

Современные технологии возбуждения сейсмических волн

■ Шнеерсон М.Б., Жуков А.П., ООО "ГСД", г. Москва

*«Грохочет взрыв и силою упругой
волна охватывает сонные слои,
а встретившись с границей мощным цугом
стремится вспять, к поверхности земли»
И. Мушин*

Сейсморазведка начинается с возбуждения колебаний, реализуемого путем приложения внешних, переменных во времени динамических нагрузок к точкам среды, под действием которых они выходят из положения равновесия и начинают совершать собственные или вынужденные колебания. В результате в земле возникает волновой процесс, и образуются отраженные, преломленные и другие волны, прием и регистрация которых позволяет решать задачи по изучению строения и состава земных недр и поиска полезных ископаемых. Постоянные нагрузки не приводят к образованию переменных во времени волновых полей. Наряду с активными, существуют и пассивные методы сейсморазведки, основывающиеся на использовании шумовых волновых полей разной природы, но они далее не рассматриваются.

По времени действия внешние нагрузки подразделяются на импульсные, вибрационные и вибро-импульсные или кодо-импульсные. Первые – носят кратковременный, импульсный характер и время их действия существенно меньше периода возбуждаемых колебаний. Вторые – квазисинусоидальные по форме и продолжительные во времени нагрузки, время действия которых может достигать нескольких десятков и более секунд. Третьи – длительные во времени последовательности однополярных или разнополярных коротких импульсов, следующих друг за другом с переменны-

ми или постоянными временными интервалами, длительность которых меньше периода генерируемых волн.

По способу создания избыточных давлений и возбуждения волн в среде нагрузки подразделяются на взрывные и невзрывные. Взрывные (ВН), - используют энергию различных по массе и размеру взрывчатых веществ помещенных в скважины, шурфы или в специально созданные полости в земле. Невзрывные (НН) - создаются специальными устройствами и установками и в них не применяются взрывчатые вещества в их обычном понимании.

В настоящее время при работах на суше наиболее широкое применение получили взрывные и невзрывные вибрационные источники колебаний (вибраторы). Наряду с ними, используются импульсные невзрывные электромагнитные источники сейсмических волн («Енисей» и «Геотон»). Ведутся также работы по пневматическим и гидропневматическим импульсным источникам колебаний.

На море исключительное применение получили импульсные невзрывные пневматические источники колебаний.

Исторически сложилось представление о том, что взрыв заряда ВВ на оптимальной глубине является наилучшим со всех точек зрения источником колебаний в сейсморазведке. И это мнение в течение ряда лет не подвергалось сомнению в связи с тем, что отсутствовали адекватные, сопоставимые по эффективности промышленные, невзрывные способы

генерирования волн. С развитием технических и методических средств сейсморазведки (создание невзрывных источников колебаний, сейсмостанций с воспроизводимой записью, систем накопления сигналов и др.) положение существенно изменилось. Создались объективные условия для появления более прогрессивных и безопасных во всех отношениях невзрывных способов генерирования волн в сейсморазведке. К настоящему времени невзрывное возбуждение колебаний на суше заняло прочное место в общем комплексе работ на нефть и газ, а в морской сейсмике – является практически единственным способом генерирования волн.

Выбор того или иного способа возбуждения колебаний на суше, в конечном счете, определяется заказчиком работ. Можно лишь говорить о том, что по мере урбанизации наших территорий и повышения требований к безопасности работ и сохранению окружающей среды приоритет будет получать невзрывная сейсморазведка.

Для начала волнового процесса в среде необходимо в некоторой ее точке приложить внешнюю нагрузку, которая, как указывалось ранее, может носить импульсный (кратковременный), вибрационный (продолжительный во времени) или вибро-импульсный характер.

При импульсном и кодо-импульсном возбуждении точки среды совершают собственные колебания, частота которых определяется массой (M) и упругостью (C) выведенного из равновесия, «присоединенного» объема грунта, а также затуханием волн. На этой частоте смещения частиц пород будут наибольшими и максимумы амплитудно-частотных характеристики возбуждаемых волн будут тяготеть к частотам собственных колебаний.

Применительно к сейсморазведке этот результат важен тем, что он объясняет наблюдаемую качественную зависимость между уровнем возбуждаемых колебаний и частотами регистрируемых волн. Действительно, чем мощнее источник, тем больший объем пород выводится из положения равновесия и тем ниже частоты собственных колебаний и регистрируемых волн. Отметим, что при кодо-импульсном возбуждении функция кода – интервалы между импульсами не оказывает влияния на частоту возбуждаемых и регистрируемых волн.

При вибрационном возбуждении колебаний точки совершают вынужденные колебания в соответствии с поведением внешней нагрузки. На частоте собственных колебаний будет наблюдаться резонанс – максимум амплитуд волн, величина которого определяется параметрами излучателя и среды. Из этого следует, что, как и при импульсном возбуждении, с увеличением силовых характеристик вибратора возрастает масса присоединенного объема грунта, что приводит к снижению частоты резонанса и возбуждению более низкочастотных колебаний, что находит качественное подтверждение на практике.

В настоящее время сложился определенный стандарт технических и методических средств возбуждения колебаний в сейсморазведке.

