



ТЕСТИРОВАНИЕ АЛГОРИТМОВ ОБРАБОТКИ СЕЙСМИЧЕСКИХ ДАННЫХ НА РЕЗУЛЬТАТАХ ЛАБОРАТОРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Т.А. Петроченко³, А.Ю. Задоев^{1,2}, А.А. Дучков^{1,2,3}, Г.М. Митрофанов^{1,2,3}

¹*Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН,
630090, Новосибирск, просп. Акад. Коптюга, 3, Россия,*

²*Новосибирский государственный университет, 630090, Новосибирск, ул. Пирогова, 1, Россия,*

³*Новосибирский государственный технический университет, 630073, г. Новосибирск, пр-т К. Маркса, 20, Россия
e-mail: MitrofanovGM@ipgg.sbras.ru*

В данной работе рассматривается пример использования физического моделирования для получения сейсмических данных, подобных тем, которые регистрируются во время полевых съемок. Показано, что особенности данных близки к тем, что наблюдаются в реальном эксперименте. Это служит обоснованием возможности тестирования методов обработки, используемых в практике сейсморазведки на данных лабораторного моделирования сейсмических съемок. В качестве примера в работе приводятся результаты типовой обработки набора модельных данных по методике МОВ ОГТ с получением итогового сейсмического разреза, демонстрирующего все структурные особенности используемой модели среды.

Физическое моделирование, сейсморазведка, обработка данных сейсморазведки

TESTING PROCESSING ALGORITHMS FOR SEISMIC DATA FROM LABORATORY MODELING

T.A. Petrochenko³, A.Yu. Zadoev^{1,2}, A.A. Duchkov^{1,2,3}, G.M. Mitrofanov^{1,2,3}

¹*Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, Koptug Ave., 3, Novosibirsk, 630090, Russia,*

²*Novosibirsk State University, Pirogova Str., 1, Novosibirsk, 630090, Russia,*

³*Novosibirsk State Technical University, K. Marks Ave., 20, Novosibirsk, 630073, Russia,
e-mail: MitrofanovGM@ipgg.sbras.ru*

In this paper, we consider an example of obtaining data similar to seismic surveys in the process of conducting physical modeling. It is shown that the features of the data are close to those observed in a real experiment. This is proof of the possibility of testing the processing methods used in the practice of seismic exploration on the data of laboratory modeling of seismic surveys. In particular, the application of a certain set of processing procedures for the considered data related to the simulated environmental object showed that the resulting time sections contain all the inherent structural features of the model.

Physical modeling, seismic exploration, seismic processing

ВВЕДЕНИЕ

Изучение процессов распространения упругих колебаний в различных средах длительное время осуществлялось путем проведения прямых измерений или посредством выполнения физического

моделирования. Это позволяло изучать материальные объекты и их свойства, а также выявлять закономерности и формулировать законы распространения упругих колебаний в различных средах [Terada, Tsuboi, 1927; Hilterman, 1970]. Полученные законы переводились в математическую форму и в последующем использовались уже для численного моделирования, которое, с развитием вычислительной техники, в итоге вышло на первый план в большинстве применений.

Математическое моделирование очень удобно и эффективно, однако полностью ограничено той теоретической моделью, которая лежит в его основе. Часто используемая модель является сильно упрощенной, и это делает математическое моделирование для ряда ситуаций неполным либо некорректным. Физическое же моделирование таких процессов, выполняемое на современном уровне [Wong et al., 2009, Попов и др., 2016], позволяет накопить эталонные знания о зависимостях «среда-поле-отклик» минуя этап математических моделей. Кроме того, физическое моделирование процессов и сред призвано повысить эффективность математических моделей среды и ее взаимодействий с различными, в частности сейсмическими, полями. В работе [Wang et al., 2018] представлена информация о лабораторных автоматических установках физического моделирования сейсморазведки, работающих по всему миру. Эти установки обеспечивают выполнение физического моделирования сейсмических процессов для различных сложнопостроенных моделей сред, в частности, трещиноватых и анизотропных. Примерами таких работ являются [Wang et al., 2018; Попов и др., 2019; Dugarov et al., 2022].

В представленной работе мы показываем результаты 2D профильной съемки на модели, содержащей структурную неоднородность. Материал обрабатывался с использованием типовых процедур обработки наземных данных. На результирующем временном разрезе выделяются все структурные неоднородности, заложенные в модель. Таким образом, может быть сделан вывод о том, что регистрируемое нами волновое поле содержит информацию о модельной среде. Такая информация может быть нами выделена и интерпретирована. Одновременно выполняется решение задачи о качестве выделения информации, а при наличии нескольких альтернативных алгоритмов (процедур) выполняется их сравнение.

ОБЩЕЕ ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

Лабораторное моделирование сейсморазведочных работ, проводилось на полностью автоматизированной установке, находящейся в научно-образовательном центре Газпромнефть-НГУ (НОЦ НГУ). Общий вид установки показан на рис. 1, а.

В качестве источников и приемников звуковых волн в проводимых экспериментах выступают ультразвуковые пьезоэлектрические преобразователи продольных волн (рис. 1, б). Резонансная частота преобразователей составляет примерно 660 кГц. Возбуждение ультразвуковых волн осуществляется генератором NI PXI-5421, который позволяет подавать на пьезокерамический излучатель сигналы произвольной формы. Используется усилитель, повышающий амплитуду сигнала до 50 В. Регистрация акустического сигнала осуществляется с помощью осциллографа NI PXIe-5122.

