

А.В. Череповский, А.Н. Бадейкин, г. Москва

Повышение разрешенности вибросейсмических данных становится все более актуальной задачей при переориентации сейсморазведки от поисков крупных антиклинальных ловушек нефти и газа к поискам малоразмерных и неструктурных ловушек, обнаружение и оконтуривание которых возможно только при использовании максимального набора кинематических и динамических атрибутов.

Задачи повышения как разрешенности, так и отношения сигнал/помеха не просто совместить при регистрации и обработке вибросейсмических записей. Одним из редких исключений является вибросейсмическое отбеливание (ВСО), заключающееся в применении АРУ до корреляции виброграмм. При этом, как правило, наблюдается расширение спектра отраженных волн, сопровождающееся улучшением их прослеживаемости и повышением отношения сигнал/помеха.

В США еще в начале 80-х годов прошлого века была показана высокая эффективность процедуры ВСО по ослаблению регулярных волн-помех и расширению спектра полезного сигнала [1]. В конце 80-х годов процедура ВСО была успешно опробована и на многих вычислительных центрах в России и за ее пределами (ГЭМОИ НПО "Нефтегеофизика", КОМЭ объединения "Укргеофизика", ГлавНИИЦ Мингео СССР). Была доказана высокая эффективность ВСО как при кинематической, так и при динамической (с сохранением относительных амплитуд) обработке виброданных [2,3,4]. Тем не менее, эта процедура не была широко внедрена, а теперь даже возможность применения ВСО отсутствует, поскольку корреляция виброграмм со свип-сигналом выполняется непосредственно в поле, и на обработку поступают только коррелограммы. Эта практика сложилась в 90-е годы прошлого века, когда большинство сейсморазведочных компаний и ВЦ испытывали острую нехватку как 9-дорожечных лент и картриджей, так и машинного времени. В этой работе мы даем обзор выполненных ранее практических и модельных исследований и предпринимая попытку привлечь внимание к ВСО, выполнив двумерные модельные исследования с использованием современных программных комплексов и проанализировав некоторые новые примеры реальных полевых данных.

В процессе распространения опорного сигнала вибратора в земле происходит повышенное поглощение высоких частот, что ведет к сужению спектра зарегистрированных на виброграммах колебаний по отношению к исходному свип-сигналу и ухудшению результатов виброкорреляции. Но, благодаря близкой к линейной зависимости частоты от времени записи на виброграмме, появляется возможность расширить спектр сигнала за счет ВСО.

На Рис.1 показаны фрагменты 96-канальной коррелограммы, подвергшейся четырем вариантам предобработки: а) стандартной виброкорреляции, б) виброкорреляции и деконволюции (сжатия), в) АРУ до виброкорреляции и г) АРУ до виброкорреляции в сочетании с деконволюцией. Мы видим, что деконволюция достаточно эффективна, но значительно уступает эффективности ВСО во всем интервале записи. Применение деконволюции после ВСО дает незначительный эффект, выражающийся в некотором улучшении разрешенности и прослеживаемости отражений.

На Рис.2 показаны амплитудно-частотные спектры, рассчитанные в широком окне, охватывающем горизонты 1 и 2. Как видно, после стандартной виброкорреляции запись имеет довольно узкий спектр: 18-24 Гц по уровню 0.5 при диапазоне частот исходного свип-сигнала 14-48 Гц. Применение декон-

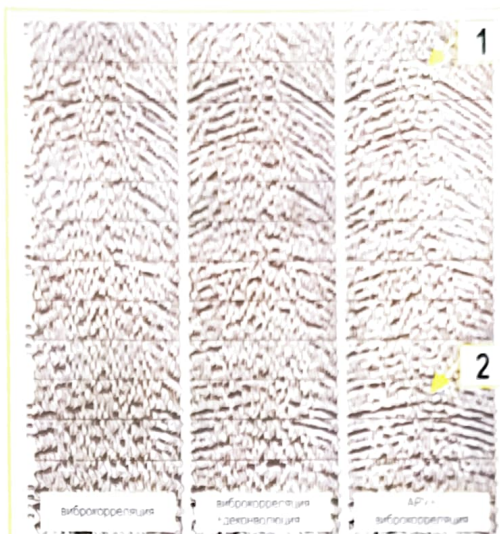


Рис.1 Фрагменты 96-канальных коррелограмм после применения: а) стандартной виброкорреляции б) виброкорреляции и деконволюции, в) АРУ до виброкорреляции

волюции сжатия резко расширяет спектр до 16-38 Гц, в то время как ВСО позволяет восстановить довольно ровный спектр, близкий к спектру исходного свип-сигнала. Если в результате применения деконволюции сжатия отношение сигнал/помеха (С/П) остается примерно на том же уровне, то после ВСО отношение С/П повышается примерно в 2.5 раза.

