

Возможности обработки различных типов волн, регистрируемых в инженерной сейсморазведке

- Белоусов А.В., ЗАО НПЦ «ГеоСейсКонтроль», РГУ нефти и газа имени И.М. Губкина, г.Москва
Сергеев К.С., Сафиуллин Р.И., РГУ нефти и газа имени И.М. Губкина, г.Москва

В статье проводится анализ исходного волнового поля, полученного с применением ударного источника колебаний (кувалда весом 5 кг) в условиях присутствия интенсивного фона промышленных помех, выделяются основные классы полезных волн и волн-помех, рассматриваются результаты обработки и интерпретации каждого типа волн.

Методика работ

Исследования проводились в городских условиях вдоль линии железной дороги, использовалась активная расстановка из 96 вертикальных сейсмоприёмников с шагом 1м. Для регистрации применялась телеметрическая сейсморазведочная станция ТЕЛСС-3, что гарантировало минимизацию аппаратного шума и электрических наводок при передаче данных по косе (Федотов, 2011). Возбуждение колебаний проводилось с шагом 2 метра, всего на фиксированную расстановку отработано 48 пунктов возбуждения (длина профиля 96 м). Время записи составляло 1000 мс, шаг дискретизации 1 мс. Как показывает практика (Рагозин, 2012), при выбранном способе возбуждения колебаний данный шаг вполне достаточен (и даже несколько избыточен), т.к. даже при наилучших условиях возбуждения доминантная частота редко превышает 70 – 100 Гц. Число накоплений – 10.

Как будет показано далее, примененная система наблюдений позволяет извлекать информацию из всех типов регистрируемых волн и реализует следующие виды полевых расстановок:

- для КМПВ - избыточная система встречных и нагоняющих годографов;
- для МОГТ - система с максимальной кратностью 24 в центре расстановки, шаг точек ОГТ 0.5 м;
- для MASW - система, обеспечива-

ющая регистрацию поверхностных волн без пространственного алейсинга.

Анализ волновой картины

Основной проблемой, связанной с исследованиями в районах с высоким уровнем промышленных помех является получение интерпретируемой волновой картины в условиях слабого сигнала и интенсивного фона когерентных и некогерентных помех.

Рассмотрим ряд волновых картин, полученных в начальной, средней и конечной частях профиля (рис.1).

Волновая картина во всех случаях существенно интерференционная. На отчетливо прослеживающиеся на большей части каналов первые вступления преломленных волн накладывается фон помех в виде когерентной (боковые поперечные волны от работающей техники и стен зданий, приповерхностные псевдорэлеевские волны, моды обменных волн от близкорасположенных границ) и некогерентной (ветровые и дождевые помехи) составляющих.

Из анализа спектра (рис.2) следует, что частотный диапазон записи достаточно широкий – 10 - 130 Гц. Сигнал преобладает в диапазоне 30 - 75 Гц. Все низкочастотные когерентные составляющие волнового поля, такие как поверхностные волны, лежат в диапазоне частот 8 - 30 Гц. Преломленные волны имеют слабую амплитуду на больших удалениях (на

