

**ОПРОБОВАНИЕ СЕЙСМИЧЕСКОЙ ИНВЕРСИИ ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ
ФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ГЕОЛОГИЧЕСКОГО РАЗРЕЗА
(НА ПРИМЕРЕ ЛИПОВОДОЛИНСКО-РУСАНОВСКОЙ ПЛОЩАДИ ДДВ)**

© Е.М. Бородулин, В.П. Солдатенко, 2010

*ГПП “Укргеофизика”, Приднeпровская геофизическая разведочная экспедиция, Новомосковск, Украина
Национальный горный университет, Днепропетровск, Украина*

Some practical aspects of impedance sections construction on the base of seismic inversion are discussed on the example of standart seismic and well log data. The productive section of the Visean carbonate plate is the subject of research. The main attention is paid to the technological aspects of inversion, impedance sections and analysis of the data. The materials obtained permit highly appreciate the practical usefulness of seismic inversion.

Keywords: seismic inversion, acoustic impedance, carbonate plate, wavelet.

Введение. Последние несколько лет за рубежом неуклонно растет интерес к методу сейсмической инверсии. Комплексный подход к разведке и разработке месторождений углеводородов составляет неотъемлемую часть современных геолого-геофизических проектов, а инверсия – один из способов извлечения дополнительной информации из сейсмических данных. Судя по количеству и качеству публикаций на эту тему [1–3], метод сейсмической инверсии уже прошел стадию опытного опробования и на сегодня является производственной технологией.

Устойчивый интерес к этой технологии обусловлен несколькими причинами. С точки зрения сверточной модели сейсмической трассы, ось синфазности отраженной волны есть не что иное, как геометрическое место точек максимального градиента поля импеданса (произведения скорости на плотность). Поэтому разрезы импеданса – это ценная дополнительная информация при стандартной структурной интерпретации, которая позволяет уточнять идентификацию одноименных геологических объектов в сложных сейсмогеологических условиях. Другая причина – наличие корреляционных связей между импедансом и некоторыми фильтрационно-емкостными свойствами среды (ФЕС), например пористостью. Таким образом, поле импеданса, полученное в результате сейсмической инверсии, является информационной базой для прогнозирования ФЕС как на стадии разведки, так и при разработке месторождений углеводородов.

При инверсии сейсмическая волна представляется в виде ступенчатого отклика, соответствующего акустическому импедансу слоистой толщи. Это упрощает интерпретацию геологических и петрофизических границ и во многих случаях

увеличивает разрешающую способность традиционной сейсморазведки. Применение инверсии позволяет оптимизировать объемные подсчеты запасов углеводородов, улучшать классификацию поисковых объектов и повышать надежность идентификации перспективных зон при разработке месторождений [4].

Сейсмическая инверсия способствует более подробному изучению характеристик коллектора и при благоприятных условиях повышает разрешенность сейсмических данных. Указанная технология постепенно становится стандартным этапом обработки при разработке и разведке месторождений. Сейсмический импеданс все чаще приходит на смену обычному амплитудному представлению сейсмических данных и как и инверсия становится составной частью технологии определения характеристик коллектора [5].

Постановка задачи. В настоящее время технология инверсии при производстве геофизических работ в Украине практически не используется. В начале 2009 г. появилась первая публикация по практическим вопросам сейсмической инверсии [6], основанная на модельных материалах. Однако синтетическое волновое поле, полученное в рамках упрощенной (акустической) модели, и реальные сейсмические материалы, отражающие весь спектр проблем современного геофизического производства, существенно различаются.

В первую очередь необходимо уточнить, как в поле импеданса, полученном на стандартных сейсмических материалах, выглядят известные геологические объекты; определить требования к разрешенности и качеству полевых сейсмограмм; выяснить специфические детали графа обработки; решить проблему увязки сейсмической и коротажной информации и, при необходимости, их

коррекции; уточнить алгоритмы и параметры инверсии и т. д.

Все перечисленные выше задачи могут служить основанием для постановки масштабных опытно-методических исследований. В настоящей работе основное внимание уделено непосредственно методическим аспектам технологии инверсии, получению разрезов импеданса и анализу результатов материалов. Объект исследования – продуктивная толща геологического разреза в интервале визейской карбонатной плиты на Липоводолинско-Русановской площади северо-западной части Днепровско-Донецкой впадины (ДДВ).

