



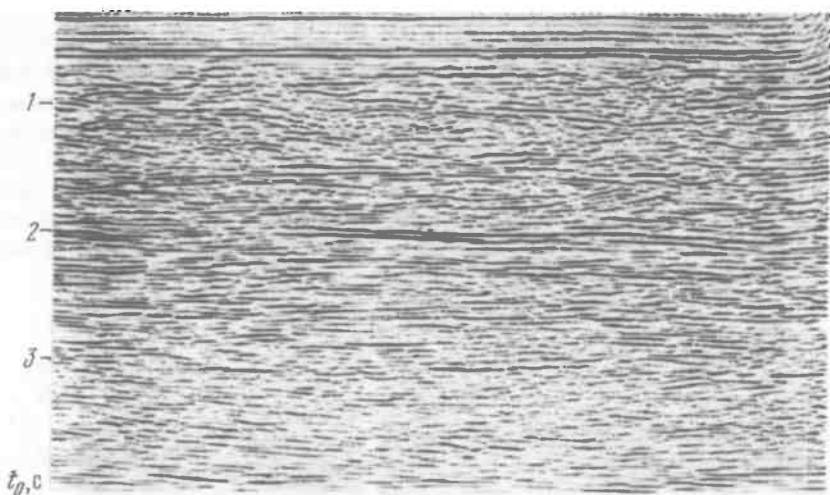


Рис. 62. Характер временных разрезов ВСП, полученных в условиях трапповых полей Якутии

соответствующий дагинской свите, на временных разрезах ВСП динамически четко выражен. На временах, превышающих времена регистрации дагинских отражений, почти повсеместно наблюдается в основном нерегулярная интерференционная запись, в которой преобладают оси синфазностей различного наклона (боковые волны).

В тектоническом отношении Сахалин характеризуется молодой складчатостью. Все структурные элементы Сахалина третичного возраста. Площади работ осложнены приповерхностными разрывами. Перспективы нефтегазоносности Сахалина связаны с осадочными отложениями неогена. Основной перспективной толщей является дагинская свита, которая широко развита на всей территории Сахалина. На Северном Сахалине, где она является основной продуктивной толщей, детально изучена бурением. В Центральном Сахалине (Тымовская впадина) — геологической съемкой и полевой геофизикой. Отложения дагинской свиты сложены чередующимися пластами песчаников, песков, глин и аргиллитов. Мощность свиты 500–1600 м (условный горизонт 3). Роль региональной покрывки принадлежит окобыкайской свите, достигающей мощности 800–900 м и характеризующейся преимущественно глинистым составом (условные горизонты 1 и 2). Ожидаемые типы ловушек — сводовые и тектонически экранированные.

При работах методом ВСП применялась следующая методика: 24- и 12-кратное профилирование; система наблюдений центральная и фланговая; минимальное удаление ПВ 300 и 600 м, максимальное удаление ПВ 1500 м, 2700 м; 4–5 вибраторов СВ-5-150; 8–16 накоплений; расстояние между вибраторами в группе 15 м; расстояние между ПВ 25

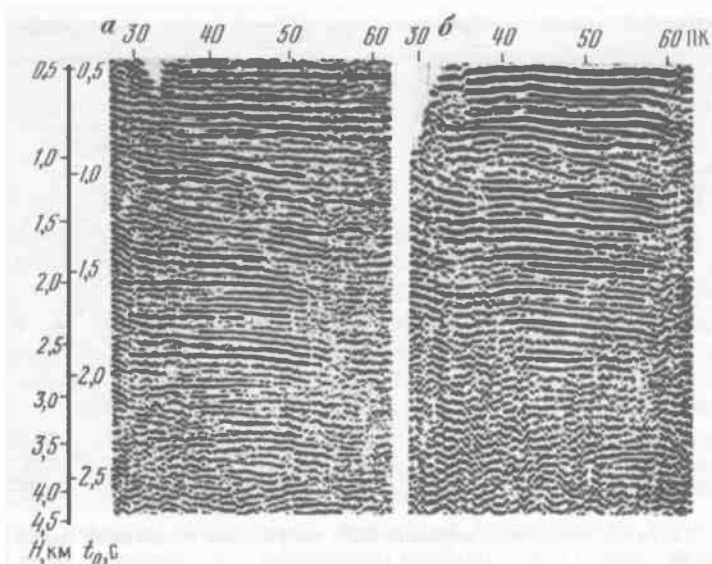


Рис. 63. Временные разрезы по Центральному Сахалину, полученные при взрывной (а) и вибрационной (б) сейсморазведке

и 50 м; применяемая на Северном Сахалине развертка частот 18–45 Гц на суше и 18–60 Гц на льду заливов. При отработке регионального профиля Тымовское — Ноглики применялся сигнал с частотой 23–50 Гц на участках с интенсивной электрической помехой от ЛЭП — 21–40, 21–45, 23–45 Гц, однако, это не дало положительного эффекта. Длительность сигнала-развертки — 7 с. Группирование сейсмоприемников СВ-20 — по 26 приборов на базе 72 м. Шаг наблюдений — 50 м. Регистрация двумя спаренными сеймостанциями СМОВ-О-24 на открытом канале без фильтров и без АРУ на максимальном усилении. Обработка материалов осуществлялась на ЕС-1052 по программам СЦС-3.

Особенностью исследований на Северном Сахалине является проведение зимних работ по льду залива. Надо отметить, что результаты зимних работ лучше, чем летних. При этом вибраторы содержат на открытой площадке и перед работой разогревают подачей горячего воздуха от теплогенератора ТГ-1,5.

Приведенные на рис. 63 временные разрезы по одному из профилей показывают, что применение стандартного графа не всегда обеспечивает получение качества, сопоставимого с качеством разрезов взрывной сейсморазведки. Волновая картина получается многофазная, динамически слабо выраженная, разрешенность низкая. Совершенно ясно, что над этими материалами еще надо работать с применением процедур, близких к комплексу ФИЛМЕМ. Главное — это то, что энергии вибрационного возбуждения вполне достаточно для получения отражений от целевых горизонтов.

Таким образом, современная география промышленного опробования ВСХ охватывает практически всю территорию СССР. Полученные, в целом положительные, результаты свидетельствуют о необходимости наращивания объемов работ, а также совершенствования методики работ. По мере увеличения объемов будет накапливаться опыт, позволяющий оптимизировать методику и технологию исследований с целью решения стоящих перед сейсморазведкой задач с большей производительностью и меньшей стоимостью.

## **6. ОРГАНИЗАЦИЯ И ТЕХНОЛОГИЯ ПРОВЕДЕНИЯ РАБОТ С ВИБРАЦИОННЫМИ ИСТОЧНИКАМИ**

### **6.1. ОРГАНИЗАЦИЯ РАБОТ**

Полевые работы с возбуждением упругих колебаний вибрационными источниками проводятся сейсмическими партиями или отрядами в соответствии с геологическим заданием и техническим проектом на производство работ, которые по структуре и содержанию аналогичны соответствующим документам "взрывных" партий.

При работах с вибраторами не требуется разрешения органов Госгортехнадзора, так как эти механизмы и устройства не подлежат их контролю.

В техническом проекте подробно излагаются геологические и методические задачи работы, а также пути и способы их решения. Если работы с вибрационными источниками ставятся в районе впервые или с новой геологической задачей, то в проекте необходимо предусмотреть достаточные объемы опытно-методических исследований для выбора и обоснования методики производственных работ. Состав и содержание этих исследований изложены в разд. 3.

Если уже имеется опыт применения вибрационных источников, объемы опытов могут быть сокращены и ограничены проведением отдельных экспериментов на участках профилей, отличающихся глубинными или поверхностными сейсмогеологическими условиями (предполагаемые зоны тектонических нарушений, выклинивания слоев, сложные формы рельефа местности, области распространения песчаных отложений, а также области, характеризующиеся низким качеством первичных материалов). Обязательно должно быть предусмотрено проведение профилактических работ в течение полевого сезона для проверки, ремонта и настройки источников, а также регистрирующей сейсмической аппаратуры.

Производительность работ в количестве физических точек, отрабатываемых за одну приборо-смену, определяется расчетом в соответствии с действующими нормами или по СУСНУ. В проект закладывается также

допустимое минимальное число одновременно работающих источников, при котором считается возможным решение поставленной геологической задачи. В случае необходимости в проекте освещается порядок отработки каждой физической точки и т.д.

Основной производственной единицей, выполняющей сейсморазведочные работы МОВ или МОГТ, является полевой сейсмический отряд.

Численный и квалификационный состав отряда определяется запро-ектированной методикой работ, временем их проведения и категорией трудности местности, где будут проложены сейсмические профили. Сейсморазведочный отряд состоит из отдельных бригад или звеньев.

Бригады отряда имеют примерно следующий состав.

1. Бригада сейсмостанции: начальник отряда (геофизик); оператор-геофизик; специалист по ремонту и настройке сейсмостанции и ГСР (инженер), водитель (тракторист) сейсмостанции.

