

## Наземная сейсморазведка

**Применение точечных приемников открывает новые возможности организации работ и использованию данных наземной сейсморазведки**

**Point-receiver seismic data offers new approach to managing onshore E&P development cycle**

**Бофф Андерсон (Boff Anderson), Петер ван Баарен (Peter van Baaren), Марк Дэли (Mark Daly), Уилл Грейс (Will Grace), Джон Куигли (John Quigley) и Денис Суини (Denis Sweeney) из компании WesternGeco объясняют, какие преимущества дает «вплетение» сейсмических работ с точки зрения сокращения времени между разведкой месторождения и вводом в эксплуатацию, а также сокращения затрат на полевые сейсморазведочные работы.**

**О**бычный цикл работ в наземной сейсморазведке начинается с региональных рекогносцировочных 2D работ с большим расстоянием между

профилями. После первичной интерпретации выделяются крупные участки, на которых ставятся 2D работы по секущим профилям. При этом расстояние между точками пересечения профилей составляет несколько километров. Далее часто возникает необходимость проведения 3D съемки для детального картирования выделенных целевых структур для постановки буровых работ. 3D съемка может повторяться несколько раз за время эксплуатации месторождения, постепенно уточняя модель разреза, способствуя тем самым управлению месторождением. В этой статье обсуждается, как преодолеть два главных недостатка такого традиционного цикла наземных сейсморазведочных работ: затраты времени на этапе проведения работ и неэффективное использование результатов работ на протяжении цикла эксплуатации месторождения.

**Сокращение сроков ввода месторождения в эксплуатацию**

Длительность интервал времени между началом 2D работ и получением изображений высокого разрешения по результатам 3D работ, пригодных для принятия управленческих решений (постановки скважин, размещения производственных сооружений и др.) может быть важным фактором. Сначала нужно провести 2D работы, затем передать полевые записи в центр обработки (часто – в другую страну), провести обработку и интерпретацию. Далее это цикл повторяется, иногда – несколько раз, в ходе 3D съемки, пока не получатся качественные изображения нужных участков, пригодные для принятия управленческих решений. Длительность такого цикла может составлять год и более.

Идеальный порядок проведения сейсморазведочных работ должен включать немедленную детализацию на выявленных структурах. План работ партии следует корректировать с тем, чтобы проводить загущение сети съемки над обнаруженными объектами. Эта идея близка к отработке профилей загущения в морской сейсморазведке. В отличие от последней, где сгущение проводят, чтобы лучше отрисовать структуру, пропущенную при первом проходе, в наземной сейсморазведке сгущение можно применять для повышения разрешения разрезов, путем уменьшения шага между трассами в окрестности структур. Для наземных работ вместо термина «загущение» лучше использовать термин «вплетение». В полевых работах и в обработке

придется изменить два этапа: во-первых, работы следует вести по 3D методике с редкой сетью, а не по 2D методике с густой сетью; и, во-вторых, обработку нужно доводить до разрезов, пригодных к интерпретации, параллельно с полевыми работами.

**Снижение общих затрат на полевые сейсморазведочные работы**

Обычно за время эксплуатации месторождения полевые сейсморазведочные работы проводятся на нем несколько раз. Часто при интерпретации используются лишь данные последних работ, а старые данные игнорируются. В частности, данные 2D работ не используются, если проведена 3D съемка. Развитие 3D методик стало решающим при сокращении количества сухих скважин. 3D данным обычно отдают предпочтение из-за того, что они изначально более пригодны для картирования разломов, для определения замкнутости ловушек, построения моделей разреза для постановки скважин.

В таких 3D работах каждый раз получают новые данные, а прежние результаты используются только при выборе начальных параметров системы наблюдений и обработки. Для дополнения новых данных старые данные, как правило, не используют. Если найти способ дотраивать существующий сейсмический разрез, вплетая в него данные новых работ, то удастся сократить общие затраты на сейсморазведку на протяжении всего цикла эксплуатации месторождения. Старые данные будут напрямую использованы повторно, а полевые работы на каждом этапе будут проводиться в минимально необходимом объеме.

**Способ оптимизации затрат в наземной сейсморазведке**

Последние технические достижения в наземной сейсморазведке, а именно, повышение качества полевой записи путем использования интегрированных систем сбора и обработки с изолированными приемниками, позволяют успешно внедрять описанную методику вплетения съемок. Такой подход позволит сократить время ввода месторождения в эксплуатацию и общие затраты на сейсморазведку. В компании WesternGeco методика работ с вплетением получила название Q-Land VIVID (Value In Variable Image Density; разрез переменной детальности – РПД).

Сроки вплетения результатов в имеющиеся данные составляют несколько недель. Вплетаемые работы, последовательно улучшающие модель разреза, могут продолжаться многие годы на протяжении всего цикла эксплуатации месторождения.

