

УДК 624.131

**МНОГОКОМПОНЕНТНАЯ СЕЙСМОРАЗВЕДКА  
НАИБОЛЕЕ ПРОГРЕССИВНЫЙ МЕТОД  
ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ГЕОЛОГИЧЕСКОГО РАЗРЕЗА**

© Кузнеченков Е.П., Керимов А-Г.Г., Крамаренко В.С., Керимова Е.Г.

*Северо-Кавказский федеральный университет, г. Ставрополь*

*Для повышения детальности сейсморазведки требуется значительное увеличение физических наблюдений, следовательно, необходимо увеличение количества пунктов возбуждения для полной отработки околоскважинного пространства. В этих условиях первостепенной задачей является упрощение способов возбуждения поперечных волн и на этой основе повышение их производительности. Статья посвящена совершенствованию поверхностных источников возбуждения поперечных волн для волновой многокомпонентной сейсморазведки.*

**Ключевые слова:** сейсморазведка, продольная волна, поперечная волна, источник возбуждения сейсмических волн, коэффициент Пуассона, экранно-целевые источники.

**Вводная часть**

При поисках и разведке месторождений нефти и газа перед современной сейсморазведкой ставятся всё более сложные и тонкие задачи, такие как поиск малоамплитудных ловушек неструктурного типа, прогнозирование геологического разреза, поиск УВ месторождений в мощных глинистых отложениях и др. Решение их требует существенного повышения точности и информативности сейсмических построений по сравнению с традиционной сейсморазведкой, основанной на использовании поляризованных в вертикальной плоскости продольных волн  $P$ , возбуждаемых и регистрируемых по системе  $Z-Z$  (вертикальные возбуждение и регистрация). Перспективы решения указанных задач в настоящее время связывают с привлечением к традиционной монокомпонентной  $P$  – волновой сейсморазведке многокомпонентных наблюдений, основанных на использовании поперечных волн  $SV$  и  $SH$ , поляризованных соответственно в вертикальной и горизонтальной плоскостях. При этом поперечные волны  $SV$  возбуждаются и регистрируются по системе  $X-X$ , при которой источник возбуждения и ось максимальной чувствительности сейсмоприёмника направлены горизонтально по оси  $X$ , совпадающей с профилем наблюдений, а волны  $SH$  – по системе  $Y-Y$ , при которой источник возбуждения и сейсмоприёмник направлены горизонтально по оси  $Y$ , перпендикулярно профилю наблюдений.

Согласно динамической теории распространения сейсмических колебаний максимально точную характеристику упругих свойств изучаемой среды можно получить

только при совместном использовании волн различной поляризации – продольных  $P$ , поперечных  $SH$  и  $SV$ .

### Материалы и методы исследования

Геологические породы характеризуются различными модулями упругости, каждый из которых выражает закон Гука (напряжение в упругой среде пропорционально вызванной им деформации) в четырех известных видах деформации: продольное растяжение в условиях поперечного сжатия, при котором определяется модуль Юнга –  $E$ ; продольное растяжение в отсутствии поперечного сжатия (определяется модуль продольного растяжения  $\Psi$ ); всестороннее сжатие, примером которого является действие давления в жидкости (определяется модуль всестороннего сжатия  $K$ ); поперечный сдвиг (определяется модуль сдвига  $G$ ). Важной характеристикой упругой среды является также коэффициент Пуассона  $\nu$ , являющийся отношением поперечного сжатия к продольному растяжению пород.

Каждый из указанных параметров выражается соответствующей формулой (1, 2, 3, 4) через значения скоростей продольных ( $V_p$ ) и поперечных ( $V_s$ ) волн [4, 6]:

$$\nu = \frac{V_p^2 - 2V_s^2}{2(V_p^2 - V_s^2)}, \quad (1)$$

где  $\nu$  – коэффициент Пуассона;

$V_p$  – скорость распространения продольной волны;

$V_s$  – скорость распространения поперечной волны.

$$E = \frac{\nu V_s^2 (3V_p^2 - 4V_s^2)}{V_p^2 - V_s^2}, \quad (2)$$

где  $E$  – модуль Юнга.

$$G = \nu V_s^2, \quad (3)$$

где  $G$  – модуль сдвига.

$$K = \frac{A}{3(1 - 2\nu)}, \quad (4)$$

где  $K$  – модуль всестороннего объемного сжатия.