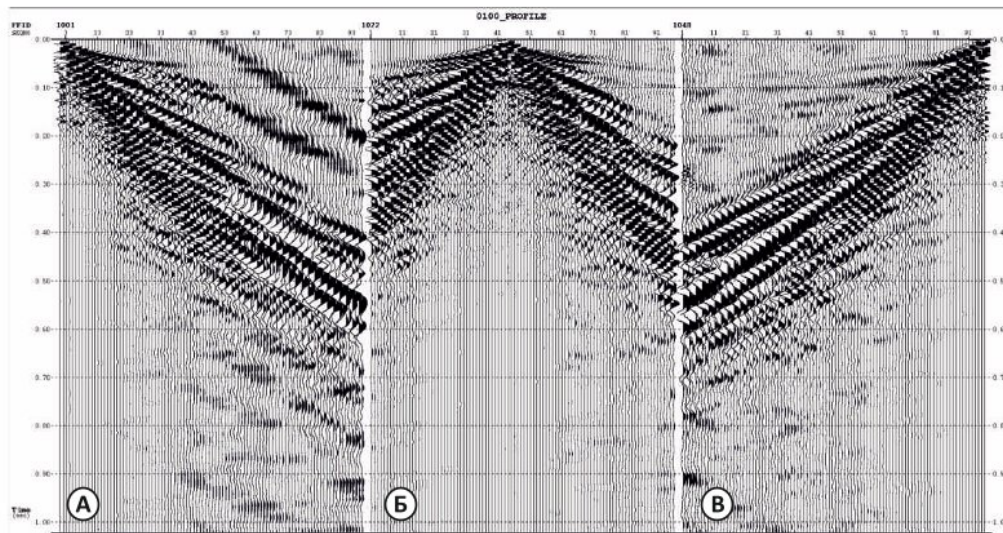


Рис. 1. Изображения исходных сейсмограмм: источник слева (а), в центре (б), справа (в) от активной расстановки. Для визуализации использовано АРУ в коротком окне

сейсмограммах фланговой расстановки).

На временах 50 – 300 мс в районе первых каналов фрагментарно прослеживаются гиперболические оси синфазности со скоростями 100 – 300 м/с (обменные (?) отражённые волны). На временах свыше 500 мс гиперболические оси не наблюдаются, уровень записи соответствует уровню микросейсмического шума.

Преломленные волны наблюдаются в первых вступлениях на временах от 0 мс до примерно 100 мс на удалении 100 м. При этом корреляция становится неуверенной на удалениях от 60 – 70 м от источника. Качественное прослеживание первых вступлений возможно до удаления 90 м, т.е. на большей части профиля.

Волны-помехи представлены прямой волной, цугами последующих вступлений преломлённых волн, а также боковыми волнами от движущегося транспорта (линейные низкочастотные и низкоскоростные оси синфазности: скорость 100-150 м/с, доминирующая частота 20 Гц). Помимо когерентного шума на отдельных сейсмограммах отмечается довольно существенный уровень микросейсмического шума. Боковые волны от внешних источников попадают в область пространственного алейсинга (рис.2(б), участки спектра отмечены чёрными линиями).

Вид волновой картины в целом позволяет считать полезными волнами в первом приближении волны преломлен-

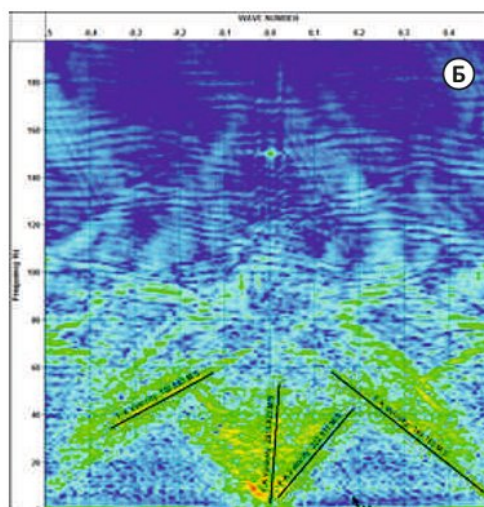
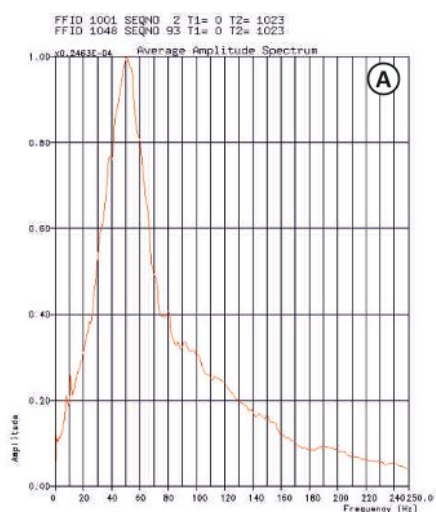


Рис. 2. Спектральный состав исходных сейсмограмм: частотный спектр (а) и FK-спектр (б)

ные. Оценка типа и свойств наблюдаемых гиперболических годографов отражённых волн требует выполнения предварительной достаточно прецизионной сигнальной обработки данных в условиях преобладания уровня шума над сигналом. Наличие интенсивных рэлеевских волн также позволяет провести многоканальный анализ поверхностных волн (MASW).