Характеристика исходных геолого-геофизических данных. В тектоническом отношении Липоводолинско-Русановская площадь расположена в пределах Лакизинско-Загорянской зоны, в районе Липоводолинского выступа поверхности докембрийского кристаллического фундамента (Сабецкий В.В., 2007). В осадочной толще Липоводолинское поднятие является крайним восточным элементом Талалаевско-Липоводолинского вала. В нижнем карбоне (горизонт $V_{в2}$) выделяется Северо-Липоводолинский свод, который представляет собой антиклинальную складку неправильной конфигурации, осложненную тектоническими нарушениями (рис. 1). Сейсмический профиль 128/4/87, на котором опробовалась технология

инверсии, пересекает указанный свод с юго-запада на северо-восток. На профиле расположена параметрическая скв. 453. В качестве исходной каротажной информации выбраны диаграммы гамма-каротажа (ГК), акустического каротажа (АК), кавернометрии и вертикальный годограф, оформленные в виде LAS-файла.

На рис. 2, а представлен фрагмент мигрированного временного разреза с вынесенной кривой АК. По скв. ЛПД 453 кровля визейской плиты привязана к низкочастотному отражению на уровне 2950 мс. Осложнение волновой картины в интервале 565–630 CDP ориентировочно соответствует зоне развития разрывной тектоники. В целом волновое поле характеризуется достаточно низким соотношением сигнал/помеха и разреженностью сейсмической записи.

Сейсмическая инверсия. В настоящее время существует около десятка различных алгоритмов инверсии. Их сопоставление и анализ на реальных производственных материалах – тема отдельного исследования. Нами выбран один из фундаментальных алгоритмов – инверсия, основанная на исходной модели [7]. Этот выбор обусловлен тем, что такая инверсия наиболее устойчиво работает в случае невысокого качества сейсмического материала при минимальном объеме скважинной информации.

