

Адаптивные технологии вибрационной сейсморазведки. Часть II

■ Жуков А.П., Коротков И.П.

1. Технология адаптации в ультранизком частотном диапазоне (1-10 Гц). Low-dwell свип

Расширение диапазона частот регистрируемых вибросейсмических сигналов становится основной тенденцией развития технологии вибросейсморазведки.

Как правило, вибросейсмические источники, по своим техническим характеристикам обеспечивают нормальную работу в пределах 8 – 80 Гц. Технология АВИСейс обеспечивает подъём средне – и высокочастотных составляющих, что зачастую достаточно для решения многих геологических задач. Однако, чтобы выйти на уровень качества, обеспечиваемого взрывной методикой, необходимо расширить частотный диапазон также и в низкочастотную сторону.

Определим диапазоны частот желаемого свип-сигнала следующим образом (Рис. 1): (1-3 Гц) – 10 Гц – ультранизкие, 10-60 Гц. – средние, 60=>100 Гц - высокие.

Следует заметить, что расширение частотного диапазона вибросигнала в сторону ультранизких частот, кроме увеличения октавности сигнала (что само по себе неплохо и приводит к улучшению формы кросскорреляционных функций с

одновременным уменьшением уровня боковых лепестков) увеличивает достоверность псевдоакустических преобразований сейсмических трасс.

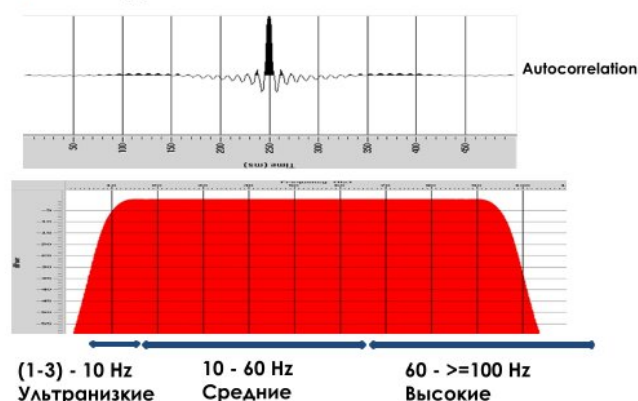
Идея ухода в область ультранизких частот была впервые высказана в статье [Bagaini, 2008], что в результате привело к появлению методики MD-свип.

Практическая реализация данной идеи возможна двумя путями. Первый – создание виброисточника, уверенно и надежно работающего в ультранизком диапазоне частот; второй -создание систем управления, генерирующих сигнал, накачивающих достаточную энергию в ультранизком диапазоне стандартными виброисточниками. Второй путь является исключительно актуальным, так как в мире и в России имеется огромный парк стандартных виброисточников, работающих в относительно узкой частотной полосе,

Первый путь реализуется производителями виброисточников (BGP, Sercel, I/O, Геосвип), которые решают эту задачу увеличивая ход инерционной массы, модернизируя систему гидроаккумуляторов для сглаживания пульсаций, увеличивая мощность гидравлического насоса и т.д. [Zhouhong Wei and Yuanzhou Pan, 2015].

Второй путь, и он реализован в отечественной системе управления GDS-II, создание сигнала, позволяющего накачивать энергию в ультранизкочастотном диапазоне стандартными виброисточниками. При этом реализуются как минимум два условия, - первое- сигнал должен быть малоамплитудным во избежание выхода из строя виброисточника, второе – уровень энергии в данном

▼ Рис. 1. Диапазоны частот свип-сигнала.



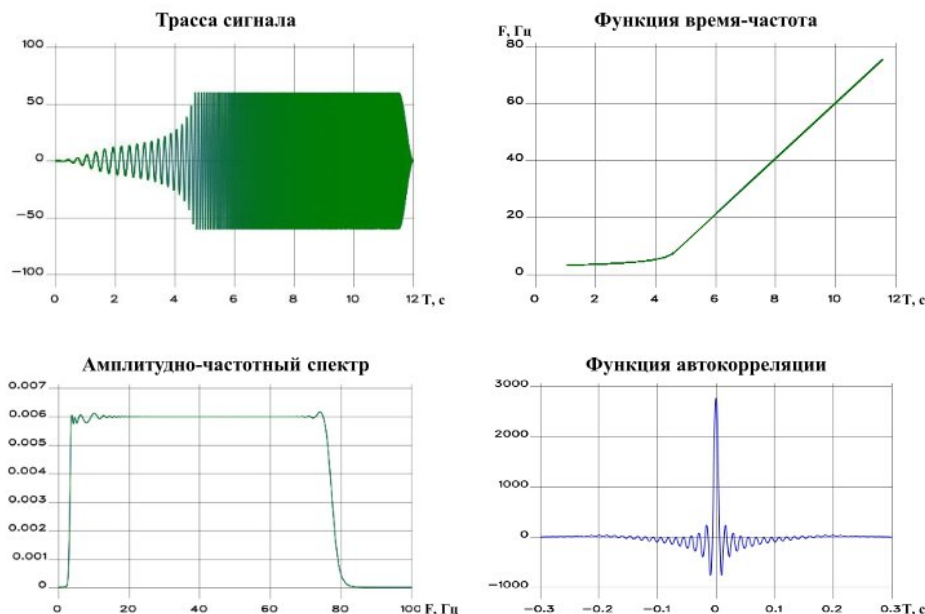
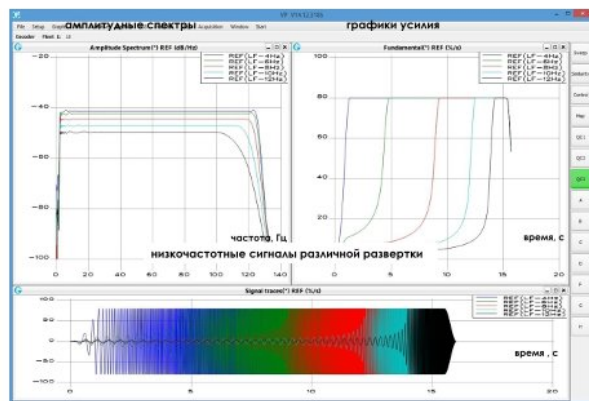


Рис. 2. GDS-II. Встроенный контроль вибрации на низких частотах.

Рис. 3. Семейство низкочастотных сигналов (Low-dwell) 2-128 Гц.



диапазоне должен быть сопоставим с энергией оставшейся части ЛЧМ-сигнала (рис. 2 и 3).

Очевидно, что совместное применение двух подходов даёт оптимальный результат.

Однако необходимо помнить, что сохранение уровня возбуждения требует снижения скорости развертки свип-сигнала. В соответствии с формулой

$$t(f) = 4D / F^2,$$

где D – желаемая плотность колебаний, F – сила,

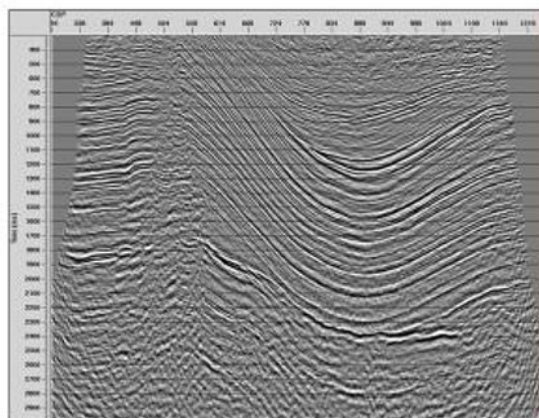
При заданной частоте длительность развертки должна увеличиваться пропорционально квадрату снижения

уровня возбуждения. При одинаковой длительности развертки и изменении диапазона ультранизких частот, происходит снижение уровня посылаемой в грунт энергии (рис. 3).

