



## ЭТАПЫ И ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ МНОГОВОЛНОВОЙ СЕЙСМОРАЗВЕДКИ

Г.А. Шехтман, И.П. Коротков

ООО “Геофизические системы данных”, 117198, Москва, Ленинский просп., 113/1, Парк Плейс, офис E-302, Россия, e-mail: gregs22@rambler.ru, info@gds.ru

В обзоре представлены этапы развития российской и зарубежной многоволновой сейсморазведки с момента ее зарождения. Кратко изложены ее преимущества и ограничения; рассмотрены модели реальных сред и типы волн, используемых в ней, а также проблемы современной обработки данных многоволновой сейсморазведки.

*Многоволновая сейсморазведка, обработка данных*

### MULTICOMPONENT SEISMIC: ADVANCEMENT STAGES AND TENDENCIES

G.A. Shekhtman, I.P. Korotkov

“Geophysical Data Systems” Ltd., 113/1, Leninsky Prospect, Park Place, Office E-302, Moscow, 117198, Russia, e-mail: gregs22@rambler.ru, info@gds.ru

The article considers advancement stages of Russian and foreign multicomponent seismic from the moment of its origination. It briefly outlines the advantages and limitations of the method. Models of the real media, wave types for multiwave seismology and problems of modern processing of the multicomponent seismic data are considered as well.

*Multiwave seismology, multicomponent seismic, full-wave seismic, data processing*

Множество отечественных и зарубежных работ, опубликованных за минувшие полвека, свидетельствуют о результативности многоволнового подхода к изучению реальной геологической среды. В кратком библиографическом справочнике по многоволновой сейсморазведке, составленном в 2010 г. [Многоволновая сейсморазведка, 2010], приводятся ссылки на две тысячи работ. Они позволяют составить общее впечатление о развитии теории, алгоритмов, методики, технологии обработки и интерпретации, а также ознакомиться с множеством методических и геологических результатов в области многоволновой сейсморазведки (МВС), полученных в самых разных геологических условиях. В данной работе мы ограничились рассмотрением лишь наиболее важных, ключевых моментов истории МВС. Список литературы к данному обзору сведен к минимуму, учитывая наличие вполне доступного читателям упомянутого справочника, содержащего часть цитируемых нами источников информации.

Идея использовать поперечные и обменные волны в сейсморазведке принадлежит академику Г.А. Гамбурцеву. Под его научным руководством в 1938–1940 гг. впервые были проведены эксперименты по возбуждению и регистрации поперечных волн. Первые публикации, касающиеся регистрации поперечных и обменных волн, появились в нашей стране и за рубежом в 1950-х годах [Берзон, 1958; Васильев, 1961; Jolly, 1956\*; и др.].

Начало планомерного использования поперечных волн в сейсморазведке относят к 1958–1959 гг.,

когда во ВНИИГеодинамика и вновь созданном Институте геологии и геофизики СО АН СССР по инициативе Н.Н. Пузырева и под его непосредственным руководством были выполнены первые экспериментальные работы по возбуждению и регистрации поперечных волн [Экспериментальные исследования..., 1962]. С 1972 г. к этим исследованиям присоединилась Сибирская геофизическая экспедиция (СибГЭ) и ряд других производственных организаций.

На начальном этапе развития исследований (до середины 1970-х годов) основные усилия были направлены на создание эффективных источников поперечных волн, отсутствие которых неизменно тормозило проведение экспериментальных исследований, с целью доведения метода до его производственного применения. Основное внимание при этом уделялось использованию  $SH$ -волн, поскольку в условиях субгоризонтального залегания отложений эти волны, в отличие от  $P$ - и  $SV$ -волн, не испытывают обмена на промежуточных и отражающих границах. Кроме того, в анизотропной среде зависимость скорости  $SH$ -волны от угла между направлением распространения волн и осью симметрии (индикатриса скорости) является наиболее простой (эллипс), что существенно упрощает обработку и гарантирует более высокую надежность на этапе интерпретации.

К середине 1970-х годов относится начало плодотворного сотрудничества отечественных и французских сейсморазведчиков, которые с самого начала придерживались точки зрения о необходимости комплексования продольных и поперечных волн с це-

\* Здесь и далее литературные источники, отмеченные \*, см. “Многоволновая сейсморазведка”. Тверь, 2010. 358 с.

лью установления различий кинематических и динамических характеристик волновых полей в присутствии флюидов. Итогом этих совместных исследований явился вывод о важности использования при интерпретации отношения  $V_S/V_P$ , довольно легко получаемого при комплексировании различных типов волн, а также количественных оценок анизотропии  $SH$ -волн. Кроме того, общепризнанным доводом в пользу комплексирования волн стало отсутствие аномалий типа “яркого пятна”, полученных на продольных волнах, при проведении наблюдений на поперечных волнах, когда аномалии связаны с флюидонасыщением. Однако развитие в 1980-х годах направления, известного под названием AVO (Amplitude Versus Offset), основанного на изучении зависимости изменения амплитуд отражений на продольных волнах от упругих свойств контактирующих пород, явно замедлило темпы дальнейшего развития методик, использующих монотипные поперечные волны. По мнению французского геофизика R. Garotta [2000], именно с появлением AVO стало ясно, что продольные волны сами по себе способны ответить на вопрос о природе “ярких пятен” [Ostrander, 1984\*] и что для этого волны  $SH$  больше не нужны. Вывод этот сделан был явно поспешно, поскольку последующие исследования показали, что в условиях анизотропных сред стандартные модели AVO требуют пересмотра [Tsvankin et al., 2010].

При работах на сейсмических профилях, расположенных во Франции и в Сибири, методика многоволновых исследований уже вполне приближалась к современной. По существу, эти работы стали прообразом современных 9-компонентных наблюдений (3-компонентный прием и возбуждение колебаний в направлениях  $z$ ,  $x$  и  $y$ ). Тогда же для определения величины  $V_S/V_P$  использовали кроме продольных волн не только поперечные, но и обменные волны. Существенным шагом вперед стало разрешение проблем со статикой при проведении этих работ путем использования непосредственно обменных волн.

Практически одновременно с исследованиями на поперечных волнах в первой половине 1960-х годов проводились работы по выяснению геологической эффективности использования обменных отраженных  $PS$ -волн. Значительные результаты на  $PS$ -волнах были получены в Саратовском Поволжье, где с их помощью более надежно, чем по продольным волнам, удалось проследить поверхность карбонатной палеозойской толщи, перекрытой маломощными выклинивающимися отложениями, состоящими из чередующихся между собой терригенных и сульфатных пород [Бахаревская, 1967\*]. Пример другого важного результата представляют собой работы, выполненные в Западном Казахстане, где при помощи  $PS$ -волн в низах неокома были выделены малоамплитудные сбросы, причем с гораздо более высокой точностью, чем по продольным волнам [Бахаревская, Бродов, 1967\*].

Целенаправленное опробование и внедрение отраженных  $PS$ -волн в нашей стране началось в конце 1970-х годов. Специально для обработки записей МОГТ на  $PS$ -волнах было разработано и успешно опробовано математическое обеспечение, позволяющее учитывать несимметричность положения точек отражения волн  $PS$  относительно базы источник–приемник [Нефедкина, 1980; Нефедкина и др., 1980].