Преломлённые волны

Обработка поля преломлённых волн полученных сейсмограмм проводилась с помощью комплекса Rayfract, позволяющего получить градиентную скоростную модель среды на основе инверсии времен пробега волн, наблюдаемых в первых вступлениях.

Входными данными для обработки являются сейсмограммы общего пункта возбуждения, содержащие в заголовках информацию о координатах, альтитудах и удалениях.

Последовательность обработки можно разделить на несколько этапов:

1.Предобработка, выполняемая с целью усиления волновой картины первых вступлений (как правило, автома-

тическая регулировка усиления в окне 40-100 мс; частотная фильтрация для устранения интерферирующих помех).

2. Фазовая корреляция первых вступлений для определения времен пробега целевых волн (модель рефракции).

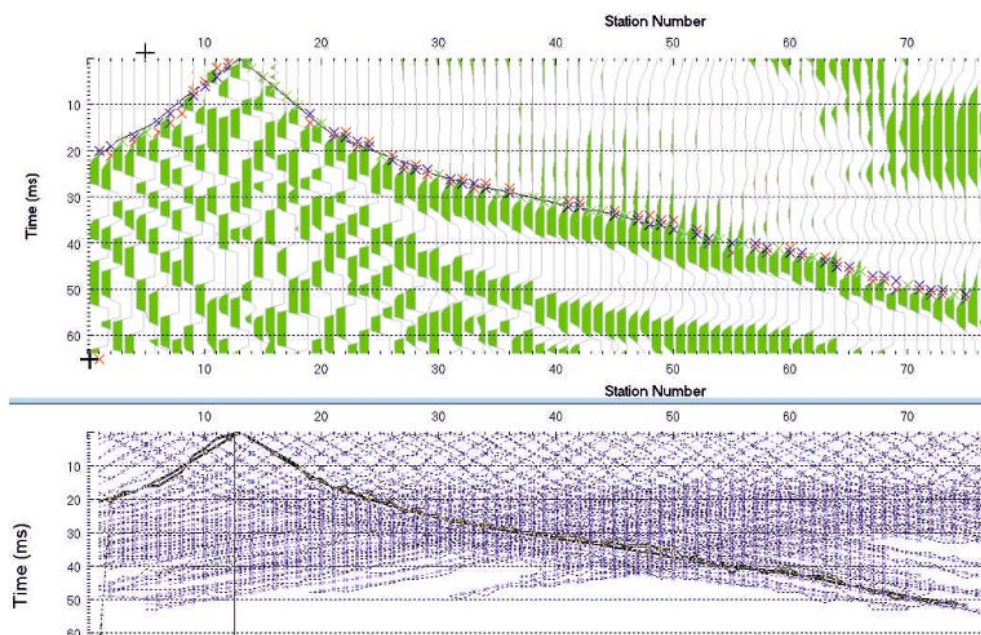
3. Построение начальной одномерной градиентной скоростной модели.

