

Шнеерсон М.Б., Жуков А.П. ООО Геофизические системы данных (GSD), г. Москва  
(по материалам зарубежных статей)

Вибрационная сейсморазведка ведет свою историю с середины пятидесятих годов прошлого столетия, когда были предложены, созданы и опробованы первые промышленные установки и устройства для возбуждения продолжительных во времени и переменных по частоте волн, их приема, регистрации и корреляционной обработки получаемых записей. К настоящему времени вибрационная сейсморазведка - это один из ведущих геофизических методов разведки, оснащенный высокопроизводительной техникой, средствами контроля и вычислительными системами. Научный, технический и методический уровень современной вибрационной сейсморазведки обеспечивает решение широкого круга геолого-разведочных задач по поиску и разведке полезных ископаемых и изучению глубинного строения земной коры. В настоящее время сложился определенный стандарт технических и методических средств вибрационной сейсморазведки.

## Технические средства.

Вибрационные источники - это гидро-механические установки отечественного, зарубежного или смешанного (вибратор импортный, транспортная база отечественная) производства с усилиями 17 - 22 тонн и выше, смонтированные на различных транспортных базах, соответствующих задачам и условиям проведения работ (автомобиль высокой проходимости, багги, снегоболотоход), в количестве 4-5 машин на полевой отряд. Из них четыре, как правило, работают на профиле, а один - находится в резерве. Отмечается стремление к применению более мощных вибраторов с усилиями 30 и даже 40 тн. Как правило, работы ведут при нагрузках 60 - 90 % от максимальных, в пределах которых вибраторы работают наиболее устойчиво.

Приемная и регистрирующая аппаратура - это электродинамические сейсмоприемники и многоканальные линейные (проводные) или телеметрические регистрирующие системы, в том числе с передачей сигналов по радио. В последние годы определенное применение получили трех-компонентные акселерометры, обеспечивающие прием продольных, поперечных и обменных волн.

## Методические средства.

Используются профильные (2D) и пространственные (3D и 4D) съемки с многократным прослеживанием волн в сочетании с интерференционными и другими системами и способами подавления волн-помех и повышения отношения сигнал/помеха. Полевые работы повсеместно проводят с группированием источников и приемников колебаний и с синхронным накоплением сигналов, что обеспечивает ослабление регулярных волн-помех в соответствии с их кажущимися скоростями и частотами, а также нерегулярных, шумовых составляющих регистрируемых волновых полей. В последнее время наметилась тенденция отказа от использования интерференционных систем при возбуждении и приеме колебаний.

Практика применения вибрационной сейсморазведки показывает, что она достаточно эффективна, обоснована теоретически и экспериментально и оснащена соответствующей аппаратурой и оборудованием. Тем не менее, необходимость решения все более сложных задач и высокие требования к качеству получаемых полевых записей и снижению стоимости работ обосновывают необходимость развития и совершенствования этого метода гео-

физики. Ознакомление и анализ зарубежных и отечественных работ в этой области показывает, что в последние годы наметились определенные направления развития вибрационной сейсморазведки. Это:

- расширение частотного состава возбуждаемых колебаний в сторону низких и высоких частот;
- повышение производительности работ;
- нелинейные искажения вибросейсмических сигналов;
- совершенствование методики полевых работ с учетом особенностей вибрационной сейсморазведки;
- вибрационная сейсморазведка повышенной достоверности (HFVS).

Рассмотрим эти направления.

## 1. Расширение частотного состава возбуждаемых колебаний

Интерес к этому направлению вибрационной сейсморазведки обусловлен следующими основными причинами.

В сторону низких частот:

- разведка более глубоко залегающих месторождений углеводородов и проведение в значительных объемах работ по изучению строения кристаллического фундамента и прослеживанию поверхности Мохоровичича;
- все возрастающее применение акселерометров при наземных работах и скважинных исследованиях, позволяющих принимать колебания в широкой полосе частот от 3 - 5 Гц.

В сторону высоких частот:

- необходимость повышения разрешающей способности вибрационной сейсморазведки за счет увеличения доли высоких частот в спектре излучаемых колебаний.

Технические возможности наиболее широко применяемых вибраторов, подтвержденные практикой их эксплуатации, показывают, что они наиболее устойчиво работают в диапазоне от 8 - 10 до 90 - 100 Гц. Дальнейшее его расширение как в сторону низких, так и в сторону высоких частот наталкивается на определенные трудности, обусловленные конструктивными решениями и особенностями современных гидравлических вибраторов. Рассмотрим те из них, которые связаны с рассматриваемым вопросом.

Рабочим элементом гидравлического вибратора является вибровозбудитель, представляющий собой массивный гидро-цилиндр, играющий роль инерционной массы, в центре которого помещен поршень, соединенный через шток с опорной плитой, которая в процессе излучения колебаний прижимается к поверхности грунта весом транспортной базы. В верхнюю и нижнюю полости цилиндра по соответствующим каналам небольшого диаметра попеременно подается под давлением масло, что выводит поршень с рабочей плитой из положения равновесия и возникающие при этом переменные нагрузки передаются среде, что и приводит к возбуждению волн. При этом, если поршень идет вниз, то инерционная масса смещается вверх и наоборот. Перемещение поршня относительно цилиндра, получившее название «ход поршня», является одним из «сейсмических» параметров вибратора, который задается на минимальной частоте из-за того, что с ее увеличением «ход поршня» уменьшается обратно пропорционально квадрату частоты возбуждаемых колебаний. Поэтому при смещении в

сторону низких частот необходимо увеличивать ход поршня, а при смещении в сторону высоких – учитывать его значительное уменьшение, которое может привести к существенному снижению уровня возбуждаемых колебаний вследствие недопустимо малых перемещений плиты из-за потерь в вибровозбудителе (сжимаемость масла, люфты механических соединений и др.).