Вышеописанные модули являются основными характеристиками упругости пород и в промысловой геофизике определяются методом широкополосной акустики (АКШ), в котором расчет скоростей выполняется по кинематическим характеристикам продольных и поперечных волн (рис. 1).

В настоящее время наибольшее практическое значение при поисках нефти и газа приобретает коэффициент Пуассона, который до трех и более раз уменьшается в пористых породах, заполненных газом, по сравнению с теми же породами, заполненными нефтью или водой [3].

Различия в значениях коэффициента Пуассона, например, для песчаника являются поисковым признаком газовых месторождений, применяемым при наземной сейсморазведке (рис. 2).

На рисунке 3 приведен пример аномального понижения коэффициента Пуассона в продуктивной толще газового месторождения Русский хутор на территории Восточного Предкавказья, полученный по данным наземной сейсморазведки.

Наряду с АКШ большой объем сейсмической информации содержит многокомпонентный вариант вертикального сейсмического профилирования (МК ВСП). Он использует волны сейсмического диапазона частот (0...500 Гц), пункты возбуждения (ПВ) на поверхности земли, пункты приёма (ПП) – в скважине на заданной глубине. При этом виде каротажа регистрируются не только первые вступления сейсмических волн,

позволяющие определить скорости их распространения, но и образующиеся на границах раздела сред последующие волны, позволяющие проводить привязку отражений к геологическому разрезу.