Взрывное возбуждение

Сейсморазведка с взрывными источниками колебаний используется при всех видах работ по изучению глубинного строения земли, поиску и разведки полезных ископаемых. Возбуждение упругих волн осуществляется взрывами зарядов бризантных взрывчатых веществ (ВВ) определенной массы, помещенных в специально пробуренные скважины или в неглубокие шурфы. Для иницииро-

вания основного заряда используются электродетонаторы, которые срабатывают от электрического импульса, создаваемого специальной системой синхронизации. Момент подачи импульса передается для регистрации на сейсмостанцию, который используется для определения времен прихода волн к приемным устройствам. Бурение взрывных скважин производится специальными самоходными или переносными, малоглубинными вращательными установками. Оптимальные глубины погружения зарядов и их массы выбираются или по материалам предыдущих съемок, или определяются экспериментально по результатам опытных работ. Определению подлежат величины зарядов и глубины их погружения. Первые могут меняться от долей килограмма при разведке неглубоких границ раздела и обращенном каротаже взрывных скважин, до нескольких килограммов и десятков килограмм при картировании глубоких границ раздела. Глубины погружения зарядов зависят от вида исследований, строения верхней части разреза и мощности зоны малых скоростей, с которой связано образование волн – спутников. Группирование взрывов применяется при возбуждении колебаний в неглубоких скважинах (до 5 м) и шурфах для подавления поверхностных волн. Перспективы развития технологии взрывных работ связаны с созданием более эффективных взрывчатых веществ (ВВ), более экономичных и совершенных установок для бурения скважин, а также устройств для безопасного ведения взрывных работ, инициирования зарядов и связи сейсмостанции с взрывным пунктом.

Наземное невзрывное возбуждение колебаний

Наземная невзрывная сейсморазведка является эффективным геофизическим методом разведки, широко приме-

няемая на всех стадиях геолого-разведочных работ. Она оснащена современным оборудованием и использует новейшие способы получения и обработки сейсмической информации. Области применения ее от глубинных и региональных работ до детальных и поисковых съемок 3D и 4D [4].

В практике наземного невзрывного возбуждения волн практическое применение получило два типа излучателей

Первый – источники активного действия, в которых потенциальная энергия поднятого над землей груза преобразуется в кинетическую при его взаимодействии с поверхностью земли, что и приводит к возбуждению волн в среде. На этом принципе были основаны первые невзрывные излучатели, установки «падающий груз», некоторые модификации которых получили промышленное применение. В настоящее время источники этого типа применяются лишь в мало- глубинной сейсморазведке. Это – ручная «кувалда», удары которой производятся или непосредственно по поверхности земли, или по жесткой прокладке для обеспечения более стабильных условий возбуждения колебаний. В практике зарубежных работ определенное применение получили «стреляющие ружья» - «Бетси» разного калибра, у которых боек под действием внешнего силового импульса разгоняется и бьет по металлической проставке, возбуждая волны в среде.

Второй тип – это источники реактивного действия, обобщенным излучающим элементом которого является цилиндр, с помещенным в нем поршнем. Под действием внутренних сил, приложенных к цилиндру и поршню, один из элементов излучателя движется вверх, а другой – вниз, воздействуя на среду и выводя ее точки из положения равновесия.

Импульсные невзрывное возбуждение

Импульсные невзрывные источники представлены легкими ударниками (кувалда), которые хорошо зарекомендовали себя при малоглубинных и инженерно-геологических изысканиях на продольных и поперечных волнах, а также электромагнитными излучателями «Енисей» и «Геотон», успешно применяемыми при съемках 2D и 3D в различных сейсмогеологических условиях. Установки «Енисей» и «Геотон» имеют единый принцип действия, основанный на взаимодействии электромагнитных полей. Излучающим элементом является жесткая устанавливаемая на поверхности земли плита, на внутренней поверхности которой размещен пригруз с индуктором электромагнита. Якорь электромагнита отделен от индуктора небольшим зазором и с помощью стоек соединен с плитой. При подаче импульса тока в катушки индуктора между ним и якорем электромагнита возникает сила взаимодействия, которая заставляет плиту двигаться вниз, создавая импульсное воздействие на среду, а пригруз - вверх. При этом зазор между якорем и индуктором выбирается и вся система отрывается от поверхности земли, а затем плавно опускается для исключения повторного удара. Электромагнитные источники достаточно просты по устройству и обслуживанию, обеспечивают получение приемлемых по качеству материалов и относительно недороги, что обосновывает целесообразность их применения при проведении поисково-разведочных работ на нефть и газ и определяет перспективы их дальнейшего использования. Небольшие величины развиваемых нагрузок приводят к возбуждению повышенных по частоте колебаний, что выгодно отличает эти установки от мощных невзрывных

источников колебаний. Уровень генерируемых волн относительно невелик, но в сочетании с группированием излучателей и синхронным накоплением сигналов появляется возможность в соответствующих сейсмогеологических условиях получать качественные относительно высокочастотные записи отраженных волн. Создано и практически применяется несколько модификаций этих источников с 1, 2 и 4 излучателями, которые могут размещаться на санях со специальными полозьями, которые одновременно являются излучателями колебаний, транспортных средствах повышенной и высокой проходимости, а также на перемкшаемых [вручную тележках.

Перспективы развития импульсной невзрывной сейсморазведки связаны с повышением технических и эксплуатационных характеристик существующих источников и созданием новых установок, а также излучателей для возбуждения волн в скважинах и болотах с перспективой существенного сокращения объемов взрывной сейсморазведки.

Вибрационное возбуждение

Вибрационная сейсморазведка получила широкое применение в комплексе геолого-разведочных работ на нефть и газ. Она оказалась эффективной при глубоких и региональных исследованиях, ориентированных на возбуждение и регистрацию отраженных волн по методике многократных перекрытий МОВ-ОГТ. Относительно небольшие расстояния между пунктами возбуждения и приема колебаний в сочетании с использованием мощных вибрационных источников и методических средств по усилению полезных волн и подавлению помех сделали возможным уверенную регистрацию отраженных волн от поверхности фундамента и более глубоких границ раздела, включая поверхность Мохоро-

вичича. Примерами успешных региональных работ в нашей стране являются пересечения Южного Урала и прилегающих территорий востока Русской платформы, геотраверс от Магадана через Магаданскую область на северо-восток, к океану и др.

Основные объемы вибрационной сейсморазведки приходятся на поисково-разведочные работы, по прослеживанию границ раздела в осадочной толще, поиску и разведке месторождений углеводородов. По ориентировочным данным до 40-45% объемов работ на нефть и газ выполняются с применением вибрационных источников колебаний. Работы ведутся практически во всех регионах России, перспективных на нефть, газ и некоторые другие полезные ископаемые. Однако, есть районы и участки, на которых применение вибраторов оказывается пока еще неэффективным. Это - незамерзающие зимой болота и топи, а также крутые склоны рельефа. Причины - отсутствие упора для рабочей плиты вибратора и сползание установок. Для проведения работ на таких участках необходимы погружные вибраторы и специальные установки, способные возбуждать колебания в таких условиях.