Эффективная работа вибратора на низких частотах (5 – 6 Гц) ограничена взаимным перемещением поршня относительно цилиндра – «ходом поршня», величиной гидравлического потока, развиваемого насосом, работой серво-клапана, управляющего потоками жидкости, весом инерционной массы, емкостью гидро-аккумуляторов и др. Модельные исследования [1] показали, что ключевыми среди них являются: «ход поршня» и предельная величина усилия, при котором отсутствует отрыв плиты от поверхности грунта. Они и ограничивают возможность излучения низкочастотных колебаний. Значимость этих параметров основывается на следующих соображениях.

При квазигармоническом излучении колебаний справедливо следующее соотношение, которое вытекает из второго закона Ньютона:

$$f = (F / 4\pi^2 S M r)^{1/2},$$

где  $f$  – частота возбуждаемых волн,  $F$  – сила, развиваемая вибратором,  $S$  – ход поршня и  $M r$  – реактивная масса вибровозбудителя (масса гидравлического цилиндра).

Приведенное соотношение определяет зависимость частоты излучаемых колебаний от развиваемого вибратором усилия, хода поршня и массы цилиндра вибровозбудителя. Из него следует, что при заданной величине силы для смещения в сторону низких частот необходимо увеличивать «ход поршня» и инерционную массу. Отметим также, что увеличение силы, развиваемой вибратором, также будет способствовать повышению уровня низкочастотных колебаний за счет уменьшения резонансной частоты системы вибратор-грунт.

Низкочастотное возбуждение на основе существующих вибрационных источников со стандартными параметрами может быть реализовано путем применения нелинейных или комбинированных управляющих сигналов с повышением уровня низких частот в спектре излучаемых колебаний, а также путем уменьшения скорости развертки управляющего сигнала в его начальной (низкочастотной) части, в области скоса, начиная с 4 – 5 Гц [2]. Этому способу было дано название «сweep максимального смещения» (maximum displacement sweep). Модельные и экспериментальные исследования показали, что использование управляющих сигналов максимального смещения повышает уровень низкочастотных колебаний и улучшает прослеживание глубоких и мелких горизонтов на временных разрезах [2]. На рис. 1 – 3 приведены выборочные материалы, полученные с 32 тн вибратором на профиле протяженностью 5 км на среднем Востоке при использовании линейного управляющего сигнала частотой 6 – 80 Гц, длительностью 16 с, со скосами 500 мс и свипа максимального смещения с теми же параметрами, иллюстрирующие эффективность применения нового управляющего сигнала.

Вопросы повышения частоты возбуждаемых колебаний рассмотрены в работе [3]. В ней отмечается, что трудности с повышением частоты возбуждаемых колебаний обусловле-

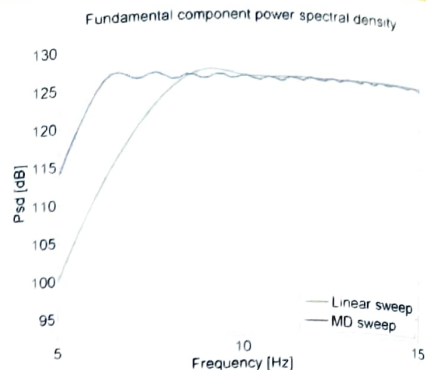


Рис. 1 Кривые изменения основной компоненты силы земли (ground force) от частоты для линейного управляющего сигнала (зеленая кривая) и сигнала максимального смещения (фиолетовая кривая)

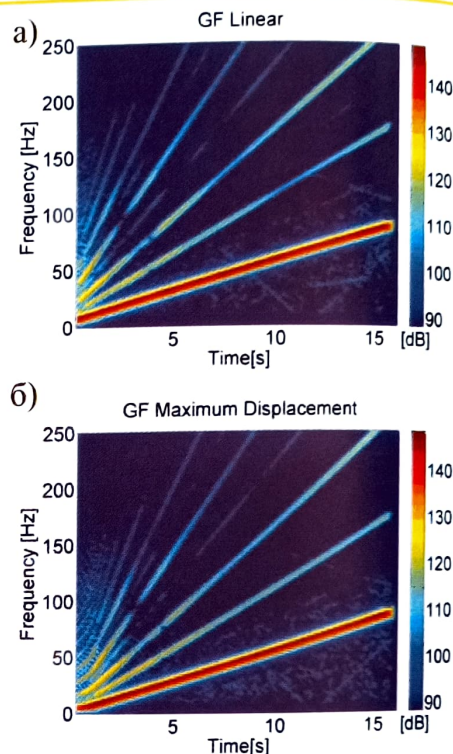


Рис. 2 Частотно-временные представления измеренной силы земли для линейного управляющего сигнала (a) и сигнала максимального смещения (б)