На рисунке 2 показаны фрагменты записей, полученных на установке при проведении испытаний на повторяемость регистрируемого сигнала. Испытания проводились на поверхности листа оргстекла толщиной 5 см, расстояние источник–приемник составляло 5 см. Изображенные сигналы являлись отраженными от нижней границы оргстекла. При формировании *seg-u* использовался масштабирующий коэффициент по времени 10^4 .

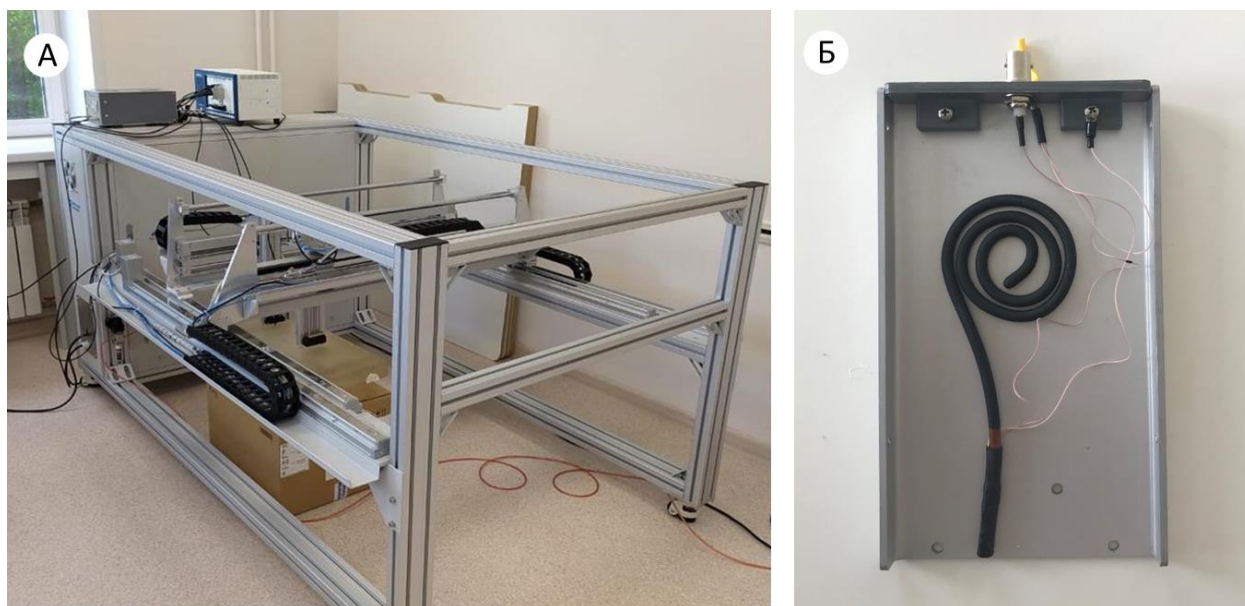


Рис. 1. А – установки для физического моделирования волновых процессов в НГУ; Б – ультразвуковой датчик