2. Бригада возбуждения колебаний: руководитель работ с вибраторами; операторы передвижных сейсмических установок (вибраторов); водители.

3. Бригада размотки сейсмических линий (кос): помощник оператора сейсмостанции (техник-оператор); рабочие II, III разрядов; водители смоточных машин.

4. Бригада по ремонту источников: автомеханик; специалист по электронному оборудованию (техник); специалист по гидравлике (техник); наладчик геофизического оборудования (техник); сварщик; слесарь.

Вибрационный способ возбуждения требует оснащения сейсмопартии средствами контроля за состоянием вибраторов, чистоты масла и фильтров. На рис. 64 приведена схема типового оснащения вибросейсмической партии комплексом приборов, устройств и материалов.

Обязанности технического персонала сейсмической партии определяются действующими инструкциями. Укажем лишь на те из них, которые составляют специфику сейсмопартий с вибраторами.

Руководитель работ с невзрывными источниками осуществляет техническое руководство и контроль при эксплуатации и ремонте вибраторов в течение полевого и межсезонного периодов, если в экспедиции не организован централизованный ремонт источников нескольких партий. В последнем случае приказом по экспедиции назначается руководитель работ по ремонту источников, который организует, контролирует и проводит необходимые работы с ними. В течение полевого сезона руководитель работ следит за техническим состоянием установок, организует и проводит их техническое и профилактическое обслуживание, контролирует работу своей бригады и обеспечивает выполнение правил техники безопасности каждым членом бригады на всех этапах работы. Руководитель обеспечивает получение новых установок с заводов-изготовителей в исправном техническом состоянии, силами бригад проводит измерения необходимых параметров установок и сопровождает последние

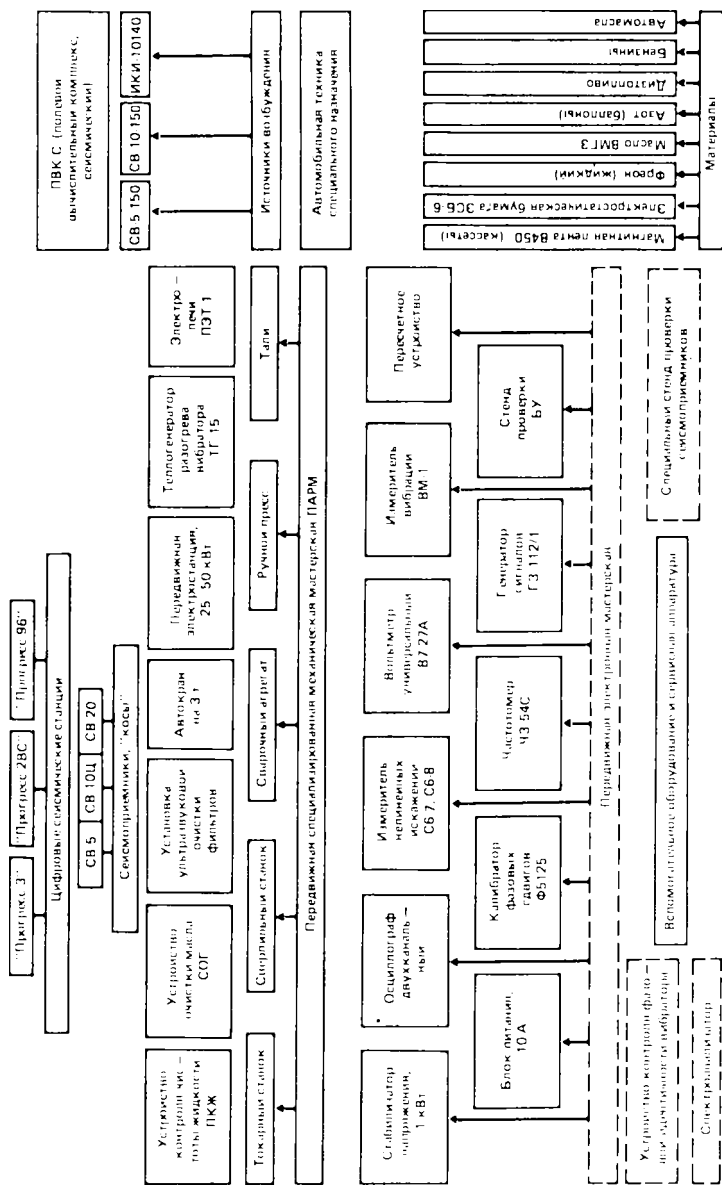


Рис. 64. Типовое оснащение вибростанционной партии.

до места полевых работ. Он контролирует также консервацию и расконсервацию источников.

Оператор вибратора проводит работы по возбуждению упругих колебаний в соответствии с распоряжениями и командами оператора сейсмостанции или начальника сейсмического отряда, проверяет техническое состояние источника, осуществляет обслуживание, ремонт и подготовку источника к работе, участвует в ремонтно-профилактических работах. Оператор подчиняется руководителю бригады и обязан неукоснительно выполнять правила техники безопасности при работах с источниками. В межсезонный период оператор участвует в ремонтных и ремонтно-профилактических работах по подготовке источников к полевому сезону.

Водитель (тракторист) установки обеспечивает исправную работу транспортного средства, переезд установки к месту работ, осуществляет перемещение установки от пикета к пикету по профилю, поддерживает заданные давления в пневмо- и гидросистемах во время работы, проверяет техническое состояние транспортной базы, проводит ремонтно-профилактические работы с гидро- и пневмосистемами, обеспечивает работоспособность дизельного двигателя и проводит техническое обслуживание, ремонт, консервацию и расконсервацию автомобиля (трактора), участвует совместно с оператором в ремонтных и ремонтно-профилактических работах источника. В своей деятельности водитель подчиняется оператору установки (при работе на профиле), а также бригадиру и автомеханику партии и обязан выполнять правила техники безопасности при эксплуатации источников и соответствующих транспортных средств.

Бригада по ремонту вибраторов обеспечивает текущий, профилактический и срочный ремонт источников и их отдельных узлов. Основная задача ее заключается в поддержании работоспособности источников, необходимой для нормального проведения полевых работ и получения качественных сейсмических материалов.

По своим параметрам отечественные вибраторы СВ-5-150 и СВ-10-150 не предназначены для ведения зимних работ. Однако интенсификация производства геофизических исследований и организационные причины требуют проведения круглогодичной эксплуатации вибраторов.

В настоящее время накоплен определенный опыт эксплуатации источников СВ-5-150 зимой в восточных и центральных районах страны. Он предусматривает строительство на базе партии ангаров с установками для обогрева или отапливаемых боксов. При содержании вибраторов на открытой площадке желательно укрывать их специальными тентами.

Помимо самих виброустановок для устойчивой работы блоков управления рекомендуется прогревать воздух в кабинах автомашин, например, с помощью печей ПЭТ-1 (1 кВт). Прогрев должен быть таким, чтобы на электронных платах БУ не было следов конденсированной вла-

ги. Для ускорения заводки дизелей виброустановок в зимнее время после прогрева форсунок и картера целесообразно использовать устройство ВАСТ, подключаемое к силовой трехфазной сети 220 В.

При переездах вибраторов с места запуска (ангара) к месту работы дизели насосных станций не глушат, а лишь разъединяют насосы от дизелей.

Заслуживает внимания идея перестановки вибраторов на сани с утепленными будками. Эта идея реализована и широко опробована в Якутии при работах в тундре. Опробование санных вибраторов показало пригодность подобной техники для работ на равнинных и заснеженных пространствах тундры.

Готовность отряда к началу проведения работ определяется после ежедневного технического обслуживания, включающего контроль каждого вибратора и проверку фазовой идентичности вибраторов.

Вибрационные воздействия могут оказывать вредное влияние на оператора. Для ограничения вредного действия вибрации на обслуживающий персонал используют специальные методы и средства. К ним относятся: контроль за уровнем вибрации; установка дополнительных виброизолирующих устройств (гасителей), снижающих уровень вибрации на путях ее распространения от собственно вибровозбудителя установки к телу человека, обслуживающего установку. Критерием эффективности виброизоляции человека могут быть не только измеренные значения виброускорений, характеризующие уровень возбуждения, но и оценки физиологического и функционального состояния оператора.

Уровень вибраций на установках СВ-5-150 проверялся многократно с целью определения их соответствия санитарным нормам. Измерения проводились на различных частотах от 15 до 90 Гц в четырех точках: на сиденьях водителя, оператора, у переднего и заднего краев платформы. В последних двух точках обычно располагаются наладчики во время регулирования установок.