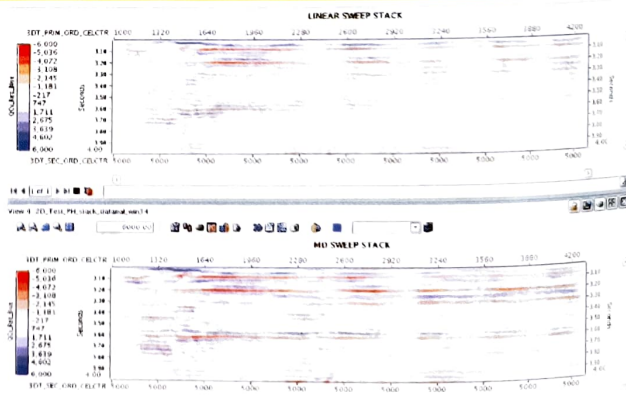


Рис. 3 Временные разрезы, (верх) полученные с линейным управляющим сигналом (5-80 Гц, 10 с) и с сигналом максимального смещения с теми же параметрами (низ)

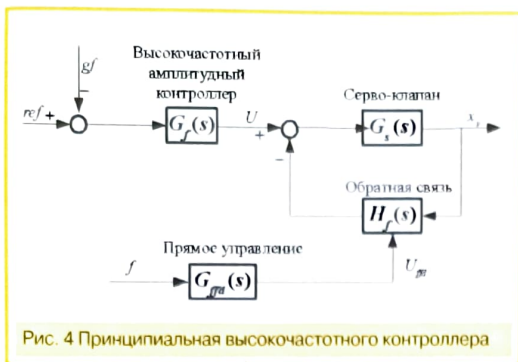


Рис. 4 Принципиальная высокочастотного контроллера

ны ограниченным частотным диапазоном серво-клапана (электро-гидравлического преобразователя), изгибом излучающей плиты вибратора, который приводит к появлению резонансных пиков на частотах свыше 100 Гц, и ненадежным контактом плиты с грунтом. Для улучшения работы серво-клапана был предложен высокочастотный контроллер, управляющий его работой, а для уменьшения величины резонансных пиков на повышенных частот было рекомендовано снижение уровня возбуждаемых колебаний и безотрывный контакт плиты с грунтом. Принципиальная схема высокочастотного контроллера приведена на рис. 4 [3]. Он предусматривает: контроль по амплитудам высоких частот, прямой контроль подаваемых колебаний и схему обратной связи для коррекции выходных сигналов, подаваемых на серво-клапан. При начале работы вибратора входной контроллер вырабатывает переменный по величине сигнал для управления работой схемы обратной связи, что практически исключает пульсации амплитуд и фаз на высоких частотах и расширяет частотный диапазон электро-гидравлического преобразователя, что показано на рис. 5[3].

Изложенные принципы оптимизации параметров вибраторов были использованы при разработке сверхтяжелого вибратора Nomad 90, способного возбуждать как низкие (5Гц), так и высокие частоты (250 Гц) [4]. Исходные параметры вибратора были выбраны следующими: максимальная сила - 90,000 фунтов; сила земли - 80,000 фунтам (35,500 кГ), инерционная масса - 7000 кг; минимальная частота - 5 Гц. При этих данных ход поршня был определен равным 5,13 см (полный ход - 10,3 см).

Для нового вибратора были запроектированы, изготовлены и опробованы плиты двух типов: одна - стандартная с одним рядом балок, сваренных ряд за рядом; вторая - имела продольные и поперечные стержни, обеспечивающие повышенную жесткость в обоих направлениях. Оба типа плит имеют одинаковую толщину и вес, равный 2300 кг, включая крепкую алюминиевую подкладку внизу. Плиты были в

2,96 раз легче реактивной массы, что обеспечивало более уверенное излучение высоких частот. На низких частотах поведение плит обеих конструкций было подобным. На частотах свыше 110 Гц материалы с плитой более жесткой конструкцией были предпочтительней и меньше искажены.

## 2. Повышение производительности работ

Повышение производительности полевых работ было и остается одной из актуальных задач. В вибрационной сейсморазведке производительность работ Q (количество наблюдений в час или в день) определяется числом одновременно обрабатываемых пунктов возбуждения (физических точек) (N), затратами времени на возбуждение и прием колебаний ( $T_n + T_p$ ), а также на переезд вибраторов с одной точки на другую (t).

$$Q = 3600 \cdot N / (T_n + T_p + t)$$

Общепринятая технология работ предполагает один одновременно обрабатываемый пункт возбуждения с последовательным возбуждением колебаний и их приемом, что и определяет производительность работ. Ее повышение, согласно приведенному соотношению, может быть достигнуто путем одновременной обработки нескольких физических точек ( $N > 1$ ), сокращения и исключения затрат времени на прием колебаний ( $T_p$ ) и переезд вибраторов (t) и соответствующей организацией работ. Особенности вибрационной сейсморазведки, обусловленные частотно-модулированным характером возбуждаемых колебаний и корреляционной обработкой получаемых первичных записей, а также ее современным техническим уровнем, позволяют увеличить число одновременно обрабатываемых пунктов возбуждения с одной расстановкой сейсмоприемников, сократить затраты времени на прием колебаний и переезд вибраторов с точки на точку и тем самым повысить производительность полевых работ. Эти направления и получили сейчас определенное применение в практике работ (съемки 3D и 4 D, ВСП) в условиях, благоприятных для их реализации.

