

УДК 550.34.016

*А. А. Табаков, Ю. А. Степченков, В. Н. Ференци*  
*ООО «Геоверс»*  
*М. С. Коваленко, Е. А. Чечеткина*  
*РУП «ПО «Белоруснефть»*

## **ВЕРТИКАЛЬНОЕ СЕЙСМИЧЕСКОЕ ПРОФИЛИРОВАНИЕ ВЫСОКОЙ ЧЕТКОСТИ В УСЛОВИЯХ СОЛЯНОКУПОЛЬНОЙ ТЕКТониКИ ПРИПЯТСКОГО ПРОГИБА**

Сейсморазведка высокой четкости (СВЧ) предназначена для получения достоверных результатов обработки данных в максимально широком диапазоне частот в присутствии сильных помех. Для достижения диапазона порядка семи октав применяется аддитивный итеративный анализ волнового поля методом проектирования на область допустимых значений параметров в нескольких частотных диапазонах. На примере обработки данных вертикального сейсмического профилирования (ВСП), проведенного в сложных геологических условиях Припятского прогиба, демонстрируется возможность достижения частотного диапазона 0–300 Гц. Представлены новые результаты, полученные в процессе развития технологии, сделаны выводы об эффективности ее применения. Продемонстрирована возможность автоматизации обработки с применением концепции «Интеллектуальный робот» (ИР). Достоверность полученных результатов подтверждается сопоставлением с данными каротажа (ГИС) и наземной сейсморазведки.

*Ключевые слова:* вертикальное сейсмическое профилирование, сейсморазведка высокой четкости, алгоритм «Поликор», Интеллектуальный робот, Припятский прогиб, реальные данные, обработка.

### **Описание метода**

Технология СВЧ – это комплекс программно-технических средств и методик их применения, обеспечивающий получение максимально достоверных результатов обработки данных сейсморазведки в максимально широком диапазоне частот в условиях присутствия сильных помех. При обработке данных ВСП [1] применяется аддитивный итеративный анализ волнового поля методом проектирования на область допустимых значений коррелируемости полезных волн в максимально широком диапазоне частот. Это достигается применением нескольких шагов предсказательной и пиковой деконволюции. Аддитивность означает, что обеспечивается равенство суммы выделенных полезных волн и помех полному анализируемому полю

на всех этапах расширения спектра. Глобальные итерации – это многократно уточняемое извлечение проекции полезных волн из поля помех и помех из полезных волн вплоть до околонулевого значения корреляции между ними. Внутренние итерации – это постепенное уточнение каждой из полезных волн на фоне остальных и на фоне помех с помощью оригинального алгоритма «Поликор» [2, 4]. Под анализом понимается разложение волнового поля на сумму выделенных полезных волн и помех. В описываемой реализации полезными волнами считаются падающие ( $dp$ ,  $ds$ ) и восходящие ( $dpup$ ,  $dpus$ ) однократные и полнократные ( $dpupdp$ ,  $dpupds$ ), а также выделенные по факту другие волны, например, дифрагированные.

На рис. 1 приведены первичное волновое поле ВСП (вертикальная компонента) и выделенные высокоразрешенные падающие и восходящие волны. В окрестности глубины 2500 м хорошо заметны отражения от крутопадающей наклонной границы (кровля соляного купола). Далее описаны основные процедуры, применяемые при интерактивной обработке и интерпретации данных ВСП в технологии СВЧ.

**Предварительная обработка.** При значимых смещениях нуля выполняются минимально фазовая ВЧ-фильтрация и плавная нульфовая фильтрация, например,  $0/300$  Гц (0,6 от Котельникова). В такой версии практически не искажаются первые вступления. Далее выполняются коррекция времен по контрольному прибору и коррекция формы возбуждения к наиболее разрешенной, оценка и вычитание резонансных колебаний, предварительная оценка первых вступлений. По предварительному годографу первых вступлений проводится оценка и вычитание предсказуемых шумов до первых вступлений и в небольшом интервале после них. Уточняется годограф первых вступлений, рассчитываются параметры поляризации и выполняется ориентация волнового поля в поляризационную систему (PRT).