Высокое качество современных вибрационных источников обеспечивает устойчивую высокопроизводительную работу полевых отрядов. Ушли в прошлое проблемы, возникавшие из-за ненадежной работы установок, когда утром на профиль выезжало пять вибраторов, а через два-три часа работы оставались два, а в ряде случаев один «полуживой» излучатель. И так каждый день. Сегодня производительность до 500 и даже 1000 физ. точек за день при высоком качестве материалов считается нормой. Однако, повышение числа пунктов возбуждения, обрабатываемых

за день работы, является актуальной задачей. Специфика вибрационной сейсморазведки, обусловленная использованием для возбуждения колебаний частотно-модулированных силовых нагрузок, открывает широкие возможности по повышению ее эффективности при проведении поисково-разведочных работ на нефть и газ. Некоторые из них будут рассмотрены далее.

В настоящее время сложился определенный стандарт, определяющий технические и методические средства вибрационной сейсморазведки [2,4].

Вибрационные источники – это установки отечественного, импортного или смешанного (вибратор импортный, транспортная база отечественная) производства с усилием от 0,5 тн при работах на небольшие глубины до 30 и даже 40 тн, смонтированные на соответствующих транспортных базах (автомобиль, багги, снегоболотоход), в количестве 4-5 штук на полевой отряд. Из них четыре, как правило, работают, а один – в резерве. Отмечается стремление к применению вибраторов со все возрастающими усилиями на грунт. Имеются вибраторы с усилиями 30 тн и даже 40 тн. Эти тенденции понятны, и они соответствуют поговорке «сила есть – ума не надо». С одной стороны, можно сэкономить на числе вибраторов и количестве накоплений, а с другой, ухудшаются условия проезда, повышаются требования к подготовке профиля и снижается резонансная частота возбуждаемых колебаний и уменьшается разрешенность записей, что многократно подтверждено на практик. Конструкции современных вибраторов позволяют изменять относительный уровень излучаемых сигналов от 40-50% до 100% от максимального. В результате меняется интенсивность возбуждаемых колебаний. Однако, зависимость между

силовыми параметрам вибраторов и амплитудами возбуждаемых волн носит нелинейный характер, что приводит к тому, что начиная с определенных величин усилий рост амплитуд волн или замедляется, или вообще прекращается. С этой позиции полезно работать при минимально возможных усилиях. Как правило, работы ведут при усилиях от 60 до 90 % от максимальных, в пределах которых вибраторы работают наиболее устойчиво.

Полевые работы повсеместно проводят с группированием вибраторов и с синхронным накоплением сигналов, что обеспечивает повышение отношения сигнал/помеха. При необходимости его повышения по регулярным помехам применяют неравномерные по чувствительности группы вибраторов, которые легко реализуются на практике. При съемках 2D группы вибраторы размещают по профилю, а при - 3D и 4D, как правило, вдоль линий возбуждения. Синхронное накопление приводит к повышению отношения сигнал/нерегулярная помеха, которое при абсолютно нерегулярных помехах пропорционально корню квадратному из числа накоплений. Характер этой зависимости таков, что он делает нецелесообразным накопление большого числа сигналов из-за снижения его эффективности и производительности работ (увеличение времени на отработку каждой физической точки). Как правило, число накоплений выбирают не большим 10–12.

Практика работ с вибрационными источниками сейсмических колебаний показывает, что качество полевых материалов во многом определяется обоснованным выбором управляющих сигналов и их параметров. В вибрационной сейсморазведке они представлены двумя модификациями: линейные сигналы, у

которых частота в процессе излучения колебаний изменяется по линейному закону, и нелинейные, характеризующиеся переменной скоростью изменения частоты в процессе излучения колебаний, позволяющей повышать уровень возбуждаемых колебаний в желаемой полосе частот. Ранее проводились работы по опробованию других видов управляющих сигналов. Это были однополярные и двухполярные кодовые последовательности импульсов. Перспективы последних были связаны с принципиальной возможностью существенного уменьшения уровня корреляционных шумов и расширению динамического диапазона результирующих записей. Рассматривались также гармонические посылки постоянной частоты, применение которых позволяет повысить уровень подавления помех и реализовать новые способы вибрационной сейсморазведки. Но эти направления пока практического применения не получили.

Рабочие параметры управляющих сигналов (начальная и конечная частоты, длительность излучения и характер изменения частоты) определяются исходя из качества предшествующих съемок и результатов опытных работ, выполняемых с целью их уточнения с учетом конкретных сейсмо-геологических условий в районе проведения работ.

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 геофизики. В последние годы наметились определенные направления развития вибрационной сейсморазведки. Основные из них следующие [1,2,3,5]: адаптивная вибрационная сейсморазведка (АВИСейс); - расширение полосы частот возбуждаемых колебаний; - повышение производительности работ; - совмещенные, смешанные системы наблюдения; - нелинейные волновые поля; - одноточечное профилирование и технология работ, основанная на применении сверхмногоканальных приемных систем и большого числа одновременно работающих источников – «тотальная сейсморазведка».