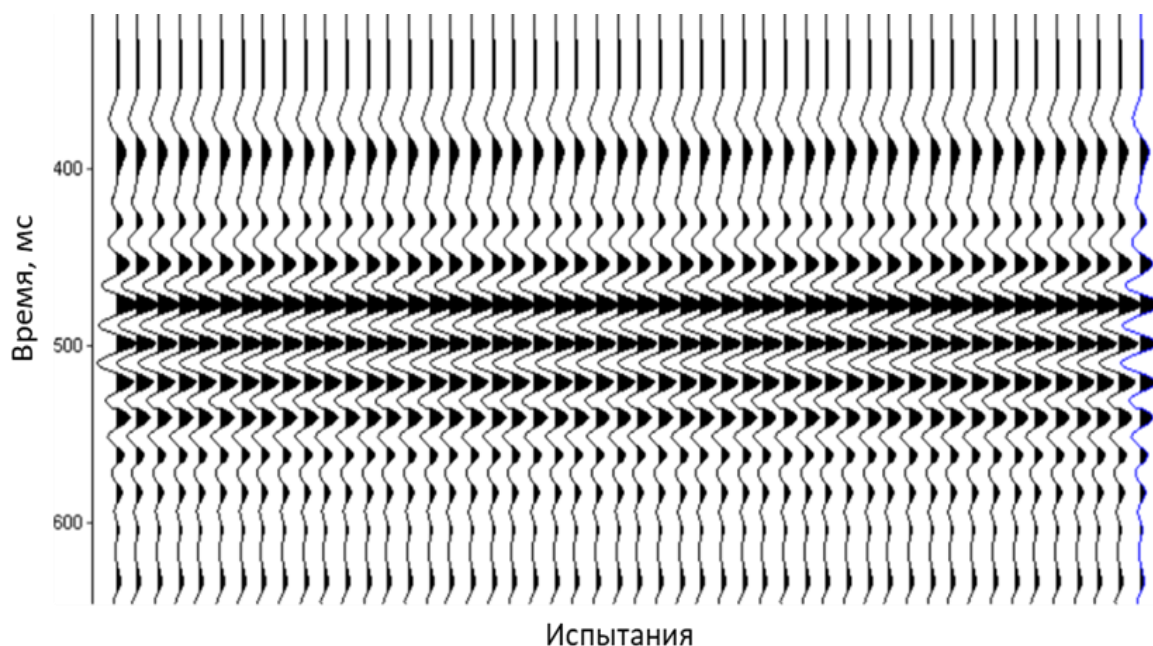


Рис. 2. Пример записи испытаний на повторение формы сигнала

Система позиционирования состоит из сервоприводов, осуществляющих перемещение источников и приемников ультразвуковых волн в горизонтальной плоскости. После прихода в нужные координаты с помощью пневмоклапанов осуществляется спуск датчиков на поверхность модели. Давление в пневмосистеме, влияющее на прижим датчиков и, соответственно, на амплитуды получаемых сигналов, поддерживается постоянным в течении всего эксперимента. Для смягчения удара датчиков о поверхность модели при их опускании к корпусам датчиков присоединены демпферы из пенополиуретана. Передвижение датчиков, генерация и прием акустических сигналов осуществляется с помощью модулей National Instruments. Платы расположены в крейте NI PXI Express.

Система управления установкой, созданная одним из авторов этой работы, является полностью автоматизированной и позволяет проводить съемку без участия человека. Программное обеспечение

написано в среде разработки LabWindows/СVI. Данные, получаемые в ходе эксперимента, изначально имеют формат ТХТ. Для чтения файлов в программах обработки геофизических данных на языке Python был написан скрипт, переводящий данные формата ТХТ в формат SEG-Y.

Погрешность позиционирования датчиков на модели определена как 0.06 мм, что в соответствии с выбранным нами коэффициентом пропорциональности 10^4 составит 60 см в масштабе реальных полевых работ.

Максимальные размеры модели, которую можно исследовать с помощью установки, составляет: длина 1.2 м, ширина 0.8 м и высота 0.5 м. Это соответствует модели среды с размерами: 12х8х5 км, если масштабирующий коэффициент эксперимента выбрать равным 10^{-4} .

Выбор коэффициента пропорциональности.

Для физического моделирования необходимо обеспечить подобие основных параметров:

- схожесть глубин и мощностей слоев по отношению к длине волны исследуемого сигнала;
- схожесть коэффициентов отражения (скачков акустических жесткостей на границах).

При создании физических моделей скорости распространения и плотности в сходных слоях натуры и модели сохраняются. В таком случае константа подобия времени, а значит и частот, зависит только от константы геометрического подобия [Ивакин, 1969].

Таким образом, масштабирующий коэффициент между полевым и лабораторным экспериментом был выбран равным 10^{-4} для расстояний и времен. То есть 1 мм лабораторной модели представляет собой 10 м полевого эксперимента, а 1 мс полевой записи моделируется 10^{-7} секунды записи физического эксперимента. Наше решение не уникально. Многие исследователи проводили свои эксперименты в подобном же масштабе, например [Wang et al., 2018]. Однако встречаются и другие решения, например в работе [Попов, 2016] физическое моделирование было проведено в масштабе $2 \cdot 10^{-4}$.

ОПИСАНИЕ МОДЕЛИ

Для оценки работы установки, качества регистрируемого материала, а также для проверки возможности обработки регистрируемых данных, была создана модель среды. Она представляла собой двухслойную модель: первый слой мощностью 50 мм (500 м) выполнен из пластика, второй слой – плита алюминия, толщиной 60 мм (600 м). Здесь и далее в скобка указывается размеры условной моделируемой среды, полученные пересчетом с коэффициентом подобия.

Для изготовления модели использовался двухкомпонентный заливочный пластик Polycast SoSlow. Твердость по Шору Д при 23 °С (ASTM D 676) – 70 ± 2 единицы. Компоненты смеси – изоцианат и полиол в соотношении 1:1 по объему. Время потери текучести после смешивания компонент при 23 °С – 6 минут. Перед смешиванием компоненты подвергались дегазации в течение 20 минут при давлении близком к 1 Кпа.

В пластике заключается неоднородность в виде клина, выполненного из пескобетона. Мощность слоя бетона в его большей части 26 мм (160 м), в меньшей 11 мм (110 м). Размер пластикового слоя в поперечном (относительно профиля) направлении составил примерно 170 мм (1700 м). Этого достаточно для того, чтобы волны, отраженные от боковых поверхностей модели, имели существенно большие времена пробега, чем однократно отраженные от границ раздела, тем самым, не попадая в целевой временной диапазон записи. На рисунке 4 показана схема полученной модели с указанием линейных размеров.

Клин располагается внутри пластика, его подошва не соприкасается с кровлей подстилающей толщи, мощность прослойки пластика между клином и подстилающей толщей около 3 мм (30 м). На рисунке 3 показана модель в процессе изготовления перед заливкой верхнего слоя пластиком и в готовом варианте.