Амплитудно-частотный анализ по отдельным горизонтам дает еще более интересные результаты. Для горизонта 2 (Рис.3), так же как и для всей коррелограммы, спектр является низкочастотным и лежит в диапазоне 17-27 Гц, а деконволюция после виброкорреляции хоть и расширяет спектр, но все же он остается обеднен высокими частотами. Применение ВСО дает возможность получить совершенно

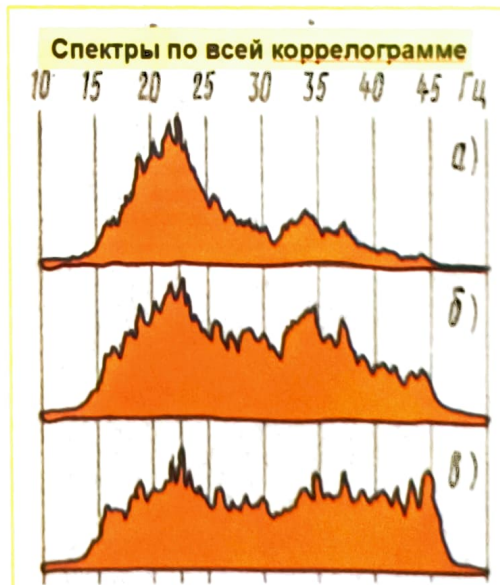


Рис.2 Спектральный анализ в широком окне по коррелограмме после применения: а) стандартной виброкорреляции, б) виброкорреляция и деконволюция, в) АРУ до виброкорреляции

ТОНКОСТИ ОБРАБОТКИ И ИНТЕРПРЕТАЦИИ
ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ТЕХНОЛОГИИ

Спектры по горизонту 2

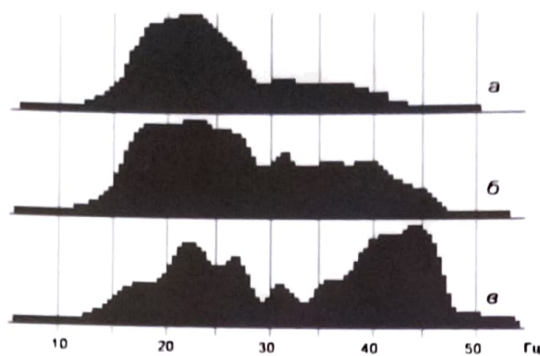


Рис. 3. Спектральный анализ в окне горизонта 2 после применения: а) стандартной виброкорреляции; б) виброкорреляция и деконволюция; в) АРУ до виброкорреляции

другой спектр: помимо низкочастотного появляется второй, более высокочастотный максимум (37-47 Гц), соответствующий отражательным свойствам среды, чем и объясняется резкое улучшение прослеживаемости горизонта 2 на коррелограмме. Таким образом, ВСО именно расширяет спектр полезного сигнала, а не поднимает уровень высокочастотных случайных помех.

На 24-кратном временном разрезе различия в отношении С/П еще более впечатляющие. Если деконволюция после виброкорреляции позволяет сохранить примерно такие же значения отношения сигнал/помеха, то в случае ВСО этот параметр возрастает по отдельным горизонтам в 3-3.5 раза. Полученные результаты свидетельствуют о возможности исключения деконволюции сжатия из графа обработки при применении ВСО.

В КОМЭ объединения "Ургеофизика" в 1990 г. была выполнена опытная обработка вибросейсмических данных с получением временного разреза по общепринятому графу, предусматривающему сохранение относительных амплитуд (COA), а также второго временного разреза, отличающегося от первого только применением АРУ (с длиной оператора 600 мс) до виброкорреляции [4]. Длина оператора АРА, по-видимому, должна зависеть от конкретных сейсмогеологических условий и целей сейсморазведочных работ.