## 2.1 Одновременная работа вибраторов с фазокодированными управляющими сигналами

Исходная схема предусматривает работу с накоплением сигналов двух групп вибраторов на одну приемную расстановку. При этом одна группа вибраторов излучает сигналы с разверткой вверх (А), а другая - вниз (Б) [5]. При одинаковых уровнях возбуждаемых колебаний и их полярности суммарный сигнал будет:  $S_1 = A + B$ . В процессе накопления полярность одного из сигналов меняется на обратную. При этом излучаемый и принимаемый сигнал будет равен:  $S_2 = A - B$ . Сложение и вычитание  $S_1$  и  $S_2$  позволяет получить исходные колебания:  $A = (S_1 + S_2) / 2$  и  $B = (S_1 - S_2) / 2$ . Проведенные в небольших объемах опытные работы подтвердили возможность разделения записей и получение приемлемых результатов [5]. Однако по прослеживаемости отражающих горизонтов и надежности их выделения на фоне помех они уступали материалам, полученным по стандартной методике, в том числе и за счет того, что возникающие нелинейные компоненты волнового поля от второй группы вибраторов, работающей с разверткой вниз, создают дополнительный фон помех, снижающий отношение сигнал/помеха. Для получения более качественных записей и подавления гармоник были предложены схемы наблюдений, предусматривающие производство 4 и 8 воздействий каждым из двух вибраторов с соответствующим изменением полярностей излучаемых колебаний, позволяющих снизить уровень волн-гармоник от вибраторов, работающих с разверткой вниз. Тем не менее, эти схемы не получили дальнейшего применения из-за относительно низких отно-

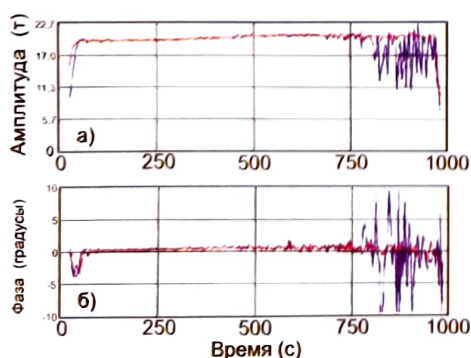


Рис. 5 Кривые, иллюстрирующие характер изменения во времени амплитуд и фаз контрольного сигнала для стандартного (синие кривые) и высокочастотного (красные кривые) контроллеров.

шений сигнал/помеха на результирующих записях, не превышающих 30 дБ [6].

## 2.2 Разновременное возбуждение колебаний

Этот способ повышения производительности работ, получивший название «скользящий свип или slip-sweep» [7], предусматривает работу на одну приемную расстановку приборов двух и более групп источников, расположенных на одном или разных пунктах возбуждения, с определенными, заданными задержками времени. Наблюдения ведутся по следующей схеме. В то время, когда одна группа возбуждает колебания, другая группа перемещается на следующий пункт возбуждения и готовится к работе. Затем начинает работать вторая группа, а первая перемещается и так далее. При этом, для обеспечения возможности полного освещения разреза, интервалы времени между последующими воздействиями разных групп вибраторов выбираются не меньшими временной глубины разведки. Времена начала вибрирования каждой группы излучателей фиксируются и заносятся в память для последующей обработки записей. Колебания с разных пунктов возбуждения принимаются и регистрируются в памяти большого объема. При обработке суммарная виброграмма последовательно коррелируется с управляющим сигналом, но каждый раз с известными временными сдвигами, соответствующими временам излучения данного управляющего сигнала, что и позволяет разделить записи и получить коррелограммы с каждого пункта возбуждения. Технология «скользящего свипа» получила довольно широкое применение при съемках 3D в пустынных районах Ближнего Востока. Однако, первые же работы показали, что возникающие нелинейные компоненты волновых полей (гармоники) с различных пунктов накладываются на полезные записи, снижая их качество. Для ослабления их влияния было предложено несколько способов, основанных на анализе получаемых записей и на использовании фазо-кодированных управляющих сигналов [6].

## 2.3 Исключение времени слушания между посылками

Стандартная технология работ с вибрационными источниками предусматривает синхронное накопление сигналов и, соответственно, затраты времени на прием колебаний (слушание). Они могут быть значительно уменьшены путем излучения последовательности идентичных по частоте и длительности управляющих сигналов, следующих непрерывно друг за другом и непрерывной регистрации поступающих колебаний без выделения времени на прием и регистрацию волн после каждого возбуждения, кроме последнего. Такая методика получила название «каскадный свип» и она позволяет уменьшить время на производство полевых работ, а также повысить их производительность [6]. Для разделения сигналов каждый из серии управляющих сигналов должен иметь начальный сдвиг по фазе, равный  $2\pi/n$ , где  $n$  - число сигналов в серии. Опробование и применение каскадных свипов оказалось достаточно успешным и было показано, что их применение позволяет повысить производительность работ на 20 – 40 % при допустимом уровне помех от предыдущих воздействий [6].

## 2.4 Навигационные системы и радио-канал

При проведении работ в промышленных районах, городах и населенных пунктах возникают определенные затруднения с размещением на местности пунктов возбуждения и приема колебаний, которые, в конечном счете, приводят к снижению производительности работ. Современные технические средства позволяют минимизировать эти непроизводительные затраты времени. Это – интегрированные навигационные системы и радио-канал для

передачи сигналов от сейсмоприемников на сейсмостанцию [9]. Интегрированные системы позволяют выбрать пункты возбуждения и распределить их на местности в оптимальных для проведения работ условиях. Навигаторы устанавливают на каждом вибраторе, что делает возможным оптимизировать пути подъезда к пунктам возбуждения и определить их точные координаты. Отказ от применения соединительных проводов и переход на передачу сигналов от сейсмоприемников на станцию по радио-каналу позволяет существенно упростить проведение работ при сложностях с расположением пунктов приема колебаний. Проведение работ без использования соединительных проводов делают приемные системы более динамичными, с возможностями их быстрого модифицирования при необходимости сохранения кратности наблюдений, что, в результате, приводит к повышению производительности работ.