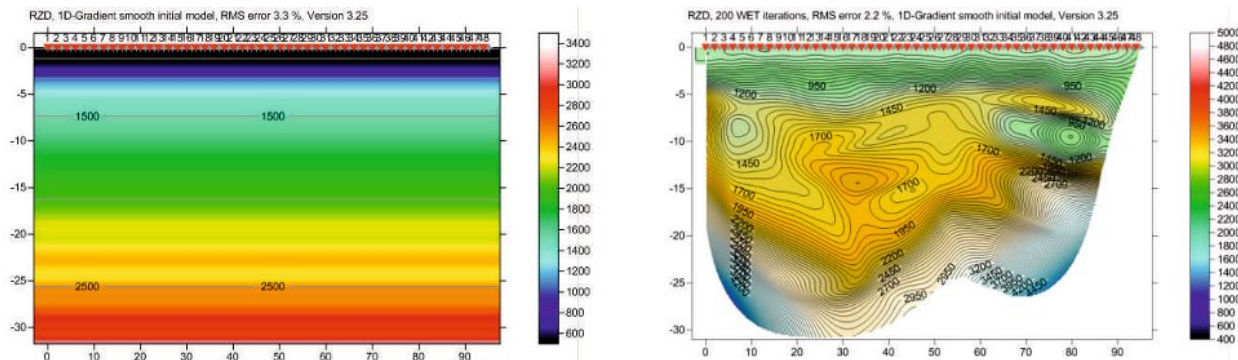
4. Инверсия времен пробега для определения скоростной модели среды (wave path eikonal tomography (WET)).

Отметим особенности отдельных этапов.

При фазовой корреляции возможно комплексирование автоматических и полуавтоматических методов определения первых вступлений. В автоматическом режиме на основе анализа амплитуд и огибающих колебаний на участках сейсмозаписей, попадающих в допустимые по скоростям пределы, определяется первый отрицательный срыв амплитуд (рис.3) – в соответствии со стандартом SEG о полярности и сложившимися принципами работы аппаратуры (Sheriff, 2002). Проблемы данного режима связаны с возможностью ложного срабатывания и необходимостью коррекции стабилизирующего фактора, определяющего

► Рис.3. Обработка данных МПВ. Сверху – сейсмограмма с нанесенными отметками первых вступлений. Снизу – система нагоняющих и встречных годографов по профилю





▲ Рис. 4. Градиентная модель среды: (а) исходная; (б) финальная.

погрешность пикирования первых вступлений по профилю в зависимости от меняющихся условий возбуждения и приёма колебаний. При значимом числе ложных срабатываний целесообразно ввести интерактивный компонент корреляции, вручную задавая линейный тренд вступлений на фоне помех – автоматический поиск локализуется в пределах заданной длины импульса вокруг линии тренда. Наконец, ручной режим может быть использован на сейсмограммах плохого качества, с большим количеством шумов, а также для корректировки времен после обработки в автоматическом и полуавтоматическом режимах. Погрешности определения времен во всех методах, как правило, не превышают нескольких шагов дискретизации записи.

В анализируемом примере преимущественно использовался полуавтоматический режим.

Основными факторами пропусков в корреляции были: перегрузка первых сейсмоприемников; значительное удаление (на удалении более 75 м первые вступления интерферируют с помехами и невозможно однозначно определить их начало); высокий уровень помех на некоторых каналах.

По окончании корреляции проводится коррекция отмеченных времен по подборкам равных удалений и общей средней точки. Далее в автоматическом

режиме строится начальная 1-D градиентная модель среды (рис.4, а)