В этом случае диапазон частот исходного свип-сигнала простирался от 12 до 80 Гц. Полученные временные разрезы имеют существенные различия (Рис.4). Второй разрез (с ВСО) предпочтительнее по многим признакам: повысилась преобладающая частота отраженных волн во всем диапазоне записи; улучшилась разрешенность записи, особенно в интервале 0.7-1.1 с; повысилась детальность сейми-

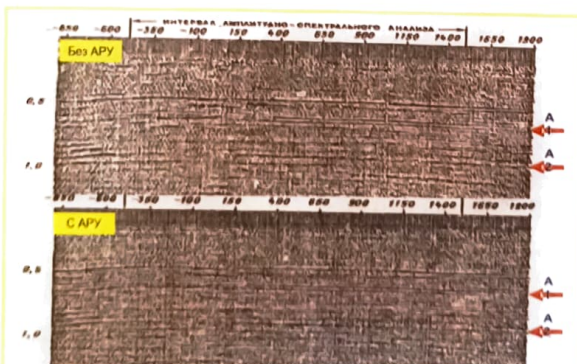


Рис. 4. Временные разрезы с сохранением относительных амплитуд без АРУ (а) и с АРУ (б) до виброкорреляции

ческого изображения за счет разделения интерференционных отражений. Практически полное подавление низкочастотных волн-помех на малых временах регистрации - это очень благоприятный фактор, поскольку специальные программы вычитания регулярных помех вносят и определенные искажения в динамику волнового поля.

Количественный анализ по обоим временным разрезам был выполнен в двух интервалах, центрами которых являются горизонты А1 и А2. Если пиковая частота спектра сигнала не изменилась, то повысилась на 6 Гц для горизонта А1 и на 11 Гц для горизонта А2 [Табл. 1]. Эффективная ширина спектра сигнала также повысилась на 14 Гц для горизонта А1 и на 16 Гц для горизонта А2. Отношение С/П в данном случае осталось практически одинаковым для обоих разрезов. Было установлено, что локальные колебания амплитуд на этих разрезах повторяются как для границы А1, так и для границы А2, различаясь лишь во второстепенных деталях, что свидетельствует в пользу сохранения динамики при применении ВСО. Более того, отношение среднеквадратических значений амплитуд А1/А2 сохраняется с точностью 1.5% на этих двух разрезах. Таким образом, ВСО не приводит к потере амплитудных соотношений в плоскости временного разреза. Этот результат имеет большое практическое значение, потому что в противном случае для обработки данных вибрационной сейсморазведки граф кинематической и динамической обработки пришлось бы разделять в самом начале, на этапе корреляции виброграмм: для получения разрешенного высококачественного кинематического разреза необходимо применять АРУ до корреляции, а при динамической обработке пришлось бы повторить виброкорреляцию без АРУ. Такой подход почти удвоил бы стоимость обработки вибросейсмических данных.

Наиболее ощутимые различия между разрезами с АРУ и без АРУ до виброкорреляции наблюдаются в спектре помех: если на разрезе без АРУ в спектре помех в окне горизонта 1 доминировали частоты 15-20 Гц, по всей видимости, соответствующие цугу поверхностных волн, и спектр затухал к 45 Гц (Рис.5), то на разрезе с АРУ низкочастотный максимум сохранился в ослабленном виде, а со стороны высоких частот спектр шума обрамлен другим экстремумом, связанным с цугом звуковых волн и отсутствовавшим ранее вследствие узкого спектра стандартных коррелограмм. Необходимо учитывать, что общий уровень энергии шума очень низкий (6-7% от полной энергии) и экстремум, соответствующий цугу звуковых волн, не проявляется в общем спектре записи и легко подавляется полосовым фильтром с

Таблица 1. Частотно-энергетические характеристики сейсмической записи для двух отражающих горизонтов