## 3. Нелинейные искажения вибросейсмических сигналов

Возбуждение сейсмических колебаний вибрационными источниками колебаний в большинстве случаев сопровождается нелинейными процессами, которые возникают в самих установках и в системе передачи нагрузок грунту. Их наличие отрицательно влияет на эффективность работы вибратора из-за снижения уровня колебаний основной частоты, нерационального расходования энергии излучения и возникновения помех, которые мешают выделению полезных волн. Причины образования нелинейных искажений вибрационных сигналов анализировались и рассматривались в ряде работ отечественных и зарубежных авторов [5,10,12]. Были предложены также способы их ослабления, которые тогда широкого применения не получили. В последние годы повысился интерес к изучению и анализу нелинейных искажений вибрационных сигналов в связи с появлением новых технологий, непременным условием успешного применения которых является уменьшение уровня этих помех.

Нелинейные искажения, возникающие в процессе возбуждения сейсмических колебаний гидравлическими вибраторами, обусловлены следующими двумя основными причинами: - нелинейным характером взаимодействия рабочей плиты вибратора с грунтом при передаче силового воздействия на среду;

- нелинейными процессами в гидравлическом механизме вибратора, возникающими при создании переменных усилий в вибровозбудителе.

Рассмотрим их.

Плита со штоком, поршнем и гидроцилиндром, инерционной массой образует единую механическую систему, приводимую в движение внутренними переменными по величине силами. В результате, поршень с плитой движутся в одну сторону, а инерционная масса – в другую. При этом, если последняя может свободно перемещаться вверх и вниз от своего центрального положения, то поршень с плитой ограничены в своем движении сопротивлением грунта и в соответствии с усилиями, развиваемыми вибраторами, смещаются в пределах упругих деформаций на величину до 1,5 – 2,0 см. Ранее отмечалось, что одним из параметров вибратора является ход поршня, который задается на самой низкой рабочей частоте вибратора и который по своей величине (до 7-10 см) существенно превышает предел упругих деформаций грунта. В результате инерционная масса свободно может свободно перемещаться в пределах хода поршня, а движения поршня с плитой ограничены величиной упругих деформаций грунта. Это приводит к искажению формы возбуждаемых колебаний, ограничению их по амплитуде, особенно в области низких

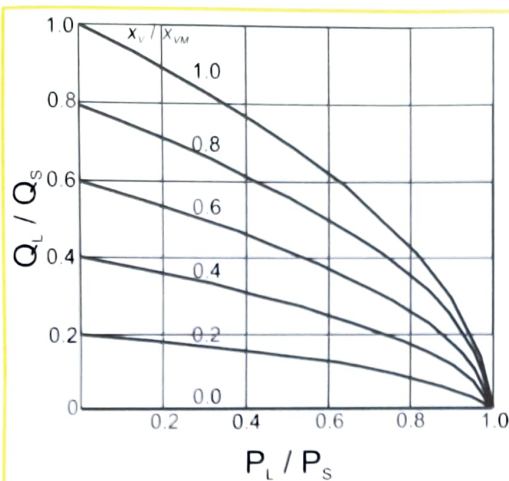


Рис. 6 Кривые, иллюстрирующие зависимость действующего потока жидкости, нормированного приложенным потоком ( $Q_L/Q_S$ ), от относительной величины давления ( $P_S/P_L$ ) при разных относительных величинах смещения поршня серво-клапана ( $x_{\text{дейс.}}/x_{\text{max}}$ )

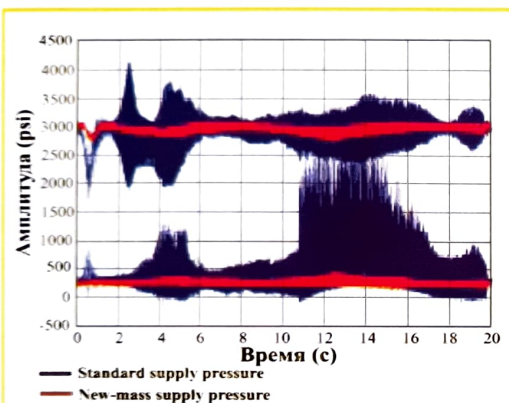


Рис. 7 Пульсации давления жидкости при стандартном (синие кривые) и новом способе передачи нагрузок

частот, и возникновению нелинейных искажений волн с кратными частотами гармоник. Их уровень определяется разницей между ходом поршня и величиной деформаций грунта и он мало зависит от силовых характеристик вибратора. С увеличением частоты возбуждаемых колебаний перемещения плиты уменьшаются и, начиная с какой-то частоты, они становятся равными, а затем и меньшими упругих деформаций грунта. В силу этих причин нелинейные искажения максимальны на низких частотах и уменьшаются с увеличением частоты возбуждаемых колебаний. Результаты изучения характеристик вибраторов, а также практика эксплуатации их различных моделей подтверждает эту зависимость. На рис. 1 приведены кривые, иллюстрирующие относительный уровень нелинейных искажений и их изменения с ростом частоты.

