



Г. А. Шехтман
В. М. Кузнецов
А. П. Жуков
И. П. Короткое
А. В. Бурлаков

ВНИИГЕОФИЗИКА, МОСКВА
ВНИИГЕОФИЗИКА, МОСКВА
ООО "ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ ДАННЫХ", МОСКВА
ООО "ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ ДАННЫХ", МОСКВА
ООО "ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ ДАННЫХ", МОСКВА

РАСШИРЕНИЕ ТИПОВ ВОЛН, ИСПОЛЬЗУЕМЫХ В СЕЙСМОРАЗВЕДКЕ: ПРЕДПОСЫЛКИ И РЕЗУЛЬТАТЫ

ВВЕДЕНИЕ. Многоволновая сейсморазведка, основанная на использовании монотипных и обменных сейсмических волн, в течение последних десятилетий успешно внедряется в производство при поисках и разведке месторождений нефти и газа, а также при изучении строения верхней толщи геологического разреза. Сделанный несколько десятилетий назад пессимистический прогноз об ограниченных возможностях сейсморазведки на обменных отраженных волнах [1] не подтвердился. Совершенствование технических средств и математического обеспечения позволило увеличить глубинность исследований обменными отраженными волнами типа *PS* на основе применения многократных систем наблюдения, большого динамического диапазона при регистрации и обработке сигналов, а также комбинирования характеристик направленности первого и второго рода при разделении полезных волн и помех. Более того, рассматривавшиеся ранее как помехи обменные отраженные волны с другими лучевыми схемами, а не только волны типа *PS*, благодаря возможностям современных технологий вполне могут использоваться как волны полезные.

Комплексирование скважинной и наземной сейсморазведки позволяет более уверенно разобраться с волновыми полями, а также вполне однозначно увязать сейсмические волны, наблюдаемые внутри Земли и на поверхности. Такая увязка, выполненная даже при редкой сети скважин, позволяет резко повысить точность результатов при изучении структуры межскважинного пространства.

Возможность расширения типов обменных волн, используемых в сейсморазведке, иллюстрируется экспериментальными результатами.

МНОГОВОЛНОВАЯ СЕЙСМОРАЗВЕДКА: ПРЕИМУЩЕСТВА И ОГРАНИЧЕНИЯ

Сейсморазведка с момента ее появления основывалась на использовании главным образом продольных отраженных (*PP*) волн. В настоящее время этот тип волн

продолжает оставаться основным при поисках и разведке месторождений нефти и газа. Определяющими факторами при этом являются: высокое отношение сигнал/помеха для волн *PP*; высокая скорость распространения *P*-волн, позволяющая регистрировать волны *PP* до прихода обменных и поперечных волн; близкая к линейной поляризация этих волн; разнообразие доступных источников колебаний, способных генерировать такие волны; возможность их регистрации не только на суше, но и на море. Совершенствование сейсморазведки на волнах *PP* в направлении повышения ее глубинности, разрешающей способности, а также переход к объемной сейсморазведке способствовали все более широкому внедрению трехкомпонентной регистрации колебаний взамен регистрации группой однокомпонентных вертикальных сейсмоприемников. Трехкомпонентная запись, обеспечив возможности повышения качества результатов на продольных волнах, позволила приступить к более широкому внедрению волн другого типа, прежде всего обменных волн *PS*, не требующих для их возбуждения никаких специальных источников колебаний.

При изучении разведочных возможностей сейсморазведки на обменных отраженных волнах основной акцент все эти годы делался на волны *PS*. Еще можно было понять доводы в пользу такого предпочтения, сделанные 40 лет назад в добротной подготовленной монографии наших отечественных ученых [1]. Их выводы опирались на ограниченные возможности сейсморазведки того времени, когда в поле преобладали осциллографные, а не магнитные и даже не цифровые, записи, причем системы наблюдений были только однократными. Предпочтение волнам *PS* отдавалось в силу того, что на расстояниях от пункта возбуждения (*ПВ*), меньших критического, они оказывались сильнее волн другого типа, например, отраженных волн типа *PSSS*, обмен которых происходит на промежуточной границе. Очевидные недостатки волн *PS*, обусловленные асимметрией сейсмического луча, тогда в учет особенно не принимались. Современная сейсморазведка, опирающаяся на системы многократных перекрытий и ведущая свое начало с

волн *PP*, оказалась более чувствительной к такому недостатку. Тем более озадачивает основной акцент на использование волн *PS*, отстаиваемый в последние десятилетия отечественными и зарубежными исследователями [4, 6, 7]. Вопрос стоит того, чтобы вернуться к истокам и рассмотреть его более подробно.