Установлено, что горизонтально-поперечные колебания и горизонтально-продольные ускорения на платформе и сиденьях в кабине находятся в пределах санитарных норм во всем диапазоне частот. По вертикальным виброускорениям на некоторых установках наблюдается небольшое превышение нормы на частоте  $< 25$  Гц. Допустимый уровень вибрации обеспечивается поддержанием необходимого давления в пневмоамортизаторах и увеличением его до 0,6 МПа, что снижает уровень вибрации до нормы. Давление в пневмоамортизаторах проверяется в рабочем положении установки с опущенной на грунт плитой. У вибратора СВ-5-150 эта процедура выполняется с помощью линейки, путем замера расстояния между плитой и основанием колонн, которое должно быть равно 250 мм при давлении в пневмоопорах 0,5–0,6 МПа. Элементами развязки от вибраций служат также сиденья в кабине водителя и резиновые коврики на полу кабины.

При проведении работ с вибрационными источниками принципиальное значение играет подготовка их к полевому сезону, а также своевременные профилактический и текущий ремонты.

Ремонт и наладку установок производят в соответствии с техническим описанием, инструкцией по эксплуатации, рекомендациями и указаниями на производство работ с вибраторами [19].

В межсезонный период устраняют все выявленные дефекты, ремонтируют и заменяют вышедшие из строя детали и узлы.

Основные неполадки у вибрационных источников связаны с гидравлической системой, электрогидравлическим преобразователем (ПЭГ) и блоками управления (БУ). Поэтому при ремонте этим узлам уделяют особое внимание: устраняют течи масла, заменяют вышедшие из строя резиновые уплотнительные кольца, проверяют работоспособность насоса высокого давления и гидростанции в целом, промывают гидросистему, устраняют повреждения электрических цепей и датчиков управления вибратором (ДПМ, ДПЗ, концевые выключатели и др.). Контроль за чистотой применяемой в гидросистеме рабочей жидкости необходим для обеспечения удовлетворительной работы вибраторов.

Очистка рабочей жидкости только с помощью штатных фильтров недостаточно эффективна из-за малой грязеемкости фильтроэлементов и связанной с этим необходимостью их частой замены. Для очистки жидкости гидросистемы целесообразно использовать устройства СОГ-904А (стенд очистки масел), УМЦ-901А (установка малогабаритная, центробежная), ПКЖ-902 (прибор контроля чистоты жидкости). По опыту работы с вибраторами, технология очистки масел состоит из следующих операций: демонтаж гидрооборудования с подключением шлангов к специальной плите со сквозными каналами для циркуляции жидкости; регенерация масла; промывка гидросистемы эталонной жидкостью. Контроль за степенью очистки ведется непрерывно с использованием прибора ПКЖ-902. Целесообразно анализы проб жидкости на присутствие механических включений дополнять анализами вязкости и плотности, которые можно проводить на ближайших нефтебазах. При изменении вязкости более чем на 20 % от первоначального значения масло следует менять. Проверку гидросистемы следует проводить не реже чем через 500 ч работы, а регенерацию рабочей жидкости — после замены или ремонта агрегатов гидросистемы.

Для проверки режимов работы вибраторов разработан программный комплекс ВИБРОТЕСТ (Гомельское СКТБ СТ). Комплекс работает в двух режимах: первый предназначен для обработки частотно-модулированных сигналов, второй — набора моногармонических сигналов. О качестве работы источников судят по функциям взаимной корреляции сигналов вибратора и ГСР. Сигнальная часть ФВК позволяет сделать вывод о временной разрешенности используемого сигнала, а ее амплитудный и фазовый спектры характеризуют амплитудную неравномерность излучаемых колебаний и фазовое рассогласование эта-



лонного и контролируемого сигналов. Реализована в проверочном комплексе дополнительная диагностическая обработка фазового спектра, позволяющая судить об относительной полярности эталонного и контролируемого сигналов, об их временном запаздывании друг относительно друга, а также о рассогласовании генераторов опорной частоты на станции и на источниках. Для контроля и калибровки отдельных устройств, входящих в состав виброисточника, например датчиков золотника (ДПЗ), массы (ДПМ), а также для определения искажений на фиксированной частоте используется второй режим комплекса.

Исходные данные для контроля получают в такой последовательности. С целью определения качества работы системы фазовой коррекции виброисточника выход датчика скорости (ускорения) опорной плиты коммутируется со входом сейсмостанции, укомплектованной ГСР. Осуществляется запуск виброисточника и на магнитную ленту сейсмостанции записываются частотно-модулированные сигналы ГСР (эталонный сигнал) и датчика скорости (ускорения) опорной плиты. Обычно испытывается группа источников, и на результирующей сейсмограмме имеются один эталонный сигнал и несколько сигналов с датчиков плит тестируемых вибраторов. Иногда возникает необходимость в получении амплитудно- и фазочастотных характеристик — паспортизации датчиков, например после их ремонта (замены). При отсутствии специального вибростенда можно использовать в качестве генератора сигнала движения опорную плиту или (предпочтительнее) инерционную массу виброисточника, снабженного заведомо работающим датчиком, выполняющим в этом случае роль эталонного. Датчики укрепляются на близком расстоянии друг от друга, и их выходы коммутируются со входами сейсмостанции. Выбирается необходимый набор частот и на каждой из них производится цикл возбуждения. В результате получается серия сейсмограмм, на которых записаны периодические сигналы эталонного и тестируемого датчиков ускорения. При обработке программным комплексом ВИБРОТЕСТ определяются различия между амплитудными и фазочастотными характеристиками сигналов с датчиков, на основании которых они паспортизируются. Материалы тестирования виброисточников и их узлов (входные данные) записываются на магнитную ленту сейсмостанции "Прогресс". После этого данные демультиплексируются (программа DEMUX пакета СЦС-3) и переписываются на новую магнитную ленту в формате Р4, которая является входной для комплекса ВИБРОТЕСТ.

Результаты работы программного комплекса ВИБРОТЕСТ выводятся на АЦПУ, а также на магнитную ленту для воспроизведения на устройствах визуализации.

Программный комплекс функционирует на ЭВМ ряда ЕС с операционной системой ОС ЕС.

Контроль за состоянием цифровых схем блоков управления и ГСР осуществляют по катодному осциллографу и с помощью пересчетного

| Проверяемый элемент – двоичные разряды счетчика |       |       |       |       |       |       |       |       |       | $F_H$ | $T_p$ | $\Delta F$ | $N$ |
|-------------------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------------|-----|
| $2^0$                                           | $2^1$ | $2^2$ | $2^3$ | $2^4$ | $2^5$ | $2^6$ | $2^7$ | $2^8$ | $2^9$ |       |       |            |     |
| +                                               |       |       |       |       |       |       | +     |       |       | 10    | 3     | 66         | 129 |
|                                                 | +     |       | +     | +     |       |       |       |       |       | 10    | 1     | 32         | 26  |
|                                                 |       | +     |       | +     | +     |       |       |       |       | 10    | 2     | 32         | 52  |
|                                                 |       |       |       | +     |       | +     | +     |       |       | 10    | 8     | 32         | 208 |
|                                                 |       | +     |       |       |       |       |       | +     |       | 10    | 10    | 32         | 260 |
|                                                 |       |       |       | +     | +     |       |       |       | +     | 10    | 20    | 32         | 520 |

устройства. Алгоритм состоит в подсчете количества полупериодов (экстремумов) для заданной развертки и его сопоставлении с определенными состояниями разрядов счетчиков преобразователя код — частота (ПКЧ) БУ и ГСР.

Для примера в табл. 11 приведены параметры ЛЧМ сигналов, которые необходимо поочередно устанавливать на переключателях БУ и ГСР, и расчетное количество полупериодов, соответствующее этим разверткам.

Данные, приведенные в таблице, рассчитываются по формуле

$$N = F_H T_p \pm (\Delta F / 2) T_p,$$

где  $N$  — контрольное число (количество экстремумов одного знака в развертке);  $F_H$  — начальная частота развертки;  $\Delta F$  — полоса частот развертки;  $T_p$  — длительность развертки. При различии между расчетным числом и числом, отображаемым на индикаторе пересчетного устройства, определяют, какой из разрядов счетчика сбивается в процессе работы. При использовании разверток "вниз" возможна ошибка в подсчете импульсов на один. Если после проведенных опытов отсутствуют сомнения в правильности работы испытуемого ПКЧ БУ, а полученные значения не совпадают, то следует причину неисправности искать в синхронности запуска БУ и ГСР.

## 6.2. ТЕХНОЛОГИЯ ПРОВЕДЕНИЯ РАБОТ

Технология проведения профильных работ с невзрывными источниками в общем аналогична технологии работ со взрывами. Тем не менее, имеются определенные отличия, которые вытекают из особенностей вибрационных установок и из возможностей варьирования большим числом параметров наблюдений.

При производственных профильных работах техника, работающая

в поле, на базу партии, как правило, ежедневно не возвращается, а оставляется в заранее предусмотренном месте в непосредственной близости от производства работ под охраной сотрудников партии.