Вторым источником нелинейных искажений являются процессы, протекающие в гидравлической системе вибратора, в серво-клапане при распределении потоков жидкости по полостям рабочего гидроцилиндра и при ее течении по соединительным шлангам и заполнении гидро-аккумуляторов [11].

Первая из этих причин является следствием того, что протекающие в серво-клапане потоки жидкости и действующие в нем давления связаны между собой нелинейной зависимостью [12].

$$Q_L = Kx_v (P_S - x_v / |x_v| P_L)^{1/2},$$

где  $P_S$  — приложенное давление;  $P_L$  — действующее давление;  $x_v$  и  $|x_v|$  — смещение и наибольшее

смещение поршня серво-клапана, соответственно;  $K$  — коэффициент.

Из приведенного уравнения следует, что действующее давление пропорционально смещению поршня серво-клапана и чем больше это смещение, тем больше нелинейность протекающих в вибраторе процессов. На рис. 6 приведены кривые, иллюстрирующие зависимость действующего потока жидкости, нормированного приложенным потоком ( $Q_L/Q_S$ ), от относительной величины давления ( $P_S/P_L$ ) при разных относительных величинах смещения поршня серво-клапана ( $x_{\text{дейс.}}/x_{\text{max}}$ ). Из приведенного графика следует, что практически при всех смещениях поршня имеет место нелинейная зависимость между величинами давления и потока жидкости, протекающей через серво-клапан, что и отражается на работе вибратора. Для снижения уровня нелинейных искажений предложена система, которая предусматривает вычисление кривизны кривой изменения потока жидкости и сигнала обратной связи для компенсации ее нелинейности. В [11] приведены результаты, иллюстрирующие ее эффективность.

Практика работ показывает, что переменные по величине потоки жидкости, протекающие в гидросистеме вибратора, приводят к пульсации давления жидкости в соединительных шлангах, которые не полностью компенсируются гидро-аккумуляторами, что отрицательно сказывается на работе установок и повышает уровень нелинейных искажений. Снижение пульсаций может быть достигнуто путем компактного расположения элементов гидро-системы и использования специальных гидравлических и механических фильтров. В [11] рассмотрены эти вопросы и показана возможность существенного снижения уровня пульсаций давления жидкости при оптимальном расположении элементов гидравлики вибратора и применении соответствующей системы подавления пульсаций (рис. 7).

#### 4. Совершенствование методики полевых работ с учетом особенностей вибрационной сейсморазведки

В этом разделе рассмотрены получившие практическое применение новые направления методики работ, ориентированные на повышение эффективности и, в конечном счете, производительности метода.

##### 4.1 Длительные управляющие сигналов (40 и более с.)

Из теории вибрационной сейсморазведки следует, что длительность управляющих сигналов определяет уровень полезной излучаемой энергии и, как следствие, отношение сигнал/помеха. С этих позиций ее увеличение всегда оправдано. Однако, имеются определенные ограничения, обусловленные непропорциональным ростом амплитуд регулярных волн с увеличением времени излучения, снижением производительности работ, а также повышением вероятности регистрации ураганных помех. По этим причинам были выдвинуты предложения о целесообразности применения укороченных управляющих сигналов длительностью до 1,0 – 1,5 с в сочетании с синхронным накоплением сигналов, позволяющих снизить вероятность регистрации ураганных помех, уменьшить область существования корреляционных помех на коррелограммах и, тем самым, повысить качество материалов. Но они широкого применения не получили. При стандартных работах управляющие сигналы длительностью 6 – 10 с. считаются оптимальными и они успешно используются при решении поисково-разведочных задач в различных сейсмогеологических условиях.

В последнее время повысился интерес к применению протяженных управляющих сигналов [13]. Он

основан на том, что синхронное накопление сигналов и длительность управляющих сигналов в одинаковой степени влияют на отношение сигнал/помеха. Поэтому синхронное накопление может быть заменено соответствующим увеличением длительности управляющего сигнала. При этом отпадает необходимость в приеме колебаний (слушании) после каждого воздействия, что ведет к повышению производительности работ. Кроме того, при протяженных управляющих сигналах меньше скажутся их «скосы» на уровне регистрируемых волн. В работе [13] по результатам опытных и производственных работ показана идентичность материалов, полученных с синхронным накоплением шести сигналов по восемь секунд каждый и управляющим сигналом протяженностью сорок восемь секунд. Замена синхронного накопления управляющим сигналом большей длительности привела к заметному повышению производительности наблюдений.

### 4.2 Одновременная работа нескольких разнесенных по площади групп вибраторов

Компания British Petroleum (BP) разработала оригинальную технологию одновременной работы нескольких разнесенных в пространстве групп вибраторов на одну расстановку сейсмоприемников [14]. Предложенная методика основывается на том, что если расстояние между группами источников равно или больше, чем вынос, необходимый для прослеживания самого глубокого целевого горизонта, то это позволяет получить независимые, неискаженные записи отраженных волн в пределах необходимого временного интервала. Эта технология была успешно применена при широко-выносных и широко-азимутальных съемках 3D большой плотности в Омане. Исходя из условий проведения работ (области прослеживания целевых горизонтов и величина максимального выноса), расстояние между групп вибраторов было выбрано равным 12 км. На рис. 8 приведена одна из типичных сейсмограмм, полученных при одновременной работе двух групп вибраторов. Из нее следует, что целевые волны прослеживаются вне области интерференции целевых волн. На площади было задействовано 15 вибраторов, которые были разделены на три группы по пять установок в каждой, находящихся на расстоянии 12 км друг от друга. При этом, в зависимости от числа одновременно работающих групп вибраторов, производительность работ повышалась в два или три раза. Полученные сейсмограммы в области целевых волн были свободны от перекрестных помех, подобны одинарным и не требовали применения для обработки каких-либо специальных программ.