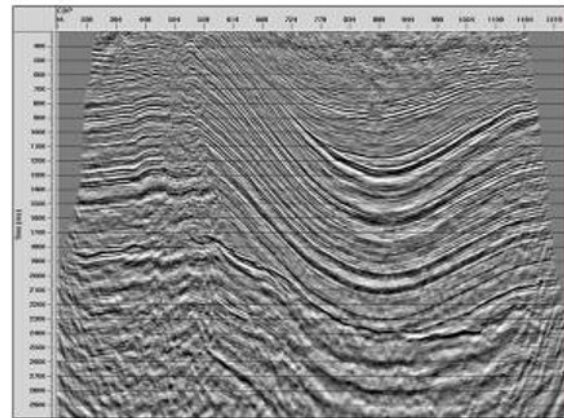
В западной литературе сигналы подобного типа носят название Low-dwell. На рис. 4 показаны результаты сравнения обычного и низкочастотного сигнала с применением системы GDS-II. Смещение начальной частоты в область ультранизких частот способствует повышению глубинности, улучшается рельефность изображения, и будет полезно при дальнейшей обработке, особенно при инверсии сейсмических данных.

2. Технология адаптивной широкополосной вибросейсморазведки Broad-sweep®

Как было рассмотрено выше, расширение полосы возбуждаемых частот вибросигнала в ультранизкую область позволяет увеличить октавность регистрируемых сейсмических данных, что повышает эффективность вибрационных исследований. Однако при этом остается нерешенным вопрос компенсации средне-высокочастотного затухания,



а



б

▲ Рис. 4. Результаты сравнения линейного и низкочастотного сигнала: а - стандартный линейный свип 10-90 Гц / 10 с; б - низкочастотный свип 3 - 8 - 90 Гц / 10 с.

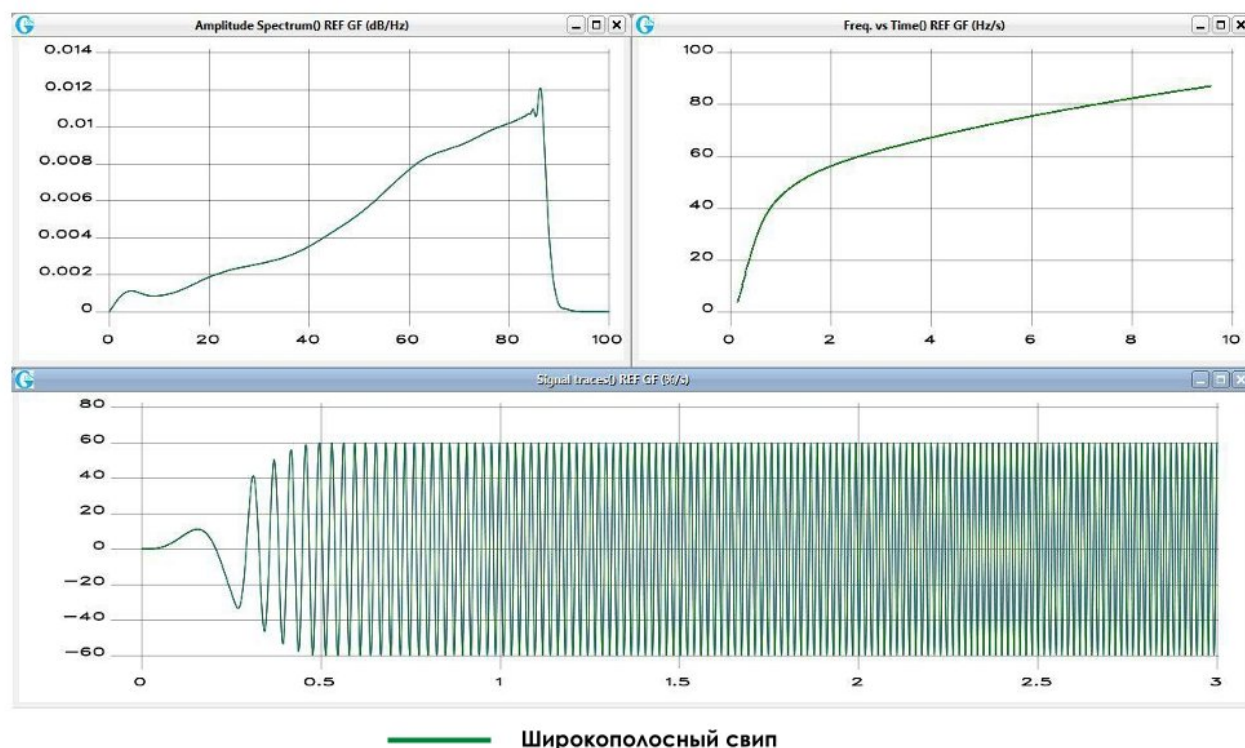
обусловленного фильтрующим действием земной толщи.

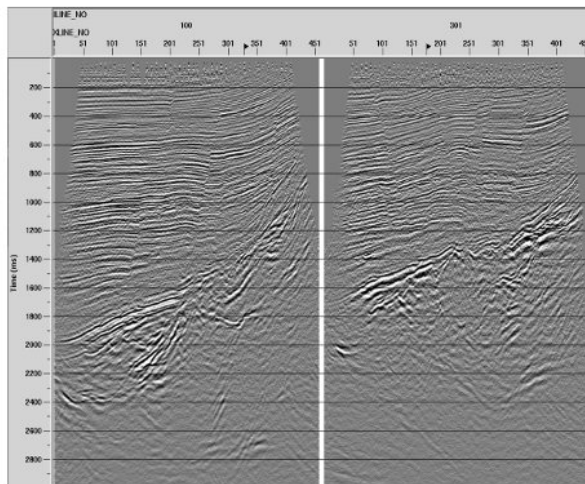
В рамках системы управления виброисточниками GDS-II эта задача была решена. Разработан широкополосный сигнал, позволяющий расширять частотный диапазон как в сторону низких, так и средне-высоких частот. На основе данного сигнала запатентована технология и товарный знак BROADSWEEP® [Гридин и др., 2014] По своей сути данная технология является аналогом технологии

АВИСейс, но с одним существенным отличием, - в качестве настроечного свип-сигнала используется низкочастотный сигнал (Low-dwell) – см. рис. 5.

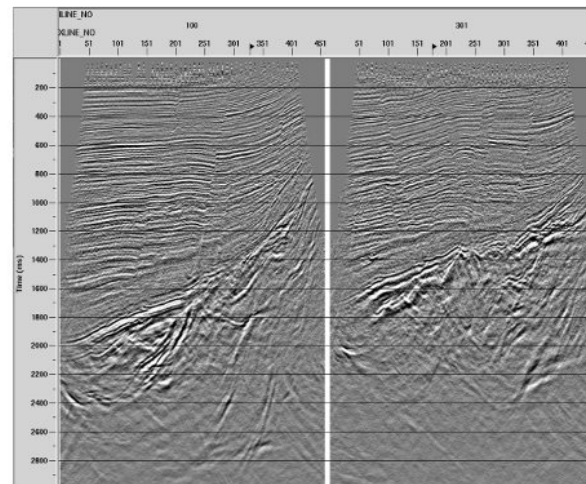
Существует также возможность реализации технологии без настроечного свипа. В настоящее время технология широко опробована в различных сейсмогеологических условиях, и по сути является единственным методом, позволяющим одновременно увеличивать глубину исследований и разрешенность

▼ Рис. 5. Характеристики широкополосного свип-сигнала.