Накануне или утром перед выездом на работу начальник сейсмического отряда получает задание от руководства партии, в соответствии с которым определяет порядок отработки профиля, число работающих источников, их размещение на пунктах возбуждения и т.д. В соответствии с принятым решением он формулирует задания руководителям бригад, после чего сейсмический отряд выезжает к месту стоянки техники. По заявке начальника отряда к месту стоянки техники направляется транспорт с ГСМ. По приезде к месту стоянки каждая бригада приступает к подготовке техники и оборудования к работе. Операторы вибраторов ежедневно перед работой производят техническое обслуживание установок и подъезжают к станции для проверки фазовой идентичности. Целесообразно проверять фазовую идентичность вибраторов при работе на максимальном рабочем удалении. Возможно проводить это при использовании двух сейсмостанций. При этом одна из станций отъезжает на заданное расстояние, а вторая — по радиозапуску с первой записывает сигналы ГСР и вибраторов. Такая проверка позволяет определить идентичность вибраторов и стабильность срабатывания дешифраторов. Внеочередная проверка идентичности вибраторов производится при резком ухудшении качества получаемых материалов. Сигналы датчиков вибраторов записываются на магнитную ленту и факт проверки фиксируется в рапорте оператора сейсмостанции.

Методика проверки фазовой идентичности заключается в следующем. Идентичность составляющих комплекта проверяется по всему частотному диапазону развертки управляющих сигналов и по временам входа в синхронизацию ("захваты" фаз).

Под стабильностью вибратора понимается сохранение идентичности по фазе и амплитуде колебаний датчиков плиты вибратора опорным сигналам, вырабатываемым БУ вибратора и ГСР станции, при их многократном сопоставлении.

Под идентичностью комплекта вибраторов понимается идентичность по фазе и амплитуде колебаний, снимаемых у всех испытуемых источников с датчиков плиты, выходов следящих фильтров, выходов счетчиков опорных разверток, управляющему сигналу, вырабатываемому ГСР с сейсмостанции. Фазовая неидентичность виброскорости (виброускорения) движения опорной плиты вибратора управляющему сигналу не должна превышать  $\pm 10^\circ$ . Разброс фаз, превышающий этот предел, приводит к заметному ухудшению качества материала. Наибольшие разбросы по фазе наблюдаются на частотах ниже 25 Гц. На частотах выше 30 Гц сдвиги уменьшаются и, как правило, у нормально работающих вибраторов не меняются до конца развертки.

Для контроля за идентичностью комплекта на специальный разъем, размещенный на передней панели БУ вибраторов, выведены контроль-

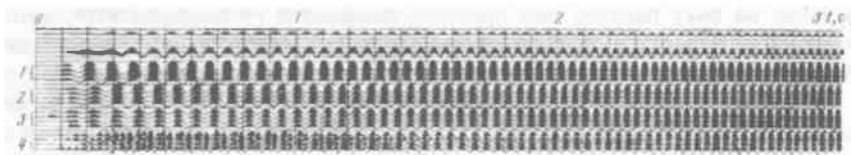


Рис. 65. Сейсмограмма идентичности комплекта вибраторов в контрольных точках

ные точки, соответствующие датчику плиты (1), выходу следящего фильтра (2) и выходу счетчика опорной развертки (3).

Идентичность комплекта проверяется обычно на рабочих управляющих сигналах или на серии моносигналов. Напряжения с блока управления каждого вибратора подаются на входы сейсмостанции через делитель 1 МОм/(75–100) Ом. Такой способ рекомендуется в качестве основного для проверки идентичности комплекта вибраторов. Для его реализации изготовляют специальный "паук", связывающий блоки управления вибраторов со входом сейсмостанции.

Проверку желательно производить на площадке со связанным грунтом. Испытательную площадку возле базы партии желательно сохранять постоянной и менять только при крайней необходимости. Вибраторы следует одинаково ориентировать и устанавливать на расстоянии 3–5 м друг от друга с прижимом опорных плит практически по всей поверхности. На рис. 65 каждой контрольной точке соответствует определенная трасса с записью указанных выше сигналов. Например, сигналы с КТ1, КТ2, КТ3 первого вибратора представлены первой трассой в каждой группе, для второго вибратора вторыми трассами и т.д.

Сопоставляя соответствующие трассы, можно получить представление об идентичности вибраторов в целом или о различиях в отдельных звеньях тракта. Колебания с КТ2, как и должно быть, сдвинуты на 90° относительно колебаний опорного сигнала ГСР станции, а колебания с КТ3, соответствующие выходам счетчиков опорной развертки ГСР станции и вибраторов, синфазны.

Соответствие излучаемого вибратором сигнала опорному сигналу относительно грубо может быть определено с помощью оценки ФВК этих сигналов [16, 20].

Однако в силу ограниченного динамического диапазона устройств визуализации часто однозначно нельзя определить, с какой степенью точности подобные сигналы. Ибо даже если из развертки ЛЧМ исключить какую-либо ее часть, то по виду ФВК это не всегда удастся заметить. На виброграмме имеется ряд сбоев, которые на ФВК отмечаются, но не столь резко, как на виброграмме, зато представление в виде ФВК компактнее. Процессы можно считать идентичными, если изображения ФВК во всех тонкостях подобны друг другу.

Оперативный контроль на профиле за состоянием вибраторов может осуществляться в тех же контрольных точках на катодном осциллографе по фигурам Лиссажу. Для этого в диагностической лаборатории дол-

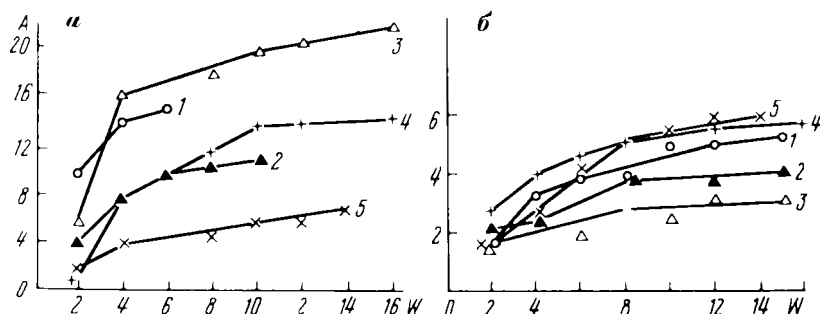


Рис. 66. Амплитудные характеристики комплекта вибраторов (1–5):

а — до регулировки; б — после регулировки

жен быть установлен блок управления вибратором БУ, синфазный с ГСР сейсмостанции.

На практике применяется и такой способ проверки идентичности вибраторов. Источники поочередно наезжают на одно и то же место, под которым на малой глубине закопан сейсмоприемник, и вибрируют на рабочем управляющем сигнале. Контрольный сейсмоприемник может быть закопан на удалении 50–100 м или же погружен в скважину и там зафиксирован. По записям виброграмм от каждого воздействия судят об идентичности вибраторов, входящих в комплект. Несмотря на простоту и логичность, этот способ используется в основном после профилактик и в дни проверок.

Вибраторы, входящие в комплект, должны быть идентичны не только по фазе, но и по амплитуде. Существенные различия в амплитудах вибраций отрицательно сказываются на результатах группирования источников, а завышение амплитуды вибраций (т.е. мощности) приводит к увеличению нелинейных искажений в возбуждаемых сигналах. Амплитудную идентичность вибраторов, входящих в комплект, проверяют по записям сейсмоприемника, помещенного в скважину или расположенного на поверхности. Вокруг сейсмоприемника (или скважины) должна быть ровная площадка радиусом 10–20 м, желательно с характерным для района работ грунтом. Поочередно каждым вибратором комплекта возбуждаются колебания рабочим управляющим сигналом при переменной мощности воздействия, т.е. на различных положениях потенциометров "Амплитуда". Регистрация может проводиться каналами сейсмостанции с разной чувствительностью или же измерительным прибором. В последнем случае специально подбирают группу сейсмоприемников для согласования с внутренним сопротивлением прибора.

На рис. 66 приведены амплитудные характеристики рабочего комплекта вибраторов в зависимости от положения  $W$  потенциометра "Амплитуда", снятые до регулировки и после регулировки их чувствительности. До регулировки разброс амплитуд составляет 400 %, после регулировки

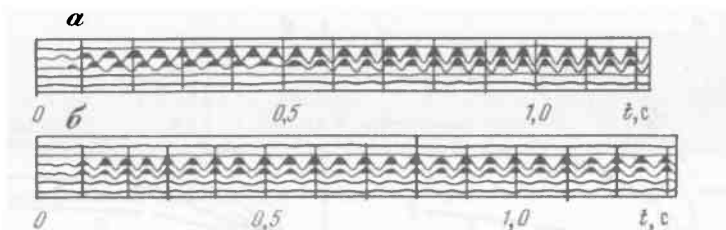


Рис. 67. Осциллограмма процессов вхождения вибратора в синхронный режим:  
 а — без автоматической подстройки фазы; б — с автоматической подстройкой фазы

за счет подбора глубин обратных связей в усилителе рассогласования он снизится и в рабочем положении потенциометра ( $W=8$ ) не превысил  $\pm 25\%$  от среднего, что вполне допустимо при проведении работ, направленных на решение структурных задач.