Рис. 3. Модель в процессе изготовления (слева) и готовый вариант (справа)

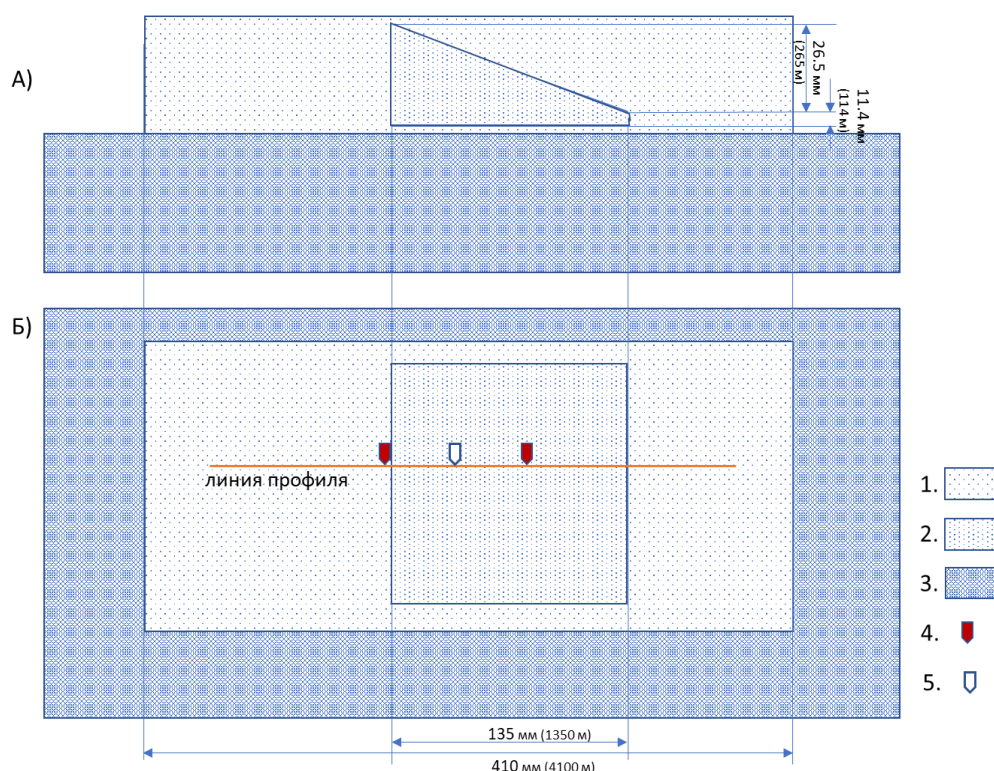


Рис. 4. Схема модели и расположение профиля на поверхности наблюдения. Материалы: 1 – пластик; 2 – пескобетон; 3 – алюминий; 4 – расположение ПВ, рассмотренных на рис. 5; 5 – воздушный пузырь. А – вид сбоку; Б – вид сверху

Во время изготовления модели были допущены некоторые ошибки, в результате чего рельеф модели имеет явный перепад высот, а в верхней части слоя пластика образовался воздушный пузырь, местоположение которого показано на рис. 4. К тому же, мы предполагаем, что в месте образования воздушного пузыря произошло локальное проникновение пластика в толщу пескобетона, то есть граница пластик-бетон не всегда резкая.

Скорость распространения продольных волн в пескобетоне составляет 2100 м/с, плотность бетона 1900 кг/м куб. В пластике скорость V_p составила 1850 м/с, плотность 1040 кг/м куб. Для алюминия V_p 6100 м/с, плотность 2700 кг/м куб. Скорости распространения продольных волн в использованных материалах определялись путем акустического просвечивания физической модели, а так же изготовленных вместе с моделью контрольных образцов. Показатели плотности частично определены в лаборатории, частично взяты из справочных материалов [Кошкин, Ширкевич, 1972; Физическая энциклопедия, 1988].

Модель имеет наклон дневной поверхности. Перепад высот на протяжении профиля составляет 5.85 мм в масштабе эксперимента, то есть 58.5 м в масштабе реального объекта и обработки. При обработке материала финальным уровнем приведения была выбрана высота первой точки наблюдения на профиле, скорость приведения – 1850 м/с – скорость продольных волн в пластике, выполняющем роль верхнего слоя модели.

СИСТЕМА НАБЛЮДЕНИЙ И РЕЗУЛЬТАТЫ СЪЕМКИ

На модели была проведена съемка 2D сейсмического профиля. Параметры системы наблюдений в масштабе эксперимента таковы: шаг ПВ 5 мм (что соответствует 50 м моделируемой среды); шаг ПП 5 мм; количество приемников в регистрирующей косе 61; количество ПВ 61; минимальное удаление 15 мм; максимальная кратность ОГТ 58; шаг дискретизации $1 \cdot 10^{-7}$ с (или 1 мс полевой записи); длина записи 5000 отсчетов; количество накоплений 800.

На рисунке 5 показаны две сейсмограммы ОПВ с наложенными теоретическими годографами. Первая сейсмограмма получена на ПВ 19, что соответствует верхней точке клина, вторая – ПВ 37. На рисунке 4 красным цветом обозначены точки этих ПВ на профиле.