Физические предпосылки регистрации обменных отраженных волн рассмотрены в работе [1]. Ее авторы в обзоре ранее проведенных исследований отмечают, что наличие сильных промежуточных границ раздела приводит к формированию заметных по интенсивности обменных отраженных волн с промежуточным обменом, препятствующих прослеживанию отражений *PS*. Исследуя на модельных и экспериментальных данных соотношение интенсивности отраженных волн различного типа, они получили важные для практики результаты:

- Волны *PS*, образующиеся в средах с сильной дифференциацией скоростей, могут, начиная с некоторых расстояний, быть интенсивнее волн *PP*. Коэффициент отражения волн *PS* в первую очередь зависит от отношения скоростей поперечных волн по обе стороны от границы.
 - Волны *PS* при расстоянии $x/H < 1,5$ интенсивнее, чем отраженные волны *PSSS*, претерпевающие обмен *P* на *5* на первой промежуточной границе. При больших расстояниях, а также в условиях резких промежуточных границ волны *PS* становятся более слабыми. Отраженные волны типа *PSSS* отличаются от волн *PS* областью регистрации, кажущимися скоростями и более низкими частотами.
- П Коэффициенты отражения волны *PS* от тонких слоев, зависящие от отношения мощности слоя к длине продольной волны, могут быть в 2 - 3 раза больше, чем коэффициенты отражения от толстого слоя при такой же скоростной дифференциации среды.
- В тонкослоистой среде могут наблюдаться более быстрое возрастание амплитуд волны *PS* вблизи источника по сравнению с толстослоистой моделью и более низкочастотный спектр волны *PS* по сравнению со спектром волны *PP*.
 - В тонкослоистой среде с однородными слоями форма записи и спектры волны *PS* очень чувствительны даже к небольшим изменениям мощности слоя, что может быть причиной их плохой коррелируемости в средах с изменяющейся мощностью слоев.

В работе [4], появившейся около 20 лет спустя, наиболее подробно описаны особенности отраженных волн *PS*, которым продолжали придавать основное значение при сейсмических исследованиях. Согласно теоретическим расчетам, волны данного типа остаются доминирующими в волновом поле, значительно превосходя по интенсивности сложные обменные волны. Было установлено, что увеличение $\gamma = V_s/V_p$ с глубиной должно приводить к повышению роли обменных отраженных волн обоих типов - *PS* и *PSSS*. При этом отмечалось, что при некоторых условиях интенсивности волн *PP* и *PSSS* оказываются близкими между собой. Исходя из этого допускалось, что волны с промежуточными обменами могут представлять самостоятельный разведочный интерес. Однако делался вывод и о том, что на больших удалениях от источника отраженные волны типа *PSSS* могут являться помехами, что соответствовало их взгля-

ду на приоритет волн *PS* над другими физически возможными обменными волнами, в частности волнами типа *PSSS*. Поэтому при изложении вопросов методики наблюдений на обменных отраженных волнах и обработки записей авторы работы [4] рассматривали лишь волны *PS*.

В современной многоволновой сейсморазведке основное внимание в нашей стране и за рубежом уделяют, кроме продольных волн, обменным отраженным волнам типа *PS*, внедрение которых к концу 90-х годов перешло в производственную стадию. Этому способствовала главным образом неприхотливость этих волн, как и продольных волн, к типу используемого источника колебаний. Основное неудобство в их применении вызвано необходимостью учета асимметрии лучей волн *PS* при проектировании систем наблюдений и при обработке записей. На этапе интерпретации для отождествления и стратиграфической привязки обменных волн используют результаты моделирования волновых полей, корреляцию с разрезами на волнах *PP*, а также сейсмограммы и разрезы ВСП.