**Кинематическая обработка** начинается с оценки пластовой скоростной модели среды без анизотропии. Вначале производится трансформация годографа первых вступлений так, чтобы он был параллелен годографу первого пересечения нуля. Такой годограф учитывает перекося за счет поглощения. Далее рассчитывается пластовая скоростная модель по ближнему пункту взрыва (ПВ) с использованием интервальных скоростей и ГИС. Полученная модель является начальным приближением для построения обобщенной анизотропной модели. Оптимизационным методом проводится оценка статических поправок за ПВ и параметров TLA анизотропии.

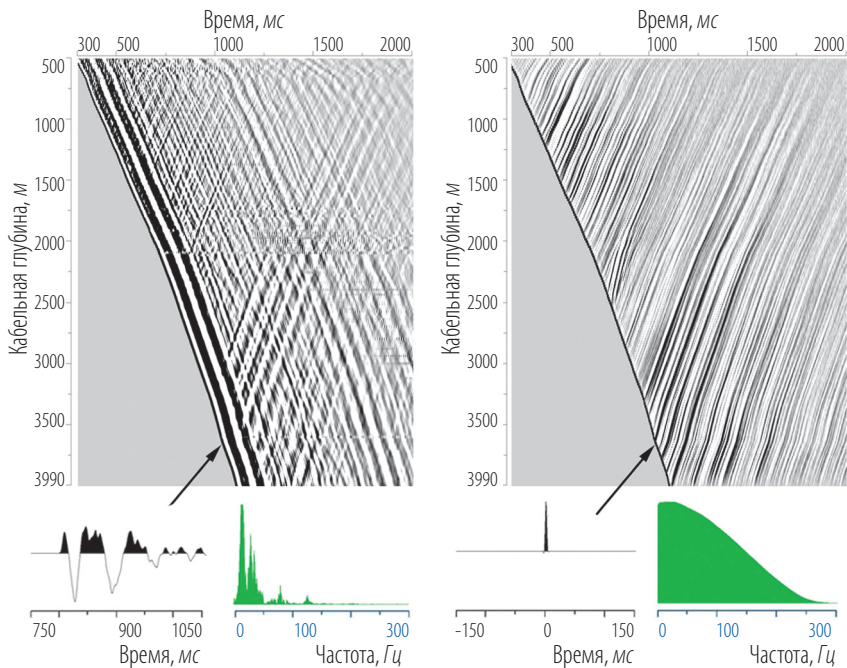


Рис.1. Фрагменты исходного волнового поля и поля полезных волн, полученного в результате обработки по технологии СВЧ

**Разделение волнового поля (селекция)** проводится для выделения шума и полезного сигнала. Первым шагом выделяется прямая, переходящая в головную, волна вблизи первых вступлений путем скользящего весового суммирования на большой (~100 уровней) базе вдоль годографа первых вступлений. К ней присоединяются выделенные по скоростной модели полнократные падающие волны ( $d_{up}d_{dp}$ ). Спектр полученного поля используется как эталон для отсеивания помех, значительно отличающихся по спектру от эталона. Весь набор регулярных волн ( $d_p$ ,  $d_s$ ,  $d_{pds}$ ,  $d_{rup}$ ,  $d_{rus}$ ,  $d_{rupdp}$ ,  $d_{rupds}$ , ) определяется также скользящим весовым суммированием (с использованием алгоритма «Поликор») по скоростной модели.

**Предсказывающая деконволюция (ПД)** применяется с целью расширения частотного диапазона записи и подавления поля кратных

волн. Оператор ошибки предсказания конструируется из единицы и последующего оператора предсказания с обратным знаком. Первое значение автокорреляции умножается на величину  $(1 + \alpha^2)$ , где  $\alpha$  – отношение шум/сигнал. Автокорреляция для расчета оператора оценивается как средняя по автокорреляциям падающих волн  $(dp + dpupdp)$ , обычно в нижней части разреза скважины.

**Пиковая деконволюция** для ближнего ПВ обычно рассчитывается по падающей волне на каждой глубине после ПД и применяется ко всем выделенным компонентам полного волнового поля после ПД. Для удаленных ПВ применяется либо один оператор по осредненной падающей волне, либо комплексный – до головной волны потрассно, далее одним оператором. Желаемый выход – единица на времени модельного годографа для данного ПВ с фильтром  $0/300$  Гц (при шаге дискретизации  $1$  мс).