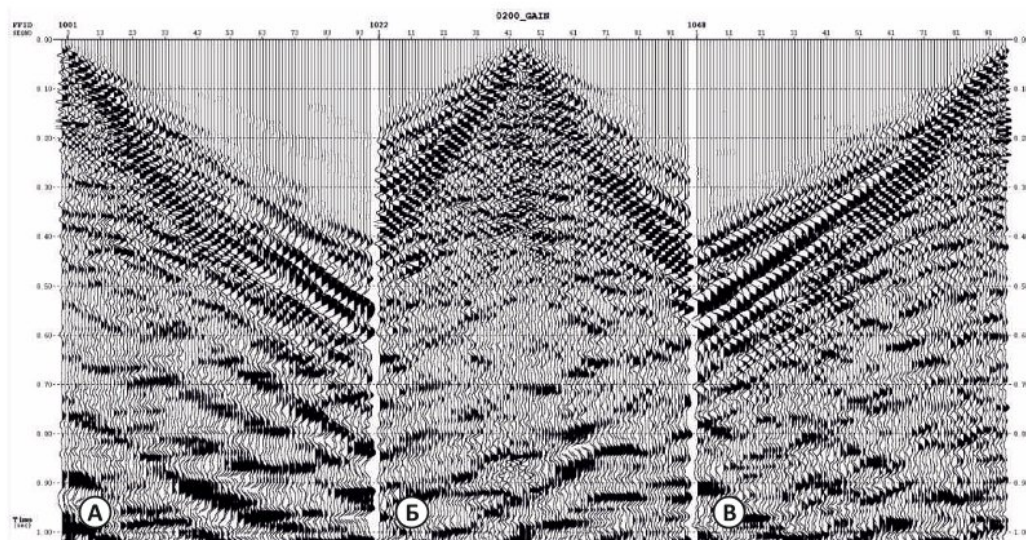
Комплекс Rayfract поддерживает несколько типов инверсии, отличающихся исходными предположениями о модели и распределении физических свойств пород по разрезу: SmoothInvert, DeltaV, WET. Для выполнения данной задачи использовался алгоритм WET, в котором производится коррекция базовой модели итерационным способом на основе минимизации среднеквадратической (RMS) ошибки определения времен пробега первых вступлений. Ошибка RMS вычисляется на каждой итерации относительно синтетического годографа.

Результат инверсии представляется в виде латерально- и вертикально изменчивой глубинно-скоростной модели (рис.4, б) и считается удовлетворительным, если финальная RMS-ошибка не превышает 3%, а максимальное расхождение модельного и реального годографов соответствует нескольким шагам дискретизации записи.

Отражённые волны

Как отмечалось в начале, на полевых сейсмограммах (рис.1) визуально определяются гиперболические оси синфазности, что позволяет предположить наличие отражающих границ и провести обработку материалов по методике ОГТ.

► Рис. 5. Изображения сейсмограмм после восстановления амплитуд: источник слева (а), в центре (б), справа (в) от активной расстановки.



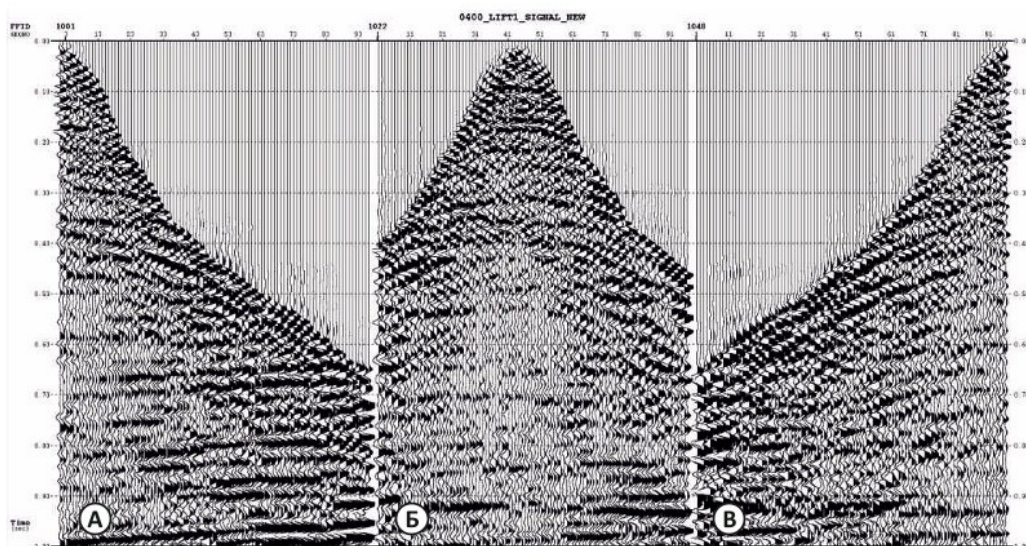
Вид сейсмограмм после проведения коррекции за сферическое расхождение волнового фронта приведен на рис.5. На данных сейсмограммах отчетливо видны отраженные волны в диапазоне времен 50 - 400 мс. Отражения не имеют четкой коррелируемости от трассы к трассе, что может говорить о достаточно сложном строении верхней части разреза (ВЧР). Так как на коротких профилях перепад высот, как правило, несущественен и априорные статические поправки не рассчитываются, верхним уровнем разрезов считается дневная поверхность. Отметим, что для улучшения прослеживаемости отражённых волн и исключения случайных статических

сдвигов возможно проведение коррекции высокочастотных статических поправок.