а



б

▲ Рис. 6. Результаты сравнения линейного и широкополосного сигнала:
а - стандартный линейный сигнал 8-90 Гц; б - широкополосный сигнал 1,5-90 Гц.

данных. На рис. 6 приведены результаты работ в Китае по стандартной технологии и технологии Broad sweep®.

Что можно видеть на данных рисунках? Первое – увеличение глубинности за счет генерации низких частот, второе – подчеркивание за счет тех же низких частот корней глобальных разломов и третье – за счет широкополосности изображение становится рельефным, динамически более выраженным. Применение данной технологии позволяет говорить о возможности получения результирующих данных на уровне, а зачастую и превосходящих взрывные.

3. Опытно-методические работы по модификациям адаптивной технологии. Оренбургская-4

Данные работы были проведены в пределах площади Оренбургская-4 (Оренбургское газоконденсатное месторождение) с целью сравнения стандартной технологии с ЛЧМ-сигналом и различными методиками адаптивной технологии. Участок работ был выбран с таким расчетом, что в пределах его были глубокие скважины с измерениями акустического импеданса. Работы выполнялись под общим методическим руководством ООО «НПП «Спецгеофизика»

силами сейсмпартии ООО «ТНГ-Групп». Общий объем 3Д исследований составил 35 кв.км с методико-техническими характеристиками, указанными в Таблице 1.

Использовалась следующая аппаратура:

- телеметрическая система сбора сейсмической информации Sercel 428XL;
- вибрационные источники сейсмических колебаний NOMAD 65;
- блоки управления сейсмическими виброисточниками GDS-II;

На каждом ПВ исследуемой площади было реализованы следующие сигналы:

- стандартный линейный свип (ЛЧМ) 8–110 Гц, 12 с
- адаптивный свип (АЧМ) 6 – 110 Гц, 12 с, параметр регуляризации 15%
- низкочастотный свип (Low-dwell, НЧ) 3–8-110 Гц, 12 с
- широкополосный свип (Broad sweep, АНЧ) 3–8-110 Гц, 12 с.

Карта кратности и схема отстрела показаны на рис. 7, исходные сейсмограммы и их спектры на рис. 8. Анализ посылаемых и принимаемых сигналов приведён ниже. Для корректного сравнения полученные данные были обработаны по единому графу.

Рассмотрим полученные результаты.

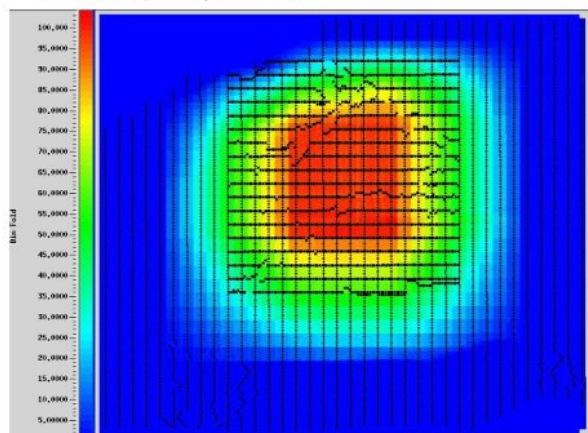
Параметры	Значение			
Станция	Sercel – 428XL#16			
Тип работ	3D МОГТ			
Расстояние между линиями приема, м	300			
Расстояние между линиями возбуждения, м	300			
Расстояние между пунктами приема, м	50			
Расстояние между пунктами возбуждения, м	50			
Число активных каналов на линию приема	120			
Число линий в полосе	20			
Количество активных каналов в расстановке	2400			
Максимальное удаление взрыв-прибор, м	4207,2			
Тип сейсмических приемников	GS 20-DX			
Длина записи, мс	6000			
Шаг дискретизации, мс	2			
Тип источника	NOMAD 65			
Усилие воздействия, %	60			
Длина группы, м	35			
Количество источников в группе	3-4			
Длина свипа, мс	12000+6000			
Тип свипа	ЛЧМ	АЧМ	НЧ	АНЧ
Начальная частота, Гц	8	6	3-8	3-8
Конечная частота, Гц	110	110	110	110

▲ Табл.1.

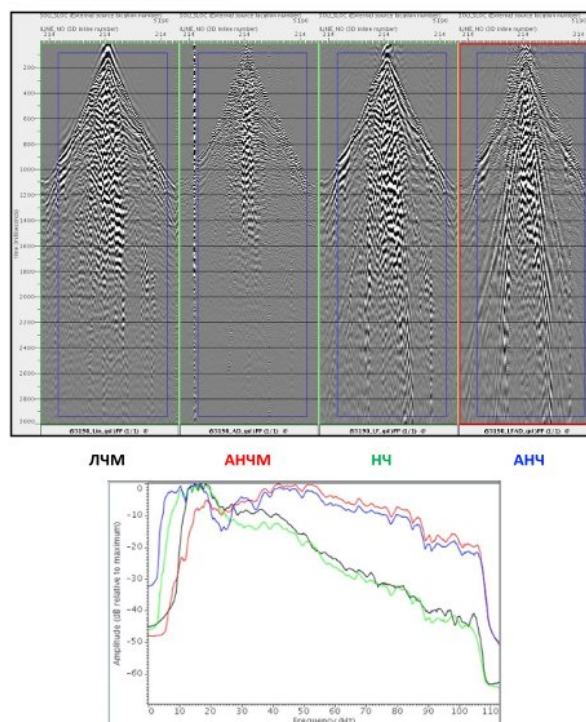
На рис. 9 приведены вертикальные временные срезы обработанных кубов данных.

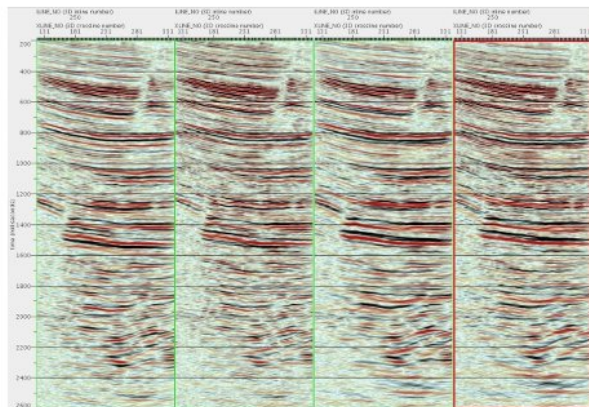
При визуальной оценке временных разрезов, особенно фрагмента, показан-

▼ Рис. 7. Карта кратности и схема расположения линий ПВ и ПП на площади работ.

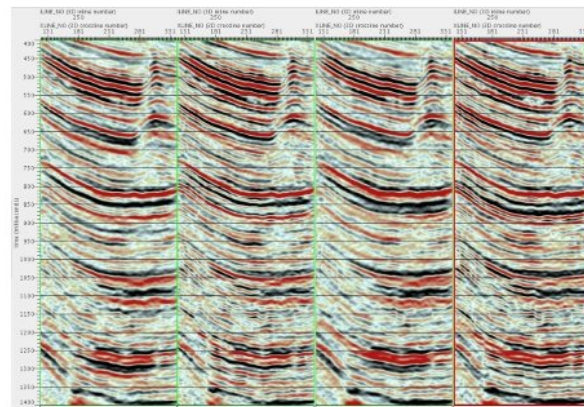


▼ Рис. 8. Исходные сейсмограммы и их спектры.