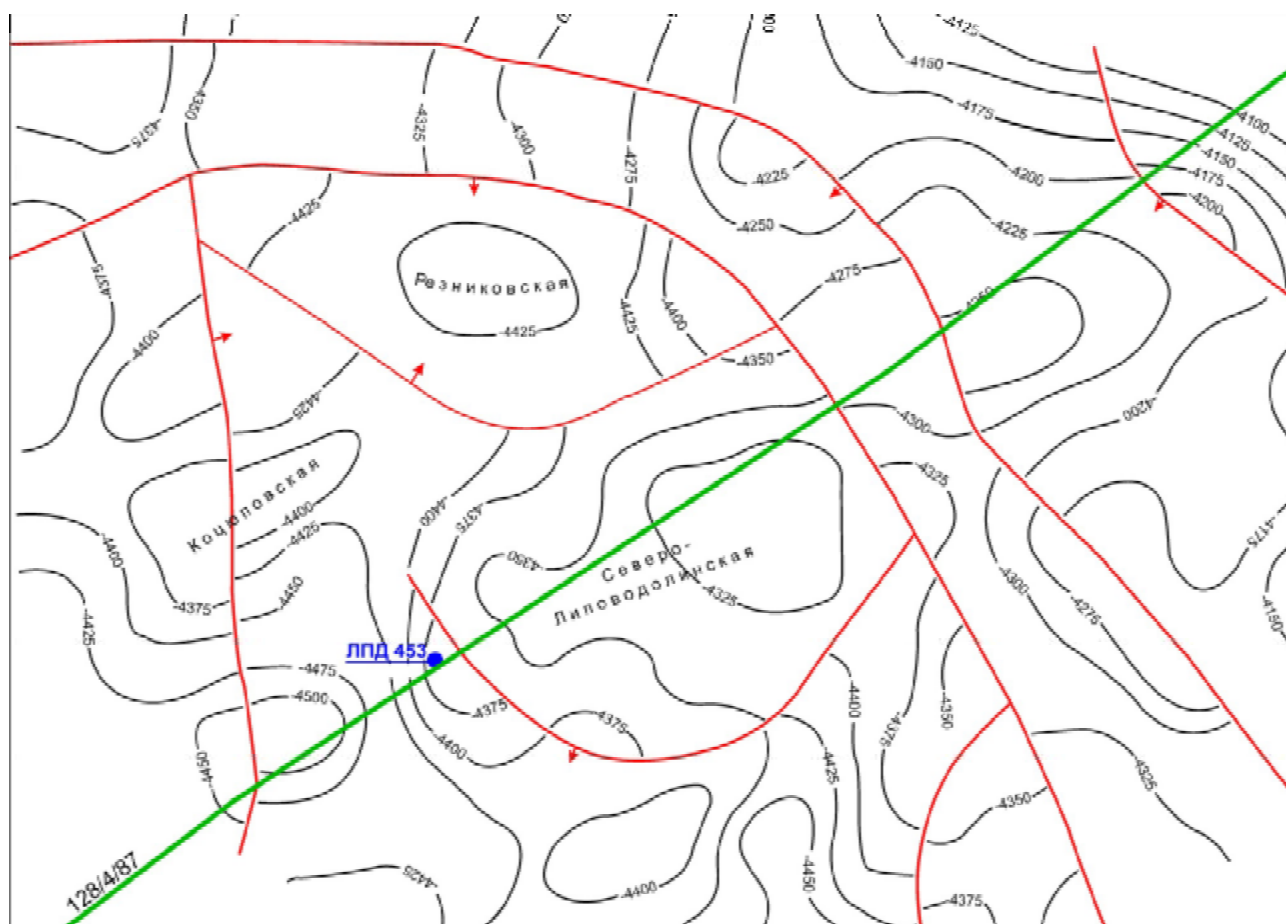
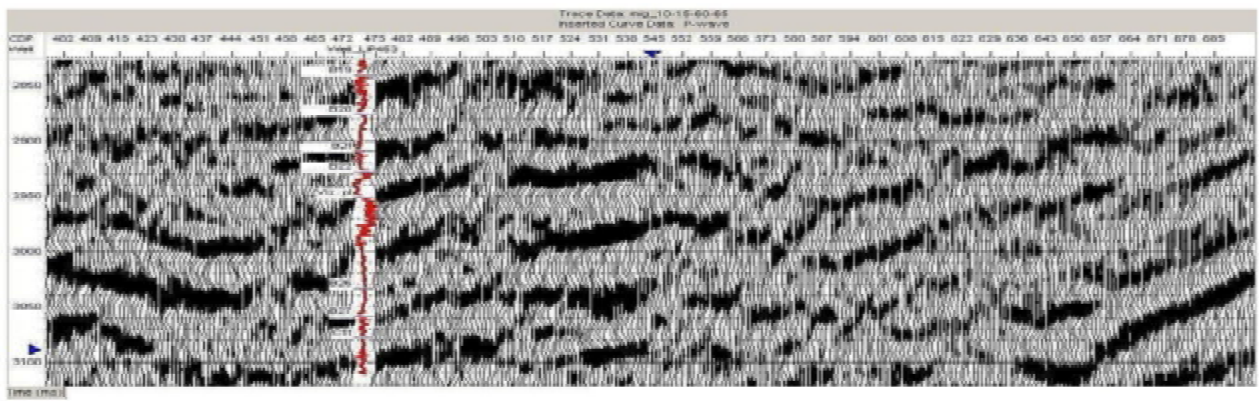
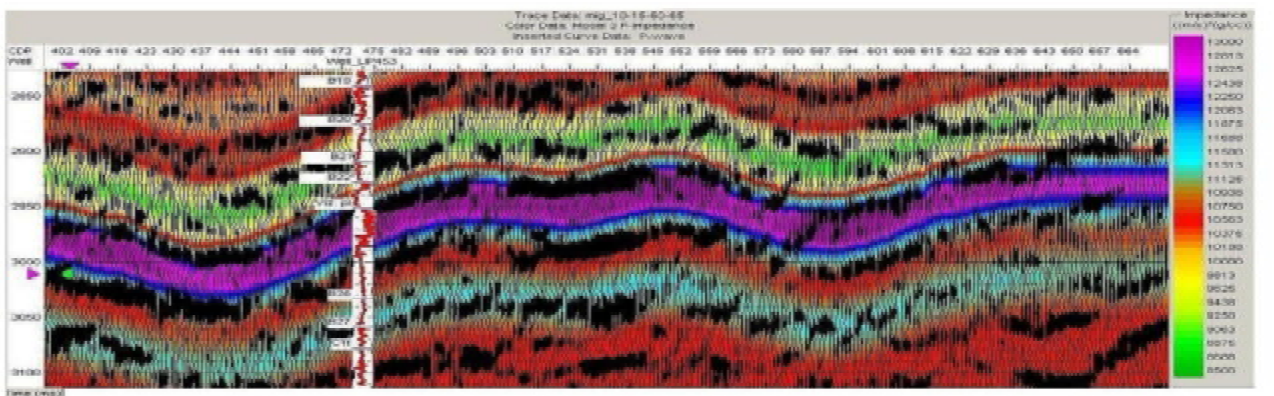


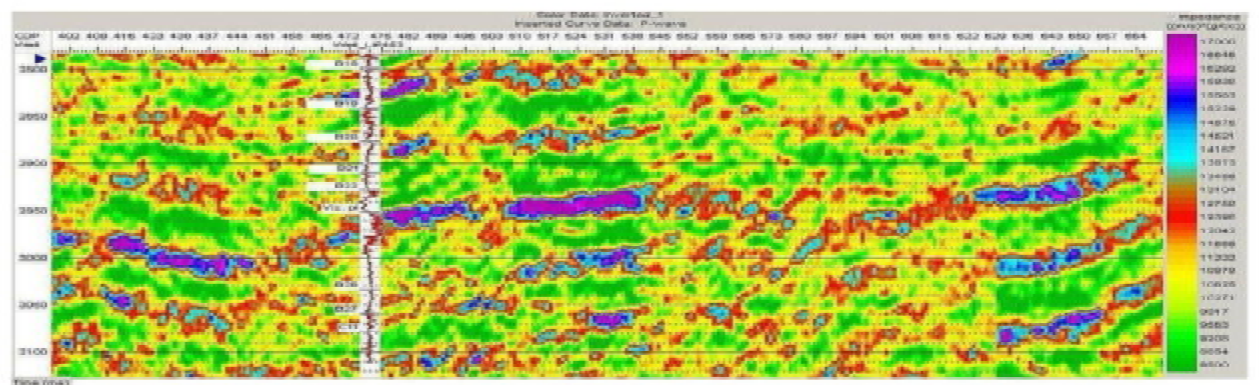
Рис. 1. Фрагмент структурной карты по горизонту В-20. Липоводолинско-Русановская площадь