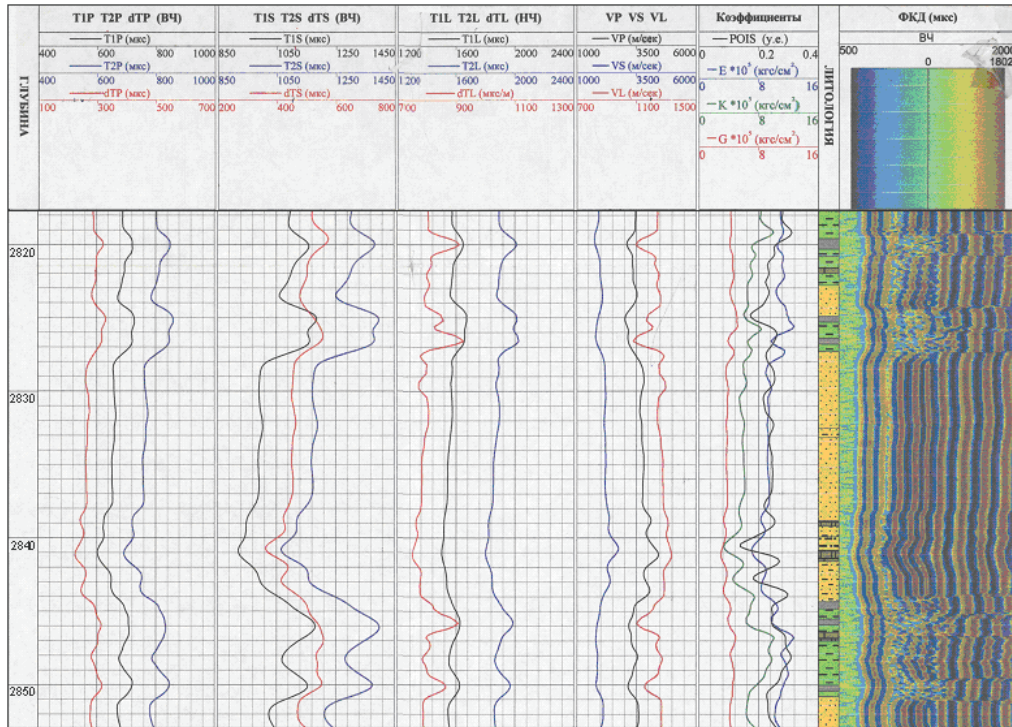


Рис. 1. Фрагмент диаграммы широкополосного акустического каротажа

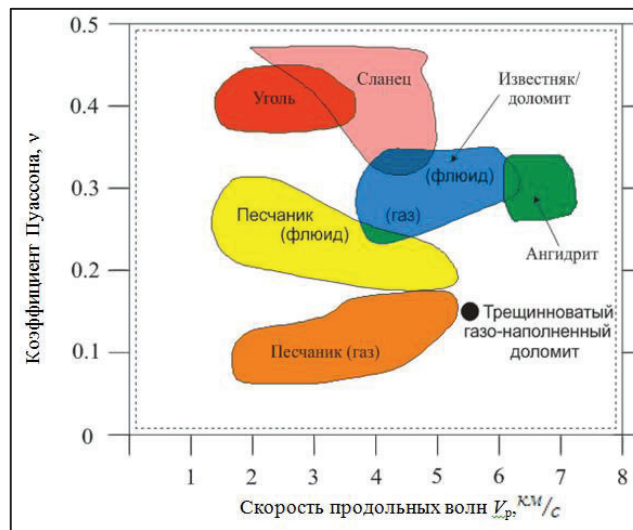


Рис. 2. Зависимость коэффициента Пуассона от скорости продольных волн для пород различной литологии

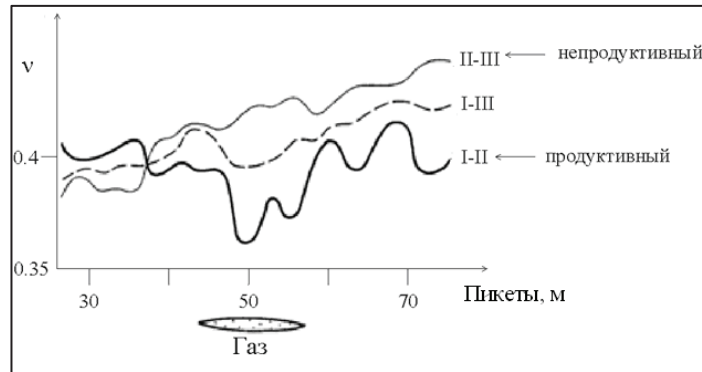


Рис. 3. Аномальное понижение коэффициента Пуассона в продуктивной толще месторождения Русский хутор

В отличие от  $P$  – волнового (однокомпонентного) варианта ВСП для проведения многокомпонентных наблюдений требуется плотный прижим сейсмоприёмников к стенке скважины, а также их ориентация в заданном направлении, согласованном с ориентировкой источников возбуждения поперечных волн. Это создаёт определённые технические трудности при разработке и применении регистрирующей аппаратуры, увеличивающиеся пропорционально количеству сейсмоприёмников в скважине. Поэтому история развития МК ВСП – это, в первую очередь, история совершенствования регистрирующей аппаратуры от одноуровневых (расположенных в одной точке скважины) трехкомпонентных сейсмоприёмников, до современных 12-ти уровневых четырехкомпонентных блоков регистрации (сейсмоприёмники XYZ плюс гидрофон), разнесенных вдоль ствола буровой скважины на различные расстояния – от типовых 10 м до более практичных 50 м (48 – канальная система регистрации) [5].

Вторая составляющая истории развития многокомпонентного ВСП – это разработка и совершенствование поверхностных источников возбуждения поперечных волн, которая пока не получила окончательного завершения не только для скважинной сейсморазведки (ВСП), но и для поверхностных её модификаций.

Основным отличием поперечной волны  $SH$ , поляризованной в горизонтальной плоскости, от волны  $SV$ , поляризованной в вертикальной плоскости, является её неспособность обмениваться энергией с поляризованной в вертикальной плоскости продольной волной  $P$  на границах раздела сред. Это даёт более простую волновую картину по сравнению с волнами  $P$  и  $SV$ , что является наиболее привлекательным свойством при решении всё более сложных задач, стоящих перед современной сейсморазведкой. Поперечные же волны  $SV$  способны обмениваться энергией с поляризованными в одной и той же вертикальной плоскости продольными волнами  $P$ . Это, с одной стороны, приводит к усложнению волновой картины на сейсмограммах, полученных по системам  $X-X$  и  $Z-Z$ , с другой стороны, позволяет получить волны  $SV$  не только с помощью специальных горизонтально направленных источников возбуждения, но и стандартных источников возбуждения продольных волн.