а



б

▲ Рис. 9. Сравнение вертикальных срезов кубов 3Д: а – интервал времен 200 – 2600 мс; б – интервал времен 400 – 1400 мс.

ного на рис.9, б, можно отметить несомненное увеличение разрешенности сигналов при применении технологии АВИСейс, увеличение глубинности при использовании НЧ (низкочастотного Low-dwell) свипа и одновременное увеличение глубинности и разрешенности при Broad sweep-сигнале. Этот вывод подтверждается также спектрами (рис. 10) и горизонтальными срезами (рис. 11).

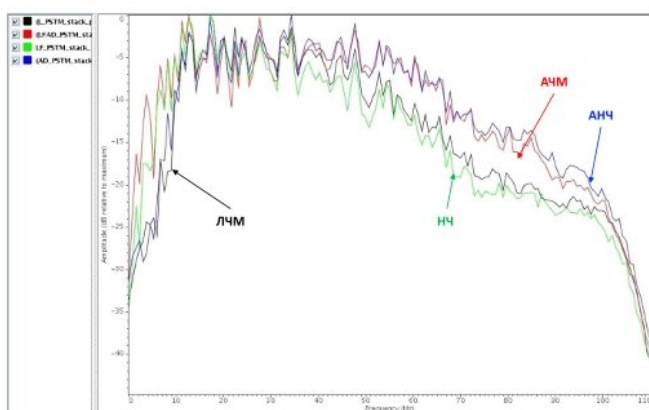
Прежде чем продолжить анализ полученных данных, сделаем небольшое отступление на тему правомочности использования геофонов с резонансной частотой 10 Гц, при посылке ультранизкочастотных составляющих сигнала с 3 Гц и ниже. Ряд экспериментальных сравнений, а также анализ амплитудно-частотных характеристик геофонов

показывает, что крутизна среза левой части позволяет регистрировать ультранизкие частоты, вносящие весомый вклад в результирующий сигнал, повышая октавность с 3-4 октав до 5-6. Появившиеся 4.5 и 5 Гц геофоны позволяют более оптимально регистрировать низкие частоты, но здесь необходимо учитывать возрастающую при регистрации энергию низкочастотных поверхностных волн.

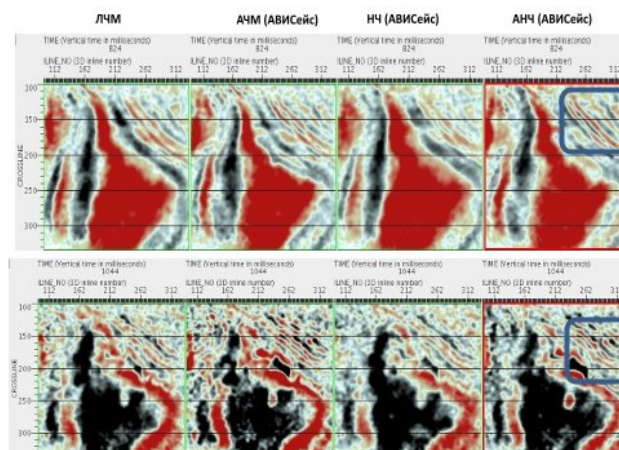
На рис. 12 показаны полосовые фильтрации (по октавам) разрезов, полученных по всем вариантам методик, где отчетливо видно расширение спектров сигнала в сторону низких и высоких частот (до 6 октав).

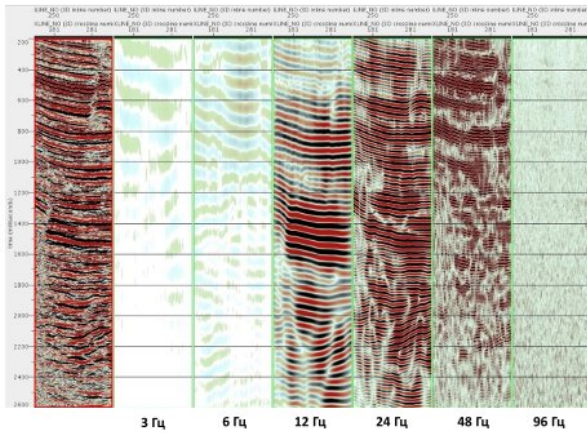
Наличие в пределах участка работ двух скважин с акустикой позволило получить

▼ Рис. 10. Сравнение амплитудно-частотных спектров волнового поля для различных сигналов.

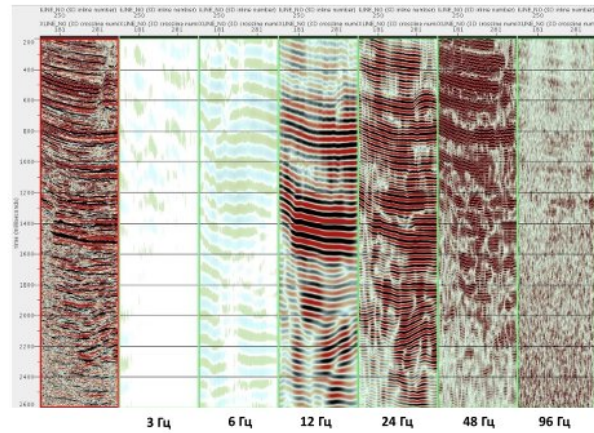


▼ Рис. 11. Сравнение горизонтальных срезов кубов 3Д.

