

Технологии адаптивной вибросейсморазведки (АВИСейс) повышают качество и эффективность сейсморазведочных работ

■ Жуков А.П., ООО "ГСД", г. Москва

Проблема повышения эффективности и качества сейсморазведочных работ приобретает все большую актуальность. Сейсморазведка, бурение, испытание и исследование скважин составляют основу геологоразведочных работ (ГРР) в России при решении проблемы наращивания и долгосрочного управления ресурсами и запасами нефти и газа. Таким образом, внедрение в производство геологоразведочных работ на нефть и газ новых методов, технологий и аппаратурно-технических средств, по-прежнему является важнейшей задачей. Особенно важно обеспечить высокий технологический уровень проведения полевых работ и высокое качество получаемых в поле сейсмограмм. Затраты на проведение полевых сейсморазведочных работ составляют сегодня порядка 80% от стоимости полного цикла сейсморазведочных работ. Потеря или снижение качества полевых данных ведет к большим экономическим потерям, ограничивает использование современных технологий обработки и анализа сейсмоданных, без которых сегодня невозможно построение достоверной геофизической модели геологического строения изучаемых территорий.

В настоящее время вибрационная сейсморазведка является одним из основных геофизических методов поиска и разведки полезных ископаемых и изучения глубинного строения земных недр. Помимо реализации высокопроизводительных методик выполнения полевых работ, вибрационные источники по сравнению с импульсными источниками имеют такие преимущества, как: воз-

можность управления параметрами возбуждения колебаний, универсальность и повсеместность применения, безопасность применения, мобильность, экологическая безопасность, высокая экономическая эффективность, более высокая информативность получаемых геофизических данных.

Одна из общих проблем, стоящих перед сейсмическим методом, является потеря средне-высокочастотных составляющих возбуждаемого сигнала в результате фильтрующего действия земной толщи (в первую очередь, ВЧР). При обработке сейсмических данных применяется ряд процедур (например, деконволюция), позволяющих расширить частотный диапазон зарегистрированных колебаний. Однако, при небольших соотношениях сигнал / помеха в высокочастотной области на исходных сейсмограммах применение данных процедур может не дать ожидаемого результата.

Как было указано выше, вибросейсмический метод, в отличие от взрывного или невзрывного импульсного возбуждения колебаний, обладает возможностью управления параметрами излучаемого сигнала, что позволяет во многих случаях решить данную проблему.

Расширить амплитудный спектр регистрируемых сейсмических сигналов возможно путем использования свипов с нелинейным законом изменения текущей частоты, а также комбинированных свипов, состоящих из нескольких ЛЧМ-сигналов, разделенных промежутками времени.

Однако трудности практической реализации этого подхода к решению

проблемы повышения доли высоких частот в спектре посылаемого свип-сигнала связаны с неудобством ручной перенастройки параметров нелинейного свипа к меняющимся вдоль профиля сейсмогеологическим условиям. Обычно, для всей площади работ используется один тип нелинейного свипа, выбранный на участке проведения опытных работ. При этом, конечно, не удаётся на всех участках площади достичь желаемого результата.

Для оптимизации расчёта произвольных нелинейных сигналов при обработке исследуемой площади была разработана технология адаптивной вибрационной сейсморазведки (АВИСейс).

Внедрение АВИСейс, построенной на использовании нелинейных свип-сигналов, адаптированных к сейсмогеологическим условиям каждой площадки возбуждения на профиле, стало возможным с появлением системы управления вибраторами GDS-I (Geophysical Digital System) и специального программного обеспечения (Equalizer), созданных специалистами ООО «Геофизические системы данных». Equalizer при этом обеспечивает автоматизированный контроль в реальном времени спектра регистрируемого поля отраженных волн, формирование корректирующего нелинейного свип-сигнала и передачу его на виброисточники. Благодаря автоматической адаптации параметров свип-сигнала к меняющимся вдоль профиля условиям возбуждения достигается эффект расширения спектра сигнала и, соответственно, повышения разрешенности поля отраженных волн. Кроме того, достигается стабилизация формы и динамических характеристик сигнала вдоль профиля. Достаточно подробно технология АВИС и ее особенности описаны в работах [1-4].

