

УДК 550.834.08

© В.В. Молдаков, В.В. Романов

В.В. Молдаков, В.В. Романов

# ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТЕЙ ПРИМЕНЕНИЯ КОМБИНИРОВАННЫХ СХЕМ НАБЛЮДЕНИЯ В ИНЖЕНЕРНОЙ СЕЙСМОРАЗВЕДКЕ

## Введение

В инженерной сейсморазведке для регистрации продольных ( $P$ ) и поперечных ( $Sh$ ) волн используются традиционные схемы наблюдений  $Z-Z$  и  $Y-Y$ . Схема наблюдения  $Z-Z$  подразумевает вертикально направленный удар и регистрацию вертикальными геофонами. Схема наблюдения  $Y-Y$  представляет собой взаимно противоположные горизонтальные удары  $Y+$ ,  $Y-$  и регистрацию горизонтальными геофонами. Учитывая тот факт, что  $Sh$  волны линейно поляризованы, фаза их импульсов зависит от направления удара источника. Если изменить направление удара на противоположное, то полярность импульсов поперечной волны развернется в другую сторону, тогда как фазы продольных неполяризованных волн останутся прежними. Это обстоятельство используется для выделения волн выбранной поляризации. Вычитая друг из друга сейсмограммы, записанные при различно ориентированных ударах, можно выделить поляризованные волны и подавить все остальные. Эта технология получила название « $\pm$ ».

В целом обе эти схемы наблюдений позволяют наиболее полно изучить верхнюю часть геологического строения участка и оценить его сейсмические свойства. Современные системы обработки позволяют использовать для оценки сейсмических условий почти всю волновую картину. Эффективно используются отраженные, преломленные и поверхностные волны, как продольные, так и поперечные.

При больших производственных объемах сейсморазведочных работ, в основном для линейных объектов, большую роль играет скорость и качество получаемого материала. Каждая деталь работы, которая позволяет сократить период производственного цикла хотя бы на короткий промежуток времени, может существенно повлиять на общее время работ.

Нами были проведены исследования по пересмотру традиционных схем наблюдений ( $ZZ$  и  $YY$ ) с целью сокращения временных и трудовых затрат в полевых условиях, а также для избавления частичной предобработки. Для этого были изучены известные публикации на эту тематику и дана оценка их

состоятельности. По результатам ряда собственных полевых экспериментов предложены свои варианты оптимизации работ.

## Датчик двойной поляризации $Y+Y-$

В публикации [1] приводится пример создания групп из пары различно ориентированных приемников, соединенных последовательно и в противофазе. Утверждается, что такие группы позволяют повторить эффект от вычитания различно ориентированных ударов, тогда как фактически удары будут выполняться только с одной стороны. Такая замена, будь она действительно равнозначной, позволила бы существенно повысить скорость выполнения полевых работ по технологии « $\pm$ » и облегчила бы предварительную обработку. Однако, действительно ли поворот направления оси чувствительности приемника равнозначен изменению направления удара?

Автором было создано пять сейсмических приемников с двойной поляризацией на базе популярных датчиков GS20-DX-2B (Геоспейс, Уфа) (рис. 1).

При сравнении с данными, полученными по стандартной технологии разнонаправленных ударов, была установлена практическая идентичность формы сигнала на трассах сдвоенных и одиночных горизонтальных приемников (рис. 2А).

Основной цели технологии – подавления колебаний продольных волн – при помощи сдвоенных приемников добиться не удалось. Причина слабой эффективности сдвоенных датчиков оказалась в том, что при повороте датчика с «+» на «-» инвертировались фазы всех волн, в том числе и продольных, наблюдаемых в первых вступлениях (рис. 2Б). Фактически группа из двух датчиков работала как стандартная группа и вызывала лишь двукратное увеличение чувствительности приема, что явно не соответствует всем задачам технологии « $\pm$ ». Еще одним важным отрицательным нюансом является побочное влияние электромагнитных колебаний в системе спаянных датчиков, которое отражается на записях сейсмограмм в виде помех.