Для выравнивания соотношения амплитуд от трассы к трассе необходимо провести поверхностно-согласованную балансировку амплитуд. Это позволит проследить отражения на больших удалениях и несколько снизить влияние высокоамплитудных зон, связанных с источником. Для удаления преломленных и поверхностных волн целесообразно применить внешний мьютинг.

Удаление помех и выделение сигнальной составляющей было проведено каскадом фильтров в различных спектральных диапазонах. Основной задачей

► Рис. 6. Изображения сейсмограмм после помехоподавления: источник слева (а), в центре (б), справа (в) от активной расстановки.



процедуры являлось подавление низкочастотных шумов, некогерентных помех, удаление остатков поверхностных волн. Материал был разделен на три полосы частот, внутри которых применялись регулировки амплитуд. Затем различные полосы частот были адаптивно объединены. Сейсмограммы ОПВ после процедур помехоподавления представлены на рис. 6.

По результатам скоростного анализа определены значения скоростей суммирования для гиперболических осей синфазности в диапазоне 50 – 300 м/с. Диапазон изменения скоростей находится в пределах 100 – 500 м/с, что в связи с малой глубиной залегания изучаемых границ позволяет предположить присутствие на сейсмограммах, главным образом, обменных (P-SV) волн.

Результирующий временной сейсмический разрез приведен на рис. 7.

В целом, волновое поле инженерных данных довольно сложное. Отличительными особенностями его являются:

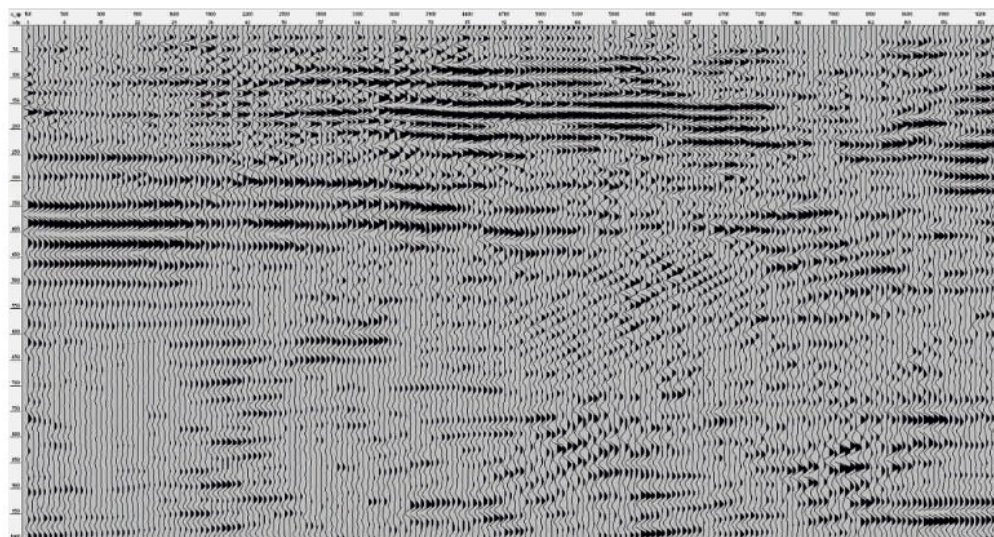
- наличие большого количества некогерентных помех (техногенного характера);
- ярко выраженные поверхностные и преломленные волны;
- слабые отраженные волны;

- не всегда ясная этиология отраженных волн;
- несбалансированность сейсмограмм от трассы к трассе и от ПВ к ПВ;
- довольно ограниченный спектральный состав.