GDS-I – многофункциональная геофизическая цифровая система управления виброисточниками, оснащенная радиосвязью и встроенными GPS / GLONASS приёмниками. Система управления состоит из универсальных устройств, каждое из которых способно работать в двух режимах:

- Encoder – связь между сейсмостанцией и вибраторами по радио;

- Decoder – управление вибраторами.

Отличительные особенности блоков управления GDS-I:

- Современная элементная база;

- Компактная конструкция;

- Совершенный алгоритм регулирования фазы и силы;

- Помехозащищенный способ радиосвязи;

- Возможность работы по методу адаптивной вибрационной сейсморазведки;

- Возможность работы по каналу RTI (Recorder Truck Interface) со всеми отечественными и зарубежными сейсмостанциями и виброисточниками;

- Конструкция блока проста в эксплуатации и ремонте.

GDS-I реализует все стандартные возможности работы с ЛЧМ и НЧМ свип-сигналами. Кроме этого реализовано:

- вычисление параметров адаптивного свип-сигнала;

- вычисление параметров функционального нелинейного свип-сигнала по спектру адаптивного свип-сигнала;

- вычисление и запись в память GF(T) – (Ground Force – «действующая сила») для использования при деконволюции виброграмм и районирования

площади по условиям возбуждения;

Программа «VP» выполняет функции управления и контроля вибросейсмического комплекса. Основные функции программы заключаются в задании

параметров работы дешифраторов, установленных на вибраторах, приёме отчётов о работе вибратора после каждого запуска – PSS (Post Sweep Service) и навигация.

Для повышения производительности сейсморазведочных работ, а также для контроля за положением вибраторов на площади, применяется система спутниковой навигации. Управляющая блоком GDS-I программа позволяет определять и контролировать координаты источников на площади работ, как оператором сейсмической станции, так и оператором вибратора. Для работы с навигацией на вибраторе к Дешифратору подключается планшетный компьютер с установленной программой управления и введенными координатами пунктов возбуждения.

Технология АВИСейс позволяет значительно повышать разрешенность сейсморазведки без уменьшения соотношения сигнал/шум в широком диапазоне глубин.

Применение АВИСейс не влияет на сроки полевых работ т.к. адаптация сигналов происходит в реальном времени.

Эффективность технологии подтверждена на практике результатами опытно-методических и производственных работ, проведенных в различных сейсмо-геологических условиях на территории Российской Федерации: в пределах Русской платформы, в условиях солянокупольной тектоники в Оренбургской области, на севере Западно-Сибирской низменности и в других местах. В целом, полученные материалы свидетельствуют о высоких потенциальных возможностях технологии АВИСейс.

Вместе с тем, экспериментальные и производственные исследования эффективности технологии АВИСейс в различных сейсмогеологических условиях показали, что дальнейшее повышение

эффективности технологии АВИСейс связано с необходимостью оптимизации методики автоматизированной настройки параметров адаптации системы управления вибраторами и, в частности, необходимостью расширения частотного диапазона сигналов, генерируемых вибраторами, в сторону низких частот.

Серийно произведенные виброисточники устойчиво работают в диапазоне 8-10 до 100-150 Гц, что в целом позволяет решать большой круг геологических задач, чем и обусловлено их широкое применение при проведении сейсморазведочных работ.

Начиная с 2008 года за рубежом и в России проведен ряд экспериментальных работ [8-12] с вибрационными источниками, доказывающих необходимость уменьшения начальной частоты вибровоздействия с традиционных 8-10 Гц до 1.5-3 Гц. Обусловлено это как необходимостью расширения частотного диапазона зондирующего сигнала, и, как следствие, получение более компактного сейсмического импульса (5-6 октав) и большей динамической выразительности сигналов, так и более широкими возможностями извлечения литологических характеристик изучаемой земной толщи при дальнейшей обработке зарегистрированных данных с применением алгоритма инверсии сейсмических данных [13 – 15].

Определим интервалы частотного диапазона возбуждаемого вибрационного сигнала следующим образом:

- от 1-1.5 Гц до 10 Гц – ультранизочастотный интервал;
- от 10 до 60 Гц – среднечастотный, и
- от 60 до 100 Гц и более – высокочастотный интервал.

Как было отмечено выше, задача частичной компенсации средне– высокочастотного затухания зондирующего

свип-сигнала, обусловленного фильтрующим действием земной толщи, решается при помощи использования технологии адаптивной вибросейсморазведки АВИСейс [6–7].