А это открывает возможность их применения не только на суше, но и на акваториях при условии установки сейсмоприёмников на дне водоёма (рис. 4). И именно на обменные волны  $SV$  делают ставку французские геофизики при проведении многокомпонентного каротажа методом ВСП на акваториях. Они считают эти работы вполне выполнимыми при использовании пункта возбуждения в движении, несмотря на довольно большой объем физических наблюдений при отработке околоскважинного пространства у каждой скважины.

Анализ методики МК ВСП показывает, что она развивается по пути существенного повышения детальности исследований, что требует значительного увеличения физических наблюдений, а, следовательно, в первую очередь, соответствующего увеличения количества пунктов возбуждения (ПВ) для полной

отработки околоскважинного пространства. В этих условиях первоочередной задачей является упрощение способов возбуждения поперечных волн и на этой основе повышение их производительности. При работе на акваториях [5] это достигается использованием обменной волны  $SV$ , образующейся на дне моря из продольной волны  $P$ , возбуждаемой на поверхности моря с помощью традиционных источников возбуждения, принятых в сейсморазведке (см. рис. 4).

Французские геофизики фирмы CGG использовали обменную волну  $SV$  и при стандартных работах на море, для чего им потребовалось устанавливать четырёхкомпонентные блоки регистрации (3 геофона  $XVZ$  + гидрофон) на морское дно, залегающее на глубине 1500 м. В результате этих донных сейсморазведочных работ строится два сейсмических разреза по данным традиционно применяемых продольных волн  $P$  и поперечных волн  $SV$ , образовавшихся из продольных волн на границе раздела вода – грунт (рис. 5). В нижней части рисунка 5а отчетливо видна аномалия типа «плоское пятно» на разрезе продольных волн, чувствительных к содержанию в пористых породах флюидов и газа. На поперечно-волновом разрезе (рис. 5 б) это отражение не проявляется из-за нечувствительности поперечных волн к жидкостям и газу, заполняющим пористый коллектор, что является признаком углеводородов [3]. Анализ методики МК ВСП показывает, что она развивается по пути существенного повышения детальности исследований, что требует значительного увеличения физических наблюдений, а, следовательно, в первую очередь, соответствующего увеличения количества пунктов возбуждения (ПВ) для полной отработки околоскважинного пространства. В этих условиях первоочередной задачей является упрощение способов возбуждения поперечных волн и на этой основе повышение их производительности. При работе на акваториях [5] это достигается использованием обменной волны  $SV$ , образующейся на дне моря из продольной волны  $P$ , возбуждаемой на поверхности моря с помощью традиционных источников возбуждения, принятых в сейсморазведке (см. рис. 4).

Французские геофизики фирмы CGG использовали обменную волну  $SV$  и при стандартных работах на море, для чего им потребовалось устанавливать четырёхкомпонентные блоки регистрации (3 геофона  $XVZ$  + гидрофон) на морское дно, залегающее на глубине 1500 м. В результате этих донных сейсморазведочных работ строится два сейсмических разреза по данным традиционно применяемых продольных волн  $P$  и поперечных волн  $SV$ , образовавшихся из продольных волн на границе раздела вода – грунт (рис. 5). В нижней части рисунка 5а отчетливо видна аномалия типа «плоское пятно» на разрезе продольных волн, чувствительных к содержанию в пористых породах флюидов и газа. На поперечно-волновом разрезе (рис. 5б) это отражение не проявляется из-за нечувствительности поперечных волн к жидкостям и газу, заполняющим пористый коллектор, что является признаком углеводородов [3].