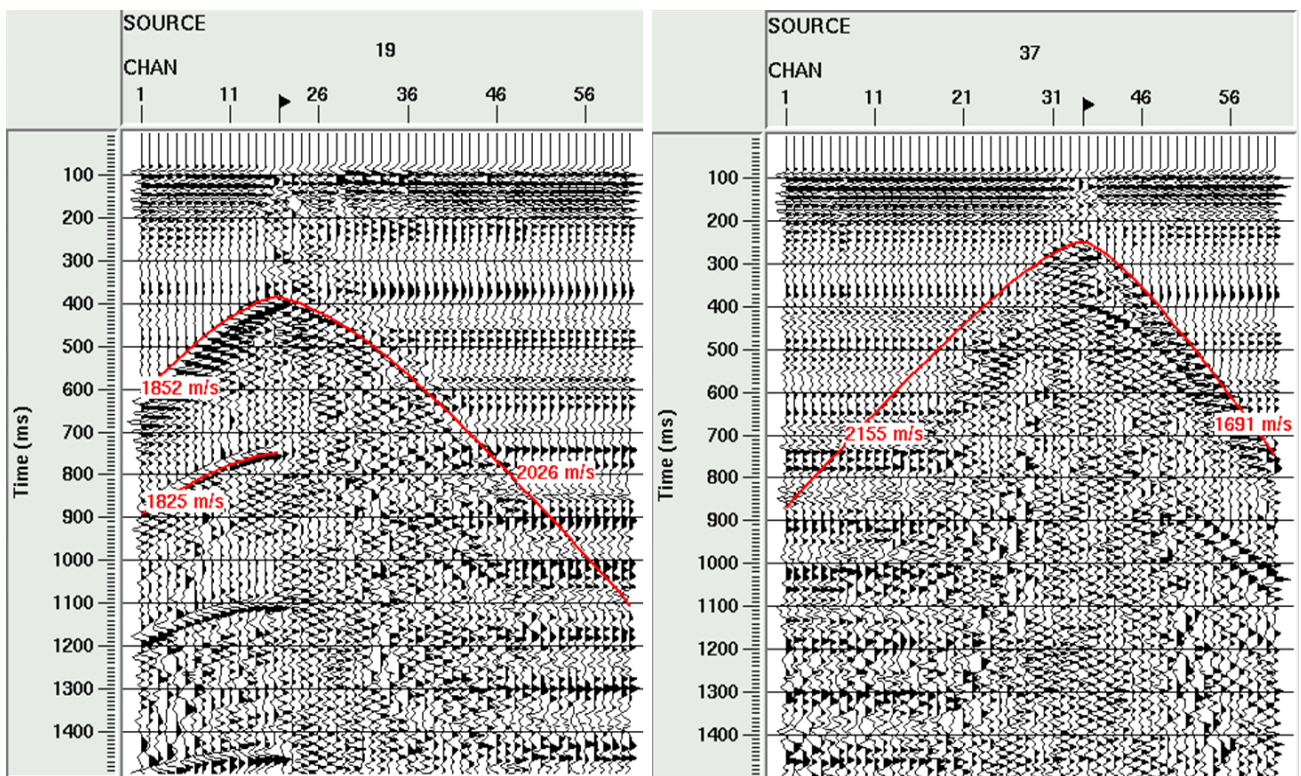


Рис. 5. Сейсмограммы ОПВ с наложенными теоретическими годографами, полученными на модели "Клин"

Рассмотрим сейсмограмму ПВ 19. В сторону уменьшения нумерации каналов записи мы наблюдаем отраженную волну, скорость распространения которой определяется 1852 м/с. Это отраженная от границы пластик/алюминий волна. Ниже мы наблюдаем двукратно отраженную от той же границы волну. По другую сторону от ПВ, в сторону увеличения нумерации каналов записи, мы видим волну, отраженную от той же границы, но с большей скоростью – существенная часть траектории движения волны проходит через пескобетон, скоростные свойства которого выше, чем у пластика.

Вторая сейсмограмма записана на ПВ над серединой клина (см. рис. 4, Б). На картинке выделена отраженная от границы пластик/пескобетон волна. В сторону падения границы кажущаяся скорость отраженной волны уменьшается, в сторону восстания границы – увеличивается [Гурвич, Боганик, 1980].

Отметим некоторые особенности зарегистрированного материала.

Получаемые нами данные осложнены регулярными помехами, вызванными приемным трактом установки. Однако решению кинематической задачи данные явления не мешают. При этом уровень случайных помех гораздо ниже, чем в случае реального полевого материала и при использовании процедур, чувствительных к общему уровню белого шума стоит искусственно его завышать.

Наличие таких жестких акустических границ как пластик–алюминий дает нам многочисленные кратные отражения на зарегистрированных сейсмограммах, что, в свою очередь, позволяет исследовать поведение алгоритмов подавления кратных волн в таких экстремальных условиях.

Так как возбуждение и регистрация сигнала ведется на очень высоких частотах, материалы лабораторного моделирования, в отличие от полевых материалов, не содержат низкоскоростных и низкочастотных помех, вызванных техногенными источниками. Однако при отсутствии в модели зоны малых скоростей, прямые поперечные волны на записях вертикальной компоненты становятся источником линейных помех. При этом прямая продольная волна практически отсутствует на записях.