Характеристика	Стандартный Разрез с АРА			
	Гор А1	Гор А2	Гор А1	Гор А2
Пиковая чистота, Гц	37	18	37	18
Средневзвешенная чистота спектра сигнала, Гц	29,5	26,2	35,6	37
Эффективная ширина спектра сигнала, Гц	28,5	21,6	42,6	37,0
Энергетическое отношение помеха/сигнал	20,2	12,9	19,6	13,5
Разрешающая способность записи, Гц	36,7	29,4	48,9	50,1
Эффективная длительность нуль-фазового аналога сигнала, Гц	38,2	53,0	24,7	30,6

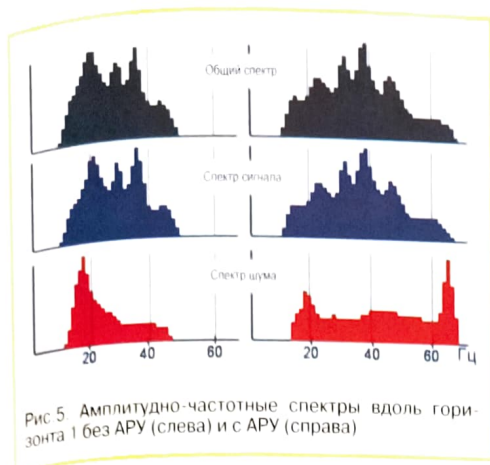


Рис 5. Амплитудно-частотные спектры вдоль горизонта 1 без АРУ (слева) и с АРУ (справа)

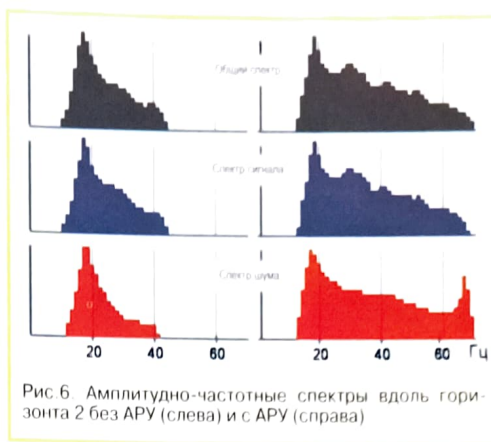


Рис 6. Амплитудно-частотные спектры вдоль горизонта 2 без АРУ (слева) и с АРУ (справа)

правым срезом 60-70 Гц (для четырехточечного фильтра), не затрагивая спектр сигнала.

В окне горизонта 2 (Рис.6) пиковые частоты спектров сигнала и шума равны 18 Гц для обоих временных разрезов, и в целом, в отличие от горизонта 1, практически полностью перекрываются. Плохое разделение спектров сигнала и шума связано, в первую очередь, с нестабильностью формы сигнала, а не с близостью преобладающих частот нерегулярных помех и отражательной характеристики данного интервала разреза. Это видно из сравнения частотных характеристик записи на рассматриваемых временных разрезах в двух вариантах обработки. Для горизонта 2 средневзвешенная частота сигнала повысилась на 11 Гц по сравнению с разрезом без ВСО, а эффективная ширина спектра - на 16 Гц. В результате разрезающая способность записи в этом интервале разреза выше, чем в окне горизонта 1. Таким образом, ВСО, компенсируя частотное затухание записи на виброграммах, оказывает заметное влияние на информативность и глубину виброграммной сейсморазведки. Эффективность ВСО увеличивается со временем регистрации, что подтверждается и другими имеющимися у нас материалами.

Хотя обычно ВСО эффективнее, чем деконволюция сжатия (после виброкорреляции) в отношении разрешенности записи, ВСО не эквивалентно декону по воздействию на АЧХ коррелограмм. Поэтому только тестирование этих процедур на каждом конкретном материале может решить вопрос об актуальности декона после ВСО.

Из-за нелинейности АРУ многие геофизики отрицают возможность точного сохранения амплитуд при ВСО. Однако, АРУ до виброкорреляции не может отождествляться с АРУ после виброкорреляции, поскольку не приводит к потере динамики по обоим координатам временного разреза. Степень амплитудно-фазовых искажений записи при применении ВСО была изучена нами на одномерных и двумерных моделях [5]. В соответствии со сверточной моделью виброграммы, моделирование включало создание импульсной модели среды, переменную по времени амплитудную модуляцию свип-сигнала с целью имитации частотно-зависимого поглощения, свертку модулированного свип-сигнала с импульсными сейсмограммами и добавление случайного шума заданной интенсивности. Полученные виброграммы служили исходным материалом для решения обратной задачи путем корреляции виброграмм (с АРУ и без АРУ до корреляции) и определения кинематических и динамических характеристик синтетических коррелограмм.