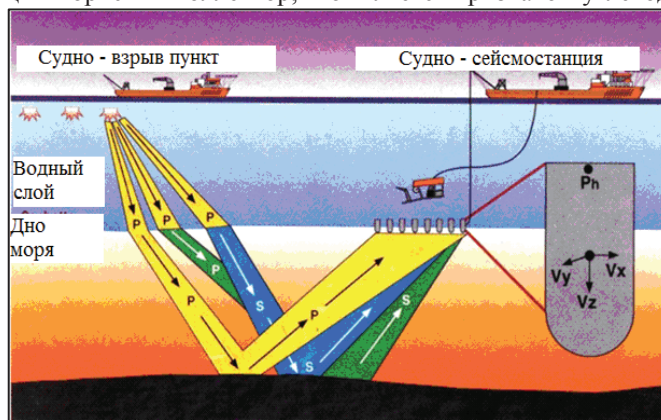


Рис. 4. Преобразование продольной волны  $P$  в поперечную волну  $SV$  на дне моря и система наблюдений при донной многокомпонентной сейсморазведке



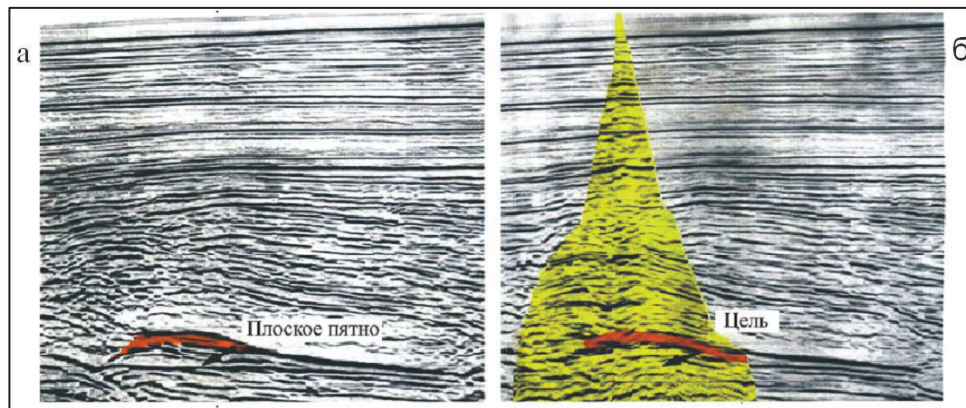


Рис. 5. Разрез продольных волн (а) и разрез продольных волн со вставленным фрагментом разреза поперечных волн (б)

Совместная интерпретация  $P$  – волнового и  $S$  – волнового разрезов повышает коэффициент успешности бурения, что оправдывает дополнительные расходы на  $S$ -волновую сейсморазведку.

У нас в стране аналогичные результаты были получены фирмой «Южморгео», которой на дне Азовского моря (максимальная глубина – 15 м) было открыто газовое месторождение с применением донной ( $P + SV$ ) – волновой сейсморазведки.

Сейсмокаротажные работы методом ВСП с использованием только продольных волн  $P$  (однокомпонентное ВСП – ОК ВСП) позволяют определять изменение скорости  $P$  волн с глубиной, осуществлять привязку сейсмических отражений к геологическому разрезу. Эти данные поступают в камеральное бюро сейсморазведки и служат для повышения точности сейсмических построений в окоскважинном пространстве на удалении от каротируемой скважины в десятки, а в отдаленных районах и в сотни километров. Использование же многокомпонентной модификации ВСП позволяет дополнительно определить значения скоростей поперечных волн  $V_s$ , на основе этого вычислить модули упругости ( $E, G, K, \Psi$ ), а также коэффициент Пуассона  $\nu$  вдоль ствола скважины и по этим данным выделить в изучаемой скважине глубину залегания и характеристики продуктивных горизонтов. Эта информация позволяет сейсморазведчикам, используя многокомпонентную модификацию ВСП, определять геометрические параметры залежи. Но на современном этапе развития поверхностной сейсморазведки на суше эта важная информация не может быть востребована в полной мере по причине отсутствия достаточно эффективных источников возбуждения поперечных волн, несмотря на более чем полувековые усилия геофизиков многих стран, направленные на решение этой проблемы. Согласно общепринятому мнению, такая ситуация сложилась из-за гораздо более сложных условий возбуждения поперечных волн по сравнению с продольными волнами. По нашему же мнению, основная причина не в этом, а в несовершенстве нашей патентной службы, не всегда способной эффективно направить развитие научных проблем, имеющих важное государственное значение, в наиболее перспективные направления, соответствующие современному мировому уровню развития, подтвержденному необходимыми изобретениями и патентами.