## Наземная сейсморазведка

Длительность может быть различной, но концепция улучшения модели путем вpletения остается неизменной. Схема методики представлена на рис. 1. Многоканальные системы с изолированными приемниками позволяют провести первичную 3D съемку по редкой сети. Если принято решение о необходимости сгущения над каким-либо объектом, проводится вторая съемка с теми же параметрами, но со смещением на полшага по X и по Y относительно первой. Объединяя данные этих этапов, получают разрез с детальностью вдвое большей, чем у каждого из этапов. Этот процесс можно повторять, улучшая качество разреза, смещая каждый раз систему на полшага относительно предыдущей.

Рассмотрим, например, разведочную 3D съемку по редкой сети с расстоянием между профилями 800 м. Максимальное расстояние между профилями определяется требуемым перекрытием и глубиной до целевого объекта и маркирующих горизонтов

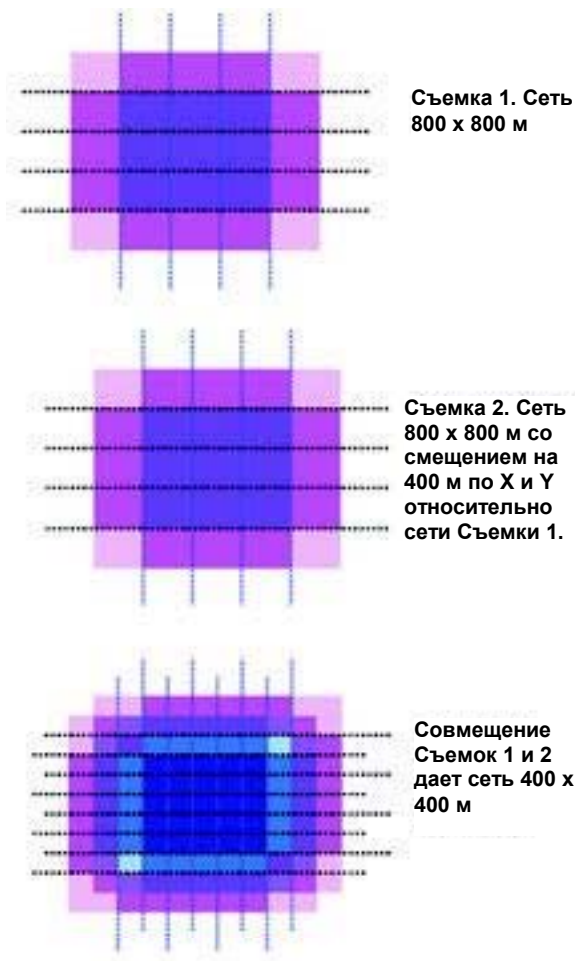


Рис. 1. Методика вpletения новых съемок для обеспечения кратности и повышенного качества разрезов.

После выделения перспективной области проводится еще одна съемка с расстоянием между профилями 800 м, которую можно вpletить в исходную, создав на целевых участках сеть с расстоянием между профилями 400 м. Дальнейшего увеличения разрешения можно добиться, вpletя в полученную сеть результаты съемки с расстоянием между профилями 400 м, получив тем самым данные по сети с расстоянием между профилями 200 м. Схема такого подхода к получению данных требуемого качества путем последовательного вpletения данных на каждом этапе эксплуатации месторождения представлена на рис. 2.

Первичную съемку следует проводить с такими параметрами, которые обеспечивали бы требуемое качество данных на протяжении всего времени эксплуатации месторождения. Например, если считается, что на этапе эксплуатации для обеспечения нужного разрешения верхняя частота свип-сигнала должна составлять 80 Гц, то и на этапе разведки нужно работать с такой же частотой, даже если для непосредственных целей разведки можно ограничиться и меньшей верхней частотой. Исходные данные первичной съемки следует хранить отдельно на уровне отдельных приемников, без какого-либо группирования или обработки. Тем самым обеспечивается возможность вpletения новых данных и повторной обработки по новым алгоритмам а также перегруппирования приемников при организации более густых сетей.

### Критерии вpletения данных

Успех вpletения новых данных зависит от двух основных факторов. Во-первых, параметры системы наблюдений и регистрации должны быть максимально близкими. Близость параметров зависит от планирования работ и возможности записи с минимальным уровнем шумов. Этим требованиям отвечает расстановка изолированных приемников в шахматном порядке. Для записи с минимально возможным уровнем шумов следует разместить приемники на нужном расстоянии, что позволит использовать преимущества новых алгоритмов подавления шумов и обработки сигналов.