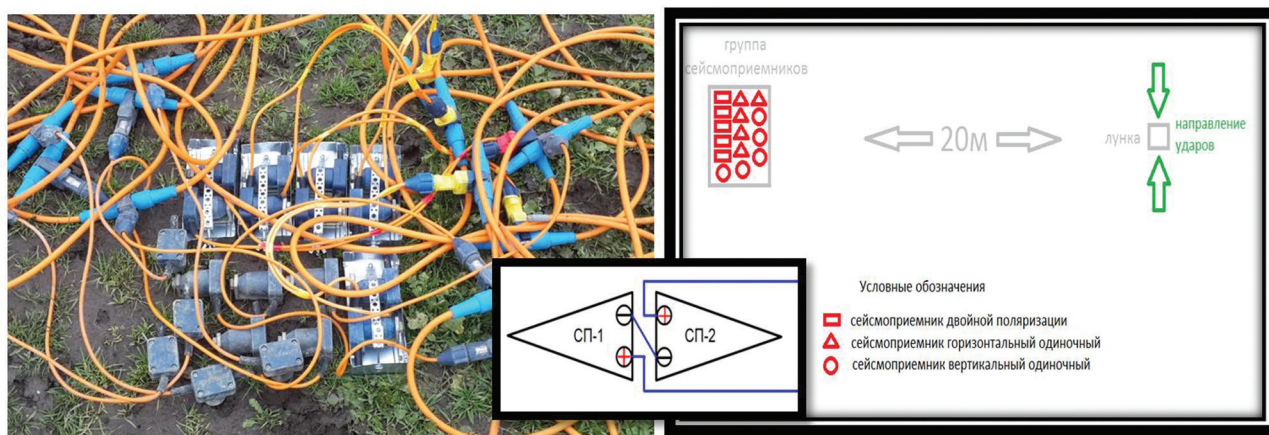


Рис. 1. Фото полевых испытаний датчиков двойной поляризации на идентичность. 5 геофонов, скрепленные перфолентой – «датчики двойной поляризации», 5 горизонтальных геофонов, 5 вертикальных геофонов. Справа – схема наблюдения. Посередине схема раскладки

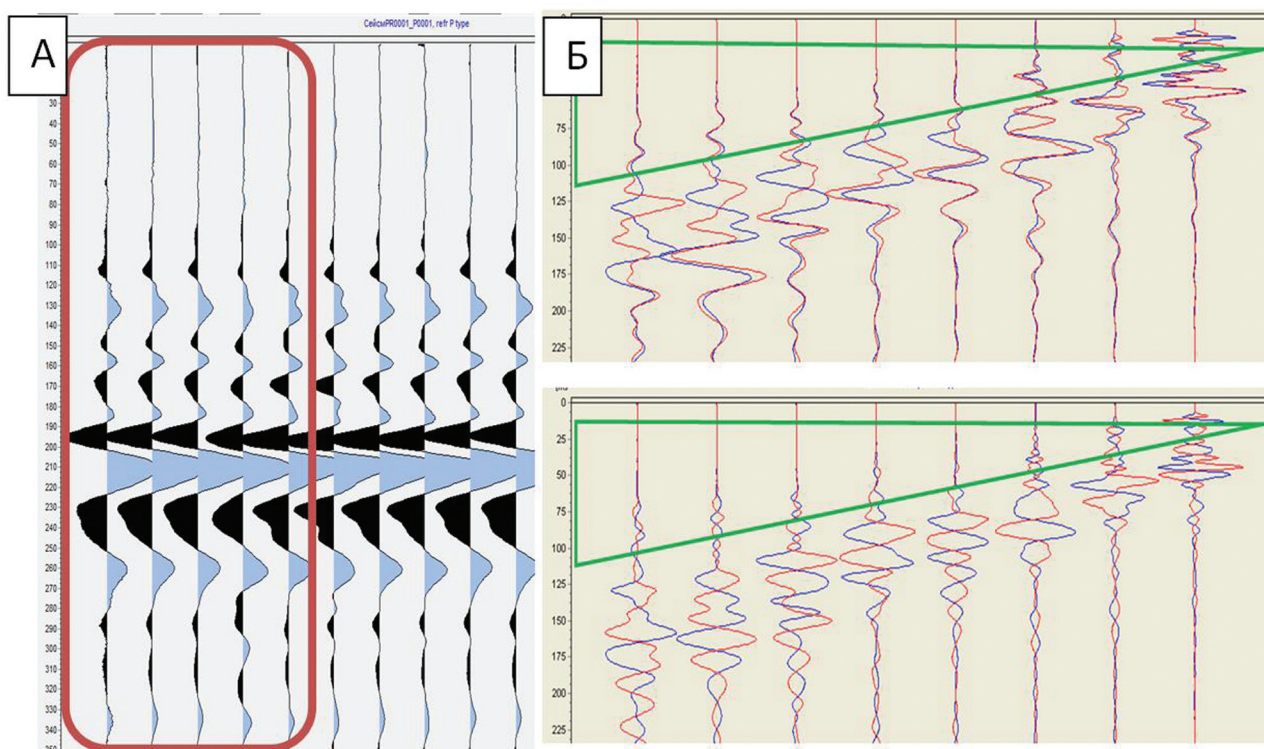


Рис. 2. А) – Проверка идентичности. 5 датчиков двойной поляризации и 5 обычные поперечные. Все датчики группированы на узком пятячке ППО, источник ПВ вынесен на –20 м. В рамке каналы с двойной поляризацией.