Чисто поперечные отраженные волны типа *SS* многоволновой сейсморазведке не нашли пока широкого применения. Основная причина затянувшегося внедрения поперечных волн в производство - отсутствие надежного и недорогого источника колебаний, невозможность проведения работ на поперечных волнах на море и в транзитных зонах, а также в условиях обводненной верхней части разреза. Кроме того, качество разрезов, полученных на поперечных волнах, часто оставляет желать лучшего из-за их зашумленности, что при высокой стоимости работ на этом типе волн делает их подчас нерентабельными.

Таким образом, основным источником информации об отражающей способности геологического разреза на поперечных волнах принято считать обменные отраженные волны *PS*. Их использование обеспечивает [4, 6, 7]:

- Получение сейсмических разрезов, содержащих дополнительную информацию к разрезам на продольных волнах.
- Более детальное отображение верхней толщи разреза.
- Более качественное представление разрезов с границами раздела, являющимися более контрастными для поперечных волн по сравнению с продольными.
- Формирование изображений среды в условиях газо насыщения и сложной тектоники.
- Углубленную интерпретацию результатов на продольных волнах путем привлечения параметра $\gamma = V_s/V_p$, использование γ для изучения литологии.
- Расширение возможностей стандартного АВА-анализа.
- Изучение анизотропии скоростей, а также плотности трещин и их ориентации.
- Изучение природы "ярких пятен", выявленных на *PP*-волнах.
- Мониторинг изменений состояния резервуара.

Обменные отраженные волны типа *PSSS*, претерпевающие обмен в верхней толще разреза на резкой промежуточной границе, заслуживают внимания по следующим причинам:

- В отличие от волн *PS*, их лучи практически симметричны, поэтому при проектировании систем наблю-

дений, а также при обработке материалов можно после несложной адаптации использовать стандартные подходы и пакеты обработки, предназначенные для монотипных волн.

- В отличие от чисто поперечных отраженных волн типа *SV*, волны *PSSS* являются более высокочастотными, поэтому разрезы, полученные путем их миграции, отличаются более высокой разрешенностью.
- При возбуждении волн *PSSS* погружным источником выбор оптимальной глубины источника позволяет, в отличие от волн *SV*, получить более широкий спектр возбуждаемых частот.
- Регистрация волн *PSSS* на временах, свободных от интерференции обменных волн более сложного типа, позволяет получить более достоверные разрезы на этих волнах.
- Регистрация волн *PSSS* на закритических расстояниях, как это следует из расчетов для различных моделей, проведенных в разное время, позволяет добиться превышения их интенсивности над волнами *PS*. Тем самым основное преимущество волн *PS* - их более высокая интенсивность по сравнению с другими обменными волнами - при докритических расстояниях перестает быть решающим.

ОТОЖДЕСТВЛЕНИЕ И УВЯЗКА ВОЛН ПРИ ПОМОЩИ ВСП

Метод ВСП позволяет непосредственно видеть внутри среды процесс формирования волнового поля, проследить физически возможные типы и классы волн, представляющих разведочный интерес, и увязать эти волны с наземными сейсмическими разрезами. Тем самым достигается повышение достоверности результатов наземной сейсморазведки. Ниже эти возможности иллюстрируются примерами.

На рис. 1 приведена сейсмограмма ВСП для *x*-компоненты при удалении ПВ от скважины, равном 380 м. Стрелкой на ней показана обменная отраженная волна типа *PSSS*, обмен которой происходит на верхней резкой границе. Можно видеть, что по интенсивности волна этого типа не уступает волне *PS*, обмен которой происходит на той же отражающей границе, расположенной на глубине 1090 м. Обменные волны, отраженные от глубоких границ, наблюдаются при больших удалениях ПВ.