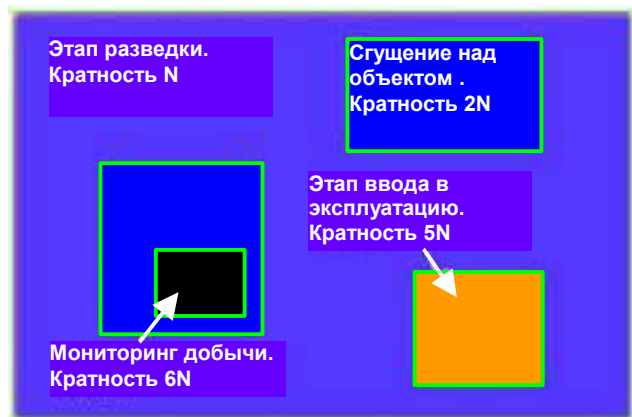


Рис. 2. При практическом применении вpletения новых съемок можно покрыть большую площадь на этапе разведки и получать данные различной кратности на целевых объектах.

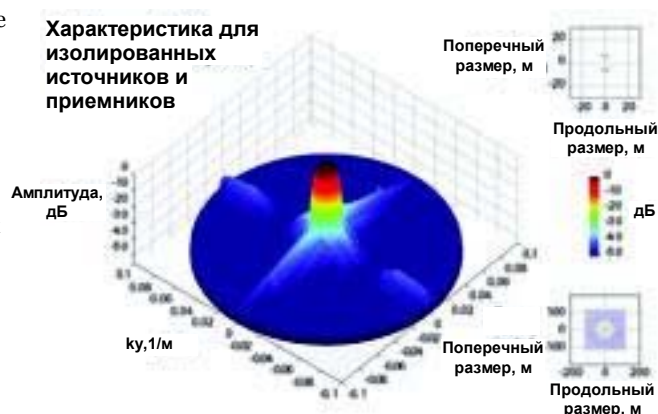
## Наземная сейсморазведка

Во-вторых, чтобы обеспечить максимальное повторное использование данных, следует в как можно большем объеме перейти при первичных съемках от 2D к 3D методикам. При этом 3D данные должны закрывать ту же площадь, что закрывала бы 2D съемка, и быть такого же или лучшего качества. Кроме того, 3D съемка не должна приводить к значительному увеличению затрат по сравнению с 2D съемкой. Это значит, что работы следует вести по редкой сети. Речь не идет о замене региональных 2D работ на 3D; имеется в виду скорее замена 2D съемки на втором этапе – отработке секущих профилей с шагом несколько километров.

Чтобы обеспечить соответствие этим критериям, требуются интегрированные многоканальные системы сбора и обработки данных с изолированными приемниками. Средства подавления шумов и сохранения сигнала, с которыми можно получить очень чистую полевую запись, позволяющую вести работы по редкой, то есть экономически выгодной, сети, но с сохранением качества данных, требуемого для первичной разведки. В дальнейшем эти данные можно использовать повторно, совместно с данными последующих работ. Следует также учитывать время, прошедшее между съемками, и обеспечивать соответствие статических поправок в данных разных съемок. Со временем рельеф или строение ВЧР могут меняться, причем, чем больше промежуток времени между съемками, тем больше могут быть эти изменения. Отклонения времен, к которым приводят эти изменения, могут быть исправлены с помощью гибкой системы обработки, возможной для данных с изолированными приемниками.

Методика вплетения данных основана в основном на использовании чистых полевых записей, получаемых с многоканальными системами с изолированными приемниками. Впервые о таком подходе говорилось в работе (Ongkiehong and Askin, 1988), опубликованной в *First Break*, и тогда не принятой. В ней предлагалось вести запись с шагом между группами 25 м и использовании особых установок для подавления высокочастотного шума. В то время из-за ограниченного числа каналов запись с меньшим шагом при сохранении требуемых выносов была невозможна. Увеличение числа каналов, достигнутое позднее, позволило сделать следующий логический шаг – отказаться от группирования. Для подавления высокочастотных шумов группирование больше не нужно; достаточно получить полевые записи от изолированных приемников, расположенных в 5-10 м друг от друга. Этого достаточно для построения цифровых фильтров, эффективно подавляющих наиболее распространенные типы высокочастотных шумов, распространяющихся со скоростью, превышающей скорость звука в воздухе и с центральной частотой менее 30 Гц. Кроме того, при использовании изолированных приемников статические поправки и коррекцию амплитуд можно проводить для каждой трассы отдельно.