Профильные работы рекомендуется проводить при положениях потенциометра "Амплитуда", соответствующих 50–60 % всей шкалы, с условием, что выбранная рабочая точка на графике  $A=\Phi(W)$  соответствует линейному участку амплитудной кривой. В ином случае рабочую точку нужно изменить, поместив ее до точки перегиба кривой  $A=\Phi(W)$ . Работа в таких режимах обеспечивает лучшую стабильность фазовой коррекции и возбуждение сигнала с меньшими нелинейными искажениями.

При использовании разверток "вверх" на вхождение вибраторов в синхронизм ("захват" фазы) затрачивается около 0,5 с. Для уменьшения этого времени предложены схемные решения на основе применения дополнительной памяти в БУ, позволяющие сократить время входа в синхронизацию до 0,1 с и тем самым лучше использовать энергию, излучаемую источником. "Быстрая" автоматическая подстройка фазы излучаемого сигнала к фазе управляющего сигнала осуществляется за счет занесения из дополнительной памяти БУ в счетчик рабочей частоты развертки синхронизатора значений фазы моночастотного сигнала. Для получения данных об этих значениях производится дополнительное возбуждение на определенной моночастоте  $F_{уст}$ , определяемой по формуле

$$F_{уст} = F_n + \Delta F / 4T_p,$$

где  $T_p$  — длительность сигнала рабочей развертки;  $\Delta F$  — приращение частоты сигнала развертки.

Если вычисленное значение  $F_{уст}$  окажется дробным, следует выбрать ближайшее целое значение. Например, при  $F_n=15$  Гц,  $\Delta F=55$  Гц;  $T_p=8$  с  $F_{уст}=16,72$  Гц. Установочный запуск следует производить с параметрами  $F_{уст}=17$  Гц,  $\Delta F=0$ ,  $T_p=8$  с. При этом тумблер фазовой

коррекции должен обязательно находиться в положении ВКЛ. После выполнения установочного запуска, не выключая питания, на программных переключателях БУ вибраторов устанавливаются рабочие значения  $+\Delta F$ , и вибратор готов к отработке профиля с заданными значениями управляющего сигнала. Теперь перед началом каждой развертки информация о начальной фазе будет автоматически заноситься в счетчик и на этой основе будет осуществляться синхронизация вибраторов практически уже со второго периода сигнала развертки. На рис. 67 приведены осциллограммы с записями управляющих сигналов при отсутствии и наличии автоподстройки. На осциллограмме *а* процесс входа в синхронизацию занимает 0,5 с, на осциллограмме *б* это время за счет использования автоподстройки уменьшилось до 0,012 с.

При выключении питания БУ информация о начальной фазе, находящаяся в памяти БУ, стирается. В этом случае процедуру запоминания начальной фазы следует повторить. Также рекомендуется повторять эту процедуру и при изменении грунтовых условий в процессе перемещения вибраторов вдоль профиля.

Очевидно, что затраты времени на выполнение таких дополнительных возбуждений практически не сказываются на общей производительности за рабочий день, а качество материала улучшается. На профиль допускаются только идентичные вибраторы. Вибраторы, не прошедшие контроль идентичности, направляются на профилактику и ремонт. Место ремонта определяется руководителем работ. На базу партии направляются вибраторы только для сложного ремонта.

Во время проверки идентичности вибраторов бригада сейсмических линий производит размотку сейсмических кос, расстановку и подключение групп сейсмоприемников, подготовку их к работе. Повсеместно применяется конвейерный способ работ. Для повышения производительности смоточные автомашины радиофицируются и укомплектовываются двойным количеством секций кос и пауков с сейсмоприемниками. Полевые работы проводятся с группированием источников и синхронным накоплением воздействий на каждой физической точке. В большинстве случаев источники становятся на пункте возбуждения друг за другом по профилю и последовательно отрабатывают пикет за пикетом. Движение установок при такой системе происходит в одну сторону, что весьма важно, так как разворот машин на профиле зачастую неудобен и приводит к дополнительным потравам. Расстояние между источниками в группе определяется принятой методикой работ. Отработка физической точки может производиться как с переездом излучателей в пределах базы группы, так и без него (см. разд. 3). С уменьшением количества вибраторов число накоплений на каждой позиции должно увеличиваться в таком соотношении, чтобы разброс значений  $N\sqrt{n}$ , характеризующих помехоустойчивость (см. подразд. 3.4), для всех вариантов группирования находился в пределах 10 %. Методика с переездом более прогрессивна, потому что она позволяет легко реализовать неравномер-

ные группы, обеспечивающие большую степень ослабления волн-помех. Однако она сопряжена с дополнительными, хотя и небольшими, затратами времени на переезд и возможна при хорошем техническом состоянии установок и отлаженном ритме работ.

Вибросейсмическая разведка, несмотря на ее высокую помехоустойчивость, к электрическим наводкам весьма чувствительна. Поэтому при прокладке вибросейсмических профилей необходимо учитывать расположение высоковольтных линий передач и других источников электрических помех и, по возможности, удалять "косы" или располагать их под большими углами к линиям электропередач. Эффективными мерами борьбы являются такие общеизвестные приемы, как заземление станции, устранение утечек в косах. К стационарным наводкам можно отнести также механические влияния вибратора на сейсмические косы. Причем помеха наблюдается и тогда, когда каналы, возле которых находится группа вибраторов, не участвуют в регистрации, будучи отключены коммутатором каналов. Помеха возникает за счет изменения межжильных емкостных связей при микроколебаниях проводов косы под действием вибраций. Поэтому желательно косы относить в сторону от линии следования вибраторов. Эта же мера уменьшает и импульсные наводки от электрических процессов, возникающих в силовых цепях вибраторов.

В районах с развитием интенсивных и медленно затухающих поверхностных волн (Туркмения, Киргизия и др.) наблюдаются искажения, связанные с наложением на начала записи "хвостов" волн от предыдущих воздействий. Поэтому при проведении опытных работ, особенно при опробовании разверток "вниз", следует определять времена затухания волн и только после этого устанавливать интервалы между воздействиями и режим накоплений при профильных наблюдениях. Это имеет первостепенное значение при работах, выполняемых с твердотельными накопителями. Для выяснения фактов влияния медленно затухающих поверхностных волн на ряде пикетов производят 8—10 накоплений на открытом канале в полуавтоматическом режиме и такое же количество воздействий в ручном режиме, но с увеличенным в 2—3 раза интервалом времени между воздействиями. При этом фильтры ВЧ в трактах записи и воспроизведения выключают. Если результаты накопления будут одинаковы, то это говорит об отсутствии влияния воздействия на воздействие и о возможности производить профильные наблюдения во всех режимах работы сейсмостанции. В случае присутствия на лентах воспроизведения помех от влияния "хвостов" предыдущего воздействия на последующее следует более точно определить время наложения "хвостов" и на этой основе с учетом затрат магнитной ленты, вызванных увеличением времени наблюдения, определить режим накопления.

Работой на профиле руководит или начальник сейсмического отряда, или оператор сейсмостанции. По его команде перемещаются и готовятся к работе источники, сматываются отработанные и разматываются запас-



ные секции кос и т.д. Непосредственно отработка физической точки начинается после проверки работоспособности расстановки групп сейсμο-приемников и докладов операторов всех источников о готовности их к работе.

По окончании смены все бригады собираются на месте ночевки техники и оттуда уезжают на базу партии. Руководители бригад сообщают начальнику отряда о состоянии оборудования, аппаратуры и техники о необходимости проведения ремонта и о потребностях горючего и других материалов на следующий день.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Сейсмическая разведка без преувеличения может быть отнесена к одному из самых динамичных методов разведочной геофизики, характеризующихся обилием новых идей и направлений и широко использующих новейшие достижения науки и техники.

Отличительная особенность современной сейсморазведки — все возрастающее применение невзрывных способов возбуждения колебаний и вычислительной техники. На этой основе возможен прогресс отечественной сейсморазведки и, в частности, значительное увеличение объемов трехмерной сейсморазведки, работ с применением продольных, поперечных и обменных волн и др.

Среди невзрывных способов возбуждения волн наиболее перспективны вибрационные.

Вибрационная сейсморазведка пока не получила в нашей стране преимущественного развития, что обусловлено рядом причин организационного и технического характера. Однако объемы ее применения значительны и обобщение полученных результатов достаточно убедительно показывает, что вибрационная сейсморазведка способна решать структурные, поисковые и разведочные задачи в районах с самыми различными поверхностными и глубинными сейсмогеологическими условиями. Тем не менее, геолого-экономическая эффективность вибрационной сейсморазведки еще недостаточна, в первую очередь, при разведке глубоких горизонтов и решении неструктурных задач. Это связано с тем, что на практике еще не реализуются потенциальные возможности вибрационных источников.

Расширение и усложнение задач, стоящих перед сейсморазведкой, требуют совершенствования и дальнейшего развития ее вибрационной невзрывной модификации. Прогресс в вибрационной сейсморазведке связан с решением следующих задач.