На тестовой импульсной модели, сочетающей в себе слабые и сильные коэффициенты отражения, расположенные через кратные временные интервалы, определялось влияние единственного параметра АРУ - длины оператора (и, соответственно, шага расчета функции усиления) - на динамику

получаемых коррелограмм (Рис.7). Анализ амплитуд во временных окнах шириной 100 мс показал, что динамика исходной импульсной трассы не сглаживается при ВСО, но искажается систематическим образом: на истинные коэффициенты отражения накладывается монотонная функция усиления. При этом для границ, отстоящих друг от друга на 150-600 мс, отношение их амплитуд меняется незначительно, на 3-8%. И только для границ или групп границ, отстоящих на 1000 мс и более, отношения амплитуд систематически искажаются на десятки процентов.

Отмеченный искусственный амплитудный тренд заметно уменьшается при увеличении длины оператора АРУ от 600 до 1200 мс, но почти не меняется в интервале длин оператора АРУ от 1800 до 3600 мс. С точки зрения расширения спектра записи результаты ВСО практически эквивалентны во всем тестируемом диапазоне длин оператора АРУ от 600 до 3600 мс.

Исследовалось также влияние случайного шума на эффективность ВСО. Для уменьшения влияния случайных реализаций шума и, соответственно, повышения стабильности результатов моделирования, спектральный анализ выполнялся по коррелограммам, состоящим из 6 трасс. Интенсивность случайного шума задавалась в следующем диапазоне значений: при минимальном уровне шума величина его среднеквадратического отклонения равнялась величине самого слабого коэффициента отражения, а при максимальном уровне шума - самого сильного, что в условных единицах соответствует изменению значений от 1 до 5 (Рис.8). Добавление случайного шума к виброграмме приводит к неожиданным результатам и выводам. Амплитудные соотношения на коррелограммах, при наличии аддитивных помех на виброграммах, искажаются в сторону сокращения динамического диапазона отражений по сравнению с истинным как при использовании АРУ до виброкорреляции, так и без нее. Чем интенсивнее шум, тем

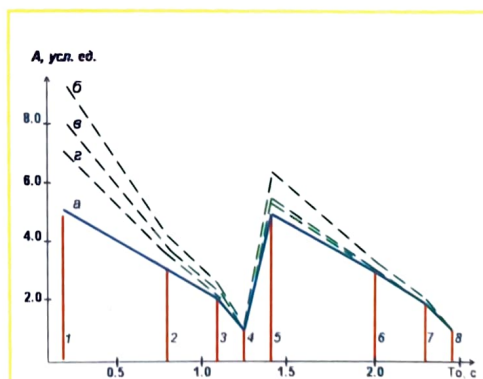
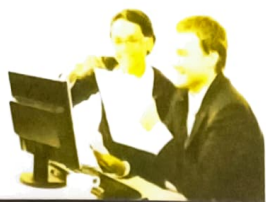


Рис 7. Модельная импульсная трасса и относительные амплитуды отражений на синтетической коррелограмме без АРУ до корреляции (а) и с операторами АРА длиной (мс): б) 600; в) 1200; г) 2400

ТОЧНОСТИ ОБРАБОТКИ И ИНТЕРПРЕТАЦИИ ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ТЕХНОЛОГИИ





больше на коррелограммах выравниваются амплитуды близких в пространстве и контрастных отражений, но при обычной корреляции результаты дальше от заданных в модели, чем при применении ВСО. При ВСО аддитивные помехи служат как бы стабилизирующим фактором, и при интенсивных случайных помехах уменьшается вышеописанный искусственный амплитудный тренд. Для реальных данных такую роль будут играть слабые отражения.