Посылка свип-сигнала в ультранизкочастотном диапазоне возможна двумя способами:

1) через проектирование специальных сигналов, позволяющих реализовать возбуждение ультранизких частот стандартными виброисточниками без ущерба для их конструкции (или так называемых в иностранных публикациях dwell-свилов);

2) через конструирование специальных «низкочастотных» виброисточников, позволяющих возбуждать эти частоты. Очевидно, что оптимальный вариант дает совмещение этих двух подходов.

Рассмотрим более подробно пути реализации рассматриваемой задачи, проблемы и пути их преодоления.

В специально сконструированных сигналах (типа «dwell-свип») ультранизкочастотная часть (1.5-10 Гц) изменяется по нелинейному закону таким образом, чтобы инерционная масса виброисточника в указанном частотном диапазоне не развивала амплитуду колебаний, опасных для конструкции виброузла источника.

Одна из задач, которая также должна быть учтена при конструировании dwell-свила - сохранение в низкочастотном диапазоне (1.5-10 Гц) энергии, которая обеспечивала бы получение равномерного амплитудно-частотного спектра по всей длительности зондирующего свип-сигнала.

Это ведет к увеличению длительности низкочастотного участка свип-сигнала, причем если амплитуда будет уменьшена в 2 раза, то длительность необходимо увеличить в 4 раза и т.д. То есть, существу-

ет квадратичная зависимость увеличения длительности от изменения амплитуды в соответствии со следующей формулой [10]:

$$f(t) = 4 \text{ psd} / D^2,$$

где psd – желаемая спектральная плотность излучаемых колебаний, D – сила.

Dwell-свилов уже широко применяются различными западными компаниями. Например, компания Schlumberger при реализации своей технологии UniQ применяет так называемый МД-свип (MD Sweep), который является одной из разновидностей dwell-свилов [9].

Недостатками конструирования МД-свила является то, что при его расчете происходит предварительная оценка различных поверхностных условий изучаемой площади [17] и, далее – на основе опытно-методических работ он вводится как пользовательский свип-сигнал в память системы управления виброисточниками.

В России также разработан на базе отечественной системы управления GDS-II (производства компании «Геофизические системы данных») (Рис. 1) свип-сигнал такого рода, имеющий ряд преимуществ перед западными разработками. Назовем полевую технологию на



▲ Рис. 1. Система управления вибраторами «GDS-II»

основе такого сигнала «низкочастотной (НЧ)»¹).

В разработке GDS-II всё предельно автоматизировано, применён оригинальный запатентованный алгоритм [5], оператору сейсмостанции задаётся только диапазон частот (как правило, от 1.5-2 до 8-10 Гц), в пределах которого будет работать специальный режим оптимальной посылки свип-сигнала. Этот режим выполняет две функции:

1 – не позволяет инерционной массе виброисточника превышать допустимые пределы амплитудных колебаний, то есть обеспечивает безопасную работу стандартного виброисточника в указанном частотном диапазоне (2-10 Гц);

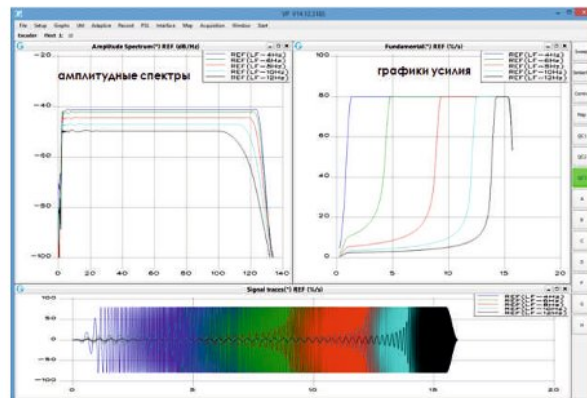
2 – посылает в земную толщу колебания с указанной частотой и сопоставимые по своей энергии со спектральной плотностью оставшейся части зондирующего сигнала. Начиная с 10 Гц и до конечной частоты возбуждается обычный ЛЧМ-свип-сигнал или сигнал, рассчитанный по технологии АВИСейс.

На Рис. 2 показаны характеристики различных dwell-свилов в зависимости от той или иной конечной частоты низкочастотной части свип-сигнала, которые были опробованы при испытаниях на источниках СВ-30/100Б «Русич» производства компании «Геосвип».