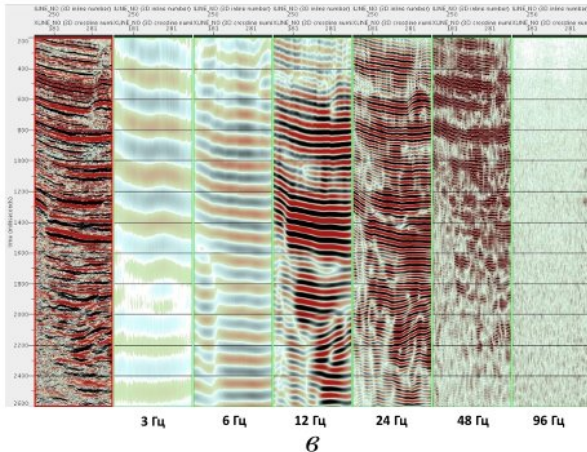




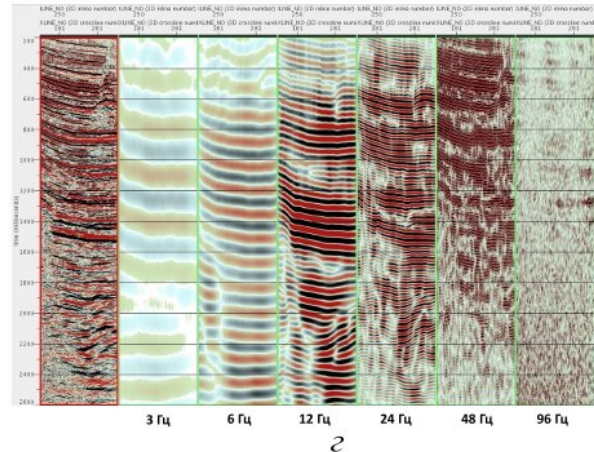
а



б



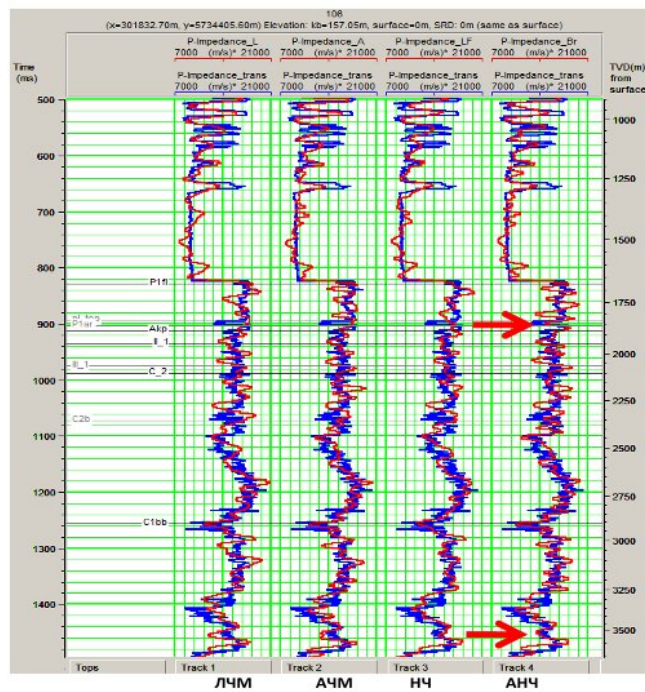
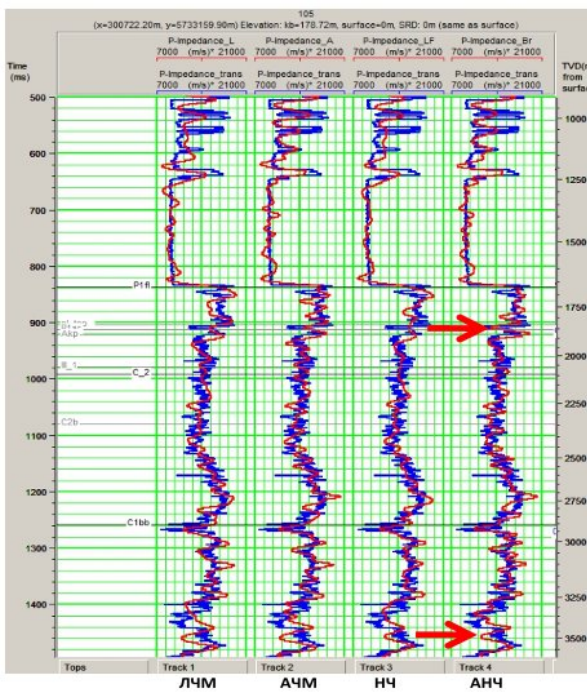
в



г

▲ Рис. 12. Полосовая фильтрация (по октавам) разреза, полученного по методике: а – ЛЧМ стандартная; б - адаптивная; в - низкочастотная; г – широкополосная.

▼ Рис. 13. Сравнение исходных и расчетных кривых акустического импеданса: синий цвет – каротажные кривые; красный цвет – кривые после псевдоакустических преобразований сейсмических трасс.



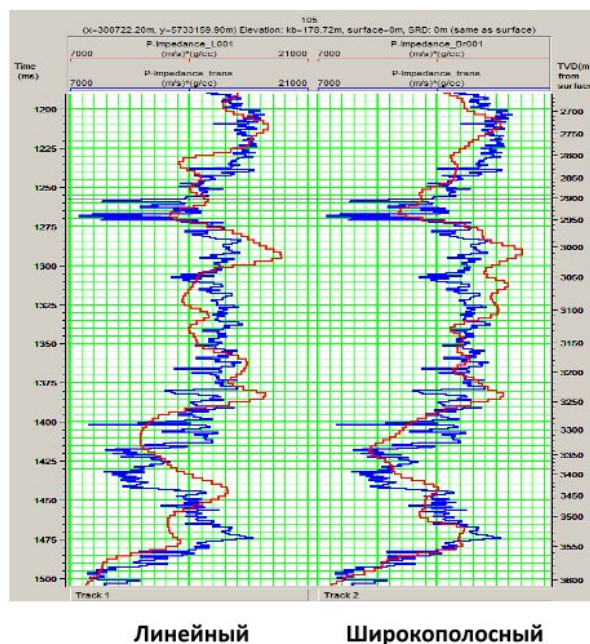


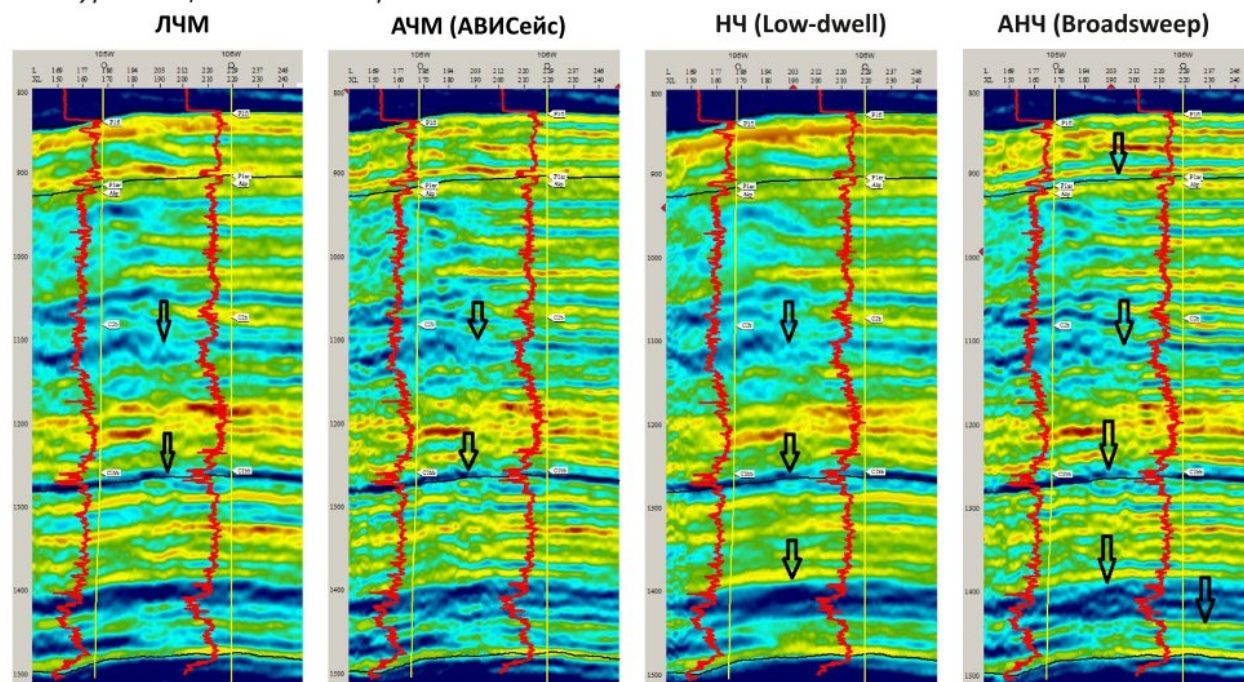
Рис. 14. Сравнение исходных и расчетных кривых акустического импеданса при минимальном влиянии модели (0.001 %): синий цвет – каротажные кривые; красный цвет – кривые после псевдоакустических преобразований сейсмических трасс.

некоторые количественные оценки, характеризующие результаты, полученные по той или иной методике.

На рис. 13 – 15 показаны результаты сравнения акустических импедансов, измеренных в скважинах (синий цвет), и полученных из сейсмических данных (красный цвет).