### 4.3 Независимое одновременное вибрирование

Независимое одновременное вибрирование – это новая технология работ, разработанная фирмой WesternGeco для BP, в основе которой лежит предположение о том, что при одновременной работе на площади нескольких разнесенных на местности вибрационных источников с извещными, но различными по параметрам управляющими сигналами, суммарное регистрируемое волновое поле будет носить нерегулярный характер за счет интерференции волн от различных разноудаленных друг от друга вибраторов [15]. При этом, если известно время начала работы данного вибратора и параметры управляющего сигнала, то корреляционная обработка сигналов позволяет из суммарного,

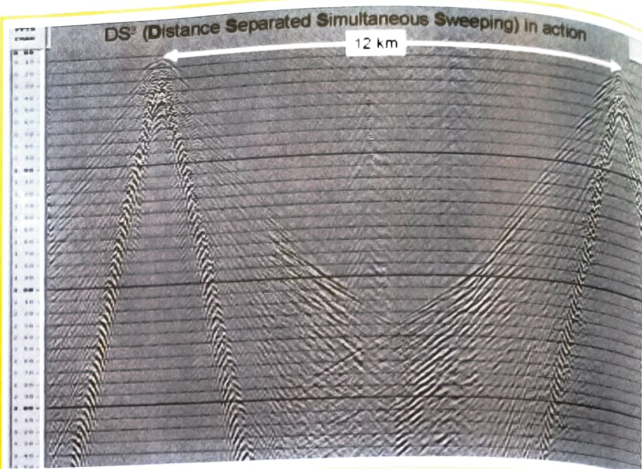


Рис 8 Пример сейсмограмм, полученных одновременно с двух отстоящих друг от друга на 12 км пунктов возбуждения

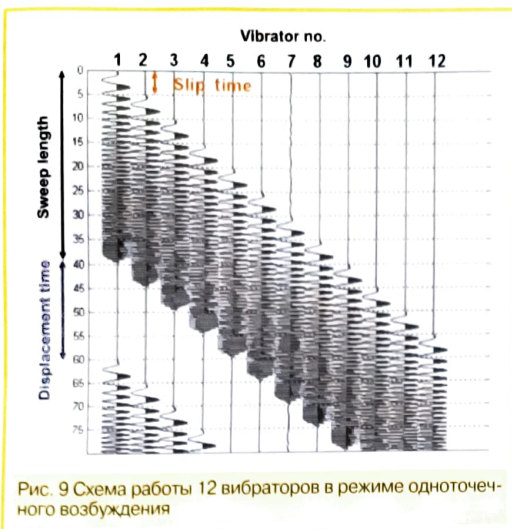
общего волнового поля выделить колебания, соответствующие этому вибратору. И так для каждого работавшего вибратора. Эта технология была опробована при съемках 3D в Алжире. Для сравнения определенный участок площади был отработан по стандартной и новой методикам. На площади было задействовано восемь вибраторов, каждому из которых была выдана схема расположения тех пунктов возбуждения, которые ему необходимо было отработать. Последовательность их отработки не оговаривалась, что обеспечило эффективную, производительную работу каждого вибратора, т.к. отпадала необходимость ожидания готовности других установок и приемной аппаратуры. Частотный диапазон управляющих сигналов, равный 6 – 80 Гц, был выбран одинаковым для всех вибраторов, а длительность их – разная (6 и 12 с). В процессе выполнения работ фиксировались координаты расположения вибратора (x, y, z) и время начала возбуждения колебаний. Это позволило получить корелограммы для каждого пункта возбуждения, провести их обработку и построить куб размером 4,5 x 6,5 км с квадратным бином 15 x 15 м. Было также выполнено сравнение материалов, полученных по новой и стандартной технологиям, которое показало их практическую идентичность. Одновременное вибрирование позволило существенно сократить время на производство работ. В среднем, каждый вибратор отрабатывал 500 пунктов возбуждения в день.

### 4.4 Одноточечное возбуждение колебаний

В последнее время в вибрационной сейсморазведке наметилась тенденция отказа от группирования источников колебаний. Обусловлено это рядом факторов:

- сложность размещения групп вибраторов на местности из-за их значительных размеров;
- ухудшение условий суммирования колебаний при работах на участках со сложным рельефом и строением зоны малых скоростей, а также за счет неполной синхронизации источников колебаний.

Эти причины, а также новые технические и методические разработки привели к отказу от группирования вибраторов и применению «одноточечного» способа возбуждения колебаний, при котором волны генерируются одиночными вибраторами. Для достижения приемлемых отношений сигнал/помеха работы проводятся по системам наблюдений повышенной плотности, с управляющими сигналами большой длительности (до 40 с), и, для повышения производительности работ, с увеличенным числом работающих на площади вибраторов, а так же по



технологиям с сокращенным временем приема колебаний после каждого возбуждения (скользящий и каскадный управляющие сигналы и др.) [16]. Одна из таких систем предусматривала работу 12 вибраторов с управляющим сигналом длительностью 40 с и временным сдвигом 5 с. (рис. 9). Согласно принятой технологии, в каждый момент времени вибрировало восемь вибраторов, а четыре перемещались на следующие пункты возбуждения. Вибраторы действовали самостоятельно и независимо по своим схемам, что не замедляло их работу. Выполненные по такой схеме три проекта в Египте и Саудовской Аравии показали ее эффективность и возможность получения качественных материалов, не уступающих по качеству стандартным, но за меньшее время и с большей производительностью работ.