На Рис. 3 показаны графики сигнала, снятого при возбуждении виброисточником «Русич» (система управления GDS II) низкочастотного сигнала с начальной частотой $F_n = 2$ Гц, $F_{кон} = 128$ Гц, $F_{нч} = 8$ Гц.

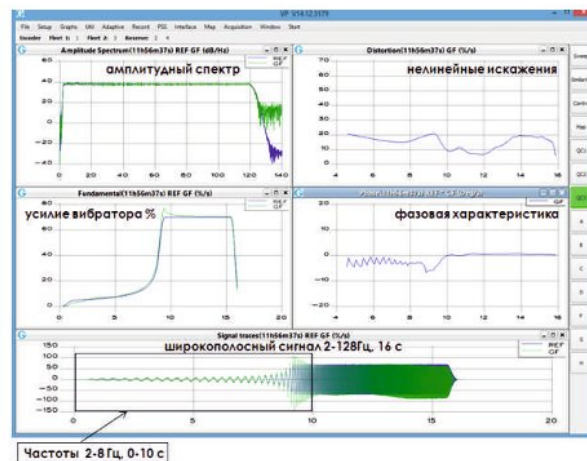
На графиках хорошо видны следующие закономерности: для того, чтобы был реализован равномерный спектр

1). «Низкочастотной» в том смысле, что начальная частота свип-сигнала находится в пределах его ультранизкочастотной части (1.5 – 6 Гц).



▲ Рис. 2. Семейство широкополосных сигналов 2-128 Гц.

сигнала, при помощи специально рассчитанного нелинейного dwell-свипа необходимо низкочастотную часть свип-сигнала (2-8 Гц, 2-9 Гц, 2-10 Гц) возбуждать в течение достаточно длительного времени, зачастую большего, чем оставшуюся – в нашем случае, от 8 (9, 10) Гц до 128 Гц.



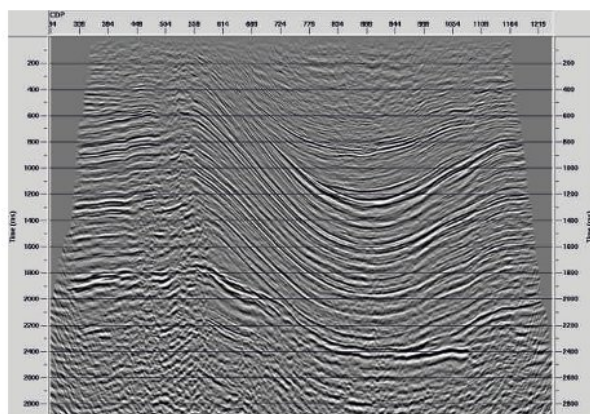
▲ Рис. 3. Широкополосный свип-сигнал 2-128 Гц.

Тем не менее, данный режим может быть исключительно полезен при проведении региональных работ и работ ЗД, где требуется освещение глубинной части разреза. Очень важно, что при этом может быть использовано стандартное оборудование (в первую очередь, виброисточники) с гарантией исключения выхода из строя гидравлического оборудования при отработке низких частот.

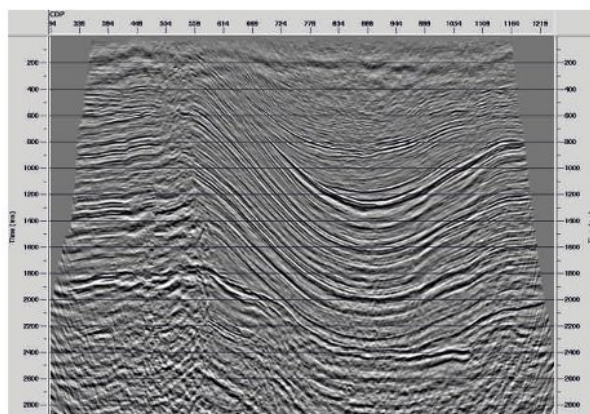
На Рис. 4б показан участок профиля, отработанного с низкочастотным свипом в Узбекистане (система управления GDS-II), по сравнению со стандартным (линейным) на Рис. 4а. Очевидна лучшая динамическая выразительность результативного временного разреза, четкое выделение разломной зоны, увеличение глубинности исследований.

Второй способ решения – создание виброисточника, позволяющего развивать полную мощность с как можно меньшей начальной частоты.