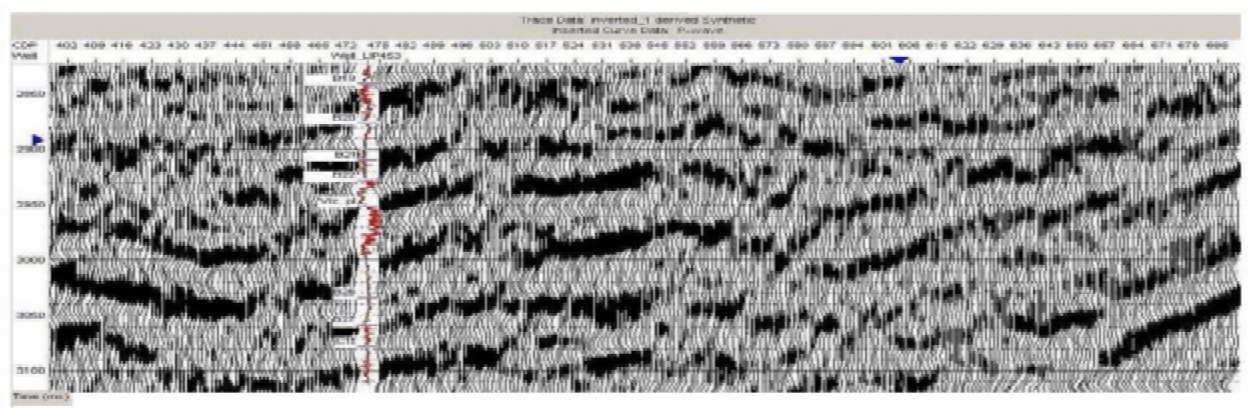
a



б



в



г

Рис. 2. Основные этапы сейсмической инверсии. Фрагмент профиля 128/4/87: а – фрагмент мигрированного временно-го разреза; б – исходная модель распределения импеданса; в – результат сейсмической инверсии – прогнозный разрез распределения импеданса; г – синтетическое волновое поле, полученное на основе расчетного импеданса



Рис. 3. Блок-схема сейсмической инверсии

На рис. 3 показана укрупненная блок-схема сейсмической инверсии, отражающая основные этапы вычислительного процесса.

Первый этап технологии инверсии – занесение в базу данных исходной геолого-геофизической информации и оценка элементарного сигнала. На рис. 4 компактно представлены исходные каротажные данные и результат одномерного сейсмического моделирования с учетом выделенного

оптимального сейсмического импульса. Гамма-каротаж (GK) и кавернометрия (DSK) использовались для уточнения стратиграфической и глубинной привязки горизонтов, а кривая акустического каротажа (P-wave_corr 2) и вертикальный годограф (Depth-time_P-wave) – непосредственно в процессе сейсмической инверсии. Черным цветом справа на рисунке показан фрагмент волнового поля вблизи скважины, красным – центральная сейсмоотрасса этого фрагмента, соответствующая местоположению скважины, синим – синтетическая трасса, полученная в результате свертки выделенного сейсмического импульса и импульсной кривой.

Для удобства визуального восприятия наблюдаемая и синтетическая трассы расположены рядом и пять раз продублированы. Наибольшее совпадение между реальными и синтетическими данными наблюдается в районе карбонатной плиты (Viz. pl) при общем коэффициенте корреляции 0,753 в интервале анализа, что с учетом качества исходных сейсмических материалов является вполне положительным результатом.

На рис. 5 показана форма выделенного сейсмического импульса, который имеет ярко выраженный низкочастотный характер с видимым периодом около 50 мс. Этот сигнал представляет собой “смешанофазовый” импульс с ненулевым фазовым спектром.