Б) – Вверху трассы при ударе «+» синим и ударе «-» красным при одном положении датчиков. Внизу трассы при ударе «+» синим, развороте датчиков на 180° и ударе «+» – красным. Шаг ПП 2 м, ПВ от первого датчика на расстоянии 4 м

### Датчик спаренной регистрации ZY

Данный принцип основывается на том же факте линейной поляризации Sh-волн и отсутствии поляризации P-волн. Предполагается, что при возбуждении колебаний под углом 45° к дневной поверхности вектор атаки удара позволяет формировать как продольные P, так и поперечные

Sh-волны (рис. 3). Таким образом, обрабатывая удары по системе «±» под углом 45° регистрируем сразу две компоненты Z и Y на одну суммарную сейсмограмму. Практически это осуществляется путем группирования вертикальных и горизонтальных геофонов штатными приспособлениями на разъемах типа «прищепка» (рис. 4). При данной системе



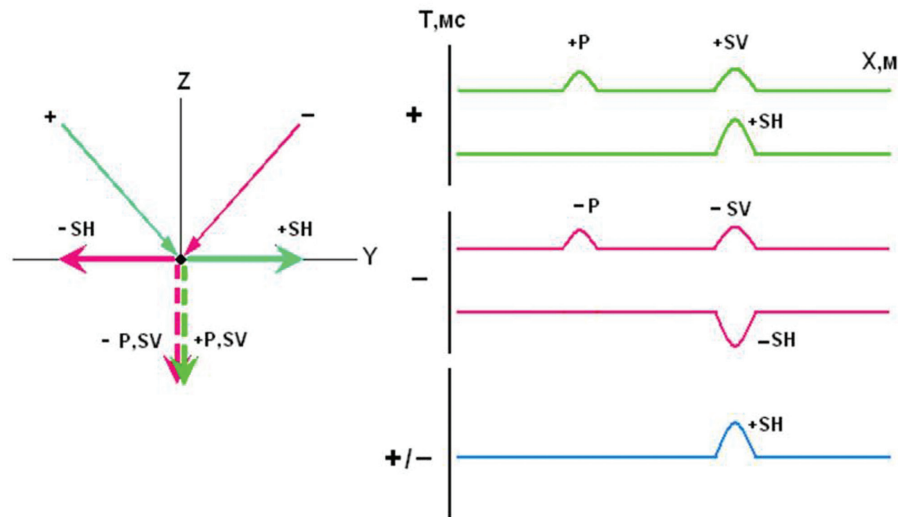


Рис. 3. Принцип возбуждения и селекции продольных и поперечных волн

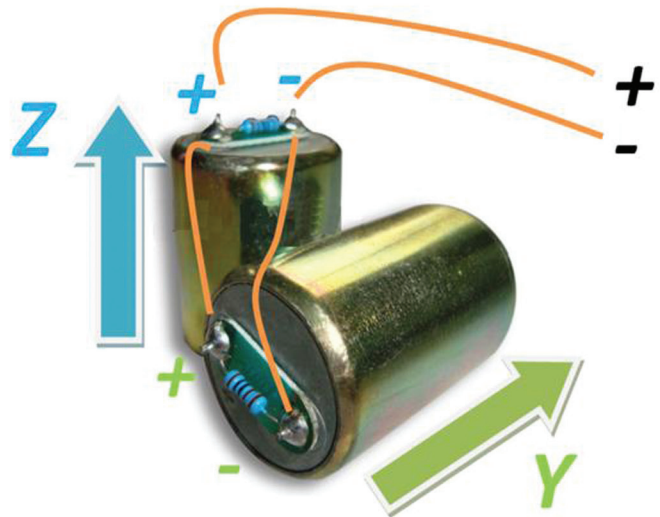


Рис. 4. Справа – схема установки и распайки датчиков спаренной регистрации ZY. Слева – соединение датчиков путем штатного приспособления «прищепка»

регистрации проводить селекцию продольных волн необходимо путем элементарного суммирования сейсмограмм «+» и «-», а поперечных волн путем операций вычитания тех же сейсмограмм.