**Характеристика для изолированных источников и приемников**



**Характеристика для обычных (в группе) источников и приемников**

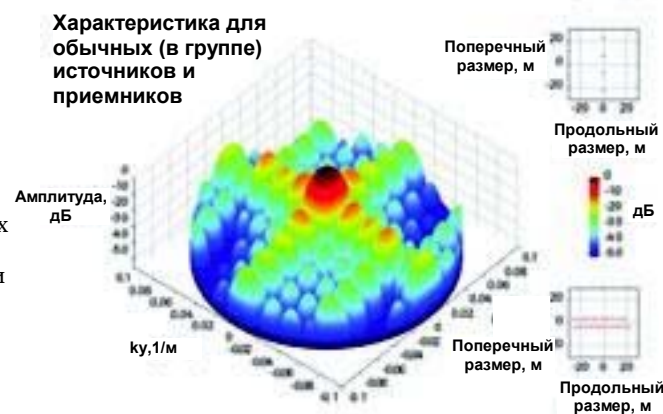


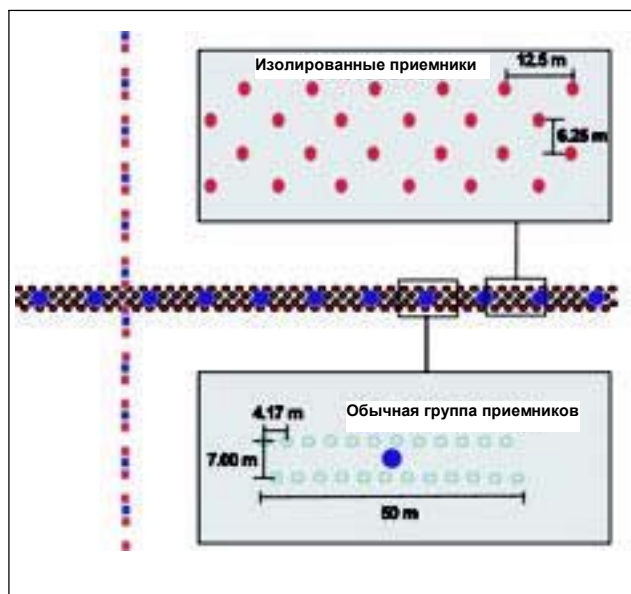
Рис. 3. Характеристики цифрового пространственного антиалиасингового фильтра  $K_x K_y$  для съемки с изолированными источниками и приемниками (вверху) и обычной расстановки с группированием источников и приемников (внизу).

Таким образом, устраняется дрейф частоты и фазы, неизбежный при обычном использовании сейсмодос.

Теорема об адекватной оцифровке (Baeten et al., 2000) утверждает, что для адекватной записи шума нужна расстановка с меньшим шагом между приемниками, чем для адекватной записи сигнала. Это значит, что данные можно восстановить на нужной пространственной сети после подавления шумов. Результатом является полевая запись с более низким уровнем шумов и улучшенным составом сигнала. Этим можно пользоваться либо для сокращения трудозатрат при полевых работах (делать меньше перекрытий, использовать меньше источников или приемников), либо для повышения качества материала по сравнению с обычными работами. Эффективная методика съемки с изолированными приемниками подразумевает использование поперечных расстановок. При такой геометрии для каждого отдельного поперечного профиля получается набор данных без перекрытия, являющийся частью непрерывной волновой картины, записанной достаточно детально, чтобы избежать перекрытия частот когерентных шумов. Это дает возможность верного применения методики 3D FKK для подавления когерентных шумов на отдельных поперечных профилях (Quigley, 2004).



## Наземная сейсморазведка



**Рис. 4. Схема сравнительных испытаний поперечных расстановок**

На рис. 3 показаны результаты применения пространственного антиаляйсингового фильтра КхКу к данным типичной традиционной расстановки и цифрового антиаляйсингового фильтра к данным, полученным с изолированными источником и приемником. В последнем случае цифровой фильтр близок к идеальному; в полосе пропускания характеристика постоянна, а вне ее – быстро падает. Кроме того, она изотропна по азимуту, то есть отклик одинаков для сигналов, приходящих с любого направления. Эти цифровые пространственные антиаляйсинговые фильтры созданы с помощью системы разработки фильтров APOCS (Ozbek et al., 2004).

Антиаляйсинговая фильтрация обычных данных проводится как правило путем свертки сигналов группы источников и приемников, при невыдержанной и меняющейся по азимуту степени подавления шумов в полосе подавления и невыдержанной (непостоянной) характеристике в полосе пропускания. При записи энергии из полосы подавления проникает в полосу пропускания и проявляется на трассе в виде шума. Подавление этого шума возможно только за счет потери части сигнала.

### Сравнительные испытания поперечных расстановок

Для оценки возможности улучшения соотношения сигнал/шум при использовании изолированных источников и приемников по сравнению с обычными способами проведения работ проведены сравнительные испытания. Испытания проведены полевым отрядом, проводившим работы по стандартной промышленной методике со стандартными расстановками источников и приемников. Положение поперечной расстановки показано на рис. 4. Испытание состояло в получении данных как с сгруппированными, так и с изолированными источниками и приемниками.