Для определения элементарного импульса использовался комбинированный способ. На пер-

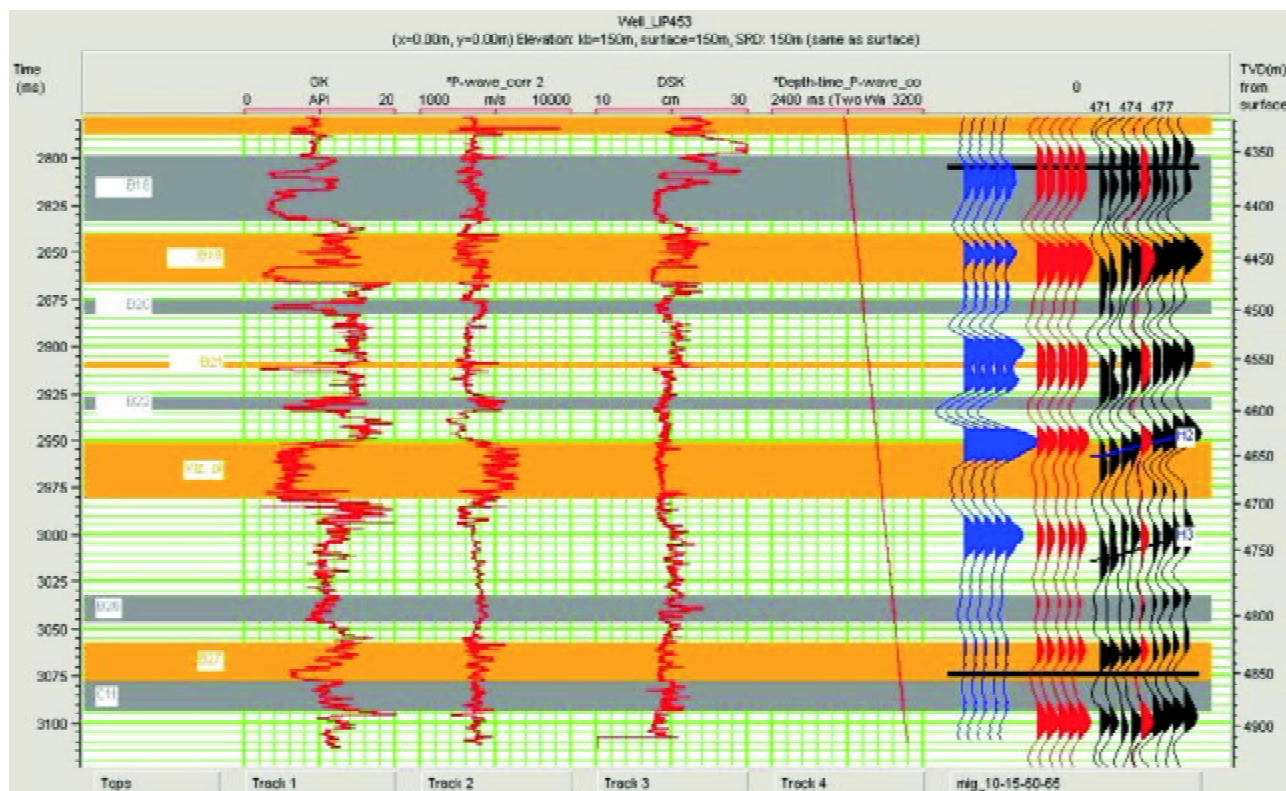


Рис. 4. Исходные каротажные данные и результат 1D моделирования с оптимальным элементарным импульсом

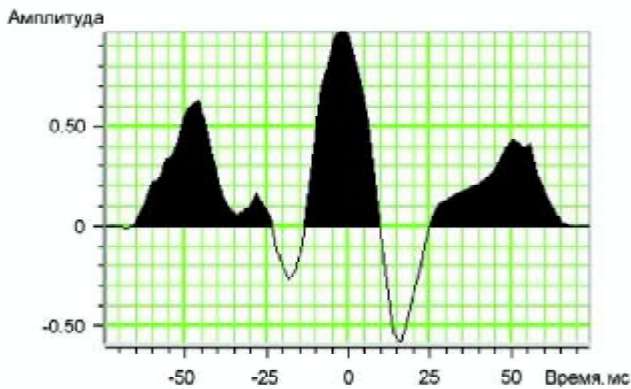


Рис. 5. Форма элементарного импульса, определенная в процессе сейсмической инверсии

вой стадии применялся стохастический подход, основанный на предположении, что функция автокорреляции сейсмической трассы эквивалентна функции автокорреляции элементарного импульса. Такой подход имеет проблемы с надежностью определения фазового спектра, но в качестве начальной итерации достаточно обоснован. На второй стадии для уточнения формы импульса использовался детерминистический алгоритм с использованием данных акустического каротажа.

Второй этап сейсмической инверсии – построение начальной модели распределения импеданса, которая по сути представляет собой низко-

частотную фоновую модель пликативного характера. Эта модель определяется на основании общей геолого-геофизической информации с учетом имеющихся структурных карт, корреляции горизонтов, скважинной информации и т. д.