Трудно переоценить значимость исследований зависимости между “аномальной” поляризацией по-

перечных и обменных (непродольных) волн и анизотропными свойствами среды, проводившихся в нашей стране в течение многих лет, начиная с середины 1960-х годов. Было установлено, что значения основной и особенно побочной компонент смещений, полученные путем расчетов для изотропной модели с наклонными границами раздела, могут не соответствовать экспериментальным значениям [Пузырев, Оболенцева, 1967]. Переход при расчетах к анизотропной модели обеспечивал лучшее их сходство.

Большой объем экспериментальных наземных и скважинных исследований, направленных на изучение поляризации волн, не являющихся продольными, был проведен на различных участках Прикаспийской впадины на склонах соляных куполов [Пузырев и др., 1985]. В результате установлено следующее: поляризация поперечных волн очень слабо зависит от угла наклона границ, при этом наблюдается сильная ее зависимость от азимута. Кроме того, была выявлена сильная зависимость анизотропии от литологических свойств пород: терригенные породы оказались более анизотропными, чем карбонатные. Аномальные свойства поляризации волн предположительно связывались с наличием анизотропии и ее специфическими проявлениями.

Итоговый вывод по результатам многолетних работ в Прикаспийской впадине состоял в следующем [Пузырев и др., 1983]: традиционное представление о том, что анизотропия осадочных отложений, описываемая моделью трансверсально-изотропной среды с осью симметрии, нормальной плоскостям слоев (квазианизотропная среда), не вполне соответствует реальности. Это было подтверждено затем большим объемом исследований, выполненных в нашей стране и за рубежом. Для практической сейсморазведки было очень важно доказать тот факт, что даже небольшая азимутальная анизотропия, если ее не учесть, может привести к значительным искажениям при обработке и интерпретации. Убедительные примеры, полученные позже за рубежом, подтвердили этот вывод [Alford, 1986; Willis et al., 1986\*].

К середине 1980-х годов в технико-методическом обеспечении МВС был достигнут достаточно высокий уровень, позволяющий проводить работы практически во всех нефтегазоносных районах страны [Бродов, Ведерников, 1987\*]. К этому времени значительно повысилась эффективность решения с помощью МВС структурных задач и изучения вещественного состава отложений. Была достигнута высокая точность в прослеживании резких границ и особенностей клиноформных отложений. Изучение вещественного состава разреза осуществлялось путем широкого использования определений коэффициента Пуассона и значений  $\gamma = V_S/V_P$ . Во многих районах была установлена связь отрицательных аномалий значений коэффициента Пуассона с нефтеносностью, а по его аномально высоким значениям (или, соответственно, пониженным значениям  $\gamma$ ) можно было судить об увеличении глинистости отложений – показателе наличия в разрезе покрывок над коллекторами углеводородов. По наличию “яркого пятна” на продольных волнах и его отсутствию на поперечных волнах стали уверенно выделять участки нефтегазонасыщенности. Изучение спектрально-временных характеристик волн позволило устанавливать цикличность осадконакопления и решать геологические задачи в рамках структурно-формационного подхода [Мушин, Бродов, 1985\*].

Успешное развитие МВС в нашей стране сыграло большую роль в том размахе, который приобрели зарубежные исследования в середине 1980-х годов. Следует отметить, что к этому времени зарубежные геофизики уже смогли существенно продвинуться и в развитии скважинных сейсмических исследований, опираясь на большой задел в этом направлении, сделанный в СССР. Некоторые из наиболее значимых зарубежных разработок были очень близки к нашим отечественным, выполненным ранее. К примеру, в обработке *PS*-волн суммирование трасс, подобранных по общим точкам обмена, заданным вначале по априорным данным, а затем уточняемым по результатам скоростного анализа [Ruehle, 1986\*], по существу, воспроизводило упомянутый выше алгоритм [Нефедкина и др., 1980].

Морская МВС в России впервые была проведена в начале 1988 г. на шельфе Черного моря [Архипов, 2002]. Для регистрации колебаний использовали донную 3-компонентную симметричную установку, контакт которой с дном осуществлялся посредством веса приборного модуля (в последующих работах более надежный контакт геофон-грунт стали обеспечивать посредством штырей). Основной вывод, который был тогда сделан, состоял в том, что регистрация обменных волн в морских условиях при помощи донных систем вполне возможна. После этого было разработано и изготовлено несколько типов многокомпонентных донных приемных систем – кабельно-модульные кося, включающие симметричные и азимутальные установки геофонов. Работы с этими установками проводились на акваториях Черного, Каспийского, Азовского и Северного морей.

Наибольший научный интерес зарубежные работы по МВС, нацеленные на решение практических задач, стали представлять для отечественных геофизиков в связи с резким сокращением геологоразведочных работ в нашей стране в начале 1990-х годов, которое неизбежно затронуло и сейсморазведку. К настоящему времени работы по МВС в России проводят в небольшом объеме, и в упомянутом выше библиографическом справочнике по МВС большая часть публикаций представлена зарубежными авторами и бывшими нашими соотечественниками.

Однако к началу 1990-х годов к производственному внедрению были готовы следующие разработанные в СНГ технические средства, предназначенные для возбуждения упругих колебаний в МВС: горизонтальные электродинамические импульсные, а также вибро- и кодоимпульсные источники типа ВЭИП-40 и ЭИП-50, разработанные в Харьковском СКБ НПО “Нефтегеофизика”, и ИКИГ-1, разработанный в Харьковском СКБ “Потенциал”; пневматический импульсный источник наклонных воздействий на среду типа ГСК-5ПП (разработка ВНИИГеофизика); электромеханический виброисточник типа “Вибролокатор” (разработка ИГиГ СО АН СССР и СНИИГиМС), а также гидравлический горизонтальный вибратор CDG-12/80, разработанный в Гомельском НПО “Сейсмотехника”. Наибольшие объемы работ по МВС в то время были выполнены источниками ВЭИП, ЭИП и “Вибролокатор”.

За рубежом для возбуждения поперечных волн продолжительное время использовали невзрывные источники с горизонтальным и наклонным импульсным воздействием на среду, а также виброисточни-

ки. В настоящее время используют, как правило, виброисточники.

Развитие аппаратно-методического комплекса сейсморазведки напрямую коснулось и решения проблем, представляющих большой интерес для МВС. Одна из них – это повышение качества полевых записей. Дело в том, что применение групп сейсмоприемников, десятилетиями использовавшихся в наземной сейсморазведке, неизбежно приводило не только к подавлению помех, но и к искажению полезных сигналов. Именно в МВС применение групп приемников и источников колебаний приводило к наиболее ощутимым искажениям из-за резкого изменения скоростей распространения поперечных волн в приповерхностном слое. Кроме того, 3-компонентный прием колебаний, характерный для МВС, вообще исключал полноценное группирование датчиков до ориентации компонент, поэтому перенос группирования с этапа регистрации на этап обработки (лабораторное группирование) выглядел вполне оправданным. Для перехода к сейсморазведке с одиночными 3-компонентными приемниками и источниками появились достаточно убедительные доводы [Череповский, 2012]. Цифровые 3-компонентные датчики, обоснованно заполнившие высокотехнологичную нишу, вскоре стали стандартными для многоволновых съемок, но они также применяются и при площадных наблюдениях на продольных волнах. Они позволяют существенно расширить спектр регистрируемых колебаний, лучше сохранять амплитуды и использовать поляризационные фильтры для подавления поверхностных волн-помех. Кроме того, применение микроэлектромеханических систем (МЭМС) весьма важно для автоматического пересчета регистрируемых компонент к вертикали. В настоящее время назрела необходимость в переходе к цифровым датчикам в скважинной сейсморазведке (методе вертикального сейсмического профилирования – ВСП), которая во всем мире полностью перешла на 3-компонентную регистрацию.