На рис. 2 приведен пример сейсмограмм НВСП, полученных при больших выносах ПВ, сопоставимых с глубиной скважины. В сложном волновом поле, характерном для неперодольных вертикальных профилей, на обеих компонентах регистрируются обменные волны сложных типов с обменом на промежуточных и отражающих границах. Можно уверенно наблюдать обмен волн с переходом от волн с продольной поляризацией к волнам с поперечной поляризацией и наоборот. По существу внутри среды на разных компонентах наблюдаются все физически возможные типы волн,

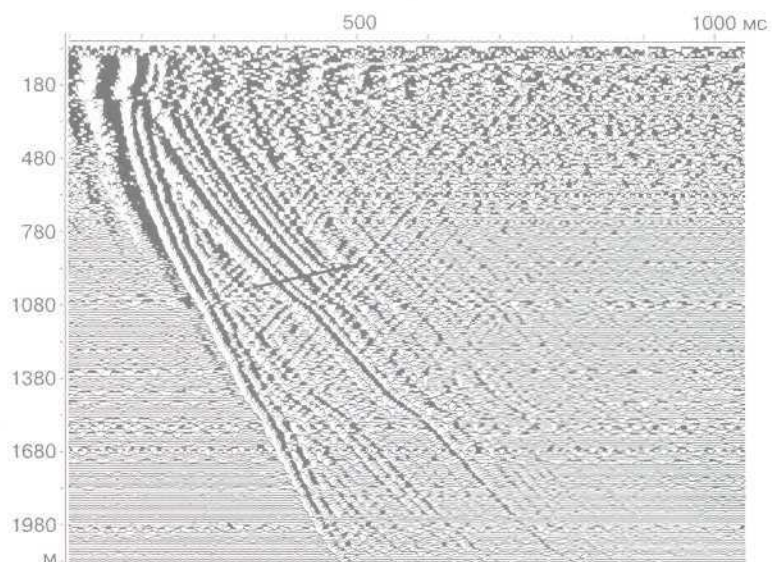


Рис. 1. Сейсмограмма ВСП, *x*-компонента, удаление ПВ-380 м, Пермская область: стрелкой показана отраженная обменная волна типа *PSSS*

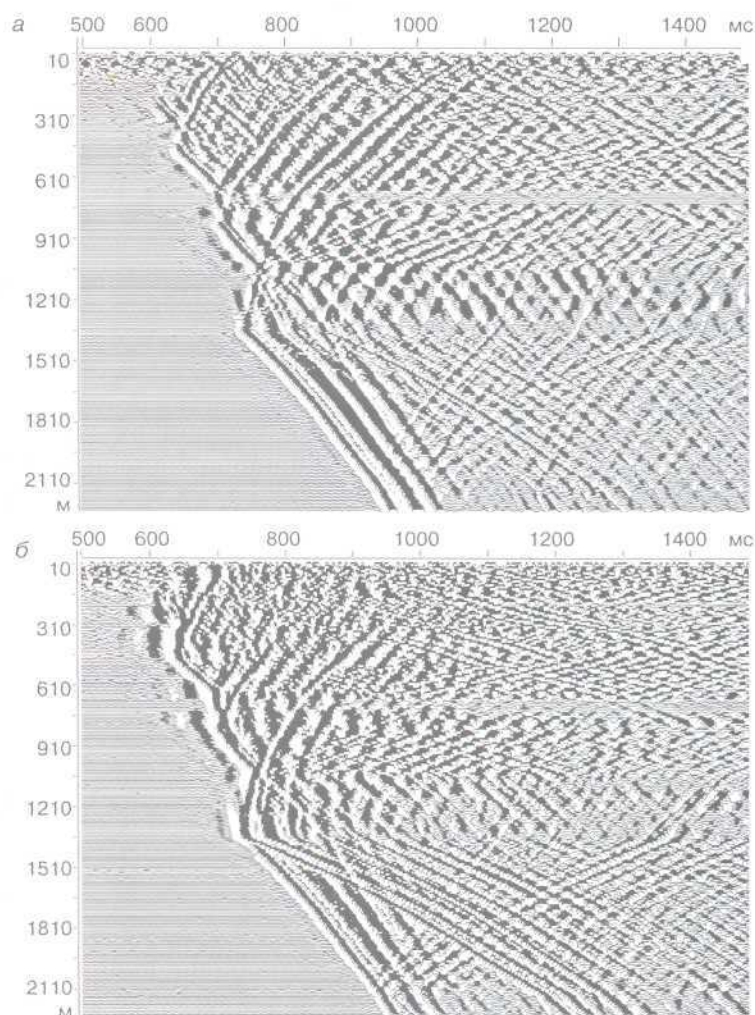


Рис. 2. Сейсмограммы НВСП на *z*-компоненте (а) и *x*-компоненте (б) при расстоянии ПВ от устья скважины, равном 2000 м, Балтийская синеклиза