1. Адаптивная вибрационная сейсморазведка (АВИСейс)

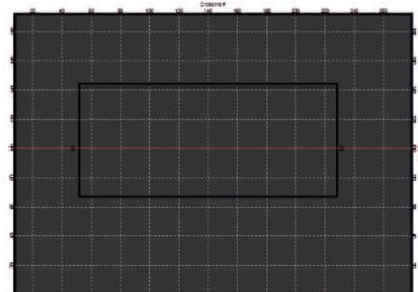
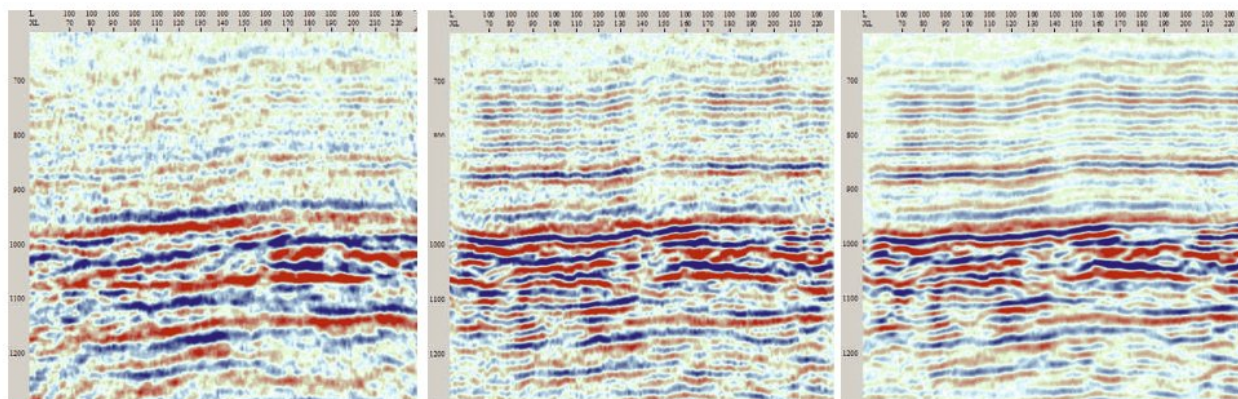
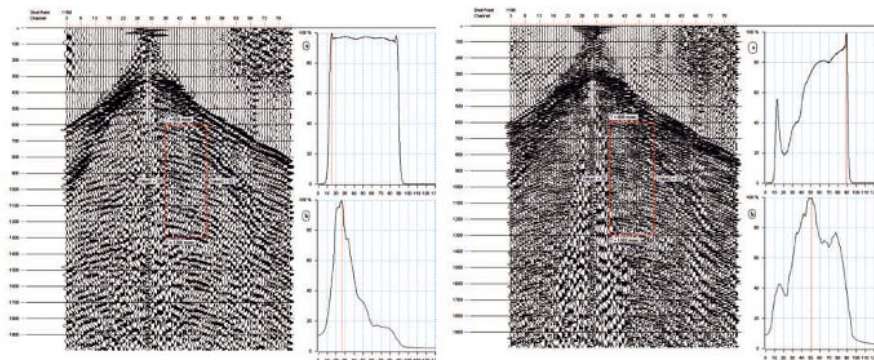
Возможности вибрационной сейсморазведки по оптимизации параметров управляющих сигналов реализованы в методико-аппаратурном комплексе «Адаптивная вибрационная сейсморазведка, АВИСейс». Его методической основой является наличие прямой зависимости уровня излучаемых колебаний от скорости изменения частоты управляющего сигнала. Поэтому увеличение или уменьшение скорости развертки приводят к соответствующему уменьшению или увеличению амплитуд генерируемых волн. Наличие частотно-зависимого поглощения волн определило основное направление работ по АВИСейс, ориентированных на повышение уровня высоких частот в спектре возбуждаемых колебаний. Аппаратурной основой комплекса является система управления работой вибрационных источников колебаний с комплексом программ, позволяющие на основании спектрального анализа зарегистрированных волн, рассчитать параметры управляющих сигналов, компенсирующих дефект

амплитуд волн в заданной полосе частот. Комплекс может работать практически со всеми современными вибрационными источниками и приемо-регистрирующими системами. Технология проведения работ предусматривает посылку вначале «калибровочного» воздействия одиночным или группой вибраторов. Параметры калибровочного сигнала выбирают, исходя из имеющихся по району данных. Как правило, это широкополосный сигнал достаточной длительности. Зарегистрированные колебания анализируются и определяются спектральные характеристики волн, по которым производится уточнение параметров управляющих сигналов, которые передаются на вибраторы для проведения работ. Коррекция сигналов может проводиться последовательно на каждом пункте возбуждения или выборочно в зависимости от качества получаемых материалов. К настоящему времени комплекс опробован и успешно применяется при проведении поисковых и детальных работ 2D и 3D. На рис. 1, 2 и 3 приведены некоторые типичные материалы, иллюстрирующие эффективность комплекса АВИСейс.

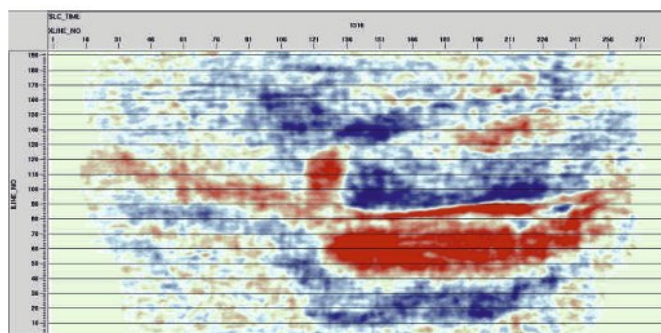
2. Расширение полосы частот возбуждаемых колебаний.