Данные профильных наблюдений были обработаны по следующему графу:

- компенсация дрейфа нуля;
- учет геометрического расхождения фронта волны, скорость среды принимается равной 1850 м/с, постоянная по профилю;
- полосовая фильтрация в окне 15-70 Гц, дополнительный режекторный фильтр на 15 Гц со склоном 4 Гц;
- подавление кратных волн – фильтрация в области Радона;
- сортировка по ОСТ;
- введение кинематических поправок – скорости суммирования переменные по профилю;
- суммирование;
- фильтрация в FK-области после суммирования;
- временная миграция Кирхгофа после суммирования.

На рисунке 6 показан результат после обработки по указанному графу и первоначальный разрез, полученный по стандартному для такого рода разрезов графу: АРУ, полосовая фильтрация, суммирование с постоянной скоростью, в данном случае 1850 м/с. На всех этапах обработки материал вел себя ожидаемым образом, волновое поле адекватно реагировало на все примененные процедуры. Это дает нам основание считать данные лабораторного моделирования, получаемые на данной

установке, пригодными для тестирования каких-либо алгоритмов кинематической обработки данных сейсморазведки.

На рисунке 7 приведен скоростной разрез, полученный по профилю модели. На этом разрезе мы ожидаемо видим скоростную неоднородность (клин), влияние которой распространяется на всю временную глубину записи.

На результирующем разрезе мы наблюдаем наклонную поверхность клина, на поверхности клина – участок изменения фазы сигнала, ассоциированный нами с воздушным пузырем, образовавшимся при заливке модели. Действительно, граница пластик/воздух имеет отрицательный коэффициент отражения, что приводит к смене фазы отраженной волны. Подобный эффект возникает на границах газовых залежей и был неоднократно описан в литературе, например, [Воскресенский, 2001].

На разрезе скоростей суммирования мы не видим влияния низкоскоростного артефакта, в том числе потому, что линейные размеры низкоскоростной области довольно малы, по сравнению с полной длиной пробега отраженных волн. Соответственно и влияние этой области на времена прихода волн минимальны. Так же немалый усредняющий эффект дает группирование нескольких точек отражения и объединение нескольких сейсмограмм ОГТ, которое применяется при стандартном скоростном анализе.

Граница пластик/алюминий наблюдается на всем протяжении профиля. Таким образом, на разрезе отображаются все структурные особенности, заложенные при построении модели.