По профилю в направлении восток-запад располагались приемники. Положения изолированных приемников (красные точки) перекрываются с обычными группами приемников (темно-синие точки обозначают центры тяжести групп, светло-синие – положение приемников в группе). Длина профиля приемников, на котором располагалось 257 обычных групп приемников и 4104 изолированных приемника, составила 12,850 м. По профилю в направлении север-юг располагались источники. Положения изолированных источников (красные квадраты) совпадают с центрами групп источников обычной методики (темно-синие прямоугольники). Длина профиля источников составила 8,25 км. Параметры системы наблюдений были те же, что и в ходе производственных работ, которые в то время вел отряд. Для определения оптимальных параметров системы наблюдений с изолированными источниками и приемниками использована система планирования работ. Параметры обеих систем приведены в табл. 1. Заметим, что трудозатраты на источниках для системы с изолированными источниками вдвое меньше, чем для обычной.

### Параметры обычной расстановки

Приемники	Источники
Шаг между группами 50 м	Шаг между группами 50 м
Длина группы 50 м	4 вибратора (длина группы 50 м)
Приемников в группе - 24	4-кратный свип сигнал по 12 с (со смещением на 12,5 м)
	Полоса свип-сигнала 8-84 Гц

### Параметры расстановки с изолированными источниками и приемниками

Источники	Приемники
В шахматном порядке	Шаг – 25 м
12,5 ч 6,5 м	4 вибратора синхронно
изолированные	1-кратный свип сигнал 12 с
	Полоса свип-сигнала 6-72 Гц

**Таблица 1. Параметры сравнительных испытаний**

На рис. 5 показаны результаты для обеих расстановок при положении вибратора в 25 м от профиля приемников. Вверху приведены полевые записи, в середине – амплитудные спектры, показывающие различие между сигналом и расчетным шумом, внизу – полевая запись, переведенная в частотную область, в координатах частота – волновое число. Данные показаны на уровне полевых записей. Это значит, что они эквивалентны; с каждого положения ПВ записано одинаковое количество трасс, т. е. данные изолированных приемников цифровым образом сгруппированы так же как обычные данные. Разница в том, что в обычных данных подавление шумов идет только за счет аналогового суммирования в группе приемников, а в данных изолированных приемников сигнал сохраняется лучше за счет цифрового подавления шумов и коррекции амплитуд.

Сравнение данных показывает, что сгруппированные данные изолированных источников очевидно чище, а отражения прослеживаются на больших расстояниях

## Наземная сейсморазведка

В обычных данных уровень шума вполне приемлем, а поверхностная волна достаточно подавлена. Но данные от изолированных приемников все же имеют более высокое качество. Их преимущества видны на амплитудных спектрах. В обычных данных различие сигнала и шума невелико, а в данных изолированных источников они уверенно различаются до частоты 40 Гц.

Представление обычных данных в FK-области показывает, что поверхностная волна зарегистрирована неадекватно, т. е. подвержена аляйсингу и попадает в полосу пропускания. Представление в FK-области данных изолированных приемников показывает, что поверхностная волна успешно устранена, а остаточный шум не подвержен аляйсингу и может быть устранен дальнейшей обработкой. Эти данные показывают, что обработка данных изолированных источников, включающая цифровое группирование, подавление поверхностной волны, коррекцию амплитуд ввод статических поправок, и применение фильтра 3D FKK, созданного в системе APOCS, дает лучшие результаты, чем аналоговая фильтрация в пространственной группе из 24 приемников. Данные изолированных источников имеют более богатый частотный состав, и большее различие сигнала и шума, чем данные, полученные по обычной методике с эквивалентными расстановками источников и приемников. Кроме того, трудозатраты при работах с изолированными источниками и приемниками уменьшаются вдвое.

### Экспериментальные работы по вплетению

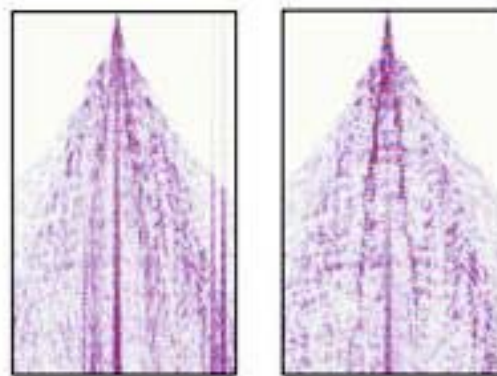
Для демонстрации применения методики вплетения с данными, полученными в 2004 г. по технологии Q-Land на месторождении Минагиш (Minagish) в Кувейте по заказу компании Kuwait Oil Company (Anderson, 2005) проведены опытные работы. Целью работ была оценка качества разреза, которого можно было бы достичь, если бы работы проводились с вплетением данных, а не за один прием. Исходные данные получены с поперечной расстановкой при расстоянии между профилями источников и приемников 200 м. Данные показаны на рис. 6.