В первую очередь — создание новых поколений вибрационных источников, способных генерировать волны в широкой (до 250 Гц и более) полосе частот, с регулируемыми параметрами и оснащенных автоматизированными системами контроля, диагностики и управления.

Одновременно с этим должны получить развитие многоканальные и сверхмногоканальные регистрирующие системы, способные принять получаемую информацию в широкой полосе частот. Дальнейшее развитие должны получить и сейсмоприемные устройства, учитывающие особенности возбуждения колебаний вибрационными источниками.

Перспективны комбинированные источники, обеспечивающие одновременное возбуждение продольных и поперечных волн. На их основе возможно существенное повышение информативности сейсморазведки, что необходимо при решении задач, связанных с определением литоло-

го-петрографического состава пород, оценкой их нефтегазонасыщенности и физических свойств.

При решении особо тонких задач может возникнуть необходимость погружения излучателя под зону малых скоростей. Этим оправданы исследования по разработке скважинных вибрационных излучателей.

Совершенствование вибрационной сейсморазведки невозможно без развития методики полевых работ, которая будет базироваться на новых видах управляющих сигналов, количественных оценках эффективности каждого способа повышения отношения сигнал/помеха и обоснованности корректировки полевой методики в процессе проведения полевых работ. Для этого необходима дальнейшая компьютеризация регистрирующих систем и источников возбуждения колебаний.

В этой связи в вибрационной сейсморазведке актуально применение полевых экспресс-центров для предварительной (до уровня временных разрезов) обработки данных. Благодаря массовому накоплению данных можно применять на этих центрах укороченные форматы представления входных данных, что позволяет уменьшить объемы необходимого оборудования и упростить создание экономичных и мобильных обрабатывающих центров.

В перспективе вибрационная сейсморазведка получит дальнейшее развитие, обеспечивая решение широкого комплекса поисково-разведочных задач.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Баранов В.Н., Захаров Ю.Е. Электрогидравлические и гидравлические вибрационные механизмы. — М.: Машиностроение, 1977.
2. Варакин Л.Е. Системы связи с шумоподобными сигналами. — М.: Радио и связь, 1985.
3. Возможности использования методики "Комбисвип" при проведении сейсмических исследований с комплексом вибросейсмической аппаратуры ВСК-2 / Л.Г. Козлов, А.П. Колейкин, Ю.П. Лукашин, В.П. Семенов // Геофизическая аппаратура — Л.: Недра, 1984. — Вып. 79.
4. Гук Л.Д. О квантовании сейсмических сигналов. — Геология и геофизика. — 1979. — № 10. — С. 113—122.
5. Гродзенский В.А., Жуков А.П. О динамическом диапазоне вибрационных данных // Вибросейсмические методы исследования Земли: Материалы Всесоюзной конференции. — ВЦ СО АН СССР, 1982. — С. 71—78.
6. Евчатов Г.П., Михаллис Ю.В., Юшин В.И. К выбору огибающей вибросейсмического сигнала // Вибрационная сейсморазведка на продольных и поперечных волнах: Тр. СНИИГГиМСа. — 1975. — Вып. 219. — С. 65—71.
7. Знаковое кодирование данных и перспективы его применения в сейсморазведке / М.Б. Шнеерсон, В.А. Гродзенский, А.Д. Пахотин, А.А. Пудовкин // Обзор. — Сер. Региональная, разведочная и промысловая геофизика. — М.: ВИЗМС, 1983.
8. Иноземцев А.Н., Колесов С.В., Жуков А.П. Способ повышения качества материалов вибрационной сейсморазведки на основе весовой корреляции полевых данных // Экспресс-информация. — Сер. Отечественный производственный опыт. — М.: ВИЗМС, 1987.
9. Исследование возможностей повышения эффективности вибрационной сейсморазведки на основе фазоманипулированных сигналов / М.Б. Шнеерсон, В.А. Гродзенский, И.С. Лев, А.Н. Иноземцев. — ВЦ СО АН СССР, 1982. — С. 48—54.
10. Кодимпульсный метод сейсморазведки / Г.И. Молоканов, Ю.П. Кострыгин, О.И. Рогоза, В.В. Трофимов // Обзорная информация. — Сер. Геология и разведка морских нефтяных и газовых месторождений. — М.: ЦНИИЭГазпром, 1981. — Вып. 1.
11. Колесов С.В., Иноземцев А.Н. Повышение временной и динамической разрешенности вибросейсмических данных. — Информ. листок МГЦ НТИ № 193—84. — 1984. С. 1—3.
12. Кострыгин Ю.П., Мисирова Н.В. Влияние неидентичности возбуждаемых вибросейсмических колебаний на качество коррелограмм // Разведочная геофизика. — М.: Недра, 1986. — Вып. 103.
13. Крылов И.Б., Брудно В.А. Особенности расчетов амплитудных спектров сигналов в вибросейсморазведке // Разведочная геофизика. — М.: Недра, 1986. — Вып. 102. — С. — 43—49.
14. Крылов И.Б. Теоретический динамический диапазон корреляционной модификации вибросейсморазведки // Вибросейсмические методы исследования Земли: Материалы Всесоюзной конференции. — ВЦ СО АН СССР, 1982. — С. 63—71.
15. Лугинец А.И. Электрогидравлические вибраторы для возбуждения упругих колебаний в сейсморазведке // Обзор. — Сер. Региональная разведочная и промысловая геофизика на нефть и газ. — М.: ВИЗМС, 1981.
16. Лукашин Ю.П., Пушкин А.Г. Повышение помехоустойчивости вибрационной сейсморазведки в условиях высокого уровня помех // Вибросейсмические методы исследования Земли: Материалы Всесоюзной конференции. — ВЦ СО АН СССР, 1982. — С. 79—87.
17. Магницкая Н.Н., Николаев А.В. Модельные исследования по обработке вибросигналов при просвечивании Земли // Вибросейсмические методы исследе-

дования Земли: Материалы Всесоюзной конференции. — ВЦ СО АН СССР, 1982.

18. *Малкин А.Л., Тумаркин В.А.* Квантование сигналов при цифровой обработке вибросейсмической информации // Тр. МИНХиГП. — М.: Недра, 1977. — С. 98–104.

19. *Методические* рекомендации по проведению работ вибросейсмическим методом с использованием СК-5-150 / В.А. Гродзенский, М.Б. Шнеерсон, И.С. Лев, А.Н. Иноземцев и др. — М.: Нефтегеофизика (Ротапринт), 1983.

20. *Повышение* разрешающей способности вибрационной сейсморазведки / А.Н. Иноземцев, О.А. Потапов, М.Б. Шнеерсон и др. // Обзор. — Сер. Разведочная геофизика. — М.: ВИАМС, 1987.

21. *Применение* знакового кодирования сейсмической информации при цифровой обработке Б.А. Вейцман, И.А. Мушин, В.Г. Щерба, И.К. Бельфер // Разведочная геофизика. — М.: Недра, 1977. — Вып. 78. — С. 15–22.

22. *Порожняков К.М., Головкин В.А., Окулов Я.И.* Регистрирующая аппаратура для вибросейсмического способа // Нефтегазовая геология, геофизика и бурение. — М.: ВНИИОЭНГ, 1983. — № 2. — С. 22–24.

23. *Порожняков К.М., Колесников В.Б.* Экспресс-коррелятор для цифровых сейсморазведочных станций // Нефтегазовая геология и геофизика. — М.: ВНИИОЭНГ, 1983. — Вып. 12. — С. 16–18.

24. *Разрешающая* способность вибрационной сейсморазведки и пути ее повышения / В.А. Гродзенский, А.Н. Иноземцев, И.С. Лев, М.Б. Шнеерсон // Экспресс-информация. — Сер. Нефтегазовая геология, геофизика и бурение. — М.: ВНИИОЭНГ, 1984.

25. *Рапорт М.Б., Вейнеров О.М., Шайбе Р.Д.* Оценка необходимой точности квантования сейсмических сигналов по уровню // Тр. МИНХиГП. — М.: Недра, 1977. — С. 81–92.

26. *Сейсмическая* разведка методом поперечных и обменных волн / Н.Н. Пызурев, А.В. Тригубов, Л.Ю. Бродов и др. — М.: Недра, 1985.

27. *Системы* регистрации и обработки данных сейсморазведки / М. К. Полшков, Е.А. Козлов, В.И. Мешбей и др. — М.: Недра, 1984.

28. *Турлов П.А., Ямольский А.М., Гольдштейн В.Л.* Эксплуатация цифровых сейсморазведочных станций "Прогресс" / Под ред. Б.Л. Лернера. — М.: Недра, 1986.

29. *Установки* для возбуждения упругих колебаний в наземной невзрывной сейсморазведке / М.Б. Шнеерсон, В.А. Гродзенский, В.Г. Ваншельбойм, А.П. Жуков, В.В. Майоров // Обзор. — Сер. Разведочная геофизика. — М.: ВИАМС, 1985.

30. *Цытович Н.А.* Механика грунтов. — М.: Высшая школа, 1973.

31. *Чичинин И.С.* Вибрационное излучение сейсмических волн. — М.: Недра, 1984.