В настоящее время уже разработаны как минимум две модификации компанией Sercel (Франция) – с 5.4 Гц, компанией BGP (Китай) – с 3.0 Гц. Думается, что аналогичную разработку по силам осуществить и отечественной компании «Геосвип», что является исключительно актуальной задачей.



▲ Рис. 4а. Стандартный свип 6-90 Гц.

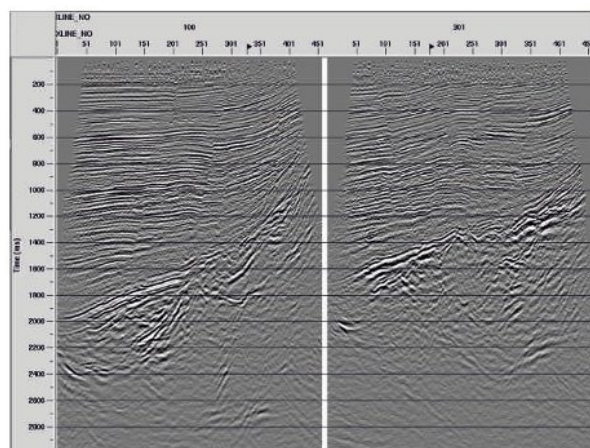


▲ Рис. 4а. Низкочастотный свип 3-90 Гц.

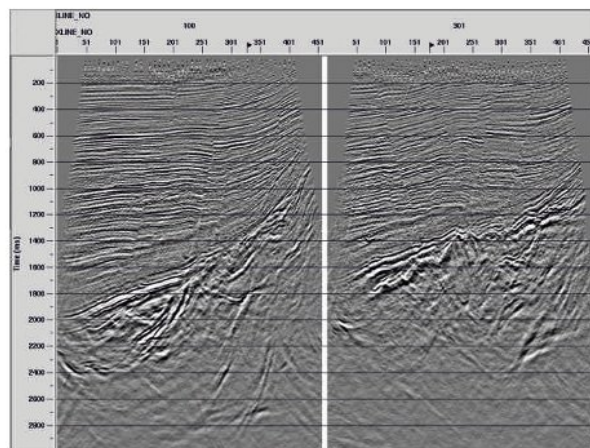
При разработке такого источника необходимо выполнить, как минимум, следующее:

1. Увеличить ход инерционной массы и ее вес;
2. Сгладить пульсации потока гидравлической жидкости на низких частотах;
3. Уменьшить уровень нелинейных искажений.

В декабре 2014 г были проведены производственные работы по технологии АВИСейс на одной из площадей в Китае (Рис 5, 6).



▲ Рис. 5. Разрез по инлайнам 100 и 301, стандартный свип.ис. 1. Плавни.



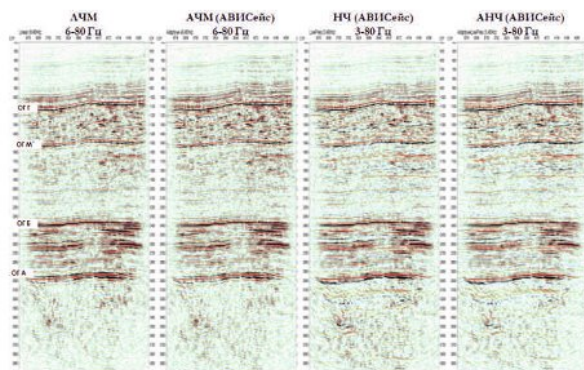
▲ Рис. 6. Разрез по инлайнам 100 и 301, широкополосный свип 1.5-90 Гц.

Закономерно возникает вопрос: если идёт речь о возбуждении ультранизких частот, то логично использовать при регистрации сейсмоприёмники с более