Визуально, на широкополосном варианте (АНЧ), на времени 910 мс,

Рис. 15. Сравнение фрагментов разрезов псевдоакустического импеданса на уровне целевого интервала.



отчетливо выделяется маломощный пласт с повышенными значениями импеданса, четко коррелирующий с реальными акустическими данными скважины 105. Как известно, при выполнении операции инверсии, в сейсмические данные добавляются модельные низкочастотные данные, которые обычно берут из скважинных исследований.

В нашем случае была выполнена инверсия с использованием модельных данных (35%) и без (значение модели 0.001%).

Далее подсчитывались среднеквадратичные отклонения значений акустического импеданса сейсмических данных от каротажных (табл.2).

На рис 17 показаны кроссплоты, которые также демонстрируют более высо-

▼ Табл. 2. Оценка ошибки прогноза акустического импеданса.

Тип данных	Скв.105 Hard	Скв.106 Hard	Скв.105 Soft	Скв.106 Soft
ЛЧМ	1953.2	1823.41	1889.53	2190.66
Адаптивный	1781.5	1868.41	1626.17	2208.57
Низкочастотный	1731.42	1624.4	1626.02	1683.35
Широкополосный	1692.91	1777.64	1595.87	1821.14

Hard – алгоритм HardConstraint. 35% ограничение ваяния модели.

Soft – алгоритм SoftConstraint. Процент ваяния модели на результат инверсии 0,001%.

кую достоверность низкочастотных и широкополосных данных.

Количественный анализ качества прогноза акустического импеданса показал, что расширение спектра по технологии BROADSWEEP® в область ультранизких частот на 1 октаву при полевых исследованиях ведёт к снижению ошибки прогноза акустического импеданса. При выполнении псевдоакустических преобразований с минимальным влиянием модели (имитация дефицита скважинной информации) выявлено снижение ошибки прогноза акустического импеданса в 1,25 раза.

Таким образом, данный эксперимент убедительно показал необходимость расширения частот вибросигнала как в сторону низких, так и высоких частот, что позволяет повысить качество получаемого изображения изучаемых земных недр, а также увеличить достоверность проводимых исследований.

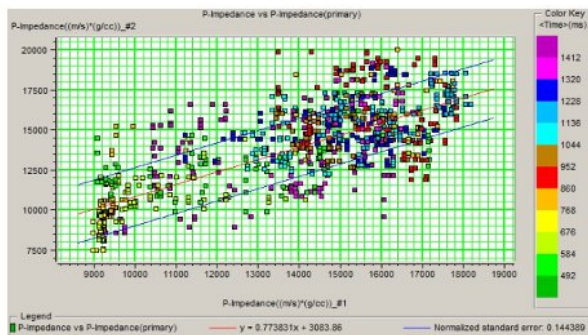
4. Анализ возбуждаемых и регистрируемых сигналов по модификациям адаптивной технологии

В рамках обработки результатов опытно-методических работ на площади Оренбург-4 был проведен анализ

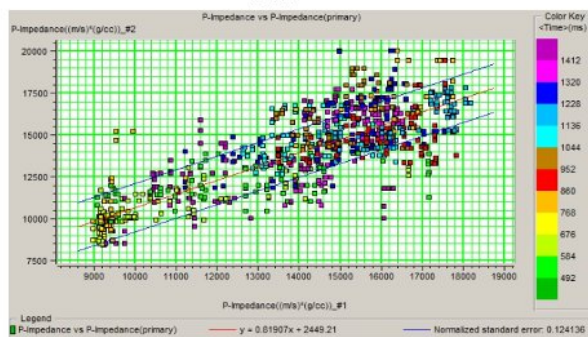
возбуждаемых и регистрируемых сигналов.

На рис. 18 показана часть коррелограмм, зарегистрированных при возбуждении стандартного ЛЧМ-сигнала ($\Delta F = 8 - 110$ Гц), низкочастотного (НЧ 3 – 110 Гц), или в западной транскрипции –Low-dwell сигнала, адаптивного (6 - 110 Гц), адаптивного широкополосного (BROADSWEEP, 3 – 110 Гц) сигнала. Кроме этого изображены спектры соответствующих возбуждаемых сигналов.

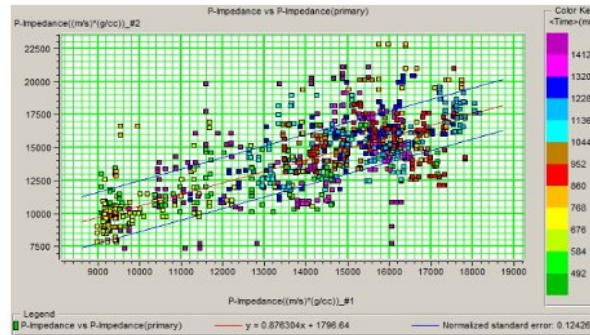
Визуально можно отметить следующее. По сравнению с линейным, адаптивный сигнал дает значительно более разрешенный отклик; низкочастотный (Low-dwell), за счет смещения возбуждаемых колебаний в низкочастотную область (3 Гц), также выглядит более разрешенным, но в меньшей степени, чем адаптивный; адаптивный широкополосный (АНЧ или BROADSWEEP) такой же разрешенный как адаптивный, и за счет добавления низких частот (с 3 Гц) не страдает и глубинность исследований. Понятно, что в случае низкочастотного и широкополосного сигналов усиливается поверхностная волна, но в настоящее время, она при помощи многочисленных алгоритмов присутствующих в любой системе обработки, легко