Работы состояли в разделении исходных данных на три набора – два с расстоянием между профилями источников и приемников 800 м (наборы А и В, один смещен относительно другого на 400 м) и один – 400 м (набор С, смещенный на 200 м относительно А и В). Набор А был обработан так, как будто был получен независимо. Затем, вплетением в него набора В, перешли к сети 400x400 м (набор АВ). Наконец, вплетением в набор АВ набора С перешли к сети 200 x 20 м (набор АВС). Результаты обработки этих наборов данных представлены на рис. 7.

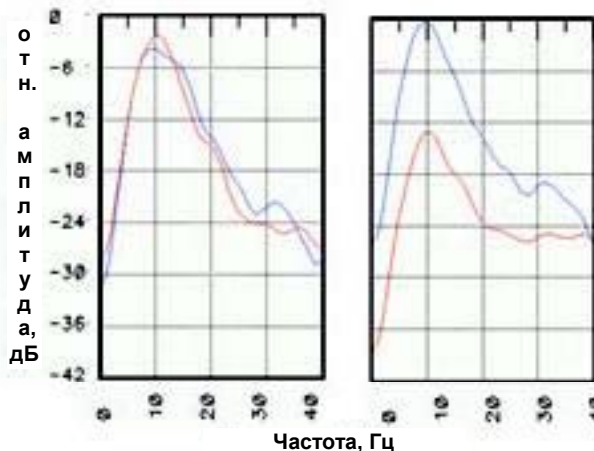
На разрезе для редкой сети 800 x 800 м по набору А хорошо выделяются структуры в целевом интервале времен 1200-1600 мс. Номинальная кратность этих данных – 24. Явные различия в спектрах сигнала и шума на частотах до 35 Гц позволяют выделить целевые объекты.

Вплетение набора В в набор А дало набор АВ с удвоенной номинальной кратностью – 48. Некоторые отражающие горизонты прослеживаются на больших расстояниях, полезный диапазон частот расширился до 45 Гц, что позволило более детально выделить зоны внутри залежи. Такой уровень детальности приемлем при постановке разведочного бурения.

Полевые записи. Интервал времен 0 – 3 с, Выносы 0-5000 м



Амплитудный спектр полевых записей. Сигнал – синий, расчетный шум – красный



Полевые записи в FK-области.  $k=0$  – середина горизонтальной оси. Частоты растут вниз по вертикальной оси (0-50 Гц)

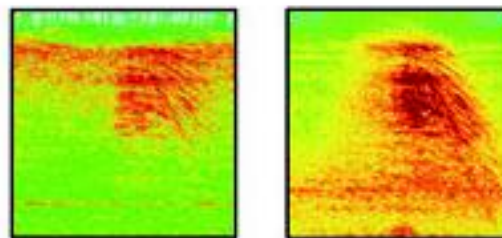
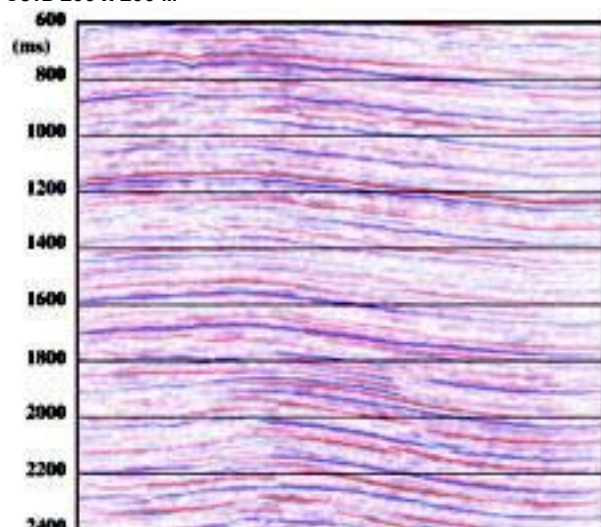


Рис. 5. Сравнение данных обычной расстановки (слева) и расстановки с изолированными приемниками (справа)

## Наземная сейсморазведка

Наконец, влетая в набор АВ набор С по сети 400 x 400 м, был получен набор АВС с шагом, сократившимся до 200 x 200 м. В результате получен разрез гораздо более высокого качества с кратностью 96 в середине профиля (рис. 7, справа). На этом разрезе видно не только общее геологическое строение, но и детально прослеживаются разломы и известные зоны внутри залежи. Частотный диапазон расширился до 55 Гц, а использование изолированных приемников позволяет использовать эти данные для обычного и азимутального AVO-анализа.