Общепринятая технология работ предусматривает возбуждение колебаний в полосе частот от 8–10 Гц до 80–100 Гц, т.е. в пределах 3,0 – 3,5 октав. Современные подходы к качеству материалов и результатам их обработки и интерпретации требуют расширения полосы частот регистрируемых колебаний до 5 – 6 октав. Практика показывает, что это позволяет увеличить глубинность разведки и разрешенность получаемых записей, снизить уровень корреляционных шумов и повысить отношение сигнал/помеха, а в итоге получить более

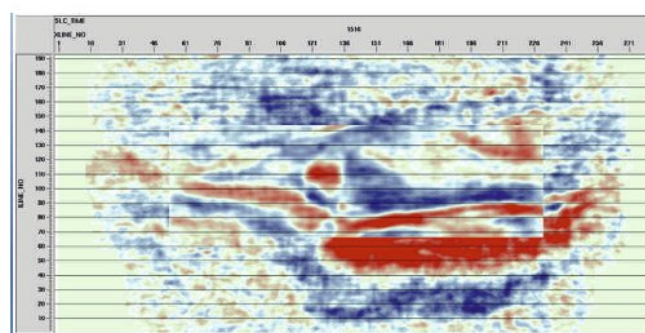
► Рис.1. Сравнение коррелограмм и спектров, полученных с линейным (а) и адаптированным (б) управляющими сигналами



◀▲ Рис.2. Рис. 2 Временные разрезы по линии 100 после деконволюции. Повышение разрешенности и выразительности волнового поля турон-сеноманских отложений при применении АВИСейс и высокоплотной съемки



▲ Рис.3а. Временной срез на времени 1516 мс, стандартная съемка



▲ Рис.3б. Временной разрез на времени 1516 мс, АВИСейс

качественные и достоверные конечные результаты. Анализ возможности расширения октавности вибрационных записей показал на перспективность смещения частоты возбуждаемых колебаний в сторону низких (до 1 – 4 Гц), а не высоких

частот. Обусловлено это частотно – зависимым затуханием волн, что делает практически нереальным удвоение верхнего диапазона частот до 250 – 300 Гц при поисково-разведочных работах на нефть и газ. При уходе в сторону низких

частот имеется практическая возможность достижения желаемой октавности записей, что показано экспериментально [3]. Так, например, при начальной частоте 4 Гц для получения шести октавного управляющего сигнала конечная частота должна быть равной 130 Гц, что вполне приемлемо. Однако, переход на низкие частот также сопряжен с необходимостью преодоления определенных технических и методических трудностей, связанных с особенностями работы применяемых вибраторов.

Эффективная работа вибратора на низких частотах (1 – 4 Гц) ограничена взаимным перемещением поршня относительно цилиндра «ходом поршня», который обратно пропорционален частоте возбуждаемых колебаний, величиной гидравлического потока жидкости, развиваемого насосом, работой серво-клапана, управляющего потоками жидкости, весом инерционной массы, емкостью гидро-аккумуляторов и др. Модельные исследования [3] 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:

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

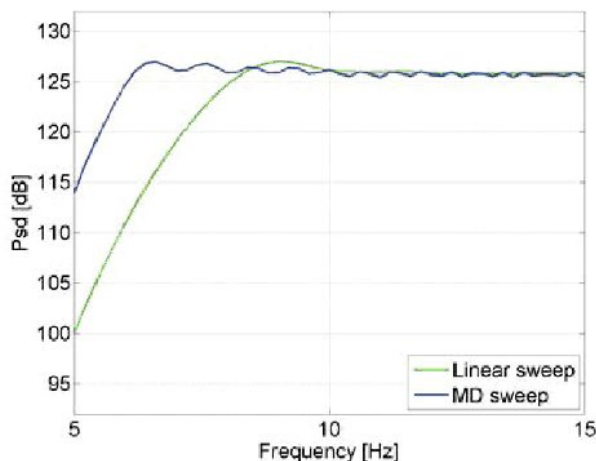
где f – частота возбуждаемых волн, F – сила, развиваемая вибратором, S – ход поршня и Mr – реактивная масса вибровозбудителя (масса гидравлического цилиндра).

Приведенное соотношение определяет зависимость частоты излучаемых

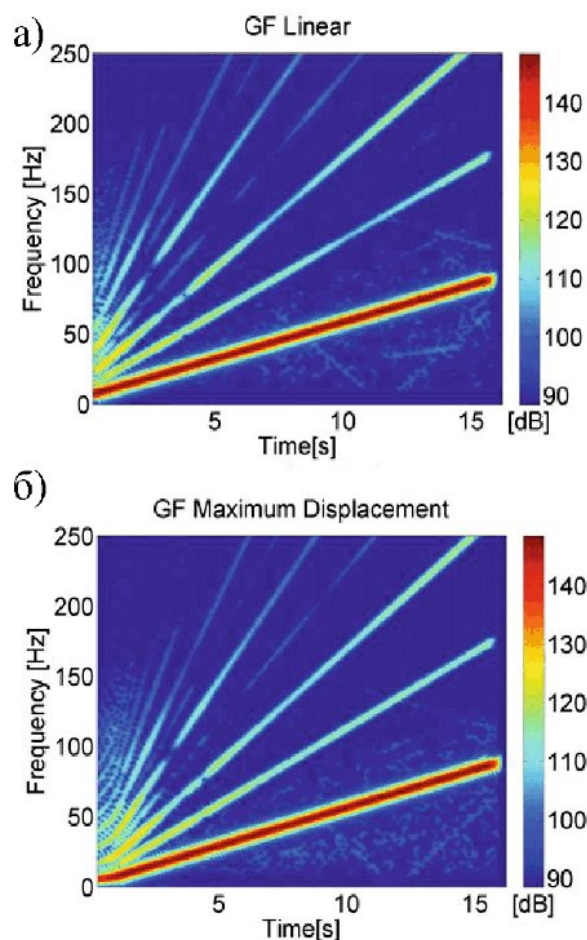
колебаний от развиваемого вибратором усилия, хода поршня и массы цилиндра вибровозбудителя. Из него следует, что при заданной величине силы для смещения в сторону низких частот необходимо увеличивать «ход поршня» и инерционную массу. В этом направлении ведутся работы по созданию широкополосного вибратора с рабочей полосой частот, равной 6,6 октавы.

Низкочастотное возбуждение на основе существующих вибрационных источников со стандартными параметрами реализовано путем применения нелинейных или комбинированных управляющих сигналов с повышением уровня низких частот в спектре излучаемых колебаний, уменьшением скорости развертки управляющего сигнала в его начальной (низкочастотной) части, в области скоса, начиная с 4 – 5 Гц, и снижением уровня силового воздействия на среду [3]. 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 [3].