Альтернативой применению АРУ до виброкорреляции по повышению разрешенности записи является весовая корреляция. Как известно, весовая корреляция дает возможность управлять спектром коррелограмм. Но что особенно важно с точки зрения сохранения относительных амплитуд, эта процедура линейна и не дает амплитудного тренда в отличие от АРУ до виброкорреляции. Однако, на той же импульсной модели установлено, что и при весовой корреляции аддитивные помехи вызывают сокращение динамического диапазона отражений, особенно для близких контрастных границ, причем в еще большей мере, чем при АРУ до виброкорреляции. В таблице 2 приведены отношения амплитуд на коррелограммах в % к истинному значению для отражающих границ 3 и 4, 4 и 5 модели, представленной на Рис. 7.

Двумерное моделирование "ярких пятен" и интерференционных отражений от выклинивающегося тонкого слоя показало, что ВСО не вызывает сколь-нибудь заметного сглаживания амплитуд отражений и в горизонтальном направлении, и весьма устойчиво к интенсивным случайным помехам [6].

Опытная обработка полевых вибросейсмических данных и двумерное моделирование позволили сделать следующие выводы по эффективности ВСО (или АРУ до виброкорреляции):

- значительно ослабляются низкочастотные помехи, включая поверхностные волны;
- резко расширяется спектр сигнала и повышается разрешенность сейсмической записи;
- эффективность ВСО значительно превышает эффективность деконволюции сжатия;
- повышается прослеживаемость отражающих границ, особенно с увеличением времени регистрации, - то есть, повышается глубинность сейсмических исследований.
- не происходит потери динамики в плоскости временного разреза (как по вертикали, так и по латерали);
- при низком отношении сигнал/шум более достоверные результаты обработки виброграмм могут быть получены с использованием ВСО, чем при стандартной виброкорреляции.

В настоящее время не просто привлечь интерес к ВСО из-за общепринятой корреляции виброграмм непосредственно в поле, в основном по причине экономии картриджей или дискового пространства.

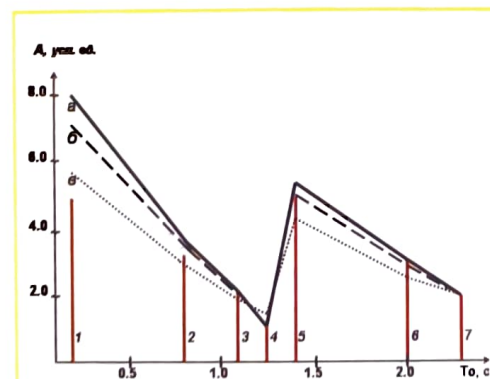


Рис. 8. Модельная импульсная трасса и относительные амплитуды отражений на синтетической коррелограмме с АРУ до корреляции при следующих уровнях случайного шума (усл. ед.): а) 1.0; б) 2.5; в) 5.0

Но цена этого вопроса совсем другая и, к счастью, она звучит так: будет сохранен материал для интерпретации интерпретируемых данных или нет? Чтобы убедительно показать это, мы использовали примеры имеющиеся в нашем распоряжении - примеры современных виброграмм. Первый пример - это виброграммы с уникального 9-компонентного профиля, отработанного Пермнефтегеофизикой по заказу Министерства природы в 2005 г. В качестве источника на этом профиле использовались трехкомпонентные вибраторы, а в качестве приемников - трехкомпонентные электродинамические приборы. На Рис. 9 приведен пример коррелограммы горизонтальной компоненты, записанной при горизонтальном воздействии вибратора в плоскости профиля - другими словами, это запись поперечных SV-волн. Вибратор возбуждал диапазон частот от 10 до 40 Гц, и коррелограмма после стандартной виброкорреляции характеризуется многофазием и интенсивными низкочастотными кратными волнами, полностью маскирующими целевые поперечные волны в интервале записи от 1 до 2 с. Максимум амплитудно-частотного спектра (на стандартной коррелограмме) в целевом интервале записи достигается на 13-14 Гц, а на 30 Гц амплитуды записи ослабевают более чем на 30 дБ. Одноканальная деконволюция сжатия позволяет поднять амплитуды записи примерно на 5-6 дБ в интервале 20-40 Гц, но она не может "вытащить" полезные поперечные волны из таких исходных коррелограмм. В свою очередь, ВСО буквально "проявляет" целевые поперечные волны благодаря высокоэффективному ослаблению низкочастотных цугов помех, и амплитуды записи в этом случае повышаются на 14-15 дБ в диапазоне 20-40 Гц. Таким образом, и на поперечных волнах наблюдаются те же эффекты, - нентных виброграмм, а именно ВСО гораздо лучше выравнивает спектр (полезных волн), чем одноканальная деконволюция сжатия (Рис. 10).