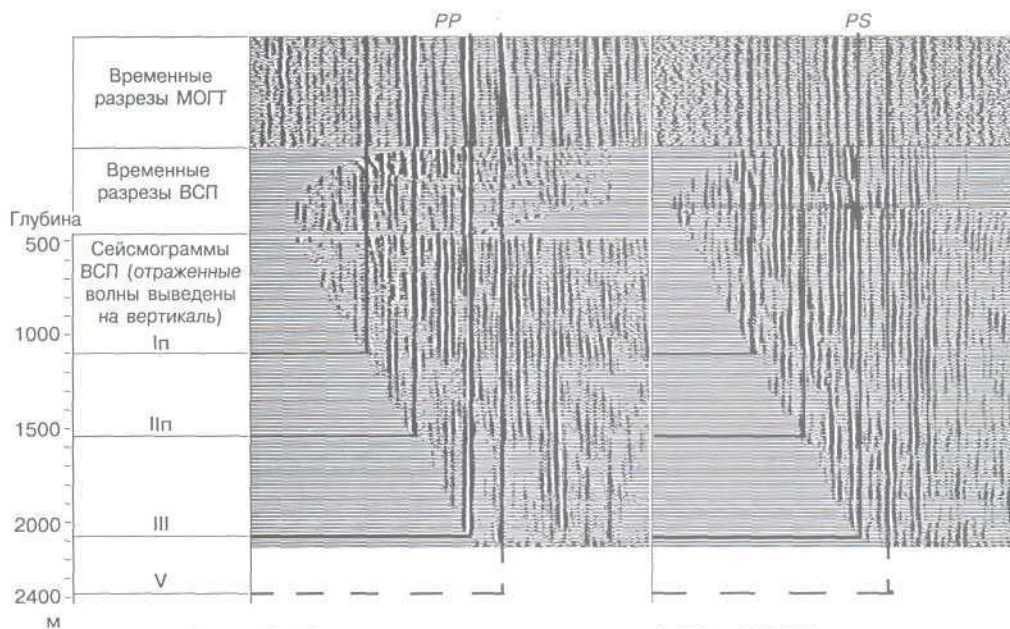


Рис. 3. Пример увязки результатов ВСП и МОГТ на продольных и обменных отраженных волнах, Пермская область