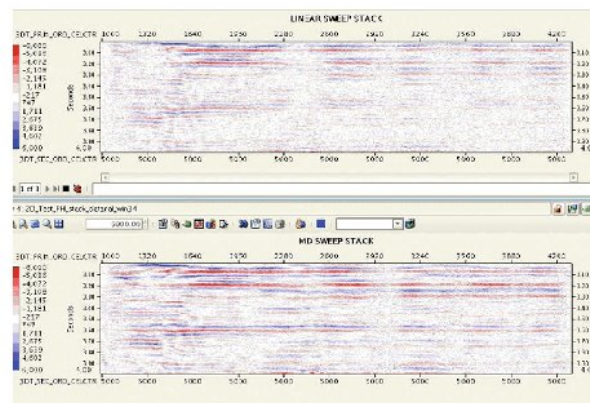
На рис. 4-6 приведены выборочные материалы, полученные с 32 тн вибратором на профиле протяженностью 5 км на среднем Востоке при использовании линейного управляющего сигнала частотой 6 - 80 Гц, длительностью 16 с со скосами 500 мс и свипа максимального смещения с теми же параметрами, иллюстрирующие эффективность применения нового управляющего сигнала. Это направление получило определенное практическое применение. В докладах на конференциях EAGE в Копенгаге-



▲ Рис. 4. Кривые изменения основной компоненты «силы земли» (ground force) от частоты для линейного управляющего сигнала (зеленая кривая) и сигнала максимальной длительности (фиолетовая кривая)



▲ Рис. 5. Частотно-временные представления сигналов силы земли для линейного свипа (а) и свипа максимальной длительности (б)



▲ Рис. 6. Временные разрезы, полученные с линейным сигналом (а) и сигналом максимальной длительности (б)

не (2012 г) и в Лондоне (2013) приведены сейсмические материалы, полученные с применением расширенных в сторону низких частот (до 1,5 – 3,0 Гц) управляющих сигналов и стандартным оборудованием, в том числе с сейсмоприемниками с собственной частотой 10 Гц. Тем не менее, в сообщениях отмечается перспективность и необходимость применения сейсмоприемников с резонансной частотой 4,0 – 4,5 Гц и акселерометров MEMS.

В пределах России также проводятся работы с низкочастотными управляющими сигналами повышенной длительностью скаса и пониженным уровнем воздействия на среду для уменьшения уровня нелинейных искажений возбуждаемых колебаний [2].

3. Повышение производительности работ

Повышение производительности полевых работ было и остается одной из актуальных задач сейсморазведки. 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 ($T_v + T_p$), а также на

переезд вибраторов с одной точки на другую (t).

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

Общепринятая технология работ предусматривает последовательную отработку каждого пункта наблюдений с затратами времени на возбуждение колебаний, их прием и переезд вибраторов на следующую точку, что и определяет производительность работ.

Ее повышение может быть достигнуто путем одновременной отработки нескольких физических точек ($N > 1$), сокращения и исключения затрат времени на прием колебаний (T_n) и переезд вибраторов (t) при соответствующих изменениях аппаратуры, технологии и организации 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. Практическое применение получили следующие способы повышения производительности работ при съемках 3D и 4D, ВСП в пустынных и полупустынных районах юго-восточной Азии [3].

3.1 Разновременное возбуждение колебаний

Этот способ повышения производительности работ, получивший название «скользящий свип или slip-sweep», 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 интервалы времени между последующими воздействиями разных групп вибраторов выбираются не меньшими временной глубины разведки для возможности полного освещения разреза. Времена начала вибрирования каждой группы излучателей фиксируются и заносятся в память для последующей обработки записей. Колебания с разных пунктов возбуждения принимаются, регистрируются в памяти большого объема.

При обработке суммарная виброграмма последовательно коррелируется с использованным 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 применение при съемках 3D в пустынных районах ближнего Востока и в некоторых районах России. Однако, первые же работы показали, что возникающие нелинейные компоненты волновых полей (гармоники) накладываются на полезные записи, снижая их качество. Для ослабления их влияния было предложено несколько способов, основанных на использовании фазо-кодированных управляющих сигналов, на выделении помех-гармоник и их последующим вычитанием из результирующих записей волю с каждого пункту возбуждения колебаний.

3.2 Исключение времени слушания между посылками излучаемых колебаний.

Рассматриваемая технология предусматривает излучение заданной последовательности идентичных по частоте и длительности управляющих сигналов, следующих непрерывно друг за другом и регистрацию поступающих колебаний без затрат времени на прием и регистрацию волн, кроме последнего. Эта методика получила название «каскадный свип», и она позволяет уменьшить время на производство полевых работ и повысить их производительность. 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. Тем не менее в последнее время наблюдается уменьшение объемов работ по этой технологии.

3.3 Навигационные системы и беспроводная система передачи сигналов от сейсмоприемников

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 сеймостанцию.

Интегрированные системы позволяют выбирать пункты возбуждения и распределять 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.

3.4 Применение длительных управляющих сигналов (40 и более с.)

Практика работ показывала, что посылки длительностью 6 – 10 с. являются оптимальными. В последнее время, в свете повышения производительности работ повысился интерес к применению протяженных управляющих сигналов [3]. 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 и регистрации колебаний после каждого воздействия, что ведет к повышению производительности работ. Кроме того, при протяженных управляющих сигналах меньше сказываются их «скосы» на уровень регистрируемых волн.

3.5 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 [3]. 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 широковыносных 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 площади было задействовано 15 вибраторов, которые были разделены на три группы по пять установок в каждой, которые находились на расстоянии 12 км друг от друга. При этом производительность работ повышалась в два или три раза в зависимости от числа одновременно работающих групп вибраторов. Полученные сейсмограммы в области целевых волн были свободны от перекрестных помех, подобны одинарным и не требовали применения для обработки каких-либо специальных программ.