Оригинальные данные после суммирования по ОГТ.  
Сеть 200 x 200 м



Амплитудный спектр оригинальных данных. Сигнал – синий, расчетный шум – красный

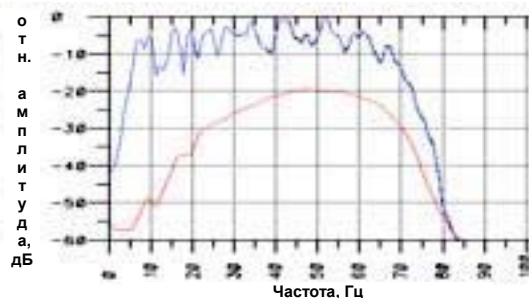


Схема системы наблюдений (желтый – профили приемников, синим – профили источников).

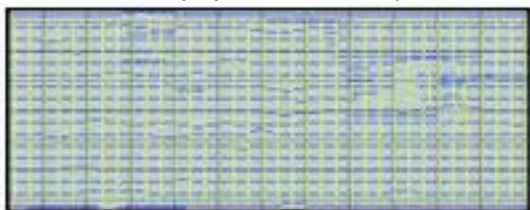


Рис. 6. Анализ данных, использованных в эксперименте по влечению данных

Частотный диапазон этого набора данных с кратностью 96 всего на 12 Гц уже, чем у исходного набора данных с кратностью 300.

Этот эксперимент показал возможность и экономическую эффективность применения методики влечения данных для улучшения качества разреза залежи. Влечение новых данных последовательно увеличивает детальность информации о залежи, что позволяет оптимизировать эксплуатацию. Важно отметить, что для определения параметров системы наблюдений и обработки никакой априорной информации с предыдущих этапов в этом эксперименте не использовалось. Например, статические поправки и скоростная модель, использованные при обработке первого набора данных по сети 800 x 800 м, были определены, опираясь только на сам этот набор данных.

### Заключение

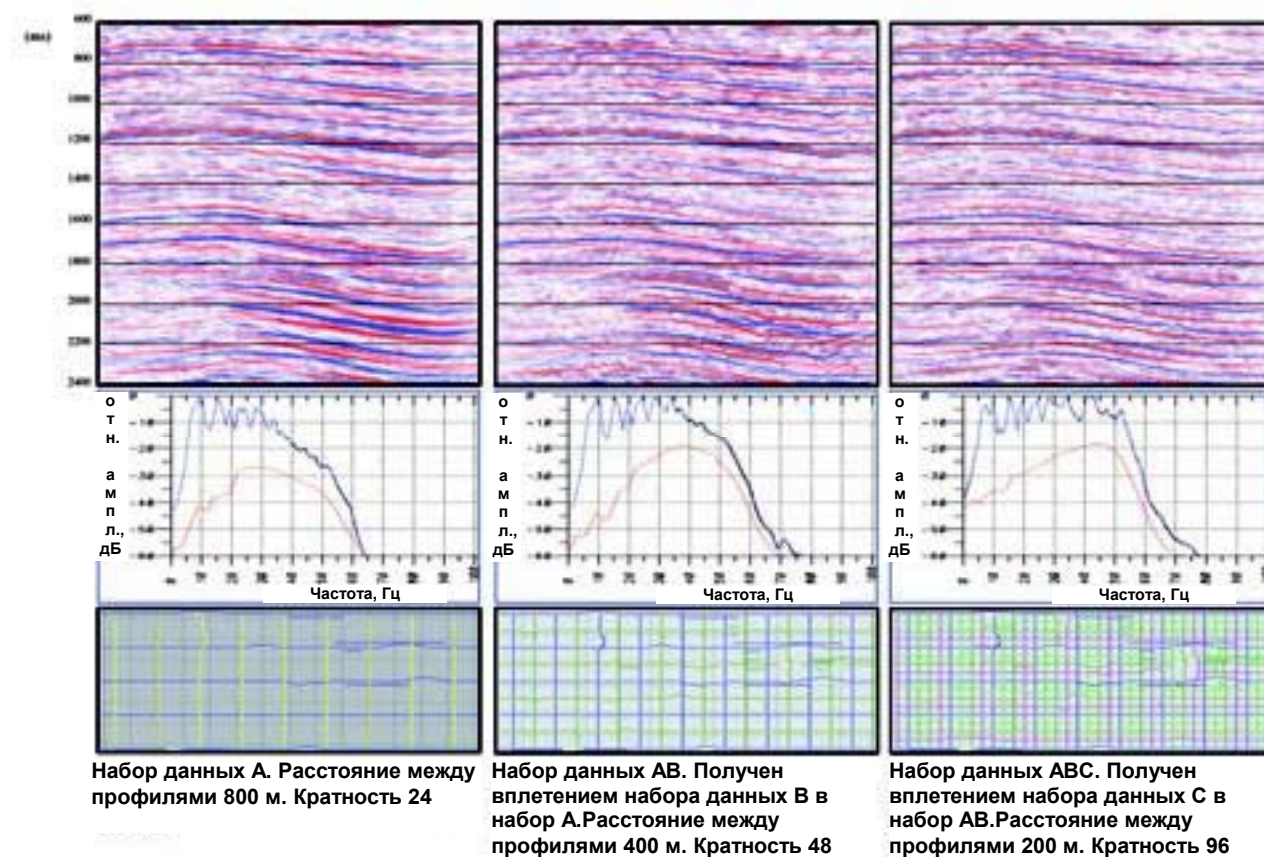
В связи с появлением многоканальных систем сбора данных с изолированными приемниками и дополняющих их алгоритмов обработки стал возможным пересмотр основных подходов к постановке сейсморазведочных работ. Эти новшества позволяют повысить качество сигнала путем коррекции трассы и подавления шума для каждого приемника. Кратность и геометрия группы утрачивают свое решающее значение в улучшении отношения сигнал-шум. В связи с необходимостью адекватно регистрировать когерентный шум при работе с изолированными источниками существенным параметром, определяющим геометрию системы наблюдений, становится расстояние между приемниками. За счет лучшего подавления когерентных и некогерентных шумов стало возможным определить истинную переходную характеристику разреза, улучшить качество расчета статических поправок и определения скоростной модели, что позволяет получать разрезы с большим разрешением по латерали и по времени. Более чистые полевые данные позволяют проводить работы с изолированными приемниками по редкой сети с меньшими (с точки зрения кратности и числа приемников и источников) трудозатратами в поле с сохранением требуемого качества разрезов.