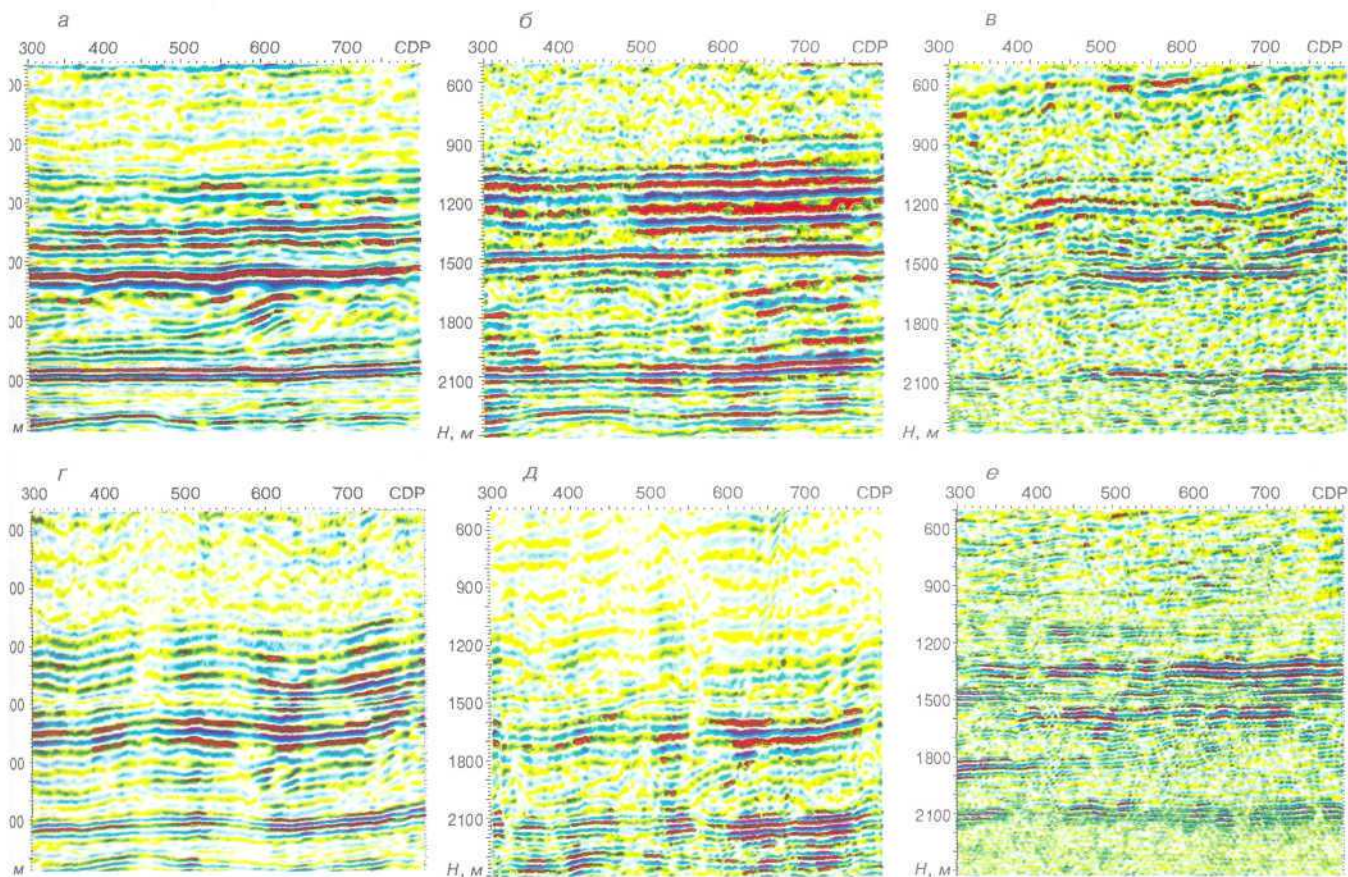


Рис. 4. Глубинные разрезы МОГТ, полученные для различных типов отраженных волн: а - продольные волны; б - обменные волны типа PS; в - обменные волны типа PSSS; г - поперечные волны SH; д - поперечные волны SV; е - обменные волны типа PSSP

Результаты увязки продольных и обменных отраженных волн типа PS на сейсмограммах НВСП, разрезах НВСП и разрезах МОГТ приведены на рис. 3. В пределах данных для одного и того же типа волн увязка вполне удовлетворительная. Обращает, однако, на себя внимание различие характера волновых картин и разрезов на различных типах волн. Это различие свойственно и скважинным, и наземным экспериментальным сейсмограммам. Обусловлено оно различием отражающих свойств тонкослоистого разреза для волн различного типа, а также наложением волн другого типа, подавить которые не удалось в процессе обработки. В работах зарубежных авторов наблюдаются нередко аналогичные результаты, где разрезы на различных типах волн плохо стыкуются между собой (например, рис. 14 в работе [6]).