3.6. Независимое одновременное вибрирование

Независимое одновременное вибрирование – это технология работ, разработанная фирмой WesternGeco для BP, в основе которой лежит предположение о том, что при одновременной работе

нескольких разнесенных по площади вибрационных источников с произвольными, но известными параметрам управляющих сигналов, суммарное регистрируемое волновое поле будет носить нерегулярный характер. При этом, если известно время начала работы данного вибратора и параметры управляющего сигнала, то корреляционная обработка сигналов позволяет из суммарного, общего волнового поля выделить колебания, соответствующие этому вибратору. И так для каждого пункта возбуждения. Эта технология сначала была опробована при съемках 3D в Алжире, а затем успешно применена при широкомасштабных работах в сопредельных районах. 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 вибраторов, 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 работ фиксировались координаты расположения вибратора (x, y, z) и время начала возбуждения колебаний. Это позволило получить коррелограммы для каждого пункта возбуждения, провести их обработку и построить куб размером 4,5 x 6,5 км с квадратным бином 15 x 15 м. Также было выполнено сравнение материалов, полученных по новой и стандартной технологиям, которое показало их практическую идентичность. Одновре-

менное вибрирование позволило существенно сократить время на производство работ, в среднем, каждый вибратор отработывал 500 пунктов возбуждения в день.

4. Отказ от группирования источников колебаний. (Одноточечное возбуждение колебаний)

В последнее время в вибрационной сейсморазведке наметилась тенденция отказа от группирования источников и приемников колебаний. Обусловлено это рядом факторов: затруднениями с размещением групп вибраторов на местности из-за значительных размеров излучателей, ухудшением условий суммирования колебаний при работах на участках с пересеченным рельефом и сложным строением зоны малых скоростей, а также возможными сбоями в синхронизации источников колебаний. Эти причины, а также новые технические и методические возможности, решения и разработки привели к тому, что некоторые организации отказываются от применения интерференционных систем и переходят на работы с одиночными вибраторами и сейсмоприемниками, так называемое «одноточечная» технология, при которой возбуждение и прием колебаний производится одиночными источниками и приемниками. Для достижения приемлемых соотношений сигнал/помеха работы проводятся по системам наблюдений повышенной плотности, с управляющими сигналами большой длительности (до 40 с), увеличенным числом работающих на площади вибраторов и технологиям с сокращенным временем приема колебаний после каждого возбуждения для повышения производительности работ (скользящий и каскадный управляющие сигналы и др.). Одна из таких систем предусматривала работу 12 вибраторов с управляю-

щим сигналом длительностью 40 с и временным сдвигом 5 с. 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 с большей производительностью и за меньшее время.

Одноточечные наблюдения (без группирования источников и приемников колебаний) привлекают все большее внимание производителей работ. В [6] подведены итоги девятилетнего применения одноточечной технологии в Кувейте и показано, что она экономически эффективна и позволяет успешно решать структурные и интерпретационные задачи в различных сейсмо-геологических условиях региона.

5. Смешанная, совмещенная технология полевых сейсморазведочных работ

Стремление существенного повышения качества и производительности полевых сейсморазведочных работ, а также степени их автоматизации привели к созданию смешанной, совмещенной технологии сейсморазведочных работ (Blended acquisition), теоретические и методические основы которой освещены в работах [5,7]. Она предусматривает одновременную работу на площади съемки большого числа источников с овыми или разными параметрами излучаемых колебаний. Применительно к вибрационной сейсморазведке - это работы с узкополосными различающимися по центральным частотам управляющими сигналами, перекрывающимися

желаемый диапазон частот, а к морской – это использование пневмопушек разного объема и давления, а также глубин погружения. Т.е. источники не должны быть одинаковыми, а при вибрационном возбуждении широкополосными. Наоборот, предпочтение отдается узкополосным вибраторам, но с оптимизированными параметрами. Отмечается, что такой подход позволяет упростить конструкцию вибраторов, ориентированных на возбуждение узкополосных колебаний с различными средними частотами. Необходимым условием смешанной технологии является то, что суммарное волновое поле от когерентных источников должно обладать требуемыми временными и спектральными характеристиками в каждой точке подземного пространства. Отмечается, что чем больше действующих на площади источников, тем выше уровень излучаемых колебаний и больше отношение сигнал/нерегулярная помеха. В экстремальных случаях съемки по этой технологии будут представлять собой смешанные излучающе-приемные системы произвольного размера, у которых время между первым и последним излучениями может быть большими. В соответствии с критерием Найквиста расстояния между источниками должны быть меньше половины длины волны излучаемых колебаний. Поэтому в случае разночастотных излучателей (например, низко, средне и высокочастотных) расстояния между ними должны быть различными, большими для низкочастотных и меньшими для высокочастотных. Следовательно и число излучателей должно быть различным. Такое размещение излучателей было названо рассеянным или дисперсионным (dispersed source array, DSA) [5]. Оно обладает следующими потенциальными преимуществами:

ществами: - простота конструкции узкополосных источников; - оптимизация параметров излучаемых колебаний в соответствии с центральной частотой; - возможность эффективного перекрытия желаемого диапазона частот и возможностью существенного повышения отношения сигнал/помеха. В качестве критерия в [7] предложен «индикатор смешанности» BPI (blending performance indicator), определяемый соотношением:

$$BPI = (N_s' / N_s) \times (T / T'),$$

где N_s и N_s' – количество работающих источников при несмешанной и смешанной съемках, а T и T' – времена, определяющие эффективное время работ при несмешанной и смешанной съемках, соответственно. Рассматривая перспективы смешанной технологии работ, авторы прогнозируют ее широкое применение и «конец» несмешанным технологиям ведения сейсмических работ [5,7].

