

Способы компенсации влияния сложнопостроенной верхней части разреза на волновое поле

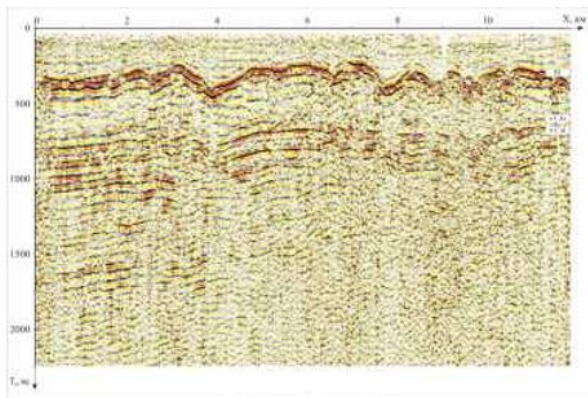
■ Артемьев А.Е., Заложных М.А., ОАО «Саратовнефтегеофизика», г. Саратов

Введение

Важной проблемой наземной сейсморазведки является то обстоятельство, что волновое поле от глубоких исследуемых объектов часто оказывается в значительной степени искаженным в результате влияния верхних частей разреза. Характер такого влияния различен и может выражаться как в геометрическом искажении осей синфазности, так и в полной потере их корреляции на временных разрезах. Влияние рельефа и ЗМС, как правило, удается компенсировать путем применения соответствующих технологий расчета статических поправок (в частности, по головным или рефрагированным волнам). Что же касается искажающего влияния более глубоких частей ВЧР, то справиться с ним на этапе обработки можно только путем применения специализированных методов. Среди искажающих факторов ВЧР следует в первую очередь отметить зоны развития многолетне-мерзлых пород, карстовых явлений, врезов, заполненных рыхлыми литологическими разностями, зоны дробления, уплотнения и разуплотнения, а также наличие сейсмических границ с высокой акустической жесткостью и имеющих сложную форму. В ряде случаев, особенно при наличии обширных карстовых воронок, мощных врезов рыхлых осадочных пород, зон дробления, попытки восстановить волновое поле оказываются безуспешными, т.к. на этих объектах происходит интенсивное поглощение и рассеяние энергии упругих колебаний и устранить их влияние принципиально невозможно.

В этой статье подробно рассматривается случай границы с высокой акустической жесткостью, поскольку он является

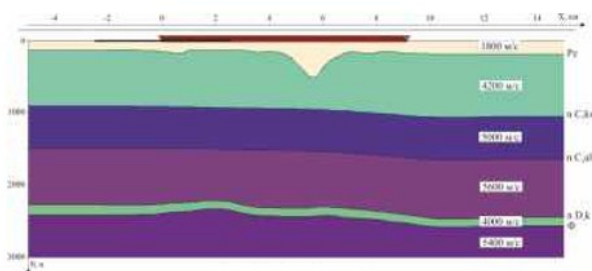
наиболее актуальным для территории Волго-Уральской нефтегазоносной провинции и встречается на значительной части нефтегазоперспективных участков. Хорошо известно, что на территории Волгоградской, Саратовской, Самарской, Оренбургской областей такой границей является кровля карбонатных отложений палеозойского возраста (Pz). Стратиграфическая привязка этой границы во многих случаях соответствует подошве татарского яруса, но она может иметь и разновозрастный характер. Принципиальную роль здесь играет смена литологического состава. Интервальная скорость в терригенных отложениях над этой границей составляет 1800-2000 м/с. Ниже нее разрез представлен высокоскоростными карбонатными породами (доломиты, известняки) и ангидритами, скорость распространения сейсмических волн в которых доходит до 4000-4500 м/с. Следовательно, с учетом изменения плотности, акустическая жесткость в них возрастает более чем в 2 раза. Вертикальное строение переходной зоны от терригенного комплекса к карбонатному может различаться. Иногда она выражена не очень явно и представляет собой переслаивание отложений с различными значениями интервальных скоростей (известняков, алевролитов, глин, песчаников) при толщине в несколько десятков метров. Такой вариант более благоприятен для изучения глубоких интервалов разреза. Но во многих случаях переход с низкоскоростных терригенных разностей на плотные высокоскоростные карбонаты является резким. При этом часто кровля карбонатного комплекса имеет сложную конфигурацию, характеризующуюся изменяю-



▲ Рис. 1. Исходный временной разрез.

щимися в пространстве абсолютными отметками и углами наклона. При такой сейсмогеологии искажения волнового поле максимальны. Характерный пример временного разреза профиля, находящегося в южной части Пугачевского свода в Саратовской области, приведен на рис. 1.

Очевидно, что для задач структурной интерпретации, прежде всего, необходимо устранить искажения осей синфазности на временных разрезах. Это наиболее актуально для районов, где объектами поиска являются малоамплитудные антиклинальные ловушки. Наша многолетняя практика показывает, что традиционный подход, предполагающий построение карт глубин путем пересчета временных толщин ΔT в глубинные ΔH , даже при удовлетворительной прослеживаемости горизонтов на временных разрезах, здесь совершенно неприменим. Погрешность определения глубины залегания целевых границ при этом зачастую намного превышает ожидаемые амплитуды структурных ловушек,



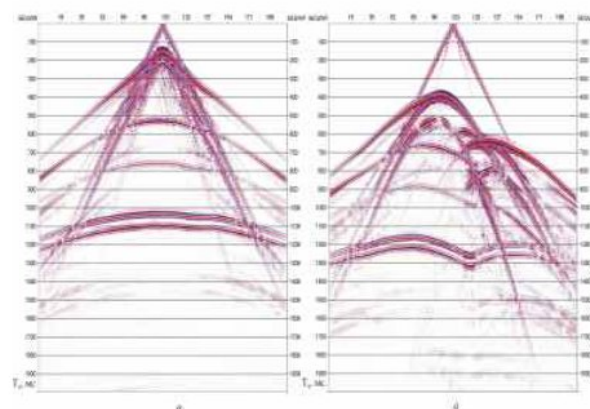
▲ Рис. 2. Глубинно-скоростная модель.

что приводит к фатальным ошибкам в итоговой геологической модели, выражающимся в появлении ложных объектов и (или) потере реально существующих.

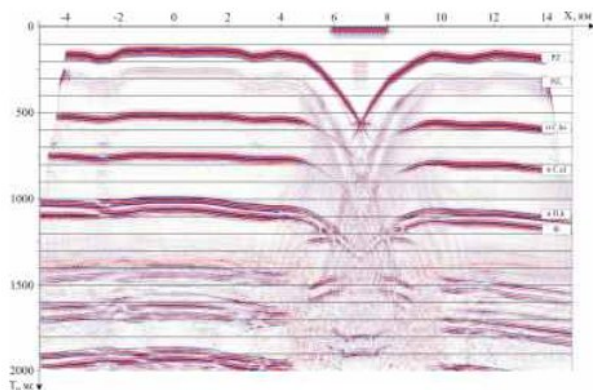
Результаты моделирования волновых полей в условиях присутствия в ВЧР криволинейной границы

На рис. 2 показана типичная глубинно-скоростная модель по одному из профилей в Саратовской области. Модель, построенная по результатам структурной интерпретации, содержит криволинейную границу, связанную с поверхностью палеозоя. На этом участке поверхность палеозоя характеризуется наличием глубокого вреза (долина Палеоволги). Модельные сейсмические материалы получены с помощью имеющегося на кафедре геофизики СГУ им. Н.Г. Чернышевского программного пакета Tesseral 2D (разработка Tesseral Technologies Inc) в выпускной квалификационной работе студентки

С.О. Дадоновой, выполненной под научным руководством А.Е. Артемьева. Выборка теоретических сейсмограмм, рассчитанных для рассматриваемой модели вдоль всего профиля, приведена на рис. 3. На рис. 3(а) показана сейсмо-

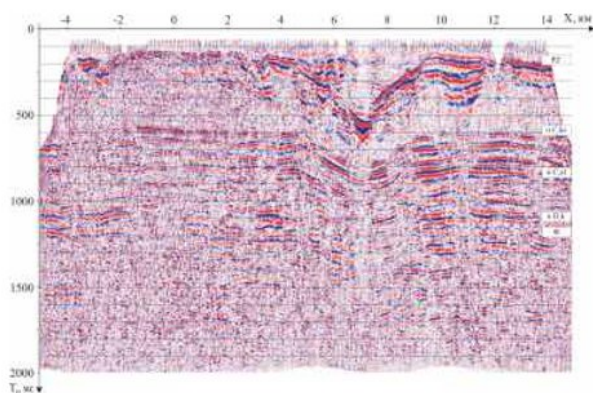


▲ Рис. 3. Синтетические сейсмограммы: а - в зоне ровной границы, б - в зоне развития вреза (палеодолины)



▲ Рис. 4. Синтетический суммарный временной разрез

грамма, полученная на участке профиля с относительно ровной поверхностью P_z , на рис. 3(б) - сейсмограмма, соответствующая местоположению вреза, связанного с палеодолиной. Временной разрез, полученный по синтетическим сейсмограммам, приводится на рис. 4. Данные материалы наглядно показывают, что искажения волнового поля, связанные с первой криволинейной границей, существенно затрагивают все горизонты, залегающие ниже нее. Для сравнения на рис. 5 также приведен реальный временной разрез по тому же профилю.



▲ Рис. 5. Реальный суммарный временной разрез

Некоторые методы построения глубинных моделей для структурной интерпретации в условиях присутствия в ВЧР криволинейной границы

В настоящее время наиболее известными методами компенсации влияния

указанной границы являются следующие:

- приведение опорного горизонта на постоянное время или на линию тренда;
- применение статических поправок «исключения»;
- замещение слоя на основе лучевого трассирования;
- замещение слоя на основе дифракционного преобразования;
- миграция до суммирования в глубинной области.

Многие из них уже давно используются в практике сейсмических исследований и подробно описаны в соответствующей литературе [5,6]. Здесь мы лишь вкратце напомним их содержание и попытаемся провести анализ преимуществ и недостатков каждого из них.

Приведение опорного горизонта на постоянное время или на линию тренда. Это наиболее простой подход, суть которого заключается в расчете и применении поверхностно-согласованных статических поправок за пункты приема и возбуждения, приводящих линию T_0 одного из первых гладких горизонтов, расположенных ниже криволинейной жесткой границы, на постоянное время на протяжении всего профиля. При этом, конечно, необходимо иметь на временном разрезе хотя бы один такой горизонт, обладающий выдержанностью и устойчивыми динамическими характеристиками по латерали. Разумеется, этот горизонт должен обладать прослеживаемостью, достаточной для того, чтобы выполнить его корреляцию до ввода поправок приведения. Корреляцию этого горизонта желательно выполнять на суммарном разрезе ближних удалений, в идеальном случае – на минимально возможной базе суммирования. Рассчитанные как разность между линией

границы и линией приведения (или линией тренда границы), поправки распределяются по ПП и ПВ и вводятся с коэффициентом 0.5 в элементарные трассы исходных сейсмограмм. Затем в обычном порядке выполняются основные этапы графа традиционной базовой обработки. Полученные в результате временные разрезы пригодны построения карт временных толщин ΔT , карт толщин ΔH а также для динамического анализа.

В 2003 г одна из разновидностей данной технология была запатентована и носит название «палеообработка». Патентообладателем является ЗАО «Зап-прикаспийгеофизика» и группа сотрудников этого предприятия [7]. Необходимо отметить, что основной принцип, лежащий в основе данного способа, известен очень давно и применялся при обработке сейсмических данных еще задолго до выдачи патента. В частности, в ОАО «Саратовнефтегеофизика», выполнявшем в течение нескольких десятков лет большие объемы сейсмических исследований в районах с соответствующей сейсмогеологией ВЧР, с некоторыми изменениями данная технология применялась, начиная с 70-х годов прошлого века. Как правило, использовалось приведение опорной границы к ее трендовой составляющей.

Недостатки метода:

- 1) обязательное наличие субгоризонтального устойчивого опорного горизонта под первой жесткой границей, желательно, как можно ближе к ней;
- 2) невозможность учета лучевых траекторий в слое от поверхности до первой жесткой границы и, как следствие, снижение точности поправок по мере увеличения глубины залегания искажающей границы и удаления ПП – ПВ в приемной расстановке;

- 3) полная потеря информации о реальном структурном плане опорного горизонта после ввода поправок в случае горизонтальной линии приведения и, соответственно, невозможность построения структурных карт по глубоким целевым горизонтам без достаточно плотной сети структурных скважин, вскрывающих выбранный верхний репер или без привлечения структурных карт этого горизонта, построенных каким-либо другим способом.

Преимущества метода:

- 1) простота реализации, не требующая использования специализированных программных пакетов;
- 2) более эффективная работа процедур коррекции остаточных статпоправок, остаточных фазовых сдвигов, многоканальных процедур подавления помех после приведения осей синфазности на временных разрезах к субгоризонтальной форме;
- 3) значительное упрощение процесса увязки разрезов на пересечениях.

Применение статических поправок «исключения». Этот метод также заключается в расчете и применении поверхностно-согласованных статических поправок за ПП и ПВ, компенсирующих временные искажения годографов на исходных сейсмограммах. Основные отличия от предыдущего метода состоят в технологии определения этих поправок. Для этого используется не ниже лежащий опорный горизонт, а собственная конфигурация исключаемой криволинейной границы. Метод может применяться к сейсмическим данным как 2D, так и 3D.

Процедура расчета поправок исключения обычно включает следующий набор операций:

1. построение карты поверхности приведения путем пространственного

сглаживания карты вертикальных времен криволинейной границы, т.е. построение карты трендовой составляющей – временной поверхности приведения;

2. расчет карты поправок исключения путем вычитания карты тренда из карты несглаженных вертикальных времен и распределение рассчитанных поправок по пунктам приема и возбуждения;

3. выбор коэффициентов исключения для различных профилей путем визуального контроля качества суммирования на временных разрезах (кубах).

Данные коэффициенты определяются соотношением интервальных скоростей в толще пород над “жесткой” границей V_1 и под ней V_2 . Но поскольку значения данных интервальных скоростей могут быть оценены лишь приблизительно, то для более точного определения поправок требуется эмпирический подбор коэффициентов K . К тому же указанные скорости могут изменяться по латерали, соответственно, и коэффициенты исключения на разных участках площади могут быть различными. Критерием выбора оптимального значения K служит качество прослеживания глубоких границ. В большинстве случаев выполняется тестирование коэффициента K в интервале от 0.2 до 0.8 с шагом 0.1 или 0.2.

Недостатки метода

1) как и в первом методе, невозможность учета лучевых траекторий в слое от поверхности до первой жесткой границы. Т.е. поправки будут корректными только для случая вертикального хода лучей;

2) невозможность учета бокового отклонения лучей. Т.е. точки отражения от исключаемой криволинейной границы и от нижележащих границ в общем случае могут находиться не в плоскости профиля и даже не в одной плоскости

друг с другом. Это означает, что видимая компенсируемая амплитуда временного искажения, определенная по форме криволинейной границы, не обязательно равна фактической амплитуде искажения на глубоких границах. Впрочем, ни один из рассматриваемых здесь методов в случае профиля 2D не может учесть этот фактор;

3) разрушение всей верхней части суммарного разреза выше первого целевого горизонта, залегающей под криволинейной границей m , следовательно, появляется необходимость монтажа итогового временного разреза (верх+низ). Однако же, это требуется только в целях демонстрации итогового результата.

Преимущества метода

1) простота реализации в рамках известных программных пакетов обработки. Специализированное ПО не требуется;

1) необязательность присутствия, как в первом случае, устойчивого регионально выдержанного отражения непосредственно под первой жесткой границей;

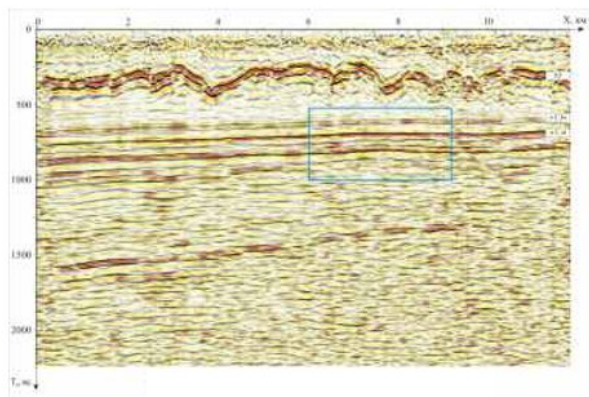
2) принципиальное сохранение регионального структурного плана глубоких границ на временных разрезах. Тем не менее, при выполнении глубинных построений калибровка к данным структурных скважин при их наличии необходима;

3) более эффективная последующая работа процедур стандартного графа обработки;

4) минимизация проблем с увязкой разрезов на пересечениях в случае сети профилей 2D.

Данный метод был разработан в ОАО «Саратовнефтегеофизика», постоянно работающем на территории Саратовской области, для значительной части которой

характерен рассматриваемый в этой статье тип геологического разреза. Примеры использования можно найти в работе [4]. Интересные результаты динамического анализа, полученные по материалам обработки данных сейсморазведки МОГТ-3D с применением технологии исключения, приведены в работе [3]. Метод успешно применяется примерно с начала 70-х гг прошлого столетия. И если в те времена поправки «исключения» рассчитывались ручным способом и требовали работы с корреляцией на временных разрезах на бумажных носителях, то теперь этот процесс реализуется в современных интерпретационных и обрабатывающих пакетах с использованием небольших программных дополнений. Пример эффективного применения технологии к показанному выше (см. рис. 1.) профилю представлен на рис. 6. Синей рамкой обозначена зона потенциального малоамплитудного объекта – структурной ловушки антиклинального типа.



▲ Рис. 6. Временной разрез после ввода статических поправок «исключения»; рамкой выделена область возможной антиклинальной ловушки

Замещение слоя на основе лучевого трассирования.

Эта методика с позиций законов геометрической сейсмики является более корректной, чем две вышеописанные. Тем не менее, ее реализация отно-

сительно проста и предполагает выполнение следующих этапов:

1. построение рабочей глубинно-скоростной модели, являющейся приближением реального сейсмогеологического разреза и содержащей, по меньшей мере, 2 границы: а) исключаемую границу, б) одну из относительно гладких границ подисключаемой;
2. построение глубинно-скоростной модели замещения, содержащей одну только гладкую границу. Среда над этой границей имеет постоянную скорость;
3. выполнение расчета лучевых траекторий для обеих моделей для каждой трассы расстановки по системе, соответствующей реальной системе наблюдений;
4. расчет статических поправок замещения для каждой элементарной трассы как разность времен лучей прохода для двух указанных моделей;
5. ввод рассчитанных поправок в трассы реального сейсмического материала.

Недостатки метода

- 1) необходимость определения достаточно точной глубинно-скоростной модели и более высокие требования к качеству первичного сейсмического материала;
- 2) необходимость использования специального программного обеспечения;
- 3) большая по сравнению с двумя предыдущими способами времяемкость процесса. Особенно в случае большого количества итераций;
- 4) разрушение всей верхней части временного разреза, включая криволинейную замещающую границу;
- 5) невозможность учета бокового отклонения лучей. Т.е. точки преломления и отражения могут находиться не в плоскости профиля.

Преимущества метода

1) корректный учет лучевых траекторий, следовательно, более высокая точность расчетных поправок для всех удалений в приемной расстановке;

2) сохранение регионального структурного плана глубоких границ на временных разрезах, что упрощает дальнейшие глубинные построения;

3) эффективная последующая работа большинства процедур стандартной обработки;

4) как правило, отсутствие проблем с увязкой разрезов на пересечениях в случае сети профилей 2D при условии согласованности моделей для всей площади.

Первоначально метод был предложен зарубежными авторами еще в 70-е годы [6]. Но работоспособные программные решения появились значительно позже лишь с развитием высокопроизводительной вычислительной техники. Одна из реализаций данного метода была выполнена в ОАО «Саратовнефтегеофизика» в конце 80-х начале

90-х гг. Она являлась составной частью разработанного в те годы на предприятии пакета двумерного сейсмического моделирования ДСМ. Программный пакет, наряду с расчетом поправок замещения, позволял рассчитывать также модельные кинематические поправки, оптимизирующие последующее суммирование. Пакет ДСМ использовался в ОАО «Саратовнефтегеофизика» в течение многих лет и продемонстрировал неплохие результаты. Его применение показало наибольшую эффективность в районах проявления солянокупольной тектоники.

Замещение слоя на основе дифракционного преобразования. Эта процедура является частичным миграционным преобразованием. При этом использует-

ся двухслойная модель, содержащая единственную границу, влияние которой необходимо устранить. Но в данном случае модельные сейсмограммы не формируются, а работа идет непосредственно с наблюдаемым волновым полем. Сначала выполняется его трансформация на поверхность исключаемой границы со скоростью среды над ней, а затем на горизонтальную линию приведения, располагаемую обычно на уровне поверхности наблюдения уже со скоростью в подстилающем криволинейную границу слое. Этот метод чаще применяется в морской сейсморазведке, поскольку обычно скорость в водном слое и рельеф дна хорошо известны и поэтому возможна достаточно точная аппроксимация реальной среды моделью.

Недостатки и преимущества метода по существу те же, что и для замещения по лучевой схеме. При обработке наземных сейсмических данных здесь главной проблемой является сложность построения аппроксимирующей модели с необходимой точностью, т.к. обычно скоростные параметры определяются с большими погрешностями.

Миграция до суммирования в глубинной области. Подробное описание этапов технологии глубинной миграции, применяемых в ОАО «Саратовнефтегеофизика», можно найти в работах [1, 2]. Главное достоинство метода – максимально точный в рамках построенной модели миграции учет влияния конфигурации границ и вариаций скоростных параметров среды в вышележащих слоях при учете сейсмического сноса и построения результирующей модели нижележащих границ.

Основные недостатки:

1) высокая стоимость использования специализированного программного обеспечения;

2) значительная трудоемкость интерактивного процесса построения модели;

3) значительная времяемкость собственно вычислительного процесса при выполнении миграции, требующая высокой вычислительной мощности;

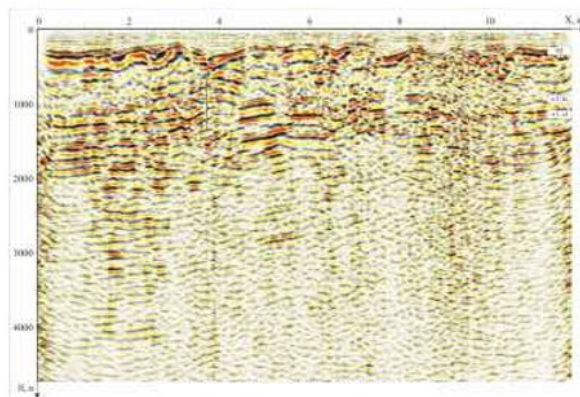
4) ограничения на минимальную толщину слоя в модели миграции;

5) выраженная зависимость результата от точности аппроксимации реальной среды моделью миграции;

6) плохая увязка на пересечениях профилей 2D после миграции, особенно, в случае наклонных границ;

7) частичные искажения динамических параметров отражений и зависимость их от выбранной апертуры.

Пример разреза после глубинной миграции по алгоритму Кирхгоффа по этому же профилю приводится на рис. 7. Несмотря на достаточно однозначную корреляцию искажающей границы (см. рис. 5), а, следовательно, вполне надежное построение глубинной модели для нее, полученный результат следует признать совершенно неприемлемым. Исследуемый интервал разреза, имеющий относительно простое строение, здесь по существу не подлежит интерпретации. Показанный выше (см. рис. 6) потенциальный антиклинальный объект на данном разрезе выделить совершенно невозможно. Впрочем, проблема неудовлетворительной работы глубинной миграции в подобных условиях известна уже давно. Отчасти это объясняется низкой достоверностью скоростного анализа по первому гладкому горизонту, определяющего модельную скорость в слое под криволинейной поверхностью. Но наш опыт свидетельствует, что главная причина кроется в невозможности точного моделирования вертикального строения (на интервале 10 – 30 м) зоны



▲ Рис. 7. Глубинный разрез после миграции до суммирования

поверхности размыва. А это в данном случае является ключевым моментом, т.к. именно здесь и происходит резкая смена интервальных скоростей. Скорее всего, данное обстоятельство и определяет существенные отличия реальных лучевых траекторий от модельных и, соответственно, неправильный пересчет фактического временного разреза в глубинный. Последующая же миграция по таким данным только усугубляет некомпенсированные искажения.

Заключение

Подводя итоги вышеприведенного сравнения, необходимо отметить следующее. Первые два метода основаны на предположении о вертикальном ходе лучей в среде от искажающей границы до поверхности наблюдений и являются более или менее корректными лишь при определенных условиях, а именно – малые удаления и близкое к поверхности залегание искажающей границы.

Последние три подхода предлагают более строгое решение, учитывающее лучевые траектории и формально более корректный расчет поправок. Однако же все они при этом обладают одним очень существенным недостатком. Их результативность во многом определяется точностью задания используемой в них глубинно-скоростной модели. Очевидно,

что на практике скважинные данные далеко не всегда доступны или просто отсутствуют, а получить необходимые параметры из имеющихся сейсмических материалов с требуемой точностью и детальностью также весьма затруднительно. Поэтому, как правило, модель ВЧР получается приближенной, что приводит к заметному падению эффективности применения этих методов, а иногда и к явно неудовлетворительным результатам. На практике часто оказывается, что менее корректные с формальных позиций подходы дают в итоге приемлемый результат, пригодный для дальнейшего использования и решения хотя бы части геологических задач.

Сказанное выше вовсе не означает призыв к упрощению процесса обработки путем отказа от современных путей решения обсуждаемой задачи. Просто в зависимости от конкретных обстоятельств (сейсмогеологической модели, качества материала, наличия априорных данных и данных других методов) необходимо использовать такой подход, который является наиболее эффективным в данной ситуации. Во всяком случае, нужно по возможности опробовать различные пути и использовать при интерпретации все заслуживающие внимания результаты.

К сожалению, и в настоящее время со стороны заказчиков услуг разведочной геофизики встречается отсутствие четкого понимания обозначенной проблематики. В некоторых случаях встречается настойчивое требование выполнения построения геологической модели на основе исключительно традиционных методов, при которых искажения, связанные с криволинейной поверхностью карбонатных палеозойских отложений, вообще никак не учитываются. В итоге таких заблуждений можно получить в лучшем случае неоднозначность построенных геологических моделей, недоуме-

ние и серьезную неудовлетворенность полученными результатами со стороны клиента, а в худшем – грубые ошибки в структурных построениях и огромные финансовые потери из-за неверно определенных точек заложения скважин и, как следствие, неэффективного бурения.

Литература

1. Артемьев А.Е. Опыт применения глубинной миграции на основе волнового уравнения в условиях развития солянокупольной тектоники. // Приборы и системы разведочной геофизики №04(14)/2005. –С.28-30.
2. Артемьев А.Е., Гавриков А.Г., Федорчук Р.А. К вопросу о необходимости применения 3D миграции до суммирования в платформенных условиях. // Приборы и системы разведочной геофизики №04(06)/2003. –С.40-44.
3. Артемьев А.Е., Жильцова Е.В. Сейсмofациальный анализ среднедевонских отложений южного склона Пугачевского свода. // Приборы и системы разведочной геофизики №01(47)/2014. С.99-109.
4. Артемьев А.Е., Иванов А.В., Жильцова Е.В., Ольшанский А.С. Центр обработки и интерпретации ОАО «Саратовнефтегеофизика». // Приборы и системы разведочной геофизики №04(38)/2011. С.6-16.
5. Боганик Г.Н., Гурвич И.И. Сейсморазведка: Учебник для вузов. Тверь: Издательство АИС, 2006. 744 с.
6. Козырев В.С., Жуков А.П., Коротков И.П., Жуков А.А., Шнеерсон М.Б. Учет неоднородностей верхней части разреза в сейсморазведке. –М.:ООО «Недра-Бизнесцентр», 2003. 227 с.
7. Пат. №2221262 Российская Федерация. Способ сейсмической разведки для изучения осадочного чехла при наличии сильно изрезанных акустически жестких границ / Шустров Е.И., Худяков Н.М., Андреев Г.Н., Кобылкин И.А., Голиченко А.М., Колосов Б.М. // Патентообладатель ЗАО «Запприкаспийгеофизика». Зарегистрировано 10.01.2004.