Установив вертикальный и горизонтальный геофоны в единый корпус и соединив контакты приборов +Z к +Y и -Z к -Y (рис. 4), можно существенно сократить время производства полевых работ по схемам ZZ и YY. Такая комбинация позволяет не менять в процессе полевых работ датчики вертикальные на горизонтальные для регистрации продольных и поперечных волн. Возбуждение колебаний может осуществляться только по схеме Y+ и Y-, но при условии угла атаки ударов под 45°. Такой угол атаки позволит оптимально распределить энергию для формирования продольных и поперечных волн. Известно, что на формирование поперечной волны от

общей энергии источника приходится порядка 25%, а на формирование продольной волны всего порядка 7%, таким образом, продольная волна будет характеризоваться наименьшим соотношением сигнал/шум. В условиях, когда количество накоплений «±» ударов является достаточным для корреляции поперечной волны, но не достаточным для корреляции продольной волны, в таком случае можно дополнить недостающую интенсивность вертикальными ударами на том же пункте возбуждения. В результате суммирования сейсмограмм, полученных ударами «±» и дополнительными вертикальными ударами, продольная волна будет суммироваться и усиливаться в трехкратном размере.

В итоге применяемая технология позволяет избавиться от работ по сборке продольных датчиков и установке поперечных датчиков (смене геофонов),

не требует производить дополнительные вертикальные удары для возбуждения продольной волны, если и требует, то в гораздо меньшем объеме, что позволяет сократить полевые работы на 35-40% времени и сил.

Пример сейсмограмм, полученных данным путем, и сравнение результатов с традиционными

системами наблюдения представлены на рис. 5. Векторами указаны корреляция целевых волн: голубой – преломленные продольные волны, зеленый – преломленные поперечные волны, оранжевым – прямые волны, красный треугольник – контур несогласия трасс регистрации Z и регистрации ZY.