**Увязка** данных ВСП, ГИС и наземной сейсморазведки проводится по обычной схеме, но сопоставление с ГИС производится дополнительно по инверсии отражательной характеристики с добавлением околонулевых частот из модельной импульсной сейсмограммы. При этом устраняется произвол при выборе сигнала для свертки. При корреляции трассы однократных отражений ВСП, которая представлена нульфазовым сигналом, с трассами наземной сейсморазведки появляется возможность оценки импульса наземных данных, коррекции его фазы (приведение к нульфазовому виду) и выполнения деконволюции для расширения спектра и приведения к форме импульса ВСП.

**Прогноз акустических импедансов ниже забоя скважины.** Наличие хорошо прослеживаемых отражений на нижних трассах ВСП дает возможность рассчитать акустические импедансы ниже забоя скважины [5]. Скорости для прогнозирования в масштабе глубин можно присвоить после корреляции маркирующих отражений из соседних скважин либо рассчитать пропорционально акустическим импедансам. Литологическая интерпретация делается с опорой на величину импеданса по априорным связям для каждого региона.

Высокое качество выделения и деконволюции полезных волн позволяет дополнительно к стандартным результатам оценить *углы наклона и азимуты отражающих границ*, а также *азимутальную анизотропию* вскрытых горных пород относительно скоростей поперечных волн, связанную с вертикальной трещиноватостью [3]. Последняя может определяться по обменам вниз или вверх.

## Применение метода к реальным данным

На примере обработки данных, полученных в сложных геологических условиях солянокупольной тектоники Припятского прогиба, демонстрируется возможность достижения частотного диапазона 0–300 Гц. Информация 0–1 Гц не может быть достоверно получена из данных и замещается рассчитанной по модели. Таким образом, из данных извлекается информация 1–300 Гц, то есть 8+ октав в сравнении с обычными 3,5–4 октавами (например, 8–128 Гц). На рис. 2 представлены фрагменты исходного волнового поля в широком спектре, поля извлеченных шумов, поля с полезным сигналом, а также логарифм отношения спектра полезного сигнала к спектру шумов.

Достоверность полученных результатов подтверждается прямым сопоставлением отражательной характеристики ВСП с данными наземной сейсморазведки с возможностью деконволюции данных метода общей глубинной точки (ОГТ) к ВСП и ее инверсии с данными ГИС с возможностями контроля глубин ВСП и привязки отражений с точностью до 1 м. На рис. 3 показан фрагмент увязки ВСП с данными ГИС и наземной 3D-сейсморазведки.

На рис. 4 представлен прогноз акустического импеданса ниже забоя скважины. Прогнозирование с уровня выше забоя позволяет убедиться в совпадении прогноза во вскрытой части профиля.

При высоком качестве выделения полезного сигнала оказывается возможным определять скорости распространения поперечных волн с точностью, достаточной для оценки их анизотропии, которая, как правило, не является ярко выраженной (единицы процентов) [3]. Анизотропия поперечных волн может быть следствием наличия вертикальной трещиноватости. На рис. 5 показаны кривые отношения интервальных скоростей падающих обменных волн в зависимости от их ориентации в пространстве. Из соотношений видно, что в интервале глубин 1200–1300 м выделяется анизотропия горных пород относительно скоростей распространения поперечных волн, достигающая 7%, которая может быть обусловлена наличием вертикальных трещин, в направлении азимута  $105^\circ$  (в восточном направлении, ось  $X$  направлена на север).