Согласно динамической теории распространения сейсмических колебаний наиболее простая волновая картина наблюдается при возбуждении поперечных волн горизонтально направленными воздействиями и приеме сейсмоприемниками, ось максимальной чувствительности которых параллельна оси приложенной силы (схема  $Y-Y$ ). При этом регистрируются только поляризованные в горизонтальной плоскости поперечные волны типа  $SH$ . В отличие от поперечных волн  $SV$ , поляризованных в вертикальной плоскости, они не дают обмена на границах раздела сред, что существенно

снижает число зон интерференции, упрощая тем самым волновую картину на сейсмограммах. Поэтому развитие метода поперечных волн шло, в основном, по пути использования именно поперечной волны  $SH$ , возбуждаемой горизонтально направленным воздействием. Благоприятным обстоятельством при этом было свойство волн  $SH$  менять на сейсмической записи свою полярность на противоположную при изменении направления горизонтального воздействия на  $180^\circ$ . Благодаря этому свойству фазовой инверсии волну  $SH$  можно выделить на фоне продольных и других необращающихся волн-помех с помощью операции вычитания сейсмических записей (операция  $\Delta$ ), полученных от противоположно направленных воздействий.

### Результаты и их обсуждение

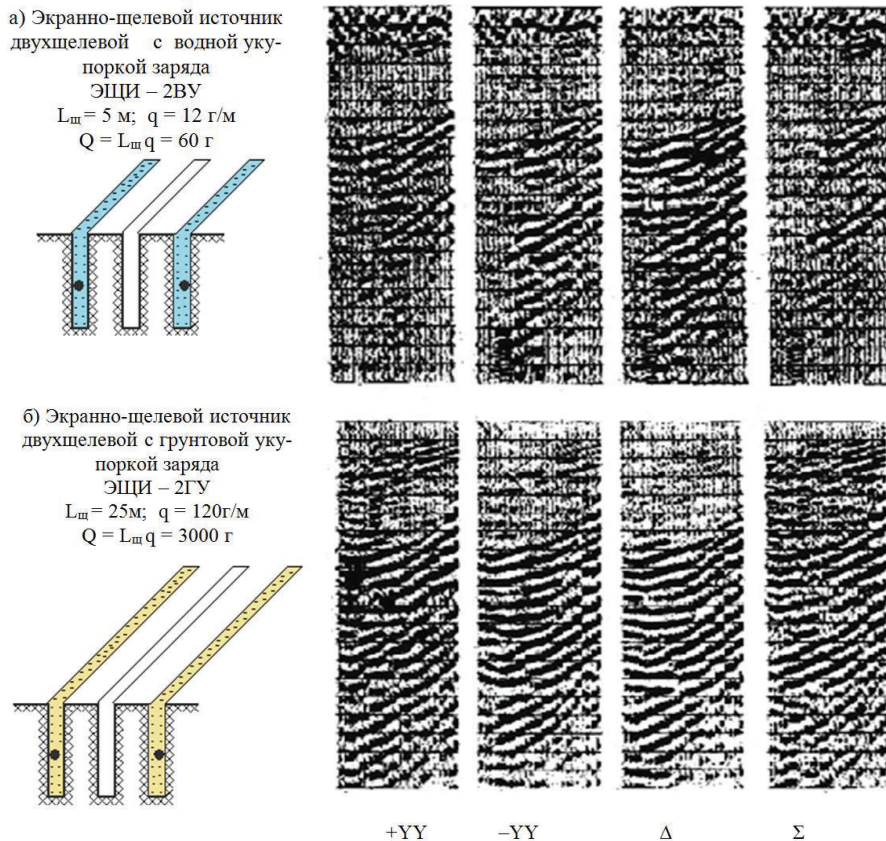
Свободными от недостатков указанных взрывных источников возбуждения поперечных волн являются экранно-щелевые источники, в которых горизонтальную направленность взрывному воздействию придает экран – отражатель в виде заполненной воздухом вертикальной щели, расположенной параллельно взрывной щели так, чтобы отражать энергию ударной волны, направляющуюся после взрыва в тыльную сторону от источника, переориентируя ее в противоположное направление, увеличивая тем самым полезный сигнал и уменьшая фон волн-помех. Это повышает коэффициент полезного действия экранно-щелевых источников по сравнению с траншейными и скважинно-камуфлетными источниками, в которых рыхлый грунт «пассивно» поглощает энергию ударной волны со всех сторон от источника, кроме рабочего направления.