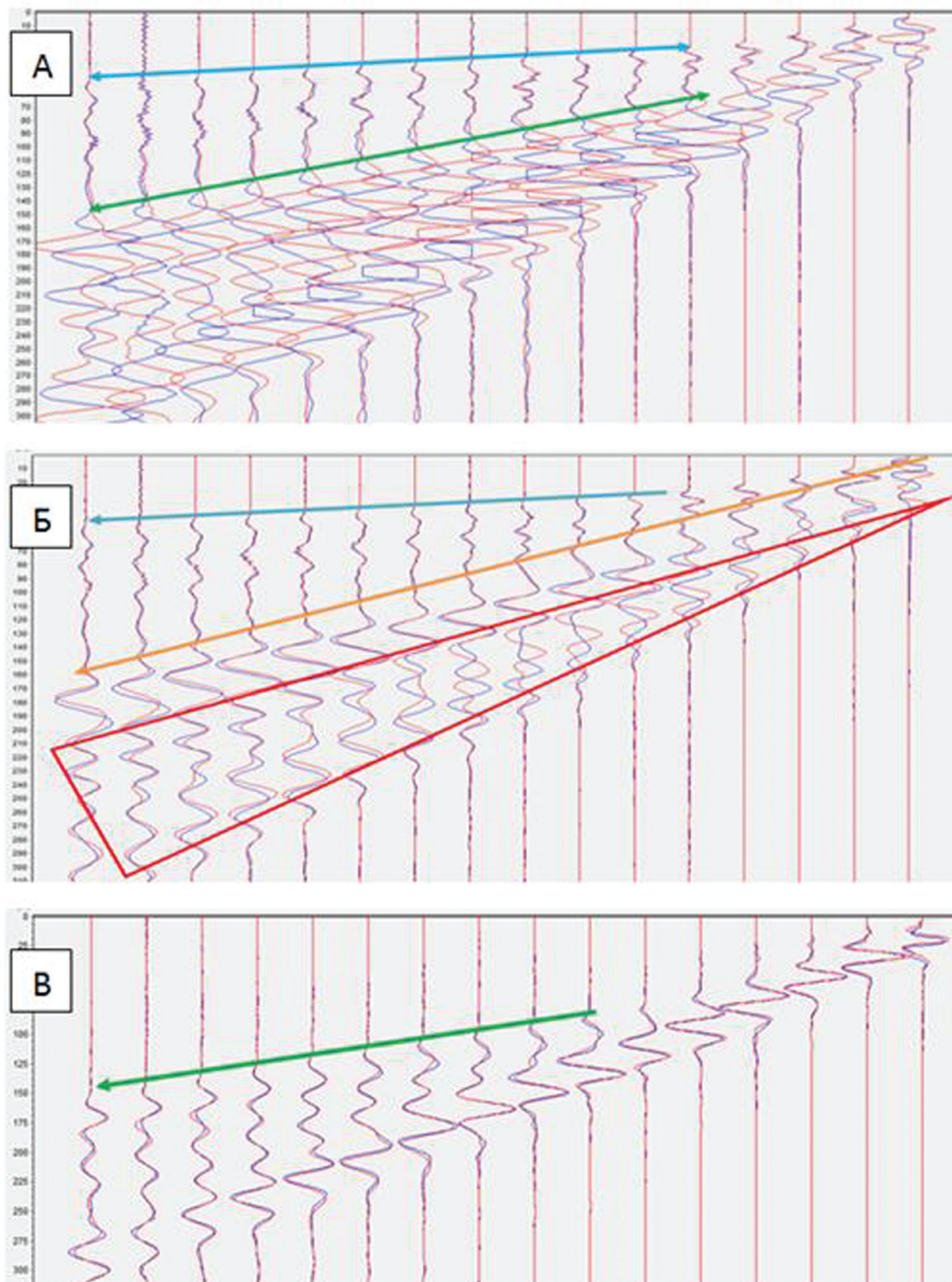


Рис. 5. А) – Сейсмограммы удар «+» синие трассы и удар «-» красные трассы, полученные датчиками спаренной регистрации ZY; Б) – синие трассы – результат суммирования сейсмограмм «±» датчиков спаренной регистрации, красные трассы – обычная система наблюдения ZZ; В) – синие трассы – результат вычитания сейсмограмм «±» датчиков спаренной регистрации, красные трассы – обычная система наблюдения YY



Полученные результаты имеют хорошую корреляцию с традиционными системами наблюдения, что дает предпосылки к применимости данной методики в производственных целях.

Для определения распределения энергии удара при разных углах атаки была выполнена серия полевых экспериментальных работ. При расставленных датчиках спаренной регистрации  $ZY$  по косе с шагом 2 м, с сейсмостанцией на 48 каналов, общая длина приемной линии составила 94 м. Пункт возбуждения находился посередине профиля на 46-м пикете. Возбуждение производилось поочередно с углами атаки к дневной поверхности  $0(Z), +45(Y), +90(Y), 0(Z), -45(Y), -90(Y)$ . С преломленных продольных и поперечных волн снимались значения амплитуд (рис. 6). Далее рассчитывались отношения амплитуд для продольных волн – вертикального удара к удару под  $45^\circ$  ( $0/45$ ), вертикального удара к удару под  $90^\circ$  ( $0/90$ ), и для поперечных волн – горизонтального удара  $90^\circ$  к удару под  $45^\circ$  ( $90/45$ ).

Полученные значения объединялись в общие выборки, и производился статистический анализ распределения значений (рис. 7). Таким образом, для продольной волны среднее значение отношения амплитуд при углах атаки  $0^\circ/45^\circ$  соответствует 1,05 раза, при отношении  $0^\circ/90^\circ$  составляет 2,17 раза. Данные показатели говорят о том, что амплитуда продольной волны при ударах под  $45^\circ$  не намного меньше (около 5-10%), чем амплитуда волны при вертикальных ударах. Для поперечных волн среднее значение отношений амплитуд при углах атаки  $90^\circ/45^\circ$  соответствует 1,08 раза, что говорит о небольшом (около 10%) различии амплитуд при углах атаки  $45^\circ$  и  $90^\circ$ .

По результатам амплитудного анализа следует, что оптимальным углом атаки при датчиках со спаренной регистрацией  $ZY$  является угол  $45^\circ$ . При соблюдении данного условия возбуждения энергия удара будет оптимально распределяться между компонентами, и потери в амплитудах, в отличие от традиционных схем  $ZZ$  и  $YY$ , будут составлять порядка 10%.

В качестве примера использования данной методики приводится результат, полученный на одном из объектов в г. Краснодаре, на котором удалось получить и обработать продольные преломленные, а также поперечные преломленные и отраженные волны (рис. 8). Преломленные и поверхностные волны обрабатывались в программе ZondST2d. Программа ZondST2d предназначена для двумерной обработки и интерпретации данных сейсморазведки на преломленных волнах и КМПВ в наземном, скважинном, межскважинном и акваторном вариантах. Кроме этого, в программе

реализованы следующие модули: 1) MASW – обработка и интерпретация данных поверхностных волн, 2) КМПВ – произвольная слоистая среда, 3) инверсия амплитуд, 4) анизотропия сейсмических скоростей, 5) сейсмическая томография на временах прихода отраженных волн. Отраженные поперечные волны обрабатывались в программе SeisShall. Программа SeisShall предназначена для обработки данных инженерной сейсморазведки методами отраженных и преломленных волн, способом общей глубинной точки и общей глубинной площадки.