Таблица 2. Отношение амплитуд на коррелограммах в % к истинным значениям для пар горизонтов 3 и 4, 4 и 5.

Интенсивность шума, усл. йод.	Стандартная корреляция, %	Весовая корреляция, %	Отбеливание (АРУ до корреляции), %
Для отражающих границ 3 и 4			
0	100,1	99,2	100,8
1,0	92,0	89,3	92,9
2,5	75,7	70,9	79,2
8,0	55,1	50,7	58,0
Для отражающих границ 4 и 5			
0	100,4	97,6	100,8
1,0	93,8	90,0	95,8
2,5	78,2	73,5	81,3
8,0	58,2	54,5	63,2

Другие проанализированные нами виброграммы, записанные летом 2007 г. на Ближнем Востоке по заказу компании Татнефть, были получены с вертикальными вибраторами и трехкомпонентными цифровыми акселерометрами VectorSeis. В этом случае мы использовали достаточно высококачественную вертикальную компоненту для анализа сохранения амплитуд отраженных волн при ВСО. Вдоль годографов двух выбранных отражений (Рис. 11) были рассчитаны среднеквадратические амплитуды и построены соответствующие графики (Рис. 12) для двух вариантов свертки виброграмм. Очевидно, что все локальные амплитудные аномалии сохраняются при ВСО, но поскольку она обладает эффектом подавления низкочастотных помех [1], то отдельные короткопериодные всплески амплитуд имеют меньшую амплитуду в случае ВСО.

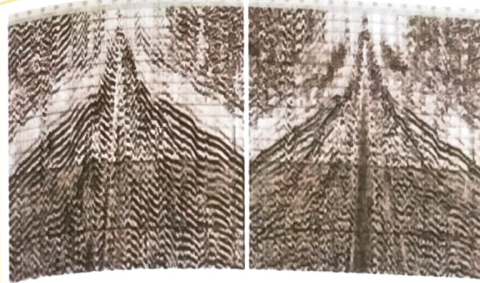


Рис.9. Горизонтальная компонента без АРУ (слева) и с АРУ (справа) до виброкорреляции при возбуждении SV-волн вибратором

Были также рассчитаны отношения амплитуд отражений для этих двух горизонтов, которые показывают, что в данном случае соотношения амплитуд по оси времен меняются несущественно при использовании ВСО. Как уже говорилось при анализе результатов моделирования, ВСО - прежде всего благодаря значительному ослаблению низкочастотных волн-помех - может давать более точные относительные амплитуды, чем стандартная виброкорреляция.

Мы надеемся, что представленные нами примеры обработки вибросейсмических данных и их моделирования вызовут новую волну интереса к ВСО и весовой виброкорреляции. Мы также планируем расширить модельные исследования с использованием современных обрабатывающих и интерпретационных комплексов и изложить результаты в следующих публикациях.

Благодарности

Я хотел бы поблагодарить Дэна Херольда (Parallel GeoScience Corp., USA) за пакет программ SPW, предоставленный для визуализации и атрибутивного анализа вибросейсмических данных.

Литература

1. Coruh, C. and J.K.Costain, 1983, Noise attenuation by vibroseis whitening, Geophysics, v.48, p.543-554.
2. Череповский А.В., Бадейкин А.Н., 1988. Роль регулирования амплитуд при кинематической обработке вибрационной сейсмозаписи. Экспресс-информация ВИЭМС. Разведочная геофизика. Ответственный производственный опыт, 1988, вып.10, с 1-4.
3. Череповский А.В., 1990. Повышение эффективности вибрационной сейсмозаписи МОГТ при решении задач регионально-поискового этапа в малоизученных регионах. Автореферат на соискание ученой степени кандидата технических наук.
4. Череповский А.В., Сергей Г.Б., Прилепская Т.В.,