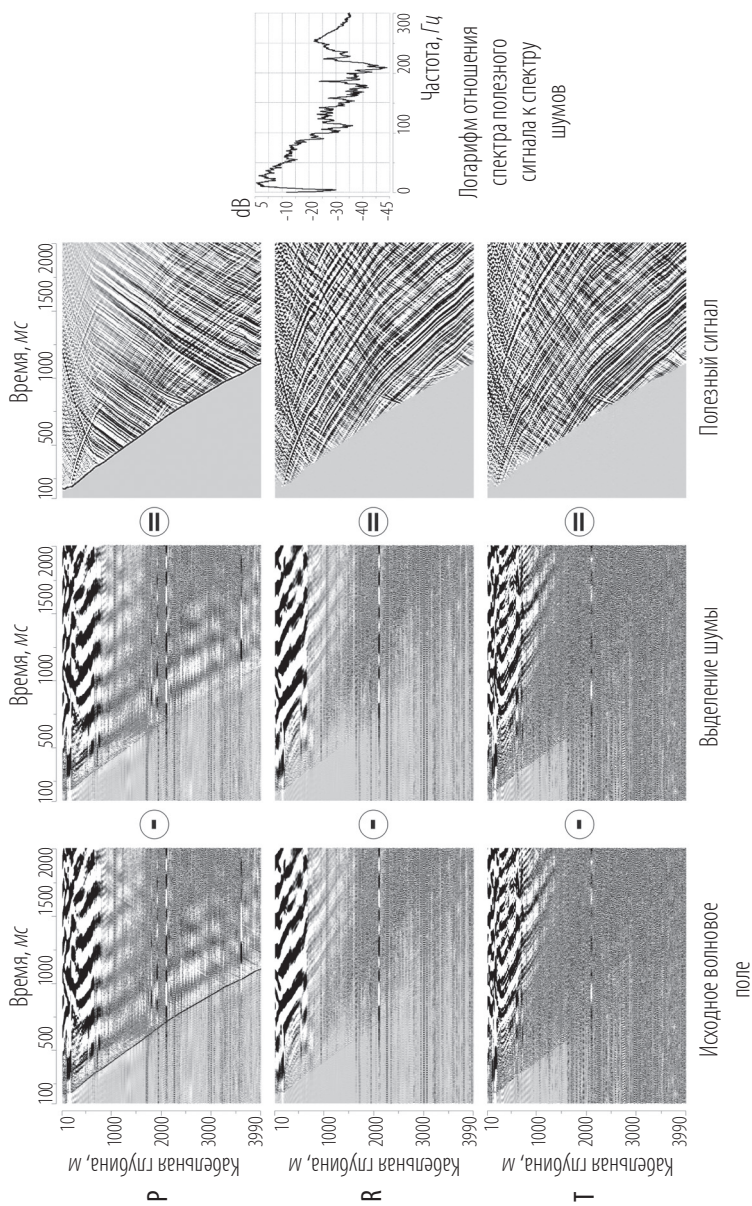


Рис. 2. Фрагменты волнового поля в широком спектре 0-300 Гц



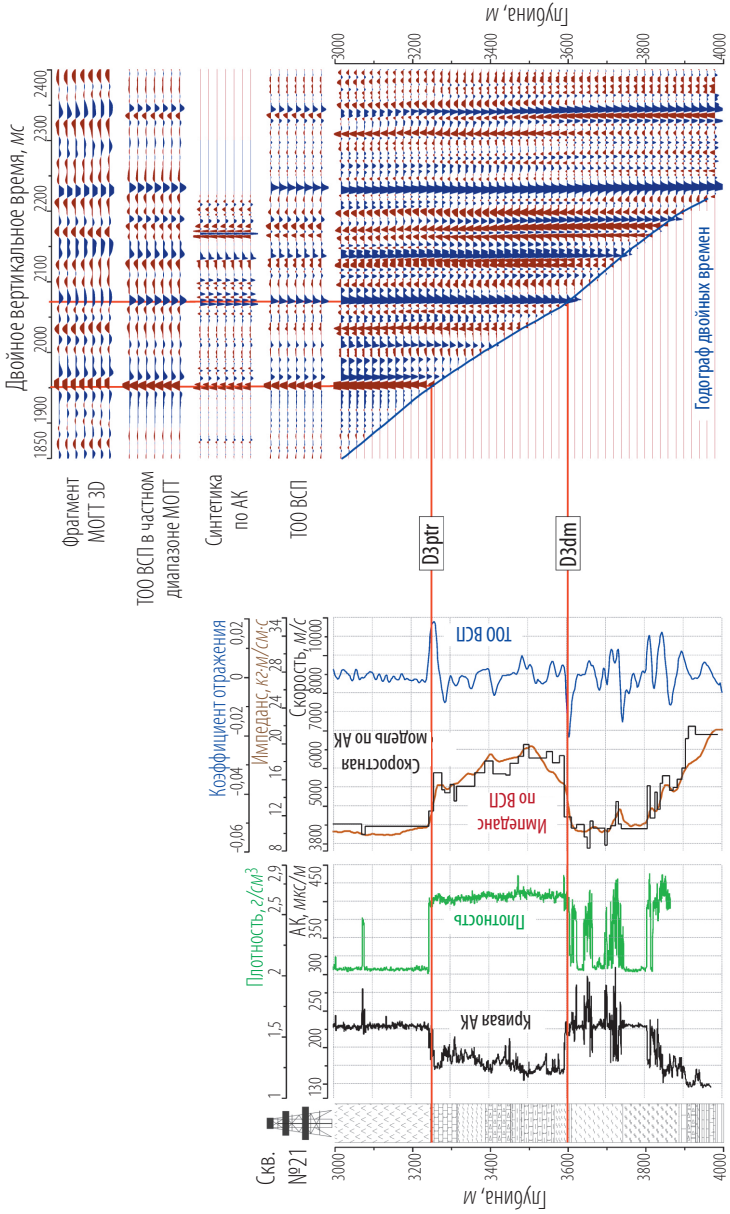


Рис. 3. Фрагмент узвки ВСП с данными ГИС и наземной 3D-сейсморазведки

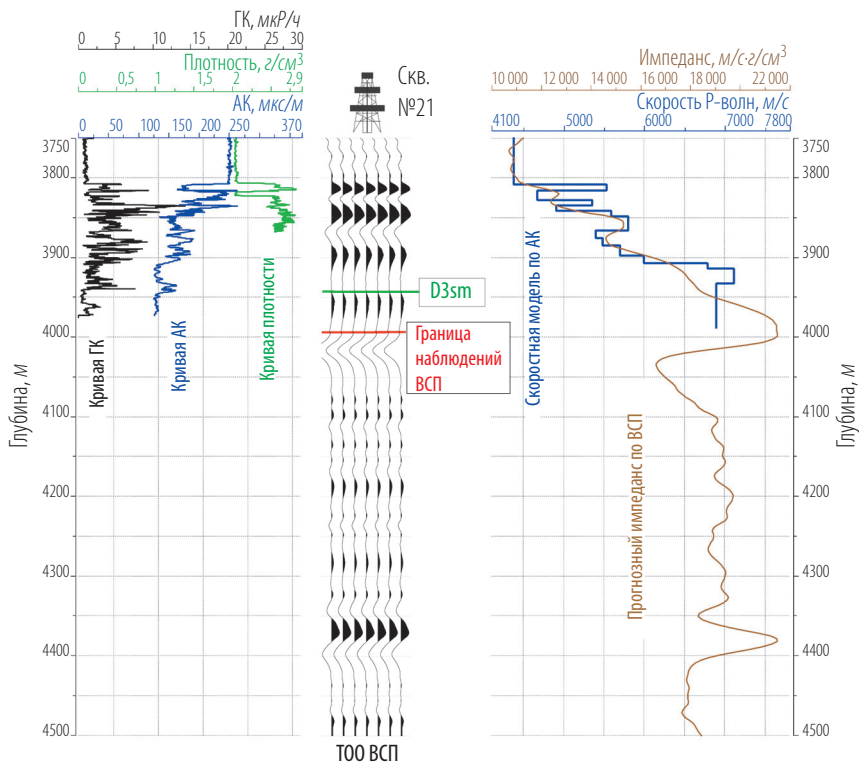


Рис. 4. Прогноз разреза ниже забоя скважины

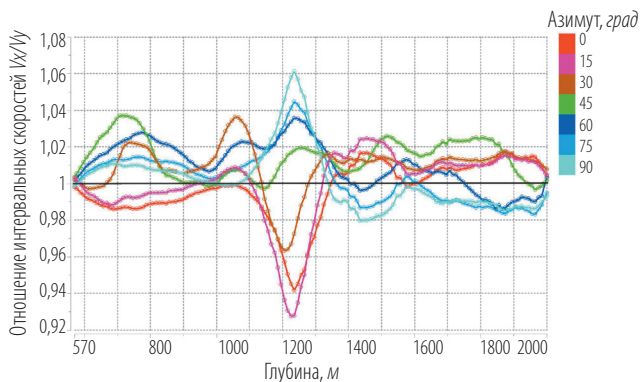


Рис. 5. Оценка анизотропии скоростей поперечных волн



На рис. 6 показаны оценки углов наклона и азимутов отражающих границ для интервала глубин с крутопадающими границами. Оценки получены из поляризации прямой волны и восходящих продольных волн, выделенных с высоким качеством из исходного волнового поля после предсказывающей и пиковой деконволюции. Результаты изображаются точками, размер которых соответствует достоверности определения угла наклона и азимута. Ниже в табличном виде представлены их численные значения.