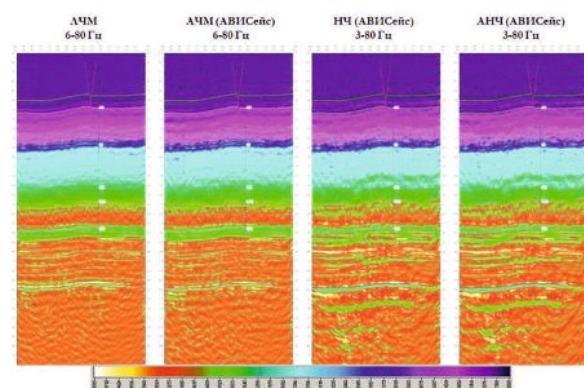
низкой резонансной частотой. Такие сейсмоприёмники разработаны и серийно производятся (Франция – 5 Гц, Китай – 4.5 Гц). И в ближайшие годы неминуем переход на данные типы геофонов. Однако, в настоящее время практически все полевые сейморазведочные партии укомплектованы сейсмоприёмниками с резонансной частотой 10 Гц. Тем не менее, опыт использования «низкочастотного возбуждения» в России, Омане и Китае показывает, что геологическая информативность существенно возрастает и в этом случае [14, 16, 17].

Рассмотрим эксперимент, выполненный на севере Тюменской области с целью сравнения технологий возбуждения линейного, низкочастотного и комбинированного – низкочастотно-адаптивного сигналов. Последняя является уникальной российской разработкой, не имеющей мировых аналогов, и обеспечивающей возбуждение как ультранизких частот, так и компенсацию затухания средне-высокочастотной части зондирующего сигнала, обусловленного фильтрующим действием земной толщи (назовём данный сигнал и технологию «широкополосной» (АНЧ) или, в англоязычной аббревиатуре Broadsweep.

Сравнение временных разрезов, полученных по единому графу обработки с применением деконволюции демонстрирует увеличение глубинности в случае НЧ- и АНЧ-сигналов, динамической выразительности, расширение спектра ФАК как в низкочастотную, так и высокочастотную части. Также, при последующей инверсии в разрезы акустического импеданса, виден значительный прирост геологической информативности, особенно в районе складчатого фундамента, на временах более 3 сек (Рис. 7, 8, 9, 10).



▲ Рис. 7. Сравнение временных разрезов. Повышение глубинности без потери разрешенности.



▲ Рис. 8. Результат псевдоакустической инверсии.



▲ Рис. 9. Сравнение ЛЧМ, АНЧМ, НЧ и АНЧ сигналов.

Симбиоз современной системы управления GDS-II и источника нового поколения позволит в кратчайшие сроки выйти на мировой уровень в области возбуждения упругих колебаний с вибрационными источниками.

Таким образом, в настоящее время на основе систем управления GDS-I и GDS-II реализованы три технологии АВИСейс:

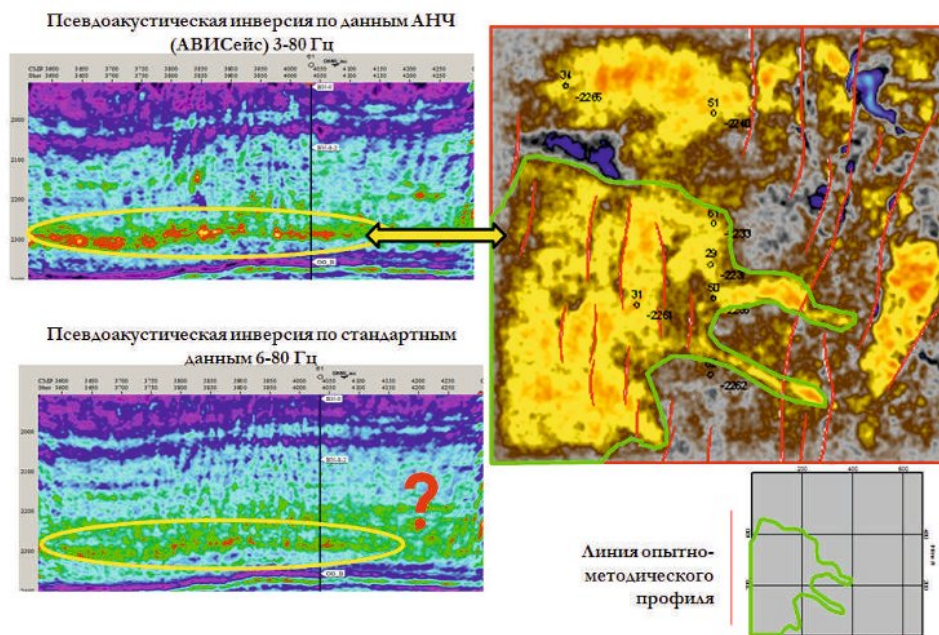


Рис. 10. Проявление дистальной части конуса выноса. Неоком.