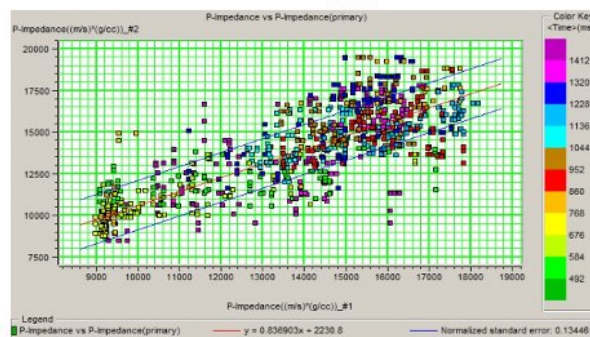
ЛЧМ



НЧ



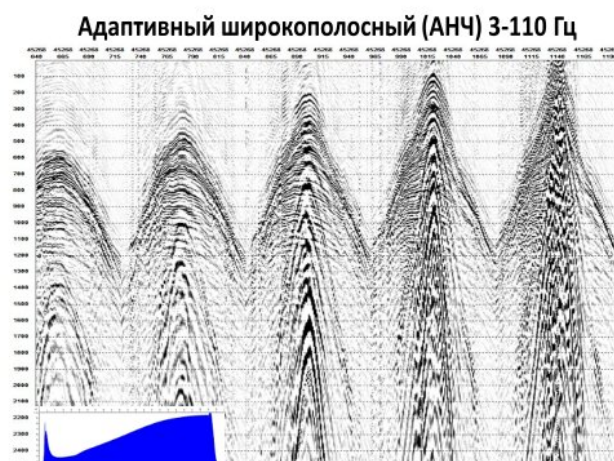
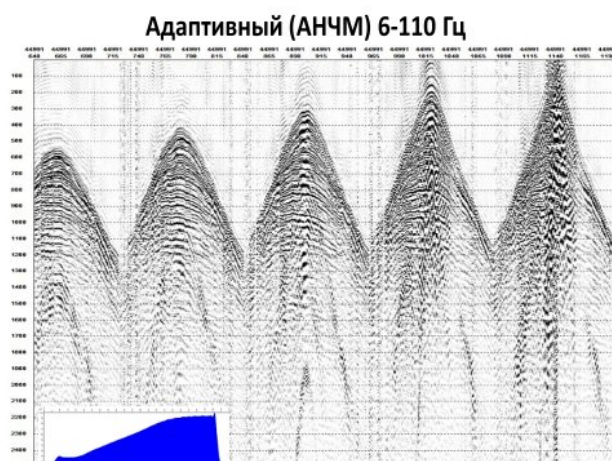
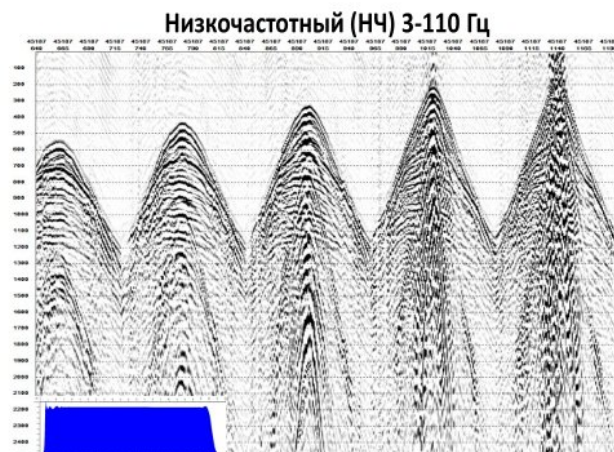
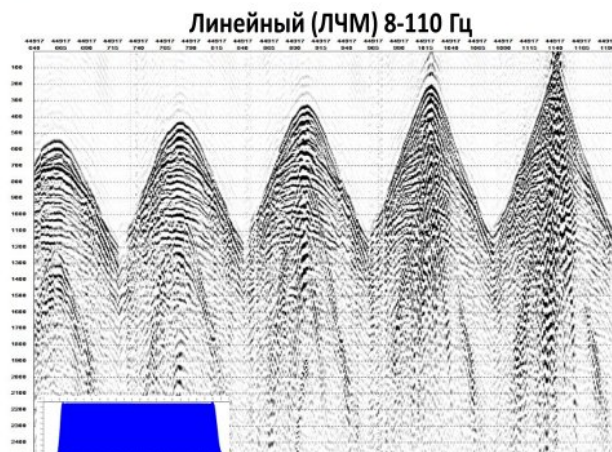
АЧМ



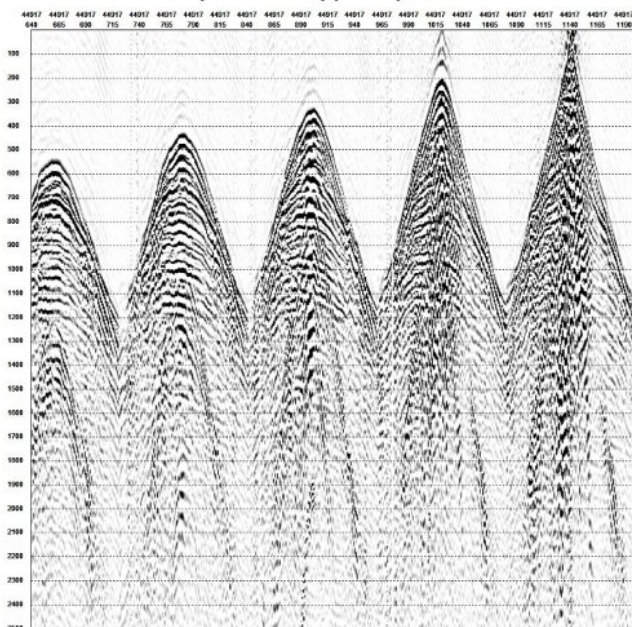
АНЧ

▲ Рис. 16. Оценка ошибки прогноза акустического импеданса. Ось X – импеданс, измеренный в скважине; ось Y – импеданс, полученный из сейсмических данных.

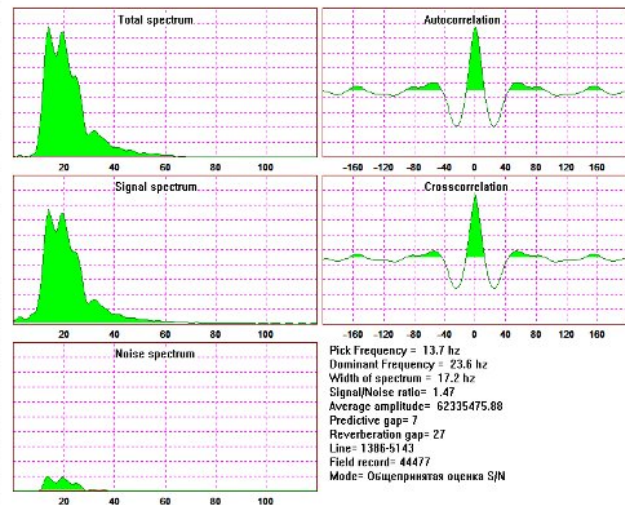
▼ Рис. 17. Сравнение откликов на различные сигналы.