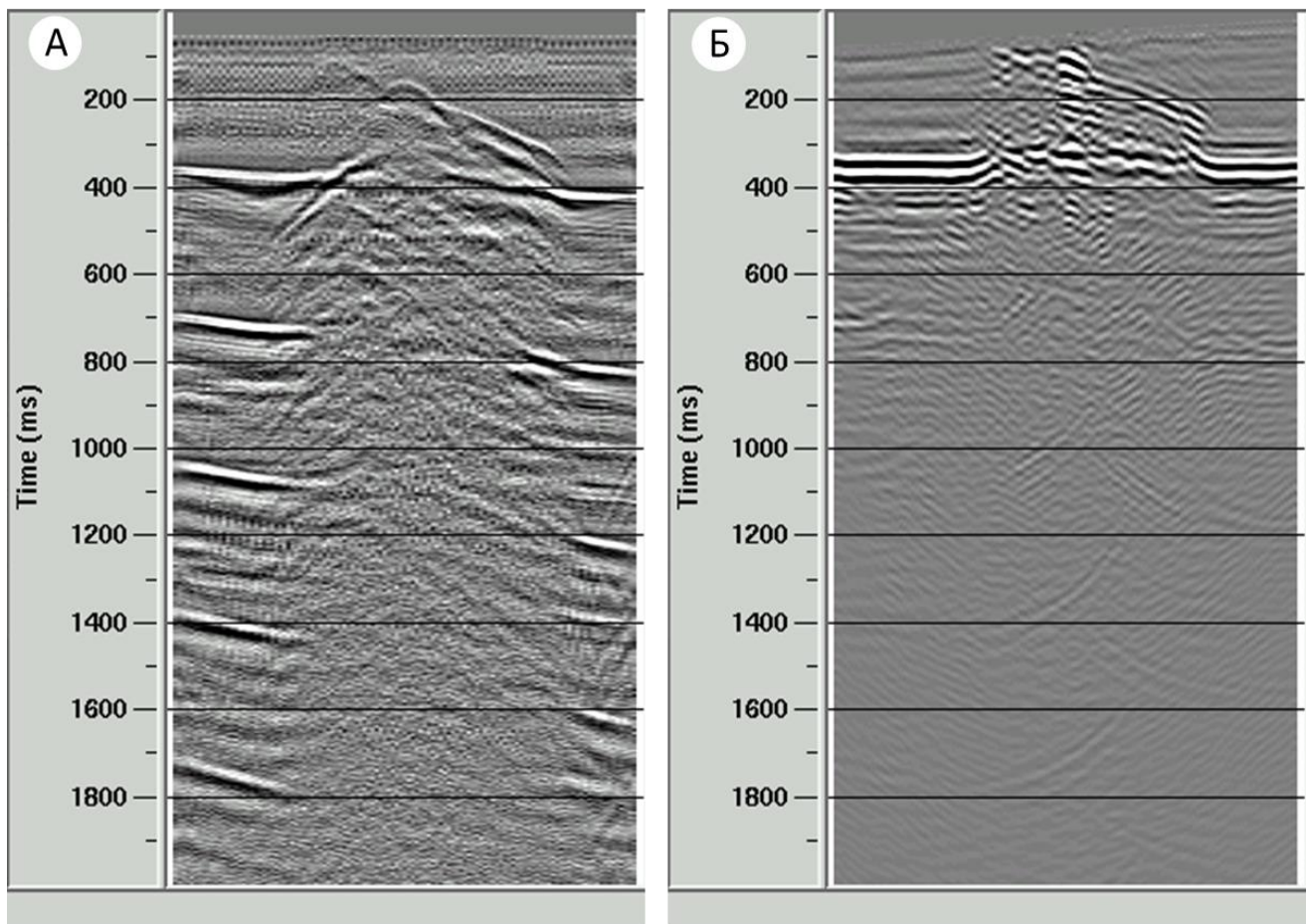


Рис. 6. Временной разрез, полученный по профилю модели. А – разрез с постоянной скоростью без обработки и Б – результат применения графа обработки.

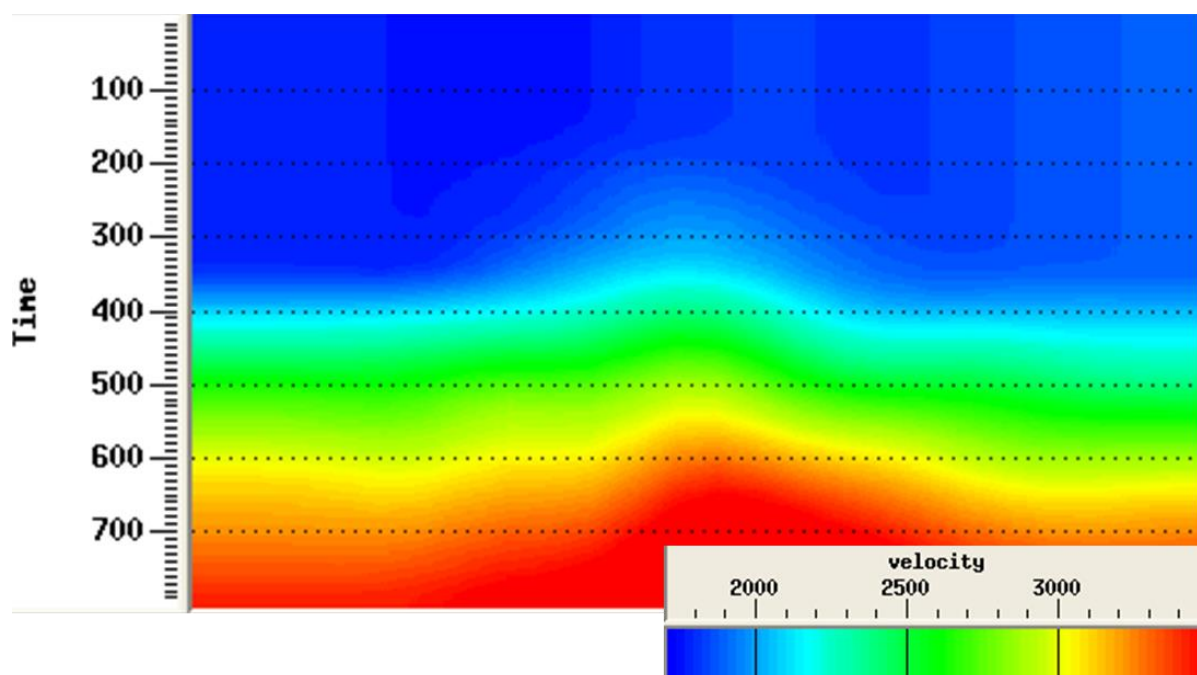


Рис. 7. Разрез скоростей суммирования по профилю

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По поверхности модели среды, содержащей структурную высокоскоростную неоднородность, была проведена съемка, моделирующая профильные наземные сейсморазведочные работы. Результаты физического моделирования находятся в полном соответствии с используемой моделью. В частности, в регистрируемом волновом поле содержится информация об основных элементах моделируемой среды (отраженные волны и пр.). Эта информация может быть нами выделена и проинтерпретирована.

Профильная съемка на поверхности модели и дальнейшее изучение полученного материала показали, что на данном этапе готовности установки, методики съемки, а также технологии изготовления моделей сред, позволяет сделать нам обоснованные выводы о структурных особенностях исследуемой модели. Так же мы можем с уверенностью фиксировать наличие неоднородности границы отражения.

ЛИТЕРАТУРА

- Воскресенский Ю.Н.** Изучение изменений амплитуд сейсмических отражений для поисков и разведки залежей углеводородов. Учебное пособие для ВУЗов. – М.: РГУ нефти и газа, 2001. – 68 с.
- Гурвич И.И., Боганик Г.Н.** Сейсмическая разведка. Учебное пособие для ВУЗов. – М.: Недра, 1980. – 551 с.
- Ивакин Б.Н.** Методы моделирования сейсмических волновых явлений. – М.: Наука, 1969. – 287 с.
- Кошкин Н.И., Ширкевич М.Г.** Справочник по элементарной физике. – М.: Наука, 1972. – 256 с.
- Попов Д.А., Мусин М.В., Половков В.В.** Использование физического моделирования при изучении строения консолидированной земной коры сейсмическими методами: Материалы конференции «Геофизические методы исследования Земли и ее недр». – Санкт-Петербург, 2016. – С. 102–111.
- Попов Д.А., Чичина Т.И., Половков В.В., Корсакова И.О., Пинбо Д., Каштан Б.М., Троян В.Н.** Физическое моделирование распространения упругих колебаний в анизотропных средах для задач сейсморазведки // Вестник Санкт-Петербургского университета. Науки о Земле. – 2019. – № 64 (3). – С. 454–465.