Специально для этой методики программа SWavePlus2, предназначенная для предварительной обработки сейсмограмм, была дополнена опцией с возможностью автоматического суммирования и вычитания одних и тех же сейсмограмм с расфасовкой результатов по отдельным каталогам. Программа SWavePlus2 создана для ввода геометрии наблюдения в заголовки, всевозможной сортировки трасс, разделение по компонентам сейсмограмм при работах с 3С датчиками, склеивания и разделения сейсмограмм по каналам, обнуления трасс или участков трасс, инверсии сейсмограмм и т.п.

Предлагаемая методика инженерной сейсморазведки хорошо зарекомендовала себя и является, на наш взгляд, удачным инструментом для ускоренного производства (сокращает 35-40% времени) полевых сейсморазведочных работ на продольных и поперечных волнах. Одним из видимых явных недостатков является сам процесс объединения записей от двух компонент регистрации, что сказывается на волнах, имеющих нелинейную поляризацию (рис. 5Б, красный контур). Применение данной схемы для работ с поверхностными волнами невозможно из-за их эллиптической поляризации. Еще одно, соблюдение угла атаки удара под  $45^\circ$  на практике не является сложной задачей, но следует учесть, что при возбуждениях колебаний близких к  $90^\circ$  интенсивность продольной волны падает более чем в 2 раза и наоборот.

### Выводы

В ходе наших работ было установлено:

1. Способ применения горизонтальных сейсмодатчиков с двойной поляризацией, предложенный в статье [1], не соответствует заявленным характеристикам. Разворот поперечных датчиков в противофазу и удары в одну сторону – это не одно и то же, что удары « $\pm$ » при фиксированном положении датчика.

2. Предложено использование спаренных (вертикального и горизонтального) сейсмических датчиков для ускорения производства работ на продольных и поперечных волнах. Определен оптимальный угол

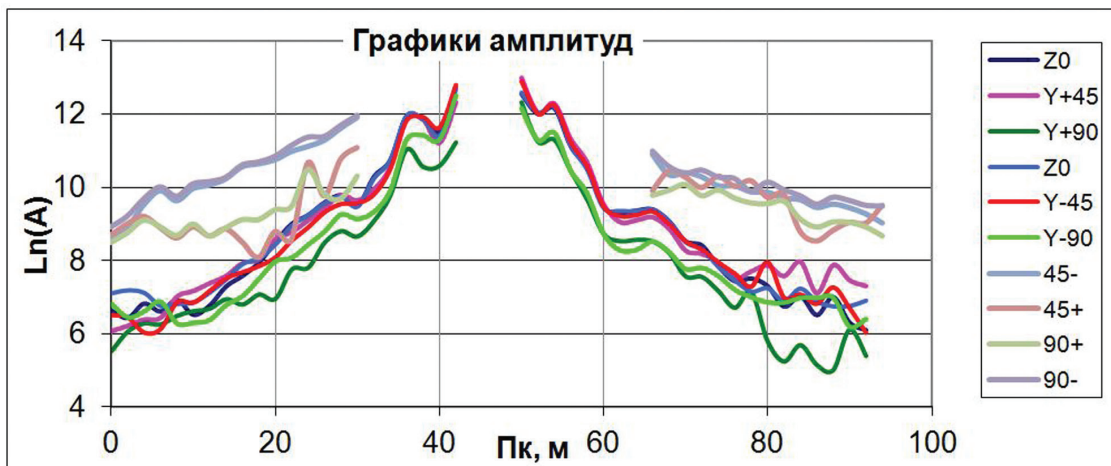


Рис. 6. Графики амплитуд, тонкие яркие – продольные волны, жирные бледные – поперечные волны