В процессе разработки технологии многокомпонентной сейсморазведки в РФ были получены несколько авторских свидетельств на изобретение способов и источников возбуждения поперечных волн [1, 2].

Однако, переход сейсморазведки к более детальным объемным наблюдениям (система 3D) потребовал от линейных источников возбуждения, к которым относятся экранно-щелевые источники поперечных волн, дополнительного повышения производительности и, особенно, уменьшения длины с 25 – 30 м, по крайней мере, до 5 – 10 м, а лучше до 1 – 3 м. Такие жесткие требования могли быть удовлетворены только за счет резкого повышения сейсмической эффективности взрыва. И такой путь был найден, это использование во взрывной щели экранно-щелевых источников водной укупорки заряда вместо традиционной укупорки из рыхлого грунта (рис. 6). Для этого, правда, пришлось преодолеть определенный психологический барьер, связанный с тем, что «поперечные волны в воде не распространяются».

При этом, с самого начала развития сейсморазведки было известно, что при возбуждении продольных волн сейсмический эффект взрыва увеличивается до 25 раз с повышением влажности пород, но только последующие опытные работы с экранно-щелевыми источниками показали, что такого же эффекта можно добиться и при возбуждении поперечных волн. Для подтверждения этого на рисунке 6 представлены знаковые ( $\pm Y$ ), разностные ( $\Delta$ ) и суммарные ( $\Sigma$ ) сейсмограммы, с записью поперечных волн  $SH$ , полученные при использовании экранно-щелевых источников с укупоркой заряда водой (рис. 6а) и рыхлым грунтом (рис. 6б).

Суммарная величина заряда  $Q$  источника с водной укупоркой заряда, равная 60 г, в 50 раз меньше величины заряда источника со стандартной грунтовой укупоркой, равной 3000 г, а амплитуды целевых поперечных волн на результирующих разностных сейсмограммах примерно равны при значительном уменьшении интенсивности волн-помех на суммарной сейсмограмме источника с водной укупоркой по сравнению с суммарной сейсмограммой источника с грунтовой укупоркой.



Исходные  $\pm Y$ , разностные  $-\Delta$  и суммарные  $-\Sigma$  сейсмограммы  
Рис. 6. Сейсмограммы, характеризующие экранно-щелевой источник возбуждения поперечных волн с водной и грунтовой укупоркой заряда

Результаты экспериментальных работ показывают, что хорошее качество сейсмического материала при профильных наблюдениях МОВ-ОГТ получается с экранно-щелевыми источниками и укупоркой заряда рыхлым грунтом при длине источника 10 м. Замена же рыхлого грунта водой в десятки раз повышает сейсмический эффект взрыва, что позволит *сократить длину источника до 1 – 2<sup>х</sup> метров*.

Таким образом, в современной геофизике успешно развиваются многокомпонентные сейсмоакустические методы. В промышленных масштабах применяется многокомпонентный вариант АКШ, метод МС ВСП на суше и море, сейсморазведочные работы при решении инженерных задач в верхней части геологического разреза, донный вариант сейсморазведки на море у нас в стране и за рубежом. И только нефтегазопоисковая многокомпонентная сейсморазведка на суше значительно отстает по объему работ от традиционной продольно-волновой сейсморазведки. Общепринятая причина такого отставания наиболее важной составляющей геофизических работ – гораздо большие трудности возбуждения поперечных волн по сравнению с продольными волнами – представляется не вполне обоснованной. Анализ развития источников возбуждения поперечных волн, в том числе анализ патентных материалов, показывает, что еще в 70-80<sup>х</sup> годах прошлого столетия в нашей стране было разработано несколько источников возбуждения поперечных волн, обладающих необходимой горизонтальной направленностью и глубиной исследований, которые в последующие годы успешно совершенствовались. И только застойные годы «перестройки» остановили успешное развитие этого перспективного