Таблица

Оценки углов наклона и азимутов отражающих границ

Глубина, м	Угол, град	Азимут, град
1666	13,3	168,4
2290–2450	27	180
3270	2,4	160,8
3619	1,7	163,4
3757.5	1,13	221,8
3825.8	8,58	101,9

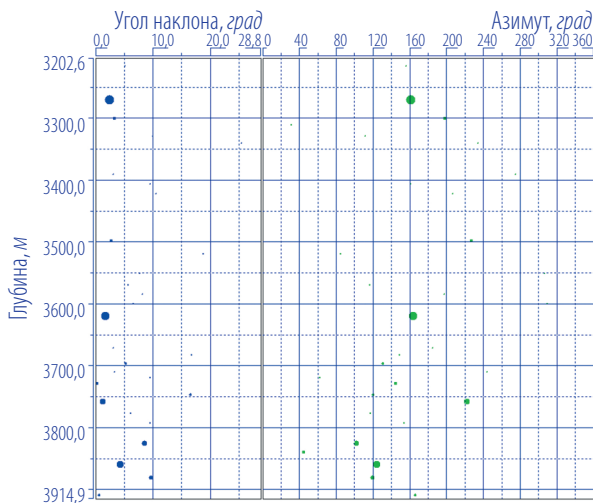


Рис. 6. Оценки углов наклона и азимутов отражающих границ

## Интеллектуальный робот

Учитывая относительную сложность оптимальной обработки как по компетенции обработчика, так и по количеству операций, изначально интерактивный процесс обработки и интерпретации замещается Интеллектуальным роботом (ИР). Концепция ИР заключается в воплощении интеллектуальной деятельности обработчика: анализ данных, выбор следующего шага и параметров процедуры, исполнение, оценка результата и т. д. ИР полностью совмещен с интерактивным графом, в том числе по базам данных, и на любой стадии может быть продолжен интерактивно и выполнен вновь автоматически.

В работе представлен пример применения ИР на первых стадиях обработки – интеллектуальная коррекция времен и формы импульса по контрольным приборам. Ниже приводятся основные этапы работы ИР, требующие принятия следующих решений:

1. Построение предварительного годографа первых вступлений по данным глубинного зонда ВСП. Основано на интеллектуальном анализе характеристик волнового поля для оценки интервалов разреза с устойчивым выделением вступлений прямой волны и последующим пикированием времен первых вступлений на этих интервалах. В областях неустойчивой корреляции вступлений годограф проводится на основе моделирования с использованием генерализованной скоростной модели для данного региона исследований.

2. Расчет статических поправок для каждого контрольного прибора. Выбор наилучшего контрольного прибора по результату анализа применения рассчитанных статических поправок к временам первых вступлений от глубинного зонда ВСП.

3. Анализ записей наилучшего контрольного прибора и выбор эталонной трассы для построения операторов коррекции формы импульса. Коррекция записей контрольного прибора и глубинного зонда ВСП.

На рис. 7 представлены результаты коррекции статики и формы импульса по контрольному прибору в ручном и автоматическом режимах. Можно отметить, что в результате работы ИР форма импульса в записях глубинного прибора ВСП стала более разрешенной по сравнению с результатом ручной обработки.