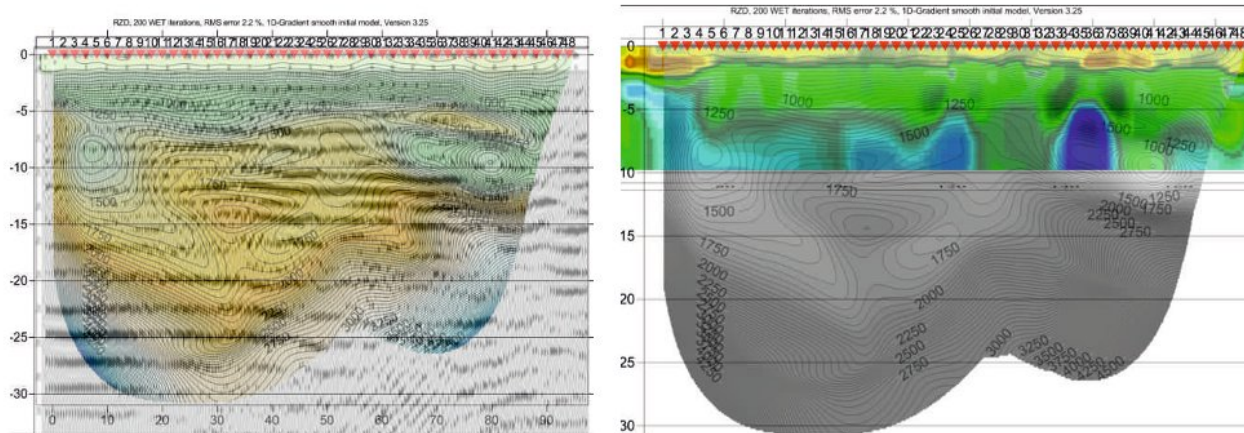
Интерпретация данных исключительно отраженных волн затруднительна.

Вместе с тем комплексирование результатов обработки отраженных и преломленных волн с возможным привлечением информации о поверхностных волнах позволяет полнее охарактеризовать картину и выявить структурообразующие элементы в разрезе, проявляющиеся на всех типах волн.

Сказанное подтверждается совместным изображением разрезов преломленных и отраженных волн (последний пересчитан в глубинный масштаб по средним скоростям) – рис. 8(а), а также совместным изображением разрезов преломленных волн и электротомографии – рис. 8(б). Отметим, что формально наибольшую глубинность исследований дают отраженные волны, однако вопрос о наличии и выраженности глубоких (более 15-20 м) границ является спорным, что связано со слабой интенсивностью отражений и возможным наличием кратных волн.



◀ Рис. 7.
Временной
сейсмический
разрез.



▲ Рис.8. Совместная визуализация данных различных методов:
(а) разрез отраженных (P-SV?) волн в глубинном масштабе (черно-белый) и скоростная модель по преломленным (P) волнам (цвет).
(б) скоростная модель по преломленным (P) волнам (черно-белая) и фрагмент разреза электротомографии (цвет).

Томография по преломленным волнам дала в данных сейсмогеологических условиях устойчивый результат до глубины 15 м. При этом осложнения в скоростной модели соответствуют аномалиям поля электротомографии.