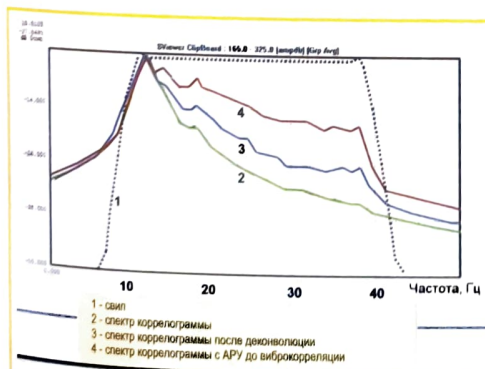


Рис.10. Амплитудно-частотные спектры горизонтальной компоненты в целевом интервале записи. 1 - исходный свип-сигнал; 2 - спектр после стандартной виброкорреляции; 3 - спектр после деконволюции сжатия; 4 - спектр при ВСО.

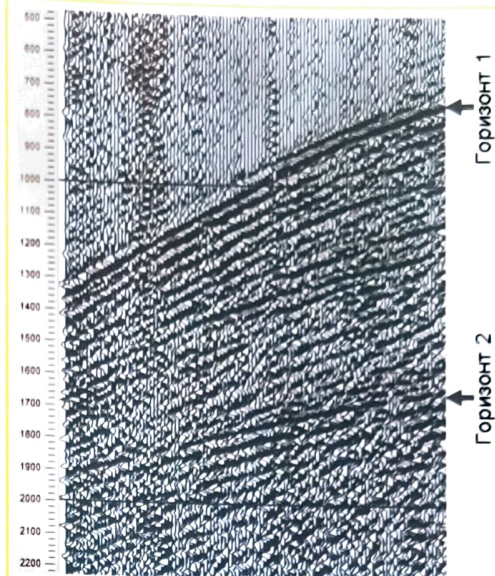


Рис.11. Фрагмент коррелограммы 3Д, на которой анализировались амплитуды по двум отраженным волнам

1990. Особенности динамической обработки вибросейсмических данных. Научно-технические достижения и передовой опыт в области геологии и разведки недр, информационный сборник, 1990, вып.4, с.32-40.

5. Череповский А.В., Бадейкин А.Н., 1992. Исследование динамических искажений записи при вибросейсмическом отбеливании. Научно-технические достижения и передовой опыт в области геологии и разведки недр, информационный сборник, 1992, вып.7, с.41-46.

6. Череповский А.В., Бадейкин А.Н., Шиморин М.В., 2008. Вибросейсмическое отбеливание: прошлое, настоящее и будущее. Тезисы 3-ей Международной конференции и выставки "Геонауки - от новых идей к новым открытиям", 7-10 апреля 2008 г., Санкт-Петербург.

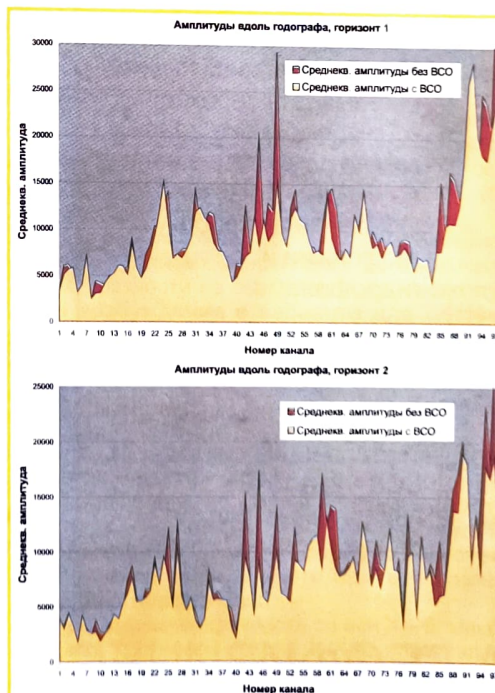


Рис.12. Среднеквадратические амплитуды по двум отражающим горизонтам с АРУ и без АРУ до виброкорреляции



ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ ТОНКОСТИ ОБРАБОТКИ И ИНТЕРПРЕТАЦИИ