

Фазовые искажения и временные сдвиги, вызванные сейсмическим затуханием и их применение к привязкам к скважинам. Phase distortion and time shifts due to seismic attenuation and application to well ties

Yeshpal Singh*

Краткое содержание

Сейсмическое затухание – частотно-зависимое явление, которое вызывает уменьшение амплитуды, сокращение полосы пропускания, и изменение фазы распространяющегося сейсмического сигнала с увеличением времени или глубины. Обычной практикой в обработке сейсмических данных является восстановление амплитуд, на основании оценочной кривой экспоненциального затухания, игнорируя все фазовые изменения. Синтетические сейсмограммы для моделей с постоянным коэффициентом добротности Q и переменным во времени Q , полученным по данным ВСП для вертикальной скважины, были построены для иллюстрации затухания амплитуд, фазовых искажений, и нелинейного тренда временных сдвигов, вызванных затуханием. В данной работе не рассматривается поправка за ослабление амплитуд. Были протестированы Q -компенсации фазовых искажений синтетических сейсмограмм и реальных сейсмических данных в точке скважины для того, чтобы посмотреть насколько точно его можно скорректировать за фазовые искажения и переменные во времени сдвиги. Показано, что выбор опорной частоты для ввода Q -поправки за фазу крайне важен для точного ввода поправок. Опорная частота, которая близка к высокочастотной границе амплитудного спектра импульса источника, вносит точную поправку в фазовые искажения.

Введение

Комплексирование данных является ключевым этапом точной интерпретации сейсмических данных и получения характеристик коллектора. Однако необходимо принимать во внимание различие масштабов измерений при подготовке данных к комплексированию. Например, акустические каротажы получают на частоте около 12 кГц с очень малым шагом квантования по глубине (менее чем 0.3 м), тогда как наземные сейсмические данные имеют полосу частот 6-100 Гц и шаг дискретизации 2 или 4 мс. Данные ВСП имеют слегка более высокую полосу частот, чем наземные сейсмические данные, но дискретизируются с более грубым интервалом, чем кривые АК.

Контрольные взрывы ВСП полезны для увязывания сейсмических данных с информацией каротажа скважин. Кривые каротажа

калибруются с сейсмическими данными с помощью ввода поправок за смещение нуля-пункта на основе контрольного сейсмокаротажа в комплексные интервальные времена АК. Однако часто наблюдаются невязки между временами пробега сейсмических волн и комплексными интервальными временами АК (например, Gretener, 1961) при сравнении синтетических сейсмограмм с реальными данными. Наблюдаемые невязки могут вызываться погрешностями измерения самого набора данных либо различием масштабов измерений. White and Simm (2003) описали рекомендуемые нормы при выполнении привязок к скважинам и пояснили как производить измерение качества подгонки и точности. Физически, невязка проявляется в виде временного сдвига, который меняется нелинейно со временем пробега, и в виде изменений в фазовом и амплитудном спектрах сейсмического импульса (e.g., Richard and Brae, 1988). Распространенной практикой является растяжение и