Увеличение кратности при исследовании отдельных структур, например на стадии ввода в эксплуатацию или при доразведке в процессе эксплуатации, достигается при необходимости влечением результатов последующих работ. Такой подход обеспечивает экономию средств при полевых работах за счет повторного использования всех имеющихся данных. Методика влечения дает разрезы, пригодные для использования. Они соответствуют требованиям каждого этапа цикла эксплуатации месторождения.

На стадии разведки происходит общая экономия времени за счет объединения систем сбора и обработки, позволяющей эффективно управлять данными и получать качественные разрезы параллельно с выполнением работ. Возможно оперативное принятие решений о проведении дополнительных работ для улучшения качества разреза над отдельными объектами в рамках текущего этапа полевых работ, пока полевой отряд не сменил дислокацию.



## Наземная сейсморазведка



**Рис. 7. Результаты эксперимента по влпению данных показывают улучшение качества разреза (вверху) и спектрального состава сигнала (посередине) по мере влпения новых данных (схемы профилей показаны внизу; профили приемников вертикальны, профили источников – горизонтальны).**

Таким образом, время получения данных, качество которых отвечает требованиям этапов разведки, детализации и даже доразведки сокращается до нескольких недель.

Кратко говоря, методика влпения позволяет радикально изменить существующий цикл полевых работ в сейсморазведке. Для улучшения качества разреза над конкретным объектом теперь возможно повторное использование ранее полученных данных, что экономически более выгодно, чем игнорирование старых данных и проведение работ с нуля. Время перехода от разрезов, пригодных для разведки к разрезам, пригодным при вводе в эксплуатацию измеряется теперь неделями, а не годами. Модели, построенные для некоторых примеров, показывают, что возможно сокращение затрат на эксплуатацию месторождения без резкого увеличения затрат на сейсморазведку.

### Литература

Ongiehong, L., and Askin, H.J. [1988] Towards the universal seismic acquisition technique. *First Break*, 6, 2, 46-63.  
Baeten, G.J.M., Belougne V., Combee, L., Kragh, E., Laake, A., Martin, J.E., Orban, J., Ozbek, A., Vermeer, and P.L.

[2000] Acquisition and processing of point receiver measurements in land seismic. *70<sup>th</sup> SEG Annual International Meeting*, Expanded Abstracts.

Quigley, J. [2004] An integrated 3D acquisition and processing technique using point sources and point receivers. *74<sup>th</sup> SEG Annual International Meeting*, Expanded Abstracts, 17-20.

Ozbek, A., Hoteit, L., and Dumitru, G. [2004] 3D filter design on a hexagonal grid for point-receiver land acquisition. *EAGE Fall Research Workshop on Seismic Acquisition Technology*, Rhodes, Greece.

Anderson, B., El-Emam, A., Rached, G., Shabrawi, A., and Smart, A. [2005] How single-sensor seismic improved image of Kuwait's Minagish Field. *First Break*, 23, 2, 63-69.

### Благодарности

Авторы благодарят Дэвида Арнольда (David Arnold), д-ра Андреаса Лакаке (Andreas Laake), Стюарта Папворта (Stuart Papworth), Стива Пикеринга (Steve Pickering) Энди Сьюэлла (Andy Sewell), Аймана Шабрави (Ayman Shabrawi), Эндрю Смарта (Andrew Smart) и Рачада Уильяма (Rachad William) за их участие и помощь.