Физическая энциклопедия / Под ред. Прохорова А.М. – М.: Советская энциклопедия, 1988. – Т. 4.

Dugarov G.A., Kolesnikov Y.I., Fedin K.V., Orlov Y.A., Ngomayezwe L. Acoustic measurements on synthetic fractured samples made using FDM 3D printing technology: Processes in GeoMedia. – Springer Verlag, Berlin, 2022. – Vol. 4. – P. 9–15, doi: 10.1007/978-3-030-76328-2_2.

Hilterman F.J. Three-dimensional seismic modeling. – Geophysics. – 1970. – Vol. 35. – P. 1020–1037, doi: 10.1190/1.1440140.

Terada T., Tsuboi C. Experimental studies on elastic waves // Bulletin of the Earthquake Research Institute. – 1927. – Vol. 3. – P. 55–65.

Wang T., Yuan S., Shi P., Shuai D., Luo C., Wang S. AVAZ inversion for fracture weakness based on three-term Rüger equation // Journal of Applied Geophysics. – 2018. – Vol. 162. – P. 184–193, doi: 10.1016/j.jappgeo.2018.12.013.

Wong J., Hall K., Gallant E., Maier R., Bertram M., Lawton D. Seismic physical modeling at the University of Calgary // CSEG Recorder. – 2009. – Vol. 34 (3). – P. 36–43.

REFERENCES

Dugarov G.A., Kolesnikov Y.I., Fedin K.V., Orlov Y.A., Ngomayezwe L. Acoustic measurements on synthetic fractured samples made using FDM 3D printing technology: Processes in GeoMedia. – Springer Verlag, Berlin, 2022. – Vol. 4. – P. 9–15, doi: 10.1007/978-3-030-76328-2_2.

Gurvich I.I., Boganic G.N. Seismic exploration. Textbook for high schools. – Nedra, Moscow, 1980.

Hilterman F.J. Three-dimensional seismic modeling. – Geophysics. – 1970. – Vol. 35. – P. 1020–1037, doi: 10.1190/1.1440140.

Ivakin B.N. Methods for modeling seismic wave phenomena. – Nauka, Moscow, 1969.

Koshkin N.I., Shirkevich M. G., 1972, Handbook of elementary physics. M., Nauka. Edition 5th.

Physical encyclopedia / Ed. Prokhorov A.M. – Soviet Encyclopedia, Moscow, 1988. –Vol. 4.

Popov D.A., Chichinina T.I., Polovkov V.V., Korsakova I.O., Pinbo D., Kashtan B.M., Troyan V.N. A new approach in physical modeling for velocity anisotropy studies // Vestnik of Saint Petersburg University. Earth Sciences. – 2019. – Vol. 64 (3). – P. 454–465.

Popov D.A., Musin M.V., Polovkov V.V. Seismic physical modeling for consolidated crust studies // Geophysical methods of survey the Earth and its subsoil. – St. Petersburg, 2016. – P. 102–111.

Terada T., Tsuboi C. Experimental studies on elastic waves // Bulletin of the Earthquake Research Institute. – 1927. – Vol. 3. – P. 55–65.

Voskresenskiy Y.N. Study of changes in the amplitudes of seismic reflections for prospecting and exploration of hydrocarbon deposits. Textbook for high schools. – Russian State University of Oil and Gas, Moscow, 2001.

Wang T., Yuan S., Shi P., Shuai D., Luo C., Wang S. AVAZ inversion for fracture weakness based on three-term Rüger equation // Journal of Applied Geophysics. – 2018. – Vol. 162. – P. 184–193, doi: 10.1016/j.jappgeo.2018.12.013.

Wong J., Hall K., Gallant E., Maier R., Bertram M., Lawton D. Seismic physical modeling at the University of Calgary // CSEG Recorder. – 2009. – Vol. 34 (3). – P. 36–43.

КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

ПЕТРОЧЕНКО Татьяна Анатольевна – аспирант Новосибирского государственного технического университета. Основные научные интересы: обработка сейсмической информации.

ЗАДОЕВ Алексей Юрьевич – инженер лаборатории динамических проблем сейсмики Института нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН. Основные научные интересы: физическое моделирование.

МИТРОФАНОВ Георгий Михайлович – д.ф.-м.н., ведущий научный сотрудник лаборатории динамических проблем сейсмики Института нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН. Основные научные интересы: разработка методов и технологий обработки и интерпретации сейсмических данных, решение обратных задач геофизики.

ДУЧКОВ Антон Альбертович – к.ф.-м.н., заведующий лабораторией динамических проблем сейсмики Института нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН. Основные научные интересы: сейсморазведка, геотермия.

*Статья поступила в редакцию 5 декабря 2022 г.,
принята к публикации 22 декабря 2022 г.*