У обменных отраженных *PS*-волн по сравнению с монотипными отраженными волнами имеется, как известно, существенный недостаток, обусловленный несимметричностью их лучевой схемы. В условиях сложно построенных сред это создает большие трудности при использовании стандартных технологий, реализованных в промышленных обрабатывающих системах. Они усугубляются сложностью учета статических поправок, которые приходится отдельно определять и вводить для продольных и поперечных волн.

Отсутствие доступных универсальных стандартных пакетов обработки данных МВС обусловило потребность в разработке специализированного программного обеспечения, позволяющего в производственном режиме осуществлять обработку данных наземной МВС [Коротков, 2012].

#### МОДИФИКАЦИИ МВС, ИХ ПРЕИМУЩЕСТВА И ОГРАНИЧЕНИЯ

Сейсморазведка с момента ее появления основывалась на использовании главным образом продольных отраженных *PP*-волн. В настоящее время *PP*-волны продолжают оставаться основными при поисках и разведке месторождений нефти и газа. Определяющими факторами при этом являются: высокое отношение сигнал/помеха для *PP*-волн и их большая скорость распространения, позволяющая регистрировать

*PP*-волны еще до прихода обменных и поперечных волн; их близкая к линейной поляризация; разнообразие доступных источников колебаний, способных генерировать такие волны, а также возможность их регистрации не только на суше, но и на море. Совершенствование сейсморазведки на *PP*-волнах в направлении повышения ее глубинности, разрешающей способности, а также переход к объемной сейсморазведке способствовали все более широкому использованию 3-компонентной регистрации колебаний взамен групп 1-компонентных вертикальных сейсμοприемников. Трехкомпонентная запись, обеспечив возможность повышения качества результатов на продольных волнах, позволила приступить к более широкому внедрению волн другого типа, прежде всего обменных отраженных волн, 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*. Можно понять доводы в пользу такого предпочтения, приведенные 40 лет назад в добротной подготовленной монографии отечественных ученых [Берзон и др., 1966]. 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 *PS*-волнам отдавалось в силу того, что на расстояниях от пункта возбуждения (ПВ), меньших критического, они оказывались сильнее волн другого типа, например *PSSS*-волн (или *PSSP*), обмен которых происходит на промежуточной резкой границе, расположенной в верхней толще разреза. Очевидные недостатки *PS*-волн, обусловленные асимметрией сейсмического луча, тогда в учет не принимались. Современная сейсморазведка, опирающаяся на системы многократных перекрытий и ведущая свое начало от *PP*-волн, оказалась более чувствительной к такому недостатку.

В упомянутой работе [Берзон и др., 1966] рассмотрены физические предпосылки регистрации обменных отраженных волн. Отмечено, что наличие сильных промежуточных границ раздела приводит к формированию заметных по интенсивности обменных волн с промежуточным обменом, препятствующих прослеживанию отражений *PS*. Исследования на модельных и экспериментальных данных интенсивности отраженных волн различного типа позволили получить важные для практики результаты, которые состоят в следующем:

- *PS*-волны, образующиеся в средах с сильной дифференциацией скоростей, могут, начиная с некоторых расстояний, быть интенсивнее волн *PP*. Коэффициент отражения *PS*-волн в первую очередь зависит от отношения скоростей поперечных волн по обе стороны от границы.

- *PS*-волны при расстоянии  $x/H < 1.5$  интенсивнее, чем *PSSS*, претерпевающие обмен *P* на *S* на первой промежуточной границе. При больших расстояниях, а также в условиях резких промежуточных границ *PS*-волны становятся слабее. Отраженные волны *PSSS* и *PSSP* отличаются от *PS* областью регистрации, кажущимися скоростями и более низкими частотами.

- Коэффициенты отражения *PS*-волн от тонких слоев, зависящие от отношения мощности слоя к длине продольной волны, могут быть в 2–3 раза боль-

ше, чем коэффициенты отражения от мощного слоя при такой же скоростной дифференциации среды.

- В тонкослоистой среде могут наблюдаться более быстрое возрастание амплитуд *PS*-волн вблизи источника по сравнению с толстослоистой моделью и более низкочастотный спектр *PS*-волны по сравнению со спектром *PP*.

- В тонкослоистой среде с однородными слоями форма записи и спектры *PS*-волн очень чувствительны даже к небольшим изменениям мощности слоя, что может быть причиной их плохой прослеживаемости в средах с изменяющейся мощностью слоев.

В работе [Пузырев и др., 1985] наиболее детально описаны особенности отраженных *PS*-волн, 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 параметра  $\gamma = V_S/V_P$  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* (*PSSP*) оказываются близкими между собой. Исходя из этого, допускалось, что волны с промежуточными обходами могут представлять самостоятельный интерес в разведочной геофизике. Однако делался вывод и о том, что на больших удалениях от источника отраженные волны типа *PSSS* (*PSSP*) могут являться помехами, что соответствовало взгляду этих исследователей на приоритет волн *PS* над другими физически возможными обменными волнами, в частности волнами *PSSS* (*PSSP*). Поэтому при изложении вопросов методики наблюдений на обменных отраженных волнах и обработки записей рассматривались лишь *PS*-волны.

В современной многоволновой сейсморазведке основное внимание в нашей стране и за рубежом уделяют кроме продольных волн обменным отраженным *PS*-волнам, внедрение которых к концу 1990-х годов перешло в производственную стадию. Этому способствовал, главным образом, тот факт, что эти волны, как и продольные, не зависят от типа используемого источника колебаний. Основное неудобство в их применении вызвано необходимостью учета асимметрии лучей *PS*-волн при проектировании систем наблюдений и 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.

Монотипные поперечные отраженные волны в многоволновой сейсморазведке не нашли пока широкого применения. Основные причины задержки широкого использования поперечных волн – 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 низкого отношения сигнал/помеха, 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 обмен-

ные отраженные волны типа *PS*. Их использование обеспечивает:

- получение сейсмических разрезов с независимыми от продольных волн свойствами;
  - 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 газонасыщения и сложной тектоники;
  - углубленную интерпретацию результатов на продольных волнах путем использования параметра  $\gamma = V_S/V_P$  для изучения литологии;
  - расширение возможностей стандартного AVO-анализа;
  - изучение анизотропии скоростей, а также плотности трещин и их ориентации;
  - изучение природы “ярких пятен”, выявленных на *PP*-волнах;
  - мониторинг изменений в состоянии резервуара.
- Обменные отраженные волны, испытывающие обмен с *P* на *S* в верхней толще разреза при пересечении резкой промежуточной границы, заслуживают внимания по следующим причинам.

• В отличие от волн *PS*, их лучи практически симметричны (особенно для волн *PSSP*), поэтому при проектировании систем наблюдений, а также при обработке материалов можно использовать стандартные подходы и пакеты обработки, предназначенные для монотипных волн.

• В отличие от чисто поперечных, волны *PSSS* (*PSSP*) являются более высокочастотными, поэтому разрезы, полученные путем их миграции, отличаются более высокой разрешенностью.

• При возбуждении волн *PSSS* (*PSSP*) погружным источником выбор его оптимальной глубины позволяет, в отличие от чисто поперечных волн, получить более широкий спектр возбуждаемых частот.

• Регистрация волн *PSSS* (*PSSP*) на временах, свободных от интерференции обменных волн более сложного типа, позволяет получить более достоверные разрезы на этих волнах.

• Регистрация волн *PSSS* (*PSSP*) на закритических расстояниях, как это следует из расчетов для различных моделей, проведенных в разное время, позволяет добиться превышения их интенсивности над *PS*-волнами. Тем самым основное преимущество волн *PS* – их более высокая интенсивность по сравнению с другими обменными волнами при докритических расстояниях – перестает быть решающим.

Большой интерес отраженные обменные волны *PSSP*, распространяющиеся в качестве продольных от источника колебаний и при подходе к приемнику колебаний, представляют для морской сейморазведки. В работе [Tatham, McCormack, 1991] упоминалось о нередко проводившемся комплексировании волн этого типа с продольными отраженными волнами при проведении многокомпонентной морской сейморазведки. Обычно многоволновые морские исследования проводят при регистрации колебаний донными косами или дистанционно управляемыми модулями [Nardage et al., 2011]. В последние годы удалось существенно продвинуться в разработке технологии сейморазведки в условиях предельного мелководья [Жгенти,

2009]. Мелководные участки акваторий являются наиболее доступными для поисково-разведочного и эксплуатационного бурения, однако они долгое время оставались малоизученными сейморазведкой из-за невозможности эффективного применения ни морской, ни сухопутной традиционных технологий сейморазведки.

Современная скважинная сейморазведка на суше и на море проводится, как правило, 3-компонентными зондами, являясь по существу многоволновой. Работы ВСП на море имеют определенную специфику, обусловленную условиями возбуждения колебаний, радиогеодезическим обеспечением работ и особенностями используемого оборудования. В развитие методики многоволнового ВСП (его поляризационной модификации) наибольший вклад внесли российские геофизики [Гальперин, 1994; Мирзоян, 2010].

### МОДЕЛИ РЕАЛЬНЫХ СРЕД И ТИПЫ ВОЛН, ИСПОЛЬЗУЕМЫХ В МВС

Применение МВС в нашей стране и за рубежом до последнего времени опиралось на использование двух моделей – изотропной и анизотропной.

При решении практических задач МВС в рамках *изотропной модели* сейморазведчики изучали параметры  $V_S$ ,  $V_P$ ,  $\gamma$ , а также динамические характеристики волн разного типа в их связи с геологическими особенностями среды. При этом они довольно успешно решали и продолжают решать следующие задачи: определение литологических и петрофизических характеристик отложений (тип породы, фильтрационно-емкостные свойства), оконтуривание флюидонасыщенных частей изучаемого объекта, изучение ВЧР и др.

В настоящее время направление с использованием *анизотропной модели* стало преобладающим в связи с тем, что азимутальная анизотропия, свойственная осадочным толщам, отличается высокой информативностью при решении задач нефтегазовой геофизики. Более того, азимутальную анизотропию все больше считают универсальным свойством пород не только для покрывающей геологической толщи, но и для земной коры в целом, а также важным источником информации об ориентации трещин и микротрещиноватости, являющихся основной причиной азимутальной анизотропии.

В МВС переход к анизотропной модели предполагает главным образом выделение и использование поперечных волн двух типов, различающихся поляризацией и скоростями распространения.

Рассмотрим сформировавшиеся на сегодняшний день представления о типах моделей анизотропных сред с точки зрения максимального упрощения и предельного сокращения числа для целей прикладной сейморазведки.

Практически все реальные среды, за исключением каменной соли, являются анизотропными, и вопрос заключается в том, в какой степени их в первом приближении можно считать изотропными без ущерба для конкретных решаемых сейморазведкой задач. Изучение анизотропии скоростей является в МВС одним из основных направлений, поэтому остановимся на этом вопросе подробнее.

Анизотропные среды в общем случае описываются большим числом модулей упругости, что при изучении моделей реальных сред создает большие неудобства. Этим объясняется широкое использование

анизотропных моделей, характеризующихся определенной *симметрией*, позволяющей в каждом конкретном случае свести число модулей упругости до минимума.

Основной моделью, учитывающей наличие в геологических средах оси симметрии, является *трансверсально-изотропная модель с осью симметрии бесконечного порядка*, ортогональной к плоскостям напластования горных пород, являющихся *плоскостями симметрии*. В рамках этой модели выделяют три типа: 1) модель с вертикальной осью симметрии (ее обозначают аббревиатурой *VTI* – vertical transversal isotropy); 2) модель с горизонтальной осью симметрии (*HTI* – horizontal transversal isotropy); 3) модель с наклонной осью анизотропии (*TTI* – tilted transversal isotropy). Широкое распространение получила также *модель орторомбической среды*, характеризующаяся тремя взаимно ортогональными осями или плоскостями симметрии.

Симметрия трансверсально-изотропных сред обусловлена плоскопараллельной ориентацией тонких слоев и трещин, представляющих собой упорядоченную систему элементов, формирующих изучаемую среду. Симметрия орторомбических сред вызвана преимущественно наложением двух ортогональных систем, представленных горизонтальной слоистостью и вертикальной трещиноватостью или же горизонтальной и вертикальной трещиноватостью. Модели реальных сред с другими системами симметрии используют редко, хотя они вполне реальны.

В осадочных бассейнах модели типа *VTI* и *TTI* характерны для толщ, содержащих сланцы с присутствующими им упорядоченными глинистыми частицами плоской формы. Для тех же осадочных формаций, которые содержат песчаники и карбонаты с системами вертикальных или крутопадающих трещин, характерна орторомбическая модель анизотропии.

Трансверсально-изотропную среду характеризуют 5 модулей упругости, орторомбическую – 9. Для их определения в трансверсально-изотропных средах необходимо комплексирование наблюдений на трех типах волн: продольных (*P*), поперечных типа *SV* (поляризованных в вертикальной плоскости) и *SH* (поляризованных в горизонтальной плоскости). Следует отметить, что в трансверсально-изотропных средах скорость и поляризация поперечных волн зависят лишь от угла между сейсмическим лучом и осью симметрии (это случай *полярной анизотропии*), в то время как в орторомбических и средах, отличных от *VTI*, аналогичные параметры зависят также и от азимута, в котором распространяется луч (случай *азимутальной анизотропии*).

Распознавание анизотропных сред с одной осью симметрии, направление которой отличается от вертикального, наиболее уверенно осуществляется по наличию в них *одновременно* двух поперечных волн разной поляризации. Речь идет об *эффекте расщепления* поперечной волны при ее попадании в анизотропную среду на две волны, каждая из которых имеет фиксированную поляризацию, обусловленную конкретным типом симметрии данной среды. Эффект расщепления поперечных волн, получивший наибольшее применение во всем мире при изучении трещиноватых коллекторов углеводородов, связывают обычно с именем Стюарта Крэмпина, известные публикации которого в максимальной степени способствовали внедре-

нию описанного им эффекта в практику сейсморазведочных работ [Crampin, 1981, 1985].

Две поперечные волны, образовавшиеся после расщепления поперечной волны при ее попадании в анизотропную среду после пересечения сейсмической границы, распространяются затем с разными скоростями, что приводит к временному сдвигу между ними, наблюдаемому в точках приема на компонентах, ортогональных направлению сейсмического луча. Наиболее сложной является ситуация, когда эти две поперечные волны интерферируют, накладываясь друг на друга с небольшим сдвигом. Основная задача при этом состоит в изучении поляризации каждой из интерферирующих волн и разделении их между собой.

В связи с трудностями, обусловленными, главным образом, отсутствием доступных источников поперечных волн, основными широко используемыми типами волн в настоящее время являются продольные и обменные отраженные волны. Считается, что наиболее устойчивыми обменными волнами являются волны, испытавшие обмен на отражающей границе, т. е. *PS*-волны. В горизонтально-слоистой азимутально однородной среде они поляризованы в плоскости падения (так называемой *сагиттальной* плоскости).

Наиболее распространенным свойством анизотропных сред является их *трещиноватость*, проявляется она в упругих свойствах, существенно различающихся своими значениями по двум направлениям – вдоль плоскостей трещиноватости и ортогонально к ним. Аналогично ведут себя тонкослоистые пачки, однако их плоскости напластования обычно горизонтальны, в отличие от чаще всего наблюдаемых трещин субвертикального характера. В отличие от *P*-волны, расщепляется именно *S*-волна, попадающая в анизотропную среду под произвольным углом к ее осям симметрии. В случае трещиноватой анизотропной среды две образовавшиеся после расщепления волны, обозначаемые обычно как  $S_1$  и  $S_2$ , имеют различные скорости и поляризацию.

В том случае, когда азимутальная анизотропия не связана с трещиноватостью, информативность поперечных волн, имеющих после расщепления различную поляризацию, достаточно высока. Поляризация более быстрой волны  $S_1$  может указывать на направление максимального напряжения (или прочности) горных пород, а более медленной волны  $S_2$  – на направление минимального напряжения (или прочности) горных пород. Эта информация может быть крайне полезной для геологов на этапе создания тектонической модели месторождения, а также для разработчиков, нуждающихся в любых данных о возможной проницаемости пород при проектировании направления проводки горизонтальных стволов скважин на этапе разведки.

Определение модулей упругости (или скоростей), а также ориентации осей и плоскостей симметрии анизотропных сред позволяет связать эти параметры с упорядоченными элементами среды, вызывающими анизотропию. Тем самым появляется возможность изучить важнейшие информативные параметры геологической среды: скорости в слоях, слагающих выделенные сейсмокомплексы, и ориентацию плоскостей напластования, а в случае трещиноватых сред – плотность трещин и ориентацию их в пространстве.

Неизменным вниманием в МВС пользуется изучение такого важного параметра сейсмических сред,

как *поглощение*, обусловленное неупругими явлениями, сопутствующими распространению волн. Оно неодинаково для продольных и поперечных волн, так как по-разному реагирует на литологические характеристики разреза и зависит от состава пород, структуры порового пространства и др. В терригенных породах различие в поглощении волн обоих типов больше, чем в карбонатных. Кавернозность сильно увеличивает затухание волн разного типа, однако трещиноватость приводит к более сильному поглощению поперечных волн, испытывающих затухание даже в случае микротрещиноватости. В целом же поглощение поперечных волн в осадочных породах выше, чем у продольных, но не является аномальным, как предполагалось много лет назад, еще до начала экспериментальных исследований.

Существенное влияние на разрешающую способность МВС оказывает спектральный состав возбуждаемых и регистрируемых колебаний. Преобладающие частоты поперечных волн, как показали многочисленные экспериментальные исследования внутри среды и на земной поверхности, примерно вдвое ниже, чем у продольных. Учитывая, что скорости  $V_S$  также примерно вдвое ниже, чем  $V_P$ , считая, что длины волн  $P$  и  $S$  близки между собой, а значит, и близка их разрешающая способность. Существенно выше оценивается разрешающая способность обменных волн, которые на начальном участке пути распространяются как продольные. Дело в том, что сам по себе акт обмена ни при преломлении волн, ни при их отражении не сопровождается необратимой потерей высоких частот из-за неупругого поглощения. Поэтому вблизи отражающих границ, на которых происходит формирование волн  $PS$ , продольные и поперечные (после акта обмена) волны имеют близкий частотный состав, и это хорошо подтверждается результатами, полученными методом ВСП [Stewart et al., 1999; Garotta, Granger, 2003]. Однако в процессе дальнейшего распространения спектральный состав волн  $PS$  становится более низкочастотным по сравнению с составом волн  $PP$  (из-за большего затухания поперечных волн), и эти различия тем больше, чем глубже отражающая граница. Разрешающая способность волн  $PS$  близка к разрешающей способности волн  $PP$  или (при работах методом ВСП) может превышать ее [Eaton et al., 1991].

Крайне полезными и плодотворными для практической сейсморазведки оказались предложенные Томсеном [Thomsen, 1986\*] безразмерные параметры, характеризующие трансверсально-изотропную среду. Вместо коэффициентов тензора жесткости, удобных лишь для решения прямых задач, он предложил использовать скорости  $P$ - и  $S$ -волн, распространяющихся вдоль оси симметрии, и три параметра –  $\epsilon$ ,  $\delta$  и  $\gamma$ , характеризующих величину анизотропии. Параметры  $\epsilon$  и  $\gamma$ , по существу, характеризуют ранее применявшиеся к волнам  $P$  и  $SH$  параметры “коэффициент анизотропии” (на продольных и поперечных волнах соответственно), поскольку характеризуют относительные изменения скоростей, измеренных вдоль оси симметрии и перпендикулярно к ней (не путать рассматриваемую здесь величину  $\gamma$  с аналогичным обозначением для отношения  $V_S/V_P$ ). Смысл параметра  $\delta$  не столь прозрачен, так как он характеризует поведение скоростей волн обоих типов в направлениях, отличающихся от направления оси симметрии. Наиболее удобными параметрами Томсена оказались при обработке дан-

ных, позволяя упростить выражения для скоростей, используемых при вводе кинематических поправок, изменений амплитуд в технологии AVO, а также для расчета геометрического расхождения. Линеаризация точных выражений с использованием этих приближенных параметров позволила наглядно оценить влияние трансверсальной анизотропии на волновые поля, а также упростить разработку алгоритмов инверсии и обработки сейсмозаписей.

Применительно к орторомбической модели подход Томсена был развит Цванкиным [Tsvankin, 1997, 2005] и затем обобщен для случаев поглощающих трансверсально-изотропных и орторомбических сред [Zhu, Tsvankin, 2006, 2007].

В результате многолетних исследований эффективности представления реальных геологических сред анизотропными моделями ведущими западными учеными были сделаны выводы, важность которых для практической МВС трудно переоценить [Tsvankin et al., 2010]. Суть их состоит в следующем.

1. Модель НТИ не является подходящей моделью для большей части формаций с вертикальной трещиноватостью.

2. Модель ТТИ предположительно является слишком упрощенной моделью симметрии для наклонных пластов.

3. Последующие разработки будут включать развитие алгоритмов скоростного анализа и миграции применительно к более реалистической орторомбической модели.

4. Несмотря на то что уже создано прочное обоснование для оценки параметров и формирования изображений в орторомбической среде, поиск робастных и экономичных решений в области обработки данных является серьезной проблемой, особенно для ортотропии с наклонными осями.

5. Большими перспективами обладает метод анализа анизотропии скоростей при полноволновой инверсии данных отраженных волн, который станет доступным в условиях возрастающей мощности компьютерных вычислений.

Кроме того, были отмечены важные для практики проявления анизотропии, даже в случае *слабой анизотропии*. Так, оказалось, что вклад такой анизотропии в коэффициенты отражения сопоставим с проявлениями “флюидного” и “литологического” факторов, что наиболее заметно проявляется в результатах азимутальных наблюдений AVO на продольных волнах. Экспериментально установлено также, что анизотропия затухания, особенно вызванная флюидонасыщенными трещинами, может быть на порядки выше, чем анизотропия скоростей. Поэтому изменяющиеся по азимуту коэффициенты затухания могут быть чувствительными атрибутами, характеризующими месторождение.

Полученные в последние годы экспериментальные данные высокого качества ставят под сомнение теоретические результаты, касающиеся условий формирования обменных отраженных волн типа  $PS$  [Tsvankin et al., 2010]. Так, факт регистрации интенсивных обменных волн при падении продольной волны на границу, близком к нормальному, не может быть объяснен в рамках изотропной или VTI-моделей при отражении плоской волны от плоской границы. Одно из объяснений аномально высокой интенсивности волн типа  $PS$  в данном случае состоит в том,

что по каждую сторону от отражающей границы среда является анизотропной с моделью типа ТП. Однако независимо от окончательного решения данной проблемы описанный эффект, возможно, потребует пересмотра моделей стандартного AVO как для моно-типных продольных, так и для обменных отраженных волн.

Модели изотропных и анизотропных сред не вполне объясняют аномальную поляризацию поперечных волн, проявляющуюся в регистрации  $u$ -компонент в тех случаях, когда вертикальная трещиноватость в горизонтально-слоистых средах отсутствует или невозможна, например в рыхлых породах. Введение *гиротропных* моделей [Оболенцева, 1992], позволяющих учитывать пространственную дисперсию упругих свойств геологических сред, позволяет адекватно описать поляризацию поперечных волн в реальных средах. Такие модели позволяют перейти к более реалистическому, по сравнению с существующими, описанию свойств геологической среды на основе учета ее микроструктуры, проявляющейся в свойствах симметрии эффективной модели [Оболенцева, 1993; Чичина, 1998]. Предположение, что приповерхностная часть разреза является гиротропной, главным свойством которой является способность поворачивать вектор смещения поперечной волны, приводит к убедительному объяснению того факта, что при ВСП с ненаправленным источником на  $u$ -компоненте почти всегда регистрируют поперечные  $SH$ -волны.

#### ОСНОВНЫЕ ПРОБЛЕМЫ СОВРЕМЕННОЙ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ МВС

Одной из ключевых проблем обработки данных МВС является сохранение динамических характеристик записи, позволяющее осуществлять динамический анализ волн, практическое значение которого трудно переоценить в связи с тем, что сейсмические скорости и такой информативный параметр, как поглощение волн, по-разному реагируют на изменение литологии и флюидонасыщенности коллекторов. Отсутствие аномалий типа “яркого пятна” на волновых разрезах поперечных волн является хрестоматийным примером повышения надежности выделения нефтегазонасыщенного интервала геологического разреза. Очевидным является тот факт, что повышение точности определения статических и кинематических поправок, вводимых в записи перед их накоплением на различных этапах обработки, неизбежно сказывается не только на прослеживании кинематических, но и динамических параметров волн. Переход от амплитуд к определению атрибутов путем динамической инверсии акустических и динамических параметров волн разных типов, наметившийся в последние годы во всем мире, позволил в полной мере убедиться в целесообразности и осуществимости использования потенциальных возможностей МВС для практических целей.

В последние десятилетия наибольшие успехи в развитии МВС достигнуты за рубежом, где это направление исследований получило название *многокомпонентная сейсморазведка* (multicomponent seismic exploration, multicomponent seismic). Все чаще там используют термин “full seismic” (полноволновая сейсморазведка).

Следует отметить, что в одном из недавних обзоров состояния МВС среди множества предприятий и

фирм, занимающихся развитием этого актуального направления, не указана ни одна российская организация [Stewart, 2009], что вполне закономерно отражает снижение объема и уровня исследований в современной России. Среди перечисленных в данном обзоре организаций, занимавшихся с конца 1980-х годов развитием МВС, имеются следующие известные в мире академические, государственные и частные предприятия, а также консорциумы: Reservoir Characterization Project (RCP) at the Colorado School of Mines, CREWES Project at the University of Calgary, EDGER Forum at UT-Austin, ChevronTexaco, ExxonMobil, Shell. Последние три компании в этом списке представили примеры использования изображений среды, полученные путем миграции обменных отраженных волн  $PS$ . Самое широкое распространение получили преобразования в изображение записей обменных отраженных  $PS$ -волн. Однако все больший интерес стали проявлять и к обменным волнам другого типа, испытывающим обмен на промежуточных границах [Шехтман и др., 2006].

В период 1999–2004 гг. за рубежом было выполнено более 200 проектов по многоволновым наблюдениям [Gaiser, Strudley, 2004], и предположительно такой же объем работ выполнен в последующие 5 лет. В указанном выше обзоре Р. Стюарта [Stewart, 2009] на вопрос о том, были ли экономически оправданы эти работы, был получен утвердительный ответ для ряда случаев. Более того, некоторые сервисные компании пришли к выводу, что полевые работы и последующая обработка данных МВС оказались выгодными. В России за последнее десятилетие был выполнен небольшой объем наземных исследований МВС, в то время как скважинная сейсморазведка полностью перешла на 3-компонентные наблюдения, и использование в ней различных типов волн стало уже правилом, а не исключением. В условиях частного рынка, когда информация о результатах сейсморазведочных работ практически недоступна для широкого использования, любой пример успешного решения геологических задач с применением МВС становится весьма полезным, особенно для тех скептиков, которые продолжают рассчитывать лишь на применение продольных отраженных волн.

Начало XXI века за рубежом ознаменовалось значительными успехами в развитии технологий обработки данных МВС, в частности обработки записей на обменных отраженных волнах [Kendall, 2006]. Однако, несмотря на успехи, остался ряд нерешенных проблем из-за их значительной сложности. На пути к получению положительных результатов, характеризующихся высоким отношением сигнал/помеха при сохранении в сигналах высоких частот, существуют следующие препятствия: выбор уровня приведения при формировании изображений среды, учет статики, подавление помех, учет анизотропии при миграции во временной области до суммирования. Все эти проблемы, комбинирующиеся между собой на всех стадиях обработки, проявляются при получении разрезов как итогового результата даже при небольшом повышении качества обработки на каждом из ее этапов.

Такие проблемы, как *выбор уровня приведения* и *учет статики* за неоднородности в верхней части разреза, взаимосвязаны. Для последующей интерпретации существенно, чтобы оба разреза, полученных на  $PP$ - и  $PS$ - волнах, были увязаны между собой в части



общего уровня приведения и положения отражающих границ на одних и тех же временах регистрации (при изображении в виде временных разрезов) или глубинах (в масштабе глубин).

Учет статики считают ключевым и вместе с тем наиболее трудным шагом при обработке записей обменных отраженных волн [Kendall, 2006]. Этот тип волн много лет использовали для изучения параметров разреза и формирования изображений среды, но лишь в последние годы были разработаны устойчивые процедуры для учета статики по обменным волнам. Статика для волн  $PS$  существенно отличается от статики для  $PP$ -волн. Одно из отличий состоит в том, что ее величина может быть существенно выше, чем для  $PP$ -волн. Из-за этого использование стандартных остаточных сдвигов нередко приводит к “перескакиванию на период” при прослеживании сигналов. Другое отличие заключается в том, что обычно записи обменных волн зашумлены больше, чем продольных. Поэтому определение статических сдвигов по выборкам общей точки обмена является менее надежным. Кроме того, статические поправки по продольным и поперечным волнам характеризуются сложной зависимостью друг от друга, и прогнозировать одну статику по другой практически невозможно. Одной из причин этого является различная зависимость волн обоих типов от водонасыщенности ВЧР. Поэтому большинство методов оценки статики для  $P$ -волн не подходит для определения статики для обменных волн. Более того, некоторое различие в положении отражателей на полученных разрезах может быть обусловлено влиянием анизотропии и расщеплением поперечных волн на две волны –  $PS_1$  и  $PS_2$ . Поскольку первые вступления обменных волн отсутствуют, то приходится разрабатывать и использовать другие способы определения низкоскоростной статики за точки приема для поперечных волн в пределах ВЧР.

При временной или глубинной миграции обменных отраженных волн до суммирования ( $PS$ -PSTM (prestack time migration) или  $PS$ -PSDM (prestack depth migration) соответственно) основная проблема состоит в сохранении амплитуд с целью последующей интерпретационной обработки по технологии AVO. До недавнего времени этому направлению уделялось гораздо меньше внимания, чем сохранению амплитуд при миграции на продольных отраженных волнах. По мере того как МВС на суше и донные морские наблюдения оказываются все более доступными, PSTM на обменных волнах становится более привычной процедурой. Все больше внимания в настоящее время уделяют результатам AVO на обменных отраженных волнах, а также совместной инверсии  $PP$ - и  $PS$ -волн, требующей сохранения амплитуд на всех этапах обработки. Однако лишь считанные публикации посвящены престоковой миграции Кирхгофа с сохранением амплитуд из-за сложностей учета статики и асимметрии лучей падающих и отраженных волн [Kristiansen et al., 2003; Miao et al., 2005; Kendall, 2006; Gaiser, Probert, 2006\*; Cary, Zhang, 2011; и др.]. Задачей дальнейших исследований в данном направлении считают усложнение моделей путем введения в них параметров анизотропии и учета азимутальной анизотропии. Для обменных волн это тем более важно, так как изображения, построенные по ним, более чувствительны к параметрам анизотропии по сравнению с изображениями на продольных волнах.

Считается, что при построении изображений в сложных средах наиболее универсальным методом глубинной миграции до суммирования, позволяющим получить лучшие результаты, является миграция в обратном времени (reverse-time migration, RTM) [Baysal et al., 1983], при которой естественным образом учитываются особенности процесса распространения волн. RTM основывается на продолжении поля отраженных волн в среду в обратном времени с использованием волнового уравнения, которое решается конечно-разностным методом. Реализация такого подхода сопряжена с огромными вычислительными затратами, поэтому до недавнего времени не находила применения. Однако в последние годы в связи с резким увеличением мощности вычислительных машин и совершенствованием алгоритмов RTM появились примеры практического осуществления такого типа миграции для монотипных и обменных волн [Farmer et al., 2006; Yan, Sava, 2008; Phadke, 2010]. Успешным оказалось применение миграции RTM к записям ВСП, в связи с тем, что объем входных данных при этом гораздо меньше, чем для поверхностных систем наблюдений [Неклюдов, Бородин, 2008].

В качестве критерия достоверности модели, полученной на продольных и поперечных волнах, используют данные ВСП. Получает значительное развитие новое направление – *скважинно-наземная сейсморазведка*. Надежным критерием точности и эффективности любых алгоритмов и результатов миграции на различных типах волн остается расчет синтетических сейсмограмм при известных моделях и сейсмических скоростях [Gaiser, Probert, 2006\*].

Авторы благодарят доктора физ.-мат. наук Сергея Андреевича Тихоцкого за доброжелательную и конструктивную критику, а также плодотворные замечания, которые были учтены на этапе редактирования.

## Литература

- Архипов А.А. Приемные системы для морской многоволновой сейсморазведки в России. К вопросу о приоритетах // Приборы и системы разведочной геофизики. 2002. № 2. С. 16–18.
- Берзон И.С., Ратникова Л.И., Рац-Хизгия М.И. Сейсмические обменные отраженные волны. М.: Наука, 1966. 223 с.
- Гальперин Е.И. Вертикальное сейсмическое профилирование: опыт и результаты. М.: Наука, 1994. 320 с.
- Жгенти С.А. Исследование и развитие технико-методических приемов сейсморазведки на предельном мелководье акваторий: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. Краснодар, 2009. 23 с.
- Коротков И.П. Создание технологии формирования изображений среды по данным многоволновой сейсморазведки в условиях сложно построенных сред: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. М.: Изд-во МГУ, 2012. 24 с.
- Мирзоян Ю.Д. Исследование и развитие поляризационного метода вертикального сейсмического профилирования на акваториях: Дис. ... д-ра техн. наук. Краснодар, 2010. 101 с.
- Многоволновая сейсморазведка: краткий библиографический справочник отечественных и зарубежных работ с 1960 по 2008 год / сост. В.М. Кузнецов, Г.А. Шехтман, Д.Т. Хандамиров, И.П. Коротков. Тверь, 2010. 358 с.
- Неклюдов Д.А., Бородин И. Миграция данных непродольного ВСП для построения глубинных изображений среды

- с неизвестной верхней частью разреза в районах со сложным геологическим строением // Технологии сейсморазведки. 2008. № 4. С. 6–14.
- Нефедкина Т.В.** Выделение обменных отраженных *PS*-волн по системе ОГТ с несимметричными выборками // Геология и геофизика. 1980. № 3. С. 113–122.
- Нефедкина Т.В., Кондакова Г.П., Олейник Л.В.** Цифровая обработка обменных отраженных волн // Геология и геофизика. 1980. № 4. С. 67–77.
- Оболенцева И.Р.** Сейсмическая гиротропия. Исследования распространения сейсмических волн в анизотропных средах. Новосибирск: Наука, 1992. С. 6–40.
- Оболенцева И.Р.** Исследование трехмерных волновых полей для решения задач многоволновой сейсморазведки: Автореф. дис. ... д-ра геол.-мин. наук. Новосибирск, 1993. 33 с.
- Пузырев Н.Н., Оболенцева И.Р.** Поляризация продольных и обменных отраженных волн на горизонтальной поверхности наблюдений в случае наклонных границ раздела // Поперечные и обменные волны в сейсморазведке. М.: Недра, 1967. С. 171–202.
- Пузырев Н.Н., Оболенцева И.Р., Тригубов А.В., Горшак-лев С.Б.** Экспериментальные исследования анизотропии скоростей в осадочных отложениях по наблюдениям на поперечных волнах // Геология и геофизика. 1983. № 11. С. 8–19.
- Пузырев Н.Н., Тригубов А.В., Бродов Л.Ю. и др.** Сейсмическая разведка методом поперечных и обменных волн. М.: Недра, 1985. 277 с.
- Череповский А.В.** Сейсморазведка с одиночными приемниками и источниками: обзор современных технологий и проектирование съемок. Тверь: Изд-во “ГЕПС”, 2012. 134 с.
- Чичинина Т.И.** Гиротропия микронеоднородных сред диссимметричного строения: Автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук. Новосибирск, 1998. 22 с.
- Шехтман Г.А., Кузнецов В.М., Жуков А.П., Коротков И.П., Бурлаков А.В.** Расширение типов волн, используемых в сейсморазведке: предпосылки и результаты // Технологии сейсморазведки. 2006. № 3. С. 30–34.
- Экспериментальные** исследования поперечных и обменных волн // Тр. Ин-та геологии и геофизики. Вып. 16. 1962. 214 с.
- Alford R.** Shear data in the presence of azimuthal anisotropy // SEG 56<sup>th</sup> Ann. Int. Mtg. Expanded Abstracts. 1986. P. 476–479.
- Baysal E., Kosloff D.D., Sherwood J.W.C.** Reverse time migration // Geophysics. 1983. V. 48. P. 1514–1524.
- Cary P.W., Zhang A.** True-amplitude PS prestack time migration via 5D interpolation: Recovery // CSPG CSEG CWLS Convention. 2011. P. 1–4.
- Crampin S.** A review of wave motion in anisotropic and cracked elastic media // Wave motion. 1981. V. 3. P. 343–391.
- Crampin S.** Evaluation of anisotropy by shear wave splitting // Geophysics. 1985. V. 50, N 1. P. 142–152.
- Eaton D.W.S., Stewart R.R., Harrison M.P.** The Fresnel zone for *P-SV* waves // Geophysics. 1991. V. 56, N 3. P. 360–364.
- Farmer P.A., Jones I.F., Zhou H., Bloor R.I., Goodwin M.C.** Application of reverse time migration to complex imaging problems. First Break. 2006. N 24. P. 65–73.
- Gaiser J.E., Probert T.** Significant developments in multicomponent seismic exploration in the last five years: Recent developments in converted *PS*-wave analysis processing of *S*-wave splitting and prestack migration // CSEG RECORDER, 31, Special Edition. 2006. P. 60–64.
- Garotta R.** Shear waves from acquisition to interpretation // SEG. 2000. 212 p.
- Garotta R., Granger P.Y.** Some requirements for PS-mode acquisition // The Leading Edge. 2003. P. 107–112.
- Hardage B.A., DeAngelo M.V., Murray P.E., Sava D.** Multi-component Seismic Technology // SEG. 2011. 318 p.
- Kendall R.** Advances in land multicomponent seismic: acquisition, processing and interpretation // CSEG RECORDER, 31, Special edition. 2006. P. 65–75.
- Kristiansen P., Fowler P., Mobley E.** Anisotropic Kirchhoff prestack time migration for enhanced multicomponent imaging // 73<sup>th</sup> SEG Expanded Abstracts. 2003. P. 961–964.
- Miao, Xiaogui, Gray S., Zhang Y., Kendall R.** Converted-wave true amplitude prestack Kirchhoff migration // 75<sup>th</sup> Ann. Internat. Mtg., Soc. Expl. Geophys. Expanded Abstracts. 2005. P. 935–938.
- Phadke S.** Reverse time migration and amplitude preservation // GEOHORIZONS. June 2010. P. 9–14.
- Stewart R.R.** The measure of full-wave motion: An overview of multicomponent seismic exploration and its value // CSEG RECORDER. 2009. P. 34–38.
- Stewart R.R., Gaiser J.E., Brown R.J., Lawton D.C.** Converted-wave seismic exploration: a tutorial // CREWES Research Report. 1999. V. 11. 42 p.
- Tatham R.H., McCormack M.D.** Multicomponent seismology in petroleum exploration // SEG. 1991. 197 p.
- Tsvankin I.** Anisotropic parameters and *P*-wave velocity for orthorhombic media // Geophysics. 1997. N 62. P. 1292–1309.
- Tsvankin I.** Seismic signatures and analysis of reflection data in anisotropic media. 2nd ed. Elsevier Science Publ. Co., Inc., 2005. 436 p.
- Tsvankin I., Gaiser J., Grechka V., Van der Baan M., Thomsen L.** Seismic anisotropy in exploration and reservoir characterization // Geophysics. 2010. V. 75, N 5. P. 75A15–75A29.
- Willis H.A., Rethford G.L., Bielanski E.** Azimuthal anisotropy: occurrence and effect on shear-wave data quality // SEG 56<sup>th</sup> Ann. Intern. Mtg. Expanded Abstracts. 1986. P. 479–480.
- Yan J., Sava P.** Isotropic angle-domain elastic reverse-time migration // Geophysics. 2008. V. 73, N 6. P. S229–S239.
- Zhu Y., Tsvankin I.** Plane-wave propagation in attenuative transversely isotropic media // Geophysics. 2006. V. 71, N 2. P. T17–T30.
- Zhu Y., Tsvankin I.** Plane-wave attenuation anisotropy in orthorhombic media // Geophysics. 2007. V. 72, N 1. P. D9–D19.

*Поступила в редакцию 19 ноября 2012 г.,  
в окончательном варианте – 3 декабря 2012 г.*

#### КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

**ШЕХТМАН Григорий Аронович** – доктор технических наук, главный научный сотрудник лаборатории многоволновой сейсморазведки ВНИИГеофизика. E-mail: gregs22@rambler.ru

**КОРОТКОВ Илья Петрович** – кандидат технических наук, главный геофизик ООО “Геофизические системы данных”. E-mail: info@gds.ru