На рис. 4 в качестве примера приведены глубинные разрезы МОГТ, полученные для одного и того же профиля на продольных, поперечных и обменных отраженных волнах различных классов, рассмотренных выше. Результаты на поперечных волнах SH и SV получены с использованием направленного вибрационного источника. Геологическая интерпретация этих результатов изложена в работе [5]. Здесь отметим лишь два существенных факта: глубинные разрезы, полученные на различных типах волн, в целом стыкуются достаточно удовлетворительно; на обменных волнах типа $PSSS$ и $PSSP$ разрезы характеризуются более высокой разрешенностью, чем на поперечных волнах. Кроме того, разрезы, полученные на обменных волнах сложных типов, обнаруживают в части геометрии границ большую близость к разрезу на продольных волнах, чем разрезы на поперечных волнах. Учитывая наиболее высокое качество разреза на продольных волнах, можно сделать вывод о том, что результаты, полученные на этих, пока еще нетрадиционных, типах обменных волн, являются вполне кондиционными.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ. Приведенные выше результаты свидетельствуют в пользу расширения типов волн, используемых в многоволновой сейсморазведке, путем привлечения волн, претерпевающих обмен на резких промежуточных границах. Реальность сейсмических границ, прослеживаемых в наземной сейсморазведке, наиболее надежно подтверждается путем комплексирования ее с методом ВСП. Комплексирование многоволновой скважинной и наземной сейсморазведки позволяет осуществлять уверенную глубинную привязку монотипных и

обменных отраженных волн к особенностям геологического разреза.

Результаты многочисленных теоретических расчетов, математического моделирования и экспериментальных исследований внутри среды, выполненных в нашей стране и за рубежом, свидетельствуют о несостоятельности появившихся недавно довольно абсурдных утверждений об отсутствии в сейсморазведке "эхо-сигналов", т. е. отраженных волн, и тем более о том, что "традиционная сейсморазведка является научным заблуждением" [2,3]. Сложности в сейсморазведке обусловлены не отсутствием отраженных волн (по А. Г. Гликману), а их большим количеством, затрудняющим успешное разделение полезных волн и волн-помех. Кроме того, сложность реальной геологической среды всегда будет требовать наличия априорной информации, адекватной поставленным обратным задачам. Источником такой информации являются сейсмические наблюдения внутри среды, которые всегда были и будут заслоном на пути не мнимых, а подлинных заблуждений в сейсморазведке.

ЛИТЕРАТУРА

1. Берзон И. С., Ратникова Л. И., Рац-Хизгия М. #., 1966, Сейсмические обменные отраженные волны: М., Наука.
2. Гликман А. Г., 2005, О принципах спектральной сейсморазведки: Геофизика XXI столетия: 2003 - 2004 годы. Сборник трудов Пятого и Шестого геофизических чтений им. В. В. Федынского: Тверь., Издательство ГЕРС, 10 - 15.
3. Гликман А. Г. 2005, Эффект акустического резонансного поглощения (АРП) как основа новой парадигмы теории поля упругих колебаний: Геофизика XXI столетия: 2003 - 2004 годы. Сборник трудов Пятого и Шестого геофизических чтений им. В. В. Федынского: Тверь., Издательство ГЕРС, 2 - 15.
4. Пузырев Н. Н., Тригубов А. В., Бродов Л. Ю. и др., 1985, Сейсмическая разведка методом поперечных и обменных волн: М., Недра.
5. Kuznetsov V. M., Erhov V. A., Shekhtman G. A., Zhukov A. P., Koroikov J. P., Salovsky V. A., Luntsev V. F., 2006, Multicomponent Analysis of 2D/3D/9C Survey over an Oil-Bearing Field - Case Study from Russian Platform: 68th EAGE Conference & Exhibition (P292).
6. Stewart R. R., Gaiser J. £., Brown R. J., Lawton D. C., 2002, Converted-wave seismic exploration: Methods: Geophysics, 67, 5. 1348 - 1363.
7. Stewart R. R., Gaiser J. £., Brown R. J., Lawton D. C., 2003, Converted-wave seismic exploration: Applications: Geophysics, 68, 1, 40 - 57.

КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

Григорий Аронович Ш ЕХТ МАН - доктор техн. наук, главный научный сотрудник ВНИИгеофизики.

Василий Маркович КУЗНЕЦОВ - кандидат техн. наук, заведующий лабораторией ВНИИгеофизики.

Александр Петрович ЖУКОВ - доктор техн. наук, директор ООО "Геофизические системы данных".

Илья Петрович КОРОТКОВ - главный геофизик ООО "Геофизические системы данных".

Алексей Владимирович БУРЛАКОВ - ведущий геофизик ООО "Геофизические системы данных".