- адаптивная базовая (АЧМ), позволяющая компенсировать средне-высоко-частотное затухание энергии, обусловленное фильтрующим действием земной толщи;

- «низкочастотная» (НЧ), позволяющая смещать начальную частоту вибрации в сторону «ультранизких» частот;

- «широкополосная» (АНЧ), позволяющая производить расширение спектра посылаемых колебаний как в сторону «ультранизких» частот, так и в сторону высокочастотной части спектра.

Использование данных модификаций адаптивной вибросейсморазведки позволяет:

1. Получать данные, сопоставимые и превышающие по динамической выразительности взрывные.
2. Уже сейчас реализовать режим низкочастотного воздействия на стандартных виброисточниках и сейсмоприемниках.
3. Достичь расширения спектра в широком диапазоне частот.
4. Увеличить глубинность исследований и контрастность изображения тектонических нарушений.

5. Обеспечивать оптимальное применение алгоритмов инверсии сейсмических данных с целью определения литологических характеристик исследуемой земной толщи.

6. В значительной степени повысить детальность и, соответственно, достоверность окончательной геологической модели месторождения.

Как итог – технология широкополосной наземной вибросейсморазведки высокого разрешения.

Автор выражает благодарность за помощь в написании статьи Некрасову И.А., Короткову И.П. и Гридину П.А.

Литература

- Жуков А.П., Шнеерсон М.Б. [2000] Адаптивные и нелинейные методы вибрационной сейсморазведки / М.: ООО «Недра-Бизнесцентр»
- Жуков А.П. и др. [2011] Сейсморазведка с вибрационными источниками / «Издательство ГЕРС», Тверь
- Жуков А.П. и др. [2011] Адаптивная вибросейсморазведка в условиях неоднородного строения верхней части геологического разреза / Технологии сейсморазведки №2, 5-12

Жемчугова В.А. Бербенев М.О., Наумчев Ю.В. [2015] Использование новых технологий сейсморазведочных работ для повышения эффективности геологоразведочных работ (На примере верхнемеловых отложений севера Западной Сибири) / Технологии сейсморазведки №4., 80-88

Патент на изобретение № 2570587 от 22.10.2014г / Гридин П.А., Жуков А.П., Шехтман Г.А.

А.П.Жуков, И.В.Тищенко, В.С.Горбунов и др. [2015] Первые результаты работ по адаптивной технологии вибросейсморазведки на примере изучения геологического строения северо-восточной части Жигулевско-Пугачевского свода / Приборы и системы разведочной геофизики. № 3(37)

А.П.Жуков и др. [2014] / Технология адаптивной сейсморазведки», доклад на конференции «Современные технологии»

Bagaini C. [2007] Enhancing the low-frequency content of vibroseis data with maximum displacement sweep [Conference]. - [s.l.] : 69th Conference & Exhibition, EAGE

Bagaini, C. [2008] Low-frequency vibroseis data with maximum displacement sweeps. Leading Edge, May, 582-591

Tellier, N. and others [2015] Vibroseis equipment for efficient low-frequency generation and high-productivity operations. First Break 33, January, 77-83

Sallas, J. [2010] How do hydraulic vibrators work? A look inside the black box. Geophysical Prospecting 58, 3-17

Wei, Z. and Pan, Y. [2015] Vibroseis source improvements towards broadband land acquisition. First Break 33, January, 61-65

Baeten, G. and others [2013] The use of low-frequencies in a full-waveform inversion and impedance inversion land seismic case study. Geophysical Prospecting, doi 10.1111/1365-2478.1210

Mahrooqi, S. and others [2012]. Land seismic low frequencies: acquisition, processing and full wave inversion of 1.5 - 86 Hz. SEG Las Vegas Annual Meeting

Sirgue, L. [2006] The Importance of Low

Frequency and Large Offset in Waveform Inversion. 68th Meeting, EAGE, Extended Abstracts, A037

Glushchenko F. Ofowena A. [2015] Broadband Surveys Conducted in Abu Dhabi, UAE [Conference]. - [s.l.] : EAGE Broadband Seismics Workshop, 16-17 November 2015, Abu-Dabi

Zhukov, A.P. [2014] Adaptive Vibroseis (AVSeis): Hardware, Software and Applications. SEG Houston Annual Meeting

Подробнее об авторе



Жуков
Александр Петрович

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