На рис. 2, б представлена начальная модель распределения импеданса, совмещенная с мигрированным временным разрезом. Центральный элемент модели – слой повышенного импеданса, соответствующий визейской карбонатной плите. Так как плотностной каротаж в скважине отсутствовал, то для определения значений плотности было использовано уравнение Гарднера [8] с дефолтными коэффициентами.

Третий, основной, этап вычислений – эталонировка и настройка параметров инверсии в точке расположения скв. ЛПД 453. На рис. 6, на второй панели (Z_p), показано сопоставление начальной модели импеданса (черная кривая), наблюдаемого (синяя кривая) и инверсионного импедансов (красная кривая), т. е. результат сейсмической инверсии. Низкочастотная кривая начальной модели представляет собой вертикальный срез профильной исходной модели (см. рис. 2, б), а наблюдаемая кривая импеданса получена на основании диаграммы АК и расчетных значений плотности.

Наибольшее совпадение наблюдаемых и инверсионных значений импеданса наблюдается в

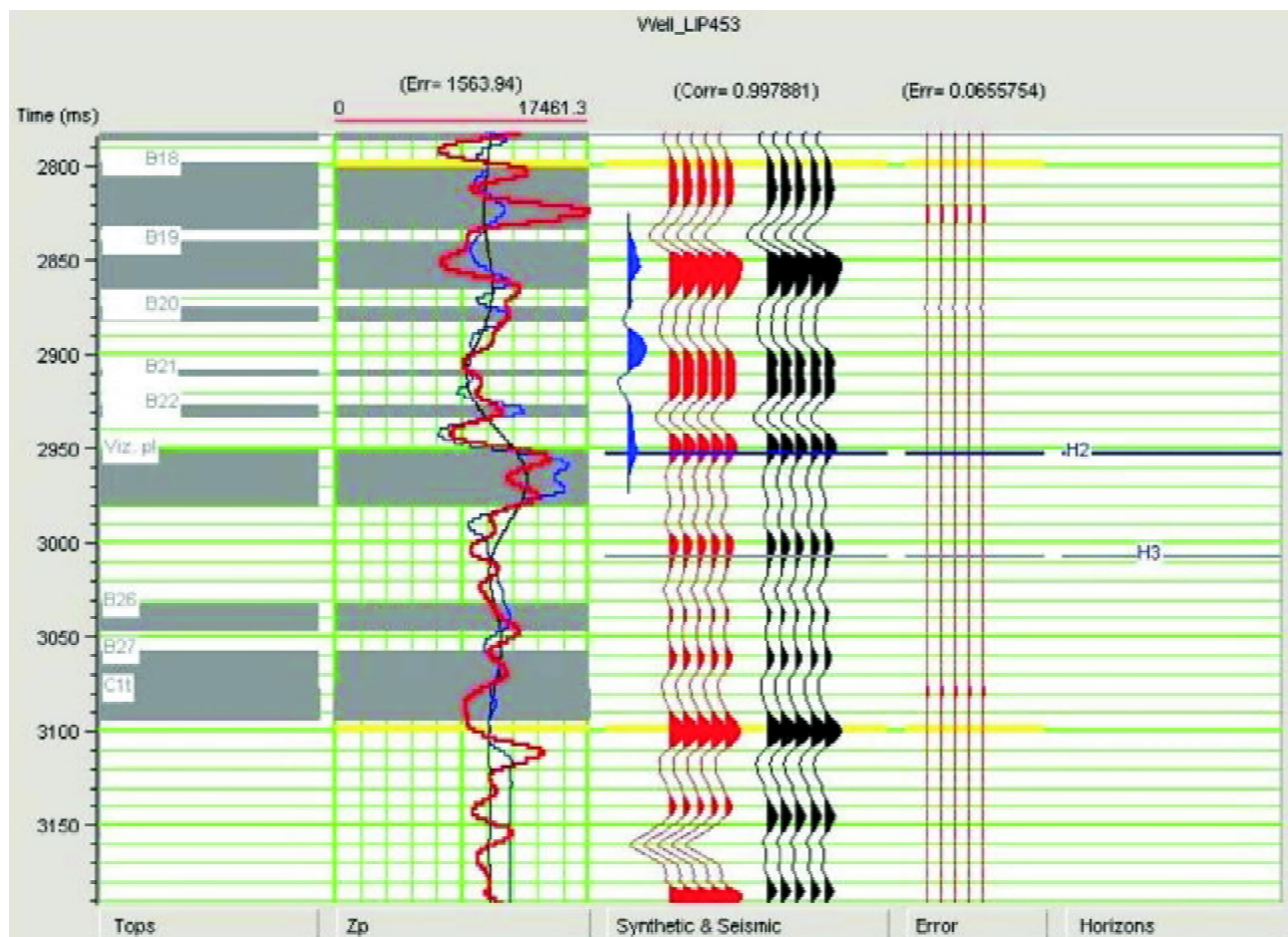


Рис. 6. Инверсионный анализ. Результаты эталонировки и настройки параметров инверсии