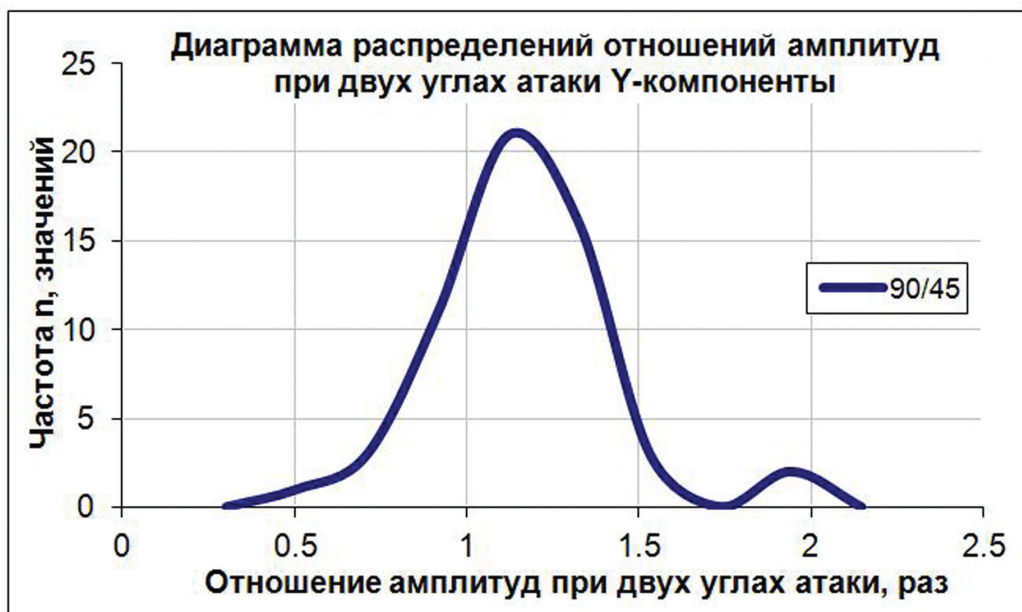
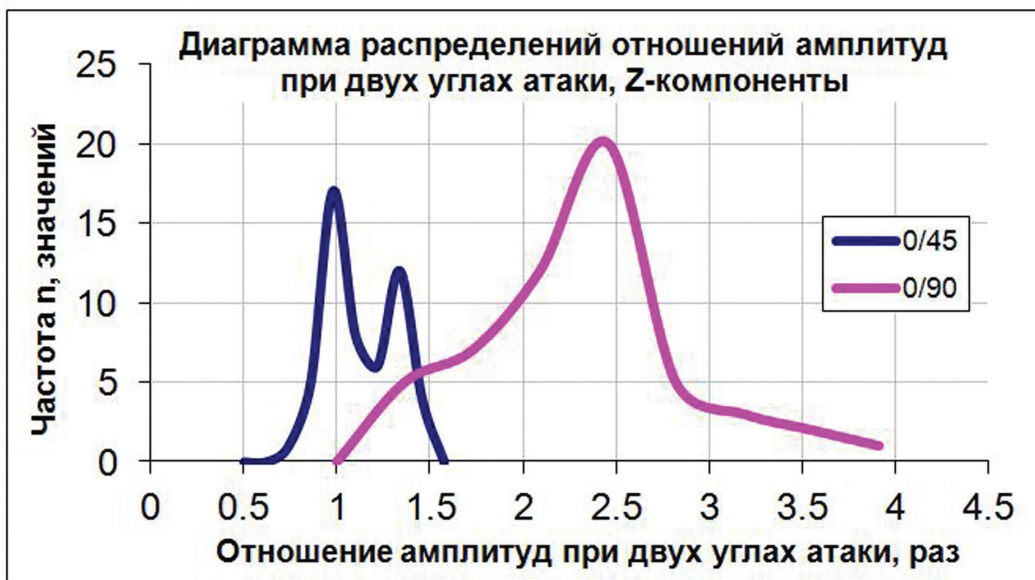


Рис. 7. Диаграммы распределения отношений амплитуд для углов атаки: сверху для продольной волны 0°/45° и 0°/90°; внизу для поперечной волны 90°/45°