направления геофизических работ. Широкое внедрение экранно-щелевых источников сдерживается также из-за отсутствия в геофизических организациях специальной щелевой техники (баровой, диско-фрезерной и др.). Поэтому в последнее время нами были разработаны источники возбуждения поперечных волн с использованием в качестве выработки в грунте скважины большого диаметра (порядка 300 – 700 мм) и малой глубины (1,0 – 2,5 м). Подготовка таких скважин является стандартной операцией для современной буровой техники, монтируемой на базе сравнительно легких автомашин типа ГАЗ-66 и даже УАЗ-469, а также колесных тракторов типа МТЗ-50. Экспериментальными работами показано, что при использовании скважины диаметром 500 мм можно получить обращающиеся поперечные волны при плотности заряжения до 360 – 420 г/м (30 – 35 линий ДША). На эти источники – «Скважинный источник возбуждения поперечных волн» и «Источник возбуждения поперечных сейсмических волн в грунте» в 2010 г. получены патенты РФ [7, 8].

### Выводы и рекомендации

Нет никакого сомнения в том, что широкое внедрение МС при поисках и разведке месторождений нефти и газа послужит, в свою очередь, мощным импульсом для дальнейшего повышения эффективности не только источников возбуждения поперечных волн заданной поляризации, но и всех других составляющих технологического процесса сейсморазведочных работ от сбора исходных данных до их обработки и интерпретации. А это, в свою очередь, позволит объединить в едином комплексе многокомпонентные сейсмоакустические методы поверхностной, поверхностно-скважинной (ВСП) и скважинной (АКШ) геофизики, что является основным условием успешности *геологического моделирования*, так как дает максимально полную и точную характеристику упругих свойств изучаемого геологического разреза, в том числе и на территории Восточного Предкавказья.

### Литература

1. А.С. 371543 СССР, G01 V 1/13. Способ возбуждения поперечных сейсмических волн в грунте. / *Е.П. Кузнеченков, А.А. Мигалкин, Н. А. Гормаш* (СССР). – 1653214/26-25 заявлено 03.05.71 опуб. 22.02.73, Бюл. 12.
2. А.С. 1004934 СССР, G01 V 1/053. Источник возбуждения поперечных сейсмических волн в грунте. / *Е.П. Кузнеченков, А.А. Мигалкин, К.А. Савинский* (СССР). – 2404259/18-25 заявлено 09.08.76 г. опубл. 15.03.83, Бюл. № 10.
3. *Вийермоз К.* Многокомпонентная сейсморазведка приобретает вес // Новые тенденции. Новые технологии. 1997. Париж. Мир CGG: С. 14–15.
4. *Ерофеев Л.Я., Вахромеев Г.С., Зинченко В.С., Номоконова Г.Г.* Физика горных пород. Томск. 2006. 519 с.
5. *Жеан Д., Дилон П.* Трехмерное уровневое ВСП. Метод детального исследования околоскважинного пространства // Новые тенденции. Новые технологии. 1997. Париж. Мир CGG: С. 11-13.
6. *Огильви А.А.* Основы инженерной геофизики. М.: Недра, 1990. 502 с.
7. Патент на полезную модель 93549 Российская Федерация, МПК G01V 1/00. Скважинный источник возбуждения поперечных волн / *А-Г. Г. Керимов, Е. П. Кузнеченков, А. Ф. Керимов, А. Н. Дектярев.* Заявитель и патентообладатель Северо-Кавказский государственный технический университет № 2009146095/22; заявл. 11.12. 2009; опубл. 27.04.2010, Бюл. № 12.
8. Патент на полезную модель 93550 Российская Федерация, МПК G01V 1/13. Источник возбуждения поперечных сейсмических волн в грунте / *А-Г.Г. Керимов, Е.П. Кузнеченков, А.Ф. Керимов, А.Н. Дектярев.* Заявитель и патентообладатель Северо-Кавказский государственный технический университет № 2009146096/22; заявл. 11.12. 2009; опубл. 27.04.2010, Бюл. № 12.