центральной части интервала анализа (район карбонатной плиты), также очевидны высокочастотные расхождения этих кривых. Однако после свертки инверсионной импульсной трассы и выделенного сигнала (синий импульс) синтетическая трасса практически не отличается от реальной в пределах интервала анализа. Коэффициент корреляции очень высок – 0,997, несмотря на сравнительно низкочастотный элементарный импульс. На панели Synthetic & Seismic красным цветом показаны синтетические данные, а черным – реальные. Полученный результат – прекрасный пример неоднозначности решения обратной задачи, частным случаем которой является сейсмическая инверсия.

На завершающем этапе технологии найденный оператор инверсии применяется ко всем сейсмическим данным. Результативный прогнозный разрез импеданса представлен на рис. 2, в. Для контроля качества результатов сейсмической инверсии дополнительно получено синтетическое волновое поле (рис. 2, г) с использованием разреза распределения импеданса и элементарного сигнала, т. е. решена прямая задача в пределах исследуемого интервала.

Анализ результатов. Достаточно высокая степень совпадения наблюдаемого и синтетического волновых полей – несколько неожиданный результат с учетом качества исходных сейсмических данных. Такого совпадения можно было ожидать в окрестностях скважины, так как настройка параметров привела к очень высокому коэффициенту корреляции. Однако устойчивость оператора инверсии, опирающегося на модельные представления об изучаемой среде, позволила получить положительный результат на всем анализируемом интервале профиля. Очевидна высокая точность математического решения обратной задачи, хотя неоднозначность, присущая всем обратным задачам, вызывает определенные сомнения. С учетом ярко выраженной производственной направленности технологии инверсии наиболее реальным способом борьбы с неоднозначностью решения наряду с тщательным подходом к выбору модели среды (в комплексе с данными ГИС) является повышение качества и разрешенности исходных сейсмических материалов. Кроме того, необходима специфическая обработка информации, направленная на повышение разрешенности, соотношения сигнал/помеха и сохранение истинных амплитуд сейсмической записи.

Фактически речь идет о получении регулярного решения обратной задачи в вариационной ее постановке путем минимизации сглаживающего функционала [9]:

$$F_{\alpha}(z) = \rho_{\nu}^2(Az, \tilde{u}) + \alpha \Omega(z),$$

представляющего собой сумму функционала невязки $\rho_{\nu}^2(Az, \tilde{u})$ и стабилизатора $\Omega(z)$. Здесь z – множество моделей; \tilde{u} – измеренное поле; A – оператор решения прямой задачи; α – параметр регуляризации. В качестве стабилизатора выступает представление о предполагаемой степени “тонкостойкости” и геометрии среды.

Если исходное волновое поле адекватно отражает истинное распределение импеданса в среде, то полученный прогнозный разрез импеданса является ценной геологической информацией. Если же исходный разрез – это результат несоблюдения полевой технологии, нерешенных проблем обработки и интерпретации, то результат инверсии очень далек от истины.

Сейсмическая инверсия по профилю 128/4/87 и 1D моделирование показали, что разрешенность сейсмической записи находится на грани допустимого. Положительная фаза, соответствующая кровле плиты мощностью около 70 м, и отрицательная, соответствующая подошве, следуют практически без промежутка (см. рис. 5, а). Тем не менее на инверсионном разрезе карбонатная плита отражена достаточно рельефно (сине-фиолетовый пласт повышенного импеданса), дизъюнктивная тектоника – очень убедительна, хотя начальная модель распределения импеданса была пликативной.

Маломощные пласты В-21 и В-22, четко выделяемые на каротажных кривых, вообще не проявляются ни на временном разрезе, ни на разрезе импеданса. Несколько более мощный пласт В-20 прослеживается спорадически и, в основном, до нарушенной зоны.

Необходимо отметить, что кроме карбонатной плиты на прогнозном разрезе импеданса на уровне 3,0 и 3,075 с дополнительно выделяются два пласта повышенного импеданса, которые четко опознаются до и после зоны развития разрывной тектоники. На мигрированном временном разрезе их отождествление практически невозможно. При необходимости пласты можно стратифицировать, если “закрывать глаза” на некорректность такой процедуры по одному прогнозному разрезе импеданса.

В целом разрез импеданса выглядит более геологически обоснованным, чем исходное волновое поле, даже с учетом всех недостатков. Не стоит забывать, что результатом инверсии является не волновое поле, а пластовая модель распределения одного из важнейших физических параметров – сейсмического импеданса.