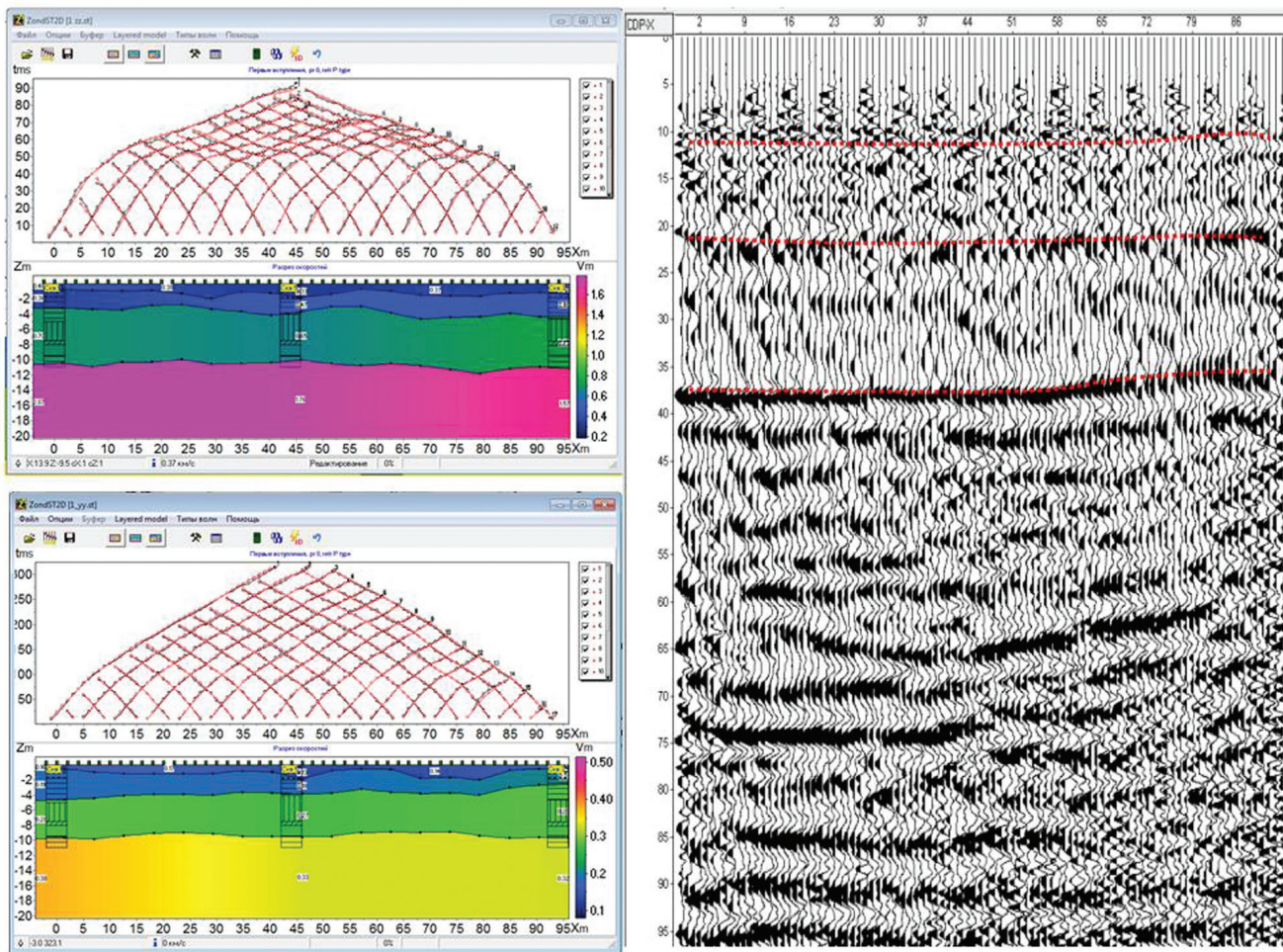


Рис. 8. Пример успешного применения технологии сейсморазведочных работ с датчиками спаренной регистрации ZY.

Слева сверху – результат обработки преломленных продольных волн;  
 слева внизу – результат обработки преломленных поперечных волн;  
 справа – глубинный разрез ОГТ по поперечным волнам

атаки удара (45°) для равномерного распределения энергии для формирования продольной и поперечной волны. Приведен пример практического использования предлагаемой методики.

**Ключевые слова:** инженерная сейсморазведка, схемы наблюдений, новые возможности регистрации, линейная поляризация фазы.

**ЛИТЕРАТУРА**

1. Абрамкин Е.А., Исков С.В., Старикова Е.Г. Применение горизонтальных сейсмоприемников с двойной поляризацией при сейсморазведке на поперечных волнах // Инженерная геофизика 2013 : мат-лы 9-й науч. практич. конф. EAGE, Геленджик, Россия, 22-26 апреля 2013 г.

2. Грохольская С.А., Романов В.В. Инженерно-геофизические изыскания при картировании гидро-геологических условий имеретинской низменности // Известия высших учебных заведений. Геология и разведка. – 2016. – № 4. – С. 84-88.  
 3. СП 11-105-97. Свод правил «Инженерно-геологические изыскания для строительства» : Часть VI: Правила производства геофизических исследований / Госстрой России. – М. : Производственный и научно-исследовательский институт по инженерным изысканиям в строительстве (ПНИИИС) Госстроя России, 2004.  
 4. Огильви А.А. Основы инженерной геофизики. – М. : Недра, 1990. – 468 с.