Поверхностные волны

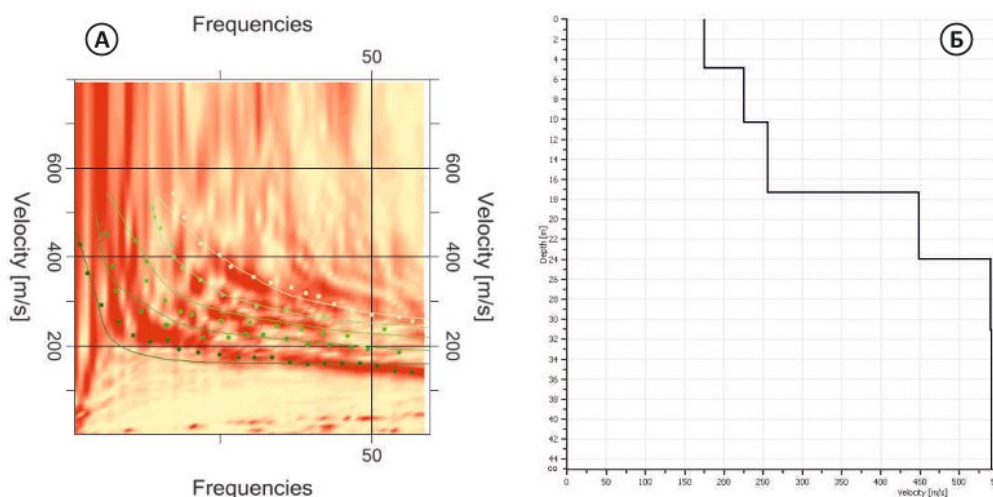
Анализ дисперсионных (фазовых) кривых волн Рэля проведён по фланговым сейсмограммам (первый и последний пикеты возбуждения) с осреднением результатов. Выбрана одномерная модель интерпретации с отнесением значений к середине профиля.

Вид фазовых кривых показан на рис. 9(а), результирующий скоростной закон поперечных волн – на рис. 9(б).

Согласно данным рэлеевских волн, почва относится к типу С (классификация USCS) - отложения среднеплотных грубозернистых почв или среднеплотных мелкозернистых почв мощностью выше 30 м, характеризующиеся постепенным улучшением механических свойств с глубиной и значениями скорости поперечных волн от 180 до 360 м/с.

Расчётные геомеханические свойства разреза сведены в таблицу 1. Отметим, что скорости поперечных волн, расчи-

► Рис. 9. Анализ данных поверхностных волн:
(а) дисперсионные кривые;
(б) скоростной закон поперечных волн.



п.	Глубина [м]	Мощность [м]	Vs [м/с]	Vp [м/с]	модуль сдвига [МПа]	Модуль Юнга [МПа]
1	4.93	4.93	174.42	284.82	54.76	131.42
2	10.33	5.40	225.33	367.97	91.39	219.35
3	17.33	7.00	255.54	417.29	117.54	282.10
4	23.99	6.66	448.38	732.21	361.89	868.53
5	31.09	7.10	540.20	882.14	525.27	1260.64
6	∞	∞	540.69	882.95	526.23	1262.95

▲ Табл. 1. Рассчитанные геомеханические свойства разреза

танные по рэлеевским волнам, в целом, согласуются с данными отражённых волн, а скорости продольных волн в сопоставлении с данными метода преломлённых волн существенно меньше.

Литература

1. Рагозин Н.А., Федотов А.С. Возможности обработки многоканальных сейсморазведочных данных // Инженерные изыскания. 2012. № 11. С. 29-34.

2. Федотов С.А., Федотов А.С., Федорова М.П. Повышение помехоустойчивости, разрешающей способности и производительности многоволновой сейсморазведки при инженерно-геофизических изысканиях // Инженерные изыскания. 2011. № 11. С. 60-65.

3. Sheriff R.E. Encyclopedic Dictionary of Applied Geophysics (4-th ed.) / Geophysical References No. 13. SEG. 2002.

Подробнее об авторах



Белоусов
Александр Валерьевич

ведущий геофизик ЗАО
НПЦ «ГеоСейсКонтроль»,
доцент кафедры разведочной
геофизики РГУ нефти
и газа имени И.М. Губкина



Сергеев
Константин Сергеевич

ведущий инженер
лаборатории инженерной
геофизики РГУ нефти и газа
имени И.М. Губкина



Сафиуллин
Руслан Ильдусович

лаборант кафедры
разведочной геофизики
РГУ нефти и газа имени
И.М. Губкина, студент
3 курса