#### 5. Вибрационная сейсморазведка повышенной достоверности (HFVS)

Стремление к повышению достоверности и качества материалов вибрационной сейсморазведки, в сочетании с высокой производительностью полевых работ, привели к созданию модификации этого метода разведки, получившего название «вибрационная сейсморазведка повышенной достоверности (HFVS)» [17, 18]. Она ориентирована на расширение реализуемого диапазона частот, снижение уровня корреляционных шумов и получение стабильного волнового импульса. Основные ее положения вытекают из анализа материалов стандартной вибрационной сейсморазведки, который показывает следующее:

- гидравлический вибратор является нелинейной механической системой, у которой силовые нагрузки, передаваемые опорной плитой грунту, осложнены нелинейными составляющими, приводящими к появлению гармоник и искажению регистрируемых колебаний;
- корреляция зарегистрированных волн с электрическим аналогом излучаемого силового сигнала, широко используемая в стандартных работах, не учитывает наличие в нем гармоник и искажений;
- различные условия передачи нагрузок среде, обусловленные рельефом местности и меняющимися параметрами грунта, а также изгибом рабочей плиты вибратора, обуславливают возможность появления фазовых различий сигналов, излучаемых каждым вибратором группы, что ухудшает результаты суммирования волн, особенно, на повышенных частотах.

В вибрационной сейсморазведке повышенной достоверности (HFVS) учтены эти особенности возбуждения волн. Она базируется на следующих двух основных положениях:

- проведение корреляции зарегистрированных в поле записей не с электрическим аналогом излучаемых колебаний (свином), который является только приближением колебаний, передаваемых земле, а с сигналом «силы земли», который содержит гармоники и нелинейности вибраторов и более полно отражает характер силовых нагрузок на грунт;
- выполнение оптимально однозначного разделения волн от каждого вибратора при их одновременном возбуждении несколькими установками на основе фазового кодирования, вращения фаз излучаемых управляющих сигналов [19]. Опробование этой модификации вибрационной сейсморазведки и ее последующее применение при проведении работ в нескольких районах юго-восточной Азии показали ее эффективность и возможность получения качественных материалов при существенном повышении производительности работ.

#### Список использованной литературы

1. Wei Z. Pushing the vibrator envelope-how low can we go? EAGE 69 Conference and exhibition, 2007
2. Bagiani C. Low-frequency vibroseis data with maximum displacement sweep/ The Leading Edge № 5, 2008, p 582-591
3. Wei Z. Pushing the vibrator envelope-how high can we go? EAGE 69 Conference and exhibition, 2007
4. Buttin P. Development of super-heavy vibrator/ Vibroseis workshop 2008, p. 26-29
5. Теория и практика наземной невзрывной сейсморазведки / Под редакцией М.Б. Шнейерсона. - М.: «Издательство Недр», 1998
6. Bagani C. Overview of simultaneous vibroseis acquisition methods/ SEG, 2006, materials of annual meeting
7. Mounier J., Bianchi T. Reduced vibroseis cycle time technique increased land crew productivity/ 2005, First Break V 23, № 23, 2005
8. Krohn C.E., Norris M.W. Vibroseis productivity: shake and go/ SEG 2006, annual meeting, p 42-45
9. Haston R., Sander A., Heath B. Improving vibroseis productivity with significant culture Obstacles through integrated navigational systems and cable-free recording/ Vibroseis workshop 2008, p 64-66
10. Циммерман В.В. Нелинейные свойства электрогидравлического вибрационного источника сейсмических колебаний/ Проблемы нелинейной сейсмики. - М.: Наука, 1987
11. Harmonic distortion reduction on vibrators – suppressing the supply pressure ripples. Wei Z., Sallas J.J., Crowell J.M., Teske J.E/ Vibroseis workshop 2008
12. Wei Z. Reducing harmonic distortion on vibrators at low frequencies-servo-valve flow linearization/ EAGE conference and exhibition, 2009
13. Egretan A., Gibson J., Lin F., Meunier J. Using long sweep in vibroseis acquisition/ 71 EAGE Conference and exhibition, 2009
14. Bouska I. Distance separated simultaneous sweeping: the world's fastest vibroseis technique/ Vibroseis workshop, 2008, p 67-69
15. Independent simultaneous sweeping/ D. Hove, A.J. Allen, M.S. Foster, I.J. Jack, B. Taylor / 70 EAGE Conference and exhibition, 2008
16. V1: Implementation and application of single-vibrator acquisition/ J.J. Postel, J. Meunier, T. Bianchi, R. Taylor/ The Leading Edge, №5, 2008
17. Krohn C.E., Johnson M. HFVS enhanced data quality through technology integration / Geophysics, vol. 71, №2, 2006
18. High fidelity vibratory seismic (HFVS) method for acquiring seismic data/ K.P. Allen, M.L. Johnson, J.S. May/ 1998 SEG Expanded abstract
19. Rietsch E. / Reducing of harmonic distortion in vibratory source records/ Geophysical Prospecting, 1991, vol. 29, p 178 – 188