6. Нелинейные волновые поля в вибрационной сейсморазведке

Возбуждение колебаний вибрационными источниками всегда сопровождается возникновением нелинейных компонент, частоты которых кратны основным [1, 2]. Интерес к изучению нелинейных волн или гармоник появлением новых технологий (slip- sweep и др.), условием успешного применения которых является существенное подавление нелинейных составляющих регистрируемых волновых полей; а также изучением нелинейных явлений, происходящих при распространении волн в нефтегазонасыщенных, многокомпонентных средах. Перспективы и возможности использования гармоник и нелинейных волн для получения дополнительной информации о разрезе и выделении углеводородосодержащих слоев рассмотрены в

работах [1,9]. Возможность использования волн-гармоник для расширения полосы частот регистрируемых колебаний рассмотрена в докладе, представленном на конференции EAGE в Копенгагене [8], что позволяет говорить об определенном интересе к этому направлению.

7. Новая парадигма наземных сейсморазведочных работ [10]

За последние годы произошли значимые изменения в технологии наземных сейсморазведочных работ. В 80-х начале 90-х годов прошлого столетия методика наземных сейсмических съемок строилась на следующих основных положениях: высокая кратность наблюдений; хорошее отношение сигнал/помеха на полевых записях; группирование источников и приемников колебаний и регистрация волн при минимальном уровне помех. Предпочтение отдавалось узко-азимутальным системам наблюдений с регулярными и однообразными распределениями по выносам и азимутам. Возросшая техническая оснащенность сейсморазведки (сверхмногоканальные приемо-регистрирующие системы, спутниковая навигация, вибрационные источники и др.) и необходимость существенного повышения производительности полевых работ для обеспечения их рентабельности привели к существенным изменениям технологии работ и требованиям к качеству полевых записей, которые определяются следующими положениями: - переход от узко-азимутальных к широко-азимутальным съемкам; - понимание того, что важна не кратность наблюдений, а качественная дискретизация записей по выносам и азимутам; - отказ от группирования и переход на «одноточечные» системы с небольшими расстояниями и интервалами между линиями и пунктами возбуждения и приема колебаний.

В обосновании этих положений приведены материалы, показывающие, что переход на новую технологию полевых работ позволяет значительно повысить детальность и достоверность получаемых результатов. Особенно эффективной оказалась эта технология при работах в пустынных районах Арабских Эмиратов с вибрационными источниками колебаний, обеспечивая получение качественных конечных материалов и решение широкого круга разведочных задач.

На основе полученных материалов в [10] обосновывается новая парадигма наземных полевых работ, суть которой состоит в отказе от группирования при возбуждении и приеме колебаний, в существенном повышении плотности наблюдений и в переходе от исходных индивидуальных записей большой кратности с высоким качеством материала к записям с несколько худшим отношением сигнал/помеха, но полученным при уменьшенных до нескольких метров интервалах дискретизации по азимутам и выносам.

В статье рассмотрены современные методы возбуждения волновых полей в сейсморазведке, которые определяются характером и параметрами внешних силовых нагрузок. Вибрационная сейсморазведка представлена несколькими модификациями, вытекающими из возможности адаптивного и направленного выбора частотных и фазовых характеристик возбуждаемых колебаний. Каждая из них имеет свои достоинства и недостатки и будущее покажет, какие из них получат дальнейшее развитие и войдут в повседневную практику проведения полевых работ. Способы возбуждения волн в сейсморазведке будут развиваться и совершенствоваться. Это

веле́ние времени, обусловленное необходимостью решения все более сложных задач в условиях урбанизации страны, заботе о сохранении экологии среды и повышении уровня безопасности работ.

Вопрос в том, как будет происходить этот процесс. Возможно два сценария. Первый – спокойный, который будет основываться на восприятии зарубежных технологий и использования их по мере поступления в наши геофизические организации. Сейчас мы, в основном, идем по этому пути, поскольку геофизические организации имеют средства практически только на проведение производственных работ.

Второй – интенсивный, предусматривающий проведение теоретических, экспериментальных и опытно-методических работ, направленных на развитие и совершенствование отечественной сейсморазведки, создание и опробование новых технологий и методов работ. Это направление позволит повысить эффективность метода и приведет к новым решениям и открытиям.

Будем рассчитывать на этот путь развития полевых методов сейсморазведки.

Литература

1. Адаптивные и нелинейные методы вибрационной сейсморазведки (2000), Шнеерсон М.Б., Жуков А.П./ М.: ООО «Недра – Бизнесцентр»
2. Сейсморазведка с вибрационными источниками (2011), Жуков А.П., Колесов С.В., Шехтман Г.А., Шнеерсон М.Б./ «Изд. ГЕРС», г. Тверь
3. Современные тенденции вибрационной сейсморазведки (2010), Шнеерсон М. Б., Жуков А.П. / Сб. Приборы и системы разведочной геофизики №3, г. Саратов

4. Теория и практика наземной невзрывной сейсморазведки (1998), Под редакцией Шнеерсона М.Б., - М. «Издательство Недр» А.И

5. Berkhout A.J. (2012), Blended acquisition with dispersed source arrays, Geophysics, Vol.77, № 4

6. Single-sensor technology – a story of success from Kuwait, (2012), A.H. El-Emam, A. Al-Eldan, K. Shams Al-Deen, 74 EAGE Conference, Extended Abstract, P034

7. The end of unblended acquisition, (2013), G. Berkhout, G. Blacquiere, E. Verschuur, 75 EAGE Conference, Workshop paper: 103

8. Broadband seismic data with vibrator harmonic signals, (2012), J.T. Hu, H.Z. Wang, 74 EAGE Conference, Extended Abstract P038

9. Логинов К.И., Жуков А.П., Шнеерсон М.Б., Логинов И.В. , Нелинейные волновые поля в акустическом каротаже и вибрационной сейсморазведке, (2012), ООО «Издательство ГЕРС»

10. Lansley M. Shifting paradigms in land data acquisition, First Break, (2013), V.31, №3

Подробнее об авторах



Шнеерсон
Михаил Борисович

доктор технических наук, профессор
Российского государственного университета нефти и газа им. И.М. Губкина.



Жуков
Александр Петрович

доктор технических наук, профессор МГУ,
Директор ООО "Геофизические Системы Данных"