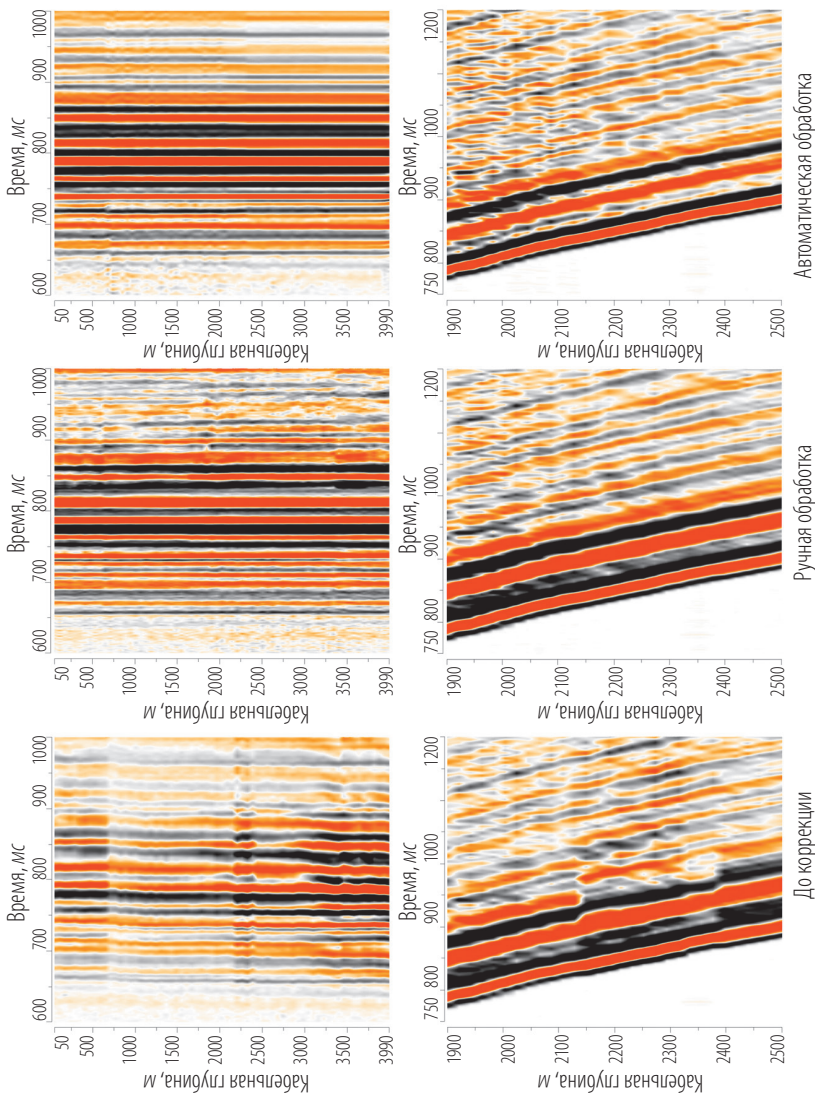


Рис. 7. Результаты ручной и автоматизированной коррекции по контрольному прибору с использованием ИР. Записи контрольного прибора (а) и глубинного зонда ВСП (б)

## Выводы

1. Обработка данных ВСП по технологии СВЧ позволяет существенно повысить информативность сейсморазведки благодаря достижению четкости получаемых результатов до 8 октав (0–300 Гц).

2. Точность контроля глубин ВСП и привязки отражений на поверхности достигает 1–2 м, появляется возможность расширения их спектра.

3. Достоверность увязки данных ГИС и поверхностной сейсморазведки через ВСП по технологии СВЧ значительно выше, чем по распространенному методу моделирования по данным ГИС, который содержит неопределенность при выборе сигнала для свертки с идеальной импульсной сейсмограммой, получаемой из акустического и плотностного каротажа.

4. Эффективность технологии СВЧ позволяет достоверно выделять интервалы разреза с вертикальной трещиноватостью, ее направленность, а также определять углы наклона и азимуты отражающих горизонтов.

5. Интерактивный процесс обработки и интерпретации, состоящий из множества процедур и требующий высокой компетенции обработчика, может быть замещен Интеллектуальным роботом, действующим в автоматическом режиме.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Гальперин Е. И. Вертикальное сейсмическое профилирование – опыт и результаты применения. М.: Наука, 1994.
2. Табаков А. А. Обратная фильтрация данных ВСП с предварительным разделением волн // Геофизические исследования на нефть и газ в Узбекистане. Ташкент. 1974. Вып. 9. С. 105–108.
3. Табаков А. А., Калван Л. В., Чистов П. И. Оценка анизотропных свойств среды по данным ВСП // Гальперинские чтения. М., 2013.
4. Ференци В. Н., Табаков А. А., Севастьянов Л. В. и др. Автоматическая селекция волн при модельбазированной обработке данных ВСП // Технологии сейсморазведки. М. 2008. № 4. С. 35–39.
5. Tal-Virsky B. B., Tabakov A. A. High-Resolution Prediction of Acoustic Impedances below Bottom-of-Hole // Geophysical Prospecting. April, 1983. P. 225–236.

*Рецензент доктор геол.-минер. наук, проф. Ю. И. Кузнецов*