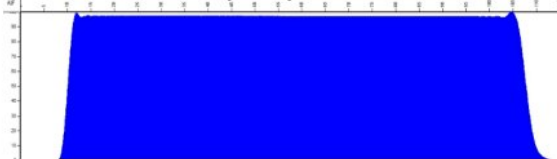
Фрагмент коррелограммы



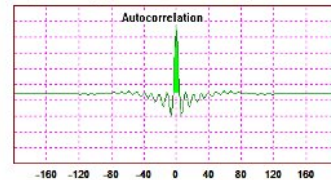
Спектральный анализ отклика



Спектр опорного сигнала

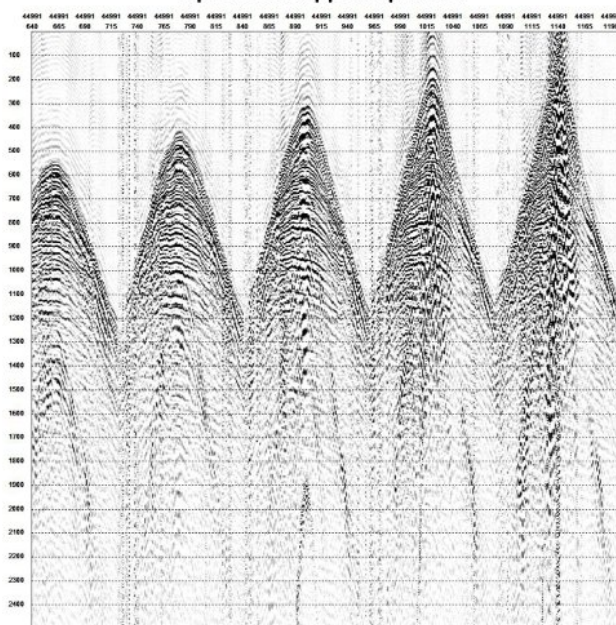


Функция корреляции опорного сигнала

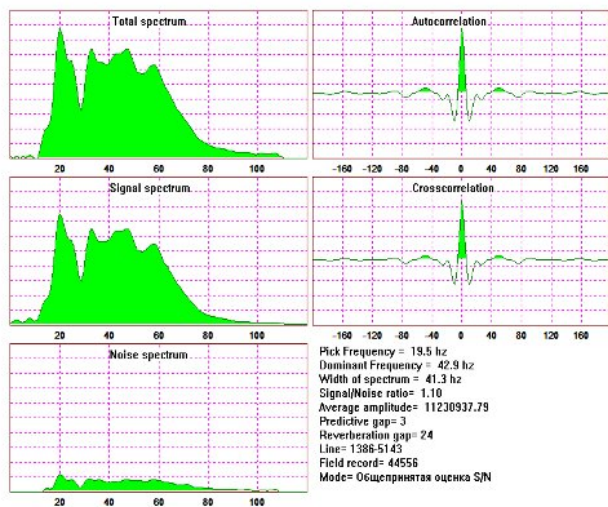


a

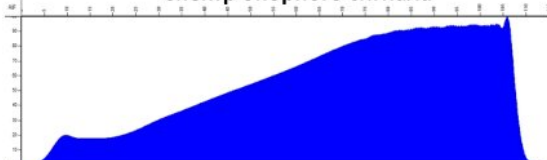
Фрагмент коррелограммы



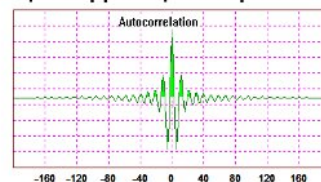
Спектральный анализ отклика



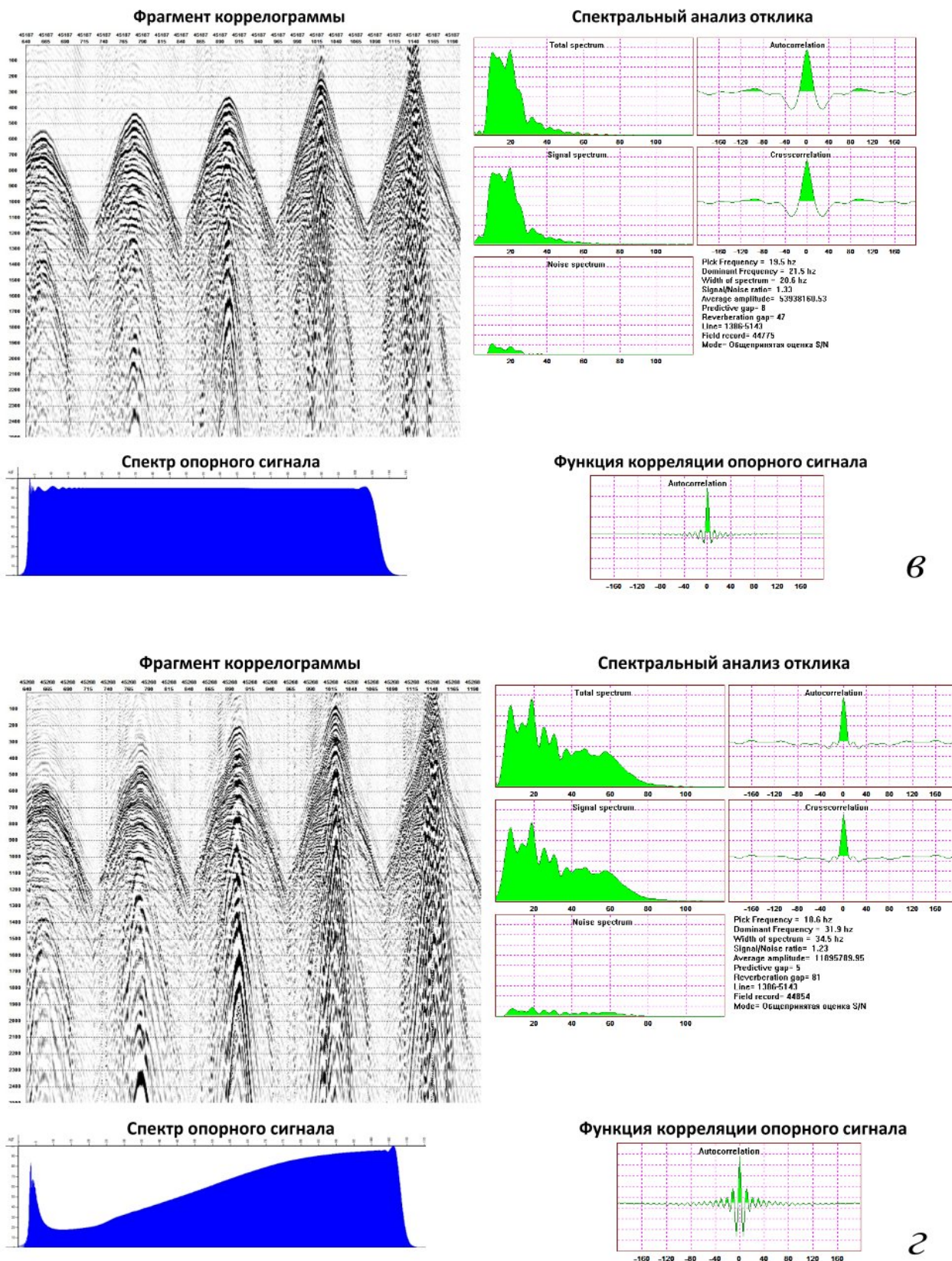
Спектр опорного сигнала



Функция корреляции опорного сигнала



б



▲ Рис. 18. Коррелограммы и спектральные характеристики сигналов:

- а - ЛЧМ свип, 8-110 Гц, 12 с;
- б - адаптивный (АЧМ) свип, 6-110 Гц, 12 с;
- в - низкочастотный (Low-dwell, 3 – 110 Гц) свип, 12 с;
- г - Адаптивный Широкополосный (АНЧ) свип, 3-110 Гц, 12 с

фильтруется без ущерба для сигнальной низкочастотной части.

На рисунках 18, а - г, изображены коррелограммы, а также спектры, авто- и кросскорреляционные функции посланных и зарегистрированных сигналов.

В случае линейного сигнала посылается весьма широкополосный сигнал (неплохая автокорреляционная функция с небольшим уровнем боковых лепестков) и регистрируется узкополосный сигнал с соответствующей кросскорреляционной функцией с расплывшимся основным максимумом и значительным уровнем боковых лепестков.

В низкочастотном варианте спектр за счет ухода в низкие частоты несколько расширился, однако это не сильно изменило вид кросскорреляционной функции сигнала. В случае адаптивного свипа спектр регистрируемого сигнала расширяется значительно и при широкополосном приобретает идеальный вид - его кросскорреляционная функция компактна, с минимальным уровнем боковых лепестков. Возникает как бы парадоксальная ситуация: в случае стандартного линейного сигнала посылаются в земную толщу условно сигнал с «хорошей» АКФ и регистрируется с «плохой» кросскорреляционной функцией. При адаптивном сигнале и тем более при широкополосном (Broadsweep) посылается «условно плохой» сигнал и регистрируется «хороший».

На рис. 6 и 9 изображены окончательные результаты обработки полученных данных, которые убедительно демо-

нстрируют преимущество широкополосных сигналов.

Литература

Bagaini C. [2008] Low-frequency vibroseis data with maximum displacement sweep. The Leading Edge, 5, 582 - 591.

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

Гридин П.А., Жуков А.П., Шехтман Г.А. [2014] Способ вибросейсмической разведки. Россия, Патент № 2570587, 22.10.2014.

Подробнее об авторах



Жуков А.П.

генеральный директор
ООО "Геофизические
системы данных",
д.т.н.



Коротков И.П.

главный геофизик
ООО "Геофизические
системы данных",
к.т.н.