32. *Шнеерсон М.Б., Майоров В.В.* Наземная сейсморазведка с невзрывными источниками колебаний. — М.: Недра, 1980.

33. *Юшин В.И.* О фильтрующей функции в частотном методе вибрационной сейсморазведки // Измерительная аппаратура для разведочной геофизики. — Новосибирск, 1973. — С. 21–29.

34. *Barbier M. G., Willinger R., Viallx J.R.* Mini-Sosie for land seismology. — Geophysical Prosp. — 1976. — V. 24, No. 3. — P. 518–527.

35. *Coruh Cahit, Costain John K.* Noise attenuation by vibroseis whitening (VSW) processing. — Geophysics. — 1983. — V. 48, No 5.

36. *Goupilaud P.L.* Signal design in the "Vibroseis" technique. — Geophysics. — 1976. — V. 41, No. 6.

37. *Gibson Bruce, Larner Ken.* Predictive deconvolution and the zero-phase source. — Geophysics. — 1984. — V. 49, No. 4.

38. *Hozin D.I., Bogers I.B.* Homomorphye deconvolution. — Geophysics. — 1983. — V. 48, No. 7. — P. 1014–1016.

39. *Iurkevics A., Wiggins R.* A critique of seismic deconvolution methods. — Geophysics. — 1984. — V. 49, No. 12.

40. *Kallweit R.S., Wood L.C.* The limits of resolution of zero-phase wavelets. — *Geophysics*. — 1982. — V. 47, No. 7.
41. *Kormylo John I., Mendel Gerry M.* Maximum — likelihood seismic deconvolution. — *IEEE Trans. Geosci and Remote Sens.* — 1983. — V. 1 No. 1.
42. *Kirk P.* Ch. 2. Vibroseis processing — developments In *Geophysical Exploration Methods*, 2. — London: Seismograph Service Ltd. Kent. — 1981. — VK. — P. 37—52.
43. *La Coste Lucien T.B.* Deconvolution By successive approximations. — *Geophysics*. — 1982. — V. 47, No. 12.
44. *O'Brien I.T., Kamp W.P., Hoover G.M.* Sign-bit amplitude recovery with applications to seismic data. — *Geophysics*. — 1982. — V. 47, No. 11. — O. 1527—1539.
45. *Safar M.H.* On the determination of the downgoing P-waves radiated by the vertical seismic vibrator. — *Geophysical Prospecting*. — 1984. — V. 32. — P. 392 — 405.
46. *Werner H., Krey Th.* Combisweep a contribution to sweep techniques. — *Geophysical Prospecting*. — 1979. — V. 27, No. 1. — P. 78—105.
47. *Wiggins Ralph A.* Minimum entropy deconvolution "Geoexploration". — 1978. — V. 16, No. 1, 2.
48. *Ristow and D. Jurezyk* Vibroseis Deconvolution. — *Geophysical Prosp.* — 1975. — V. 23, No. 2. — P. 363 — 380.

## Программа оценки разрешенности вибрационных сигналов

БЕЙСИК, ЭВМ PLURIMAT-S

```

1 REM RESOLUTION
10 PRINT"SIZE"
11 INPUT S
12 SIZE S
20 PRINT "BLOCK"
30 INPUT P
40 PRINT "Н. ОКНА"
50 INPUT N1
60 PRINT "КОН. ОКНА"
70 INPUT N2
71 PRINT"DELTA T"
72 INPUT F
80 RAZ1
90 FOR I=N1 TO N2
100 LET T(1,I)=T(P,I)
110 NEXT I
115 CXX1
119 LET A=T(1,0)
121 LET Z=S/2.
122 FOR I=0 TO Z
123 LET T(2,I)=T(1,I)/A
124 NEXT I
125LET S1=0.
126 LET D=0.05
128 STORE 2,1
130 FOR I=0 TO Z
140 LET J=I+1
141 LET A=T(1,I)
145LET B=T(1,J)
150IF B<=0.THEN 200
170LET S1=S1+(A+B)/2.
180 NEXT I
185 PRINT "ERROR AVTOKOR"
190 STOP

200LET B=ABS(B)
201 EKC
202 TRV1,0,50
220LET S1=S1+A*B/2./((A+B)
230LET S2=B*B/2./((A+B)
240 LET M=0.
245 LET H=0.
250 LET E=(I+A/(A+B))*F
270 FOR I=J TO Z
280 LET K=I+1
285 IF H>0.1 THEN 440
290 LET A=ABS(T(1,I))
300 LET C=ABS(T(1,K))
310 IF T(1,I)*T(1,K)<0 THEN 370
320 LET S2=S2+(A+C)/2.
330 IF C<B THEN 350
340 LET B=C
350 GO TO 430
370 IF B<D THEN 390
380 LET M=M+1
390 IF M<3 THEN 410
400 LET H=1.
405 PRINTA
406 PRINT C
407 PAUSE
410 LET S2=S2+(A*B+C*C)/2./((A+C)
420 LET B=C
430 NEXT I
440 LET S2=S2-C*C/2./((A+C)
510 LET R=1000.*S1/S2/E
520 PRINT "RESOLUTION=";R
530 STOP
9999END

```

Входные данные: Q — число узловых точек; A1 T1... — пары значений амплитуд и времен; T(2, I) — выходной блок, в котором формируется огибающая БЕЙСИК

38M PLURIMAT-S

```

50 LET N9=T/D
60 REM OGIBAJSHAJ
170 INPUT Q,A0,A9,A1,T1,A2,T2,A3,T3,A4,T4,A5,T5,A6,T6,A7,T7,A8,T8
180 LET M=0
189 LET M=M+1
191 IF M=2 THEN 210
192 IF M=3 THEN 220
193 IF M=4 THEN 230
194 IF M=5 THEN 240
195 IF M=6 THEN 250
196 IF M=7 THEN 260
197 IF M=8 THEN 270
198 IF M=9 THEN 280
199 IF M=10 THEN 290
200 REM INT 1
201 LET A=A1
202 LET B=A0
203 LET N1=0
204 LET N2=T1/D
205 LET S1=0
206 LET S2=T1
207 GO TO 300
210 REM INT 2
211 LET A=A2
212 LET B=A1
213 LET N1=T1/D
214 LET N2=T2/D
215 LET S1=T1
216 LET S2=T2
217 GO TO 300
220 REM INNT 3
221 LET A=A3
222 LET B=A2
223 LET N1=T2/D
224 LET N2=T3/D
225 LET S1=T2
226 LET S2=T3
227 GO TO 300
230 REM INT 4
231 LET A=A4
232 LET B=A3
233 LET N1=T3/D
234 LET N2=T4/D
235 LET S1=T3
236 LET S2=T4
237 GO TO 300
240 REM INT 5
241 LET A=A5
242 LET B=A4
243 LET N1=T4/D
244 LET N2=T5/D
245 LET S1=T4
246 LET S2=T5
247 GO TO 300
250 REM INT 6
251 LET A=A6
252 LET B=A5
253 LET N1=T5/D
254 LET N2=T6/D
255 LET S1=T5
256 LET S2=T6
257 GO TO 300
260 REM INT 7
261 LET A=A7
262 LET B=A6
263 LET N1=T6/D
264 LET N2=T7/D
265 LET S1=T6
266 LET S2=T7
267 GO TO 300
270 REM INT 8
271 LET A=A8
272 LET B=A7
273 LET N1=T7/D
274 LET N2=T8/D
275 LET S1=T7
276 LET S2=T8
277 GO TO 300
300 FOR I=N1 TO N2
310 IF A<B THEN 340
320 LET T(2,I)=B+((A-B)/((S2-S1)))
330 GO TO 350
340 LET T(2,I)=B+((B-A)/((S2-S1)))
350 NEXT I
353 IF M=Q THEN 360
355 GO TO 440
360 FOR I=N2 TO N9
370 IF A9<A THEN 400
380 LET T(2,I)=A+((A9-A)/((T-S2)))
390 GO TO 410
400 LET T(2,I)=A+((A-A9)/((T-S2)))
410 NEXT I
430 STOP
440 GO TO 189
9999END

```



## Программа формирования синтетических линейных управляющих сигналов.

Входные данные: P — ключ (P=0 — формируется up-sweep, P=1 — формируется down-sweep; F1, F2 — начальная и конечная частоты; T — длительность, с; D — шаг дискретизации, мс. T(0, I) — выходной блок, в котором формируется синтетический сигнал. БЕЙСИК, ЭВМ PLURIMAT-S

```

2 REM FORMA SVIPA
3 SIZE 2048
5 FOR I=0 TO 3
7 DISPO
9 RAZ I
10 NEXT I
12 INPUT P,F1,F2,T,D
14 LET D=D/1000
15 LET K=T/D
20 FOR I=0 TO K
23 IF P=1 THEN 27
25 LET S=F1*I*D+((F2-F1)/T)*(I*D)^2/2
27 LET S=F1*I*D-((F1-F2)/T)*(I*D)^2/2
30 LET T(0,I)=SIN(2*3.1416*S)
40 NEXT I

```

## Приложение 4

## Программа формирования нелинейного логарифмического управляющего сигнала

Входные данные: T — длительность сигнала, с; F1, F2 — начальная и конечная частоты; R — параметр крутизны. T(0, I) — выходной блок, в котором формируется нелинейный сигнал

```

10 REM NELIN1
20 SIZE 2048
25 DISPO
30 FOR I=0 TO 6
50 RAZ I
60 NEXT I
70 INPUT T,F1,F2,R
80 LET D=0.004
90 LET K=T/D
100 LET C=6.2832
105 LET Q1=(F2-F1)/(R*LGN(R*T+1))
110 FOR I=0 TO K
120 LET S=I*D
130 LET Q2=R*S+1
135 LET Q3=LGN(R*S+1)-1
140 LET P2=Q1*Q2*Q3
150 LET P1=F1*S+P2
160 LET T(0,I)=SIN(C*P1)
180 NEXT I

```

## Программа вычисления текущего динамического диапазона корреляционных сигналов

Входные данные: S1, S2 — интервал подсчета; K — номер ячейки, в которой корреляционная функция имеет максимум. T(5, I) — выходной блок, в котором рассчитан динамический диапазон. БЕЙСИК

```

1 REM DECBEL
2 SIZE 2048
3 FOR I=4 TO 5
4   RAZ I
5 NEXT I
6 DISP5
7 STORE 3,4
8 INPUT S1,S2,K
9 FOR I=S1 TO S2
10  LET V=ABS(T(4,I)/T(4,K))+0.000001
11  LET T(5,I)=0.4343*20*LGN(V)
12 NEXT I
9999END

```

## Программа расчета синтетической коррелограммы

Входные данные: F1, F2 — начальная и конечная частоты. T(2, N) — блок, в котором занесены значения импульсной трассы по данным каротажа и в котором формируется синтетическая коррелограмма на выходе. БЕЙСИК, ЭВМ PLURIMAT-S

|                                     |                      |
|-------------------------------------|----------------------|
| 1 SIZE 1024                         | 68 LET T(2,50)=0.5   |
| 2 FOR I=0 TO 3                      | 70 LET T(2,75)=-0.6  |
| 3 DISPO                             | 71 LET T(2,90)=0.5   |
| 4 RAZ I                             | 73 LET T(2,110)=0.3  |
| 5 NEXTI                             | 75 LET T(2,122)=-0.4 |
| 10 INPUT F1,F2                      | 77 LET T(2,152)=-0.3 |
| 30 LET D=0.004                      | 78 LET T(2,172)=0.5  |
| 35 LET V=255*D                      | 79 LET T(2,185)=0.5  |
| 40 FOR I=0 TO 255                   | 80 LET T(2,200)=-0.4 |
| 45 LET S=F1*I*D+(F2-F1)*(I*D)^2/2*V | 81 LET T(2,230)=-0.3 |
| 50 LET T(0,I)=SIN(2*3.1416*S)       | 90 STORE 2,3         |
| 60 NEXTI                            | 95 CVL3,1            |
| 62 STORE 0,1                        | 9999END              |
| 63 CXX 1                            |                      |

# ОГЛАВЛЕНИЕ

|                                                                                                                      |            |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| Введение . . . . .                                                                                                   | 3          |
| <b>1. Теория вибрационной сейсморазведки. М.Б. Шнеерсон . . . . .</b>                                                | <b>5</b>   |
| 1.1. Физические основы вибрационной сейсморазведки. . . . .                                                          | 5          |
| 1.2. Взаимодействие вибрационного источника с грунтовым полу-<br>пространством. . . . .                              | 8          |
| 1.3. Модель вибросейсмической трассы. . . . .                                                                        | 16         |
| 1.4. Сигналы, используемые в вибрационной сейсморазведке, и их<br>корреляционные функции. . . . .                    | 19         |
| 1.4.1. Корреляционные функции и их особенности. . . . .                                                              | 19         |
| 1.4.2. Частотно-модулированные сигналы. . . . .                                                                      | 22         |
| 1.4.3. Однополярные кодовые последовательности. . . . .                                                              | 39         |
| 1.4.4. Знакопеременные кодовые последовательности. . . . .                                                           | 43         |
| 1.5. Особенности кодирования вибросейсмических данных. . . . .                                                       | 46         |
| 1.5.1. Основы знакового кодирования. . . . .                                                                         | 47         |
| 1.5.2. Полноразрядные и знаковые корреляционные функции. . . . .                                                     | 50         |
| 1.5.3. Помехоустойчивость знакового кодирования. . . . .                                                             | 52         |
| <b>2. Технические средства вибрационной сейсморазведки М.Б. Шнеер-<br/>сон, И.С. Лев, В.А. Гродзенский . . . . .</b> | <b>54</b>  |
| 2.1. Классификация вибрационных источников. . . . .                                                                  | 54         |
| 2.2. Вибрационные источники сейсмических колебаний. . . . .                                                          | 58         |
| 2.3. Средства регистрации. . . . .                                                                                   | 86         |
| 2.3.1. Накопители. . . . .                                                                                           | 90         |
| 2.3.2. Корреляторы. . . . .                                                                                          | 96         |
| <b>3. Методика полевых работ. М.Б. Шнеерсон, А.Н. Иноземцев. . . . .</b>                                             | <b>107</b> |
| 3.1. Волновые поля, возбуждаемые вибрационными источниками,<br>и их особенности. . . . .                             | 108        |
| 3.2. Выбор параметров управляющих сигналов. . . . .                                                                  | 112        |
| 3.3. Выбор основных элементов полевой методики. . . . .                                                              | 121        |
| 3.3.1. Изучение волновой картины. . . . .                                                                            | 121        |
| 3.3.2. Группирование источников и приемников колебаний. . . . .                                                      | 123        |
| 3.3.3. Синхронное накопление воздействий. . . . .                                                                    | 128        |
| 3.3.4. Системы наблюдений. . . . .                                                                                   | 130        |
| 3.4. Помехоустойчивость вибрационной сейсморазведки. . . . .                                                         | 132        |
| 3.5. Определение статических поправок при работах с вибрационны-<br>ми источниками. . . . .                          | 135        |
| <b>4. Обработка материалов вибрационной сейсморазведки. А.Н. Иноземцев. . . . .</b>                                  | <b>136</b> |
| 4.1. Первичная обработка данных. . . . .                                                                             | 137        |
| 4.1.1. Способ подавления (ослабления) высокоамплитудных помех.<br>. . . . .                                          | 139        |
| 4.1.2. Способ частотного вырезания высокоамплитудных помех. . . . .                                                  | 141        |
| 4.1.3. Центрирование вибросейсмических записей. . . . .                                                              | 143        |
| 4.1.4. Взаимная корреляция вибросейсмических данных. . . . .                                                         | 144        |
| 4.1.5. Стандартная взаимная корреляция. . . . .                                                                      | 144        |
| 4.1.6. Весовая взаимная корреляция вибросейсмических данных. . . . .                                                 | 147        |
| 4.1.7. Арирование вибросейсмических данных. . . . .                                                                  | 151        |
| 4.1.8. Технология первичной обработки вибросейсмических данных.<br>. . . . .                                         | 152        |
| 4.1.9. Обработка материалов, полученных по методике комбини-<br>рованных сигналов. . . . .                           | 157        |

|                                                                                                                                      |            |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 4.1.10. Новые подходы к первичной обработке вибросейсмических данных . . . . .                                                       | 158        |
| 4.2. Этап углубленной обработки . . . . .                                                                                            | 160        |
| 4.2.1. Обратная фильтрация вибросейсмических данных . . . . .                                                                        | 161        |
| 4.2.2. Новые подходы к деконволюции вибросейсмических данных . . . . .                                                               | 173        |
| <b>5. Применение вибросейсморазведки в различных сейсмогеологических условиях. О.А. Потапов, А.П. Жуков . . . . .</b>                | <b>188</b> |
| 5.1. Узбекистан и Туркмения . . . . .                                                                                                | 192        |
| 5.2. Прикаспийская впадина . . . . .                                                                                                 | 198        |
| 5.3. Прибалтийская синеклиза и Днепровско-Донецкая впадина . . . . .                                                                 | 202        |
| 5.4. Западная Сибирь . . . . .                                                                                                       | 204        |
| 5.5. Восточная Сибирь и остров Сахалин . . . . .                                                                                     | 206        |
| <b>6. Организация и технология проведения работ с вибрационными источниками. В.А. Гродзенский, М.Б. Шнеерсон, И.С. Лев . . . . .</b> | <b>215</b> |
| 6.1. Организация работ . . . . .                                                                                                     | 215        |
| 6.2. Технология проведения работ . . . . .                                                                                           | 222        |
| Заключение . . . . .                                                                                                                 | 230        |
| Список литературы . . . . .                                                                                                          | 232        |
| Приложения . . . . .                                                                                                                 | 235        |