Заключение. В статье рассмотрены практические аспекты получения разрезов импеданса с помощью сейсмической инверсии на примере стандартных сейсмических и каротажных материалов по Липоводолинско-Русановской площади ДДВ. Даже небольшой объем исследований позволил получить достаточно интересные материалы, по-

звolyающие высоко оценить производственные перспективы технологии сейсмической инверсии.

В последнее время за рубежом появилась новая терминология: “обработка, руководимая инверсией” и “интерпретация, руководимая инверсией”. Это также косвенно свидетельствует о том, что технология сейсмической инверсии охватывает все более широкий круг проблем и становится цементирующим звеном современного геофизического производства. Многочисленные исследования уже доказали эффективность инверсии в задачах, связанных с улучшением оценки перспективности коллекторов и усовершенствования прямого обнаружения углеводородов. Внедрение технологии сейсмической инверсии в производственном масштабе – безусловно, первоочередная задача ближайшего будущего.

1. Cook D.A., Sneider W.A. Generalized linear inversion of reflection seismic data // *Geophysics*. – 1983. – **48**. – P. 665–676.
2. Gluck S., Deschizeaux B., Mignot A., Pinson F. Time-lapse impedance inversion of post-stack seismic data // 70th SEG Meeting: Expand. Abstr. – 2000. – P. 1509–1512.

3. Russell B.H., Hampson D.A. A comparison of post-stack seismic inversion methods // *Ann. Mtg. Abstr., Society of Exploration Geophysicists*. – 1991. – P. 876–878.
4. Veeken P.C.H., Rauch M., Gallardo R. et al. Seismic inversion of the Fortuna National 3D survey, Tabasco, Mexico // *First Break*. – 2002. – **20**. – P. 287–294.
5. Latimer R. B., Davison R., Van Riel P. Interpreter's guide to understanding and working with seismic derived acoustic impedance data // *The Leading Edge*. – 2000. – **19**. – P. 242–256.
6. Тищенко А.П., Кузьменко П.М., Жадан А.М. Дослідження неоднозначності виділення колекторів за амплітудними характеристиками хвильового поля // *Геоінформатика*. – 2009. – № 1. – С. 54–61.
7. Veeken P.C.H., Silva M.D. Seismic inversion methods and some of their constraints // *First Break*. – 2004. – **22**. – P. 47–70.
8. Gardner G.H.F., Gardner L.W., Gregory A.R. Formation velocity and density – The diagnostic basics for strati-graphic traps // *Geophysics*. – 1974. – **39**. – P. 770–780.
9. Тихонов А.Г., Арсенин В.Я. Методы решения некорректных задач. – М.: Наука, 1986. – 324 с.

Поступила в редакцию 31.08.2009 г.

Е.М. Бородулин, В.П. Солдатенко

ОПРОБОВАНИЕ СЕЙСМИЧЕСКОЙ ИНВЕРСИИ ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ГЕОЛОГИЧЕСКОГО РАЗРЕЗА (НА ПРИМЕРЕ ЛИПОВОДОЛИНСКО-РУСАНОВСКОЙ ПЛОЩАДИ ДДВ)

Рассмотрены практические аспекты получения разрезов импеданса с помощью сейсмической инверсии с использованием стандартных сейсмических и каротажных данных. Объект исследования – продуктивная толща геологического разреза в интервале визейской карбонатной плиты. Основное внимание уделено методическим аспектам технологии инверсии, построению разрезов импеданса и анализу результатов. Полученные материалы позволяют высоко оценить практические перспективы технологии сейсмической инверсии.

Ключевые слова: сейсмическая инверсия, акустический импеданс, карбонатная плита, сейсмический импульс.

Є.М. Бородулін, В.П. Солдатенко

ДОСЛІДЖЕННЯ СЕЙСМІЧНОЇ ІНВЕРСІЇ ДЛЯ ПРОГНОЗУВАННЯ ФІЗИЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ГЕОЛОГІЧНОГО РОЗРІЗУ (НА ПРИКЛАДІ ЛІПОВОДОЛІНСЬКО-РУСАНІВСЬКОЇ ПЛОЩІ ДДЗ)

Розглянуто практичні аспекти отримання розрізів імпедансу за допомогою сейсмічної інверсії з використанням стандартних сейсмічних і каротажних даних. Об'єктом дослідження є продуктивна товща геологічного розрізу в інтервалі візейської карбонатної плити. Основну увагу приділено методичним аспектам технології інверсії, побудові розрізів імпедансу та аналізу результатів. Отримані матеріали дають змогу високо оцінити практичні перспективи технології сейсмічної інверсії.

Ключові слова: сейсмічна інверсія, акустичний імпеданс, карбонатна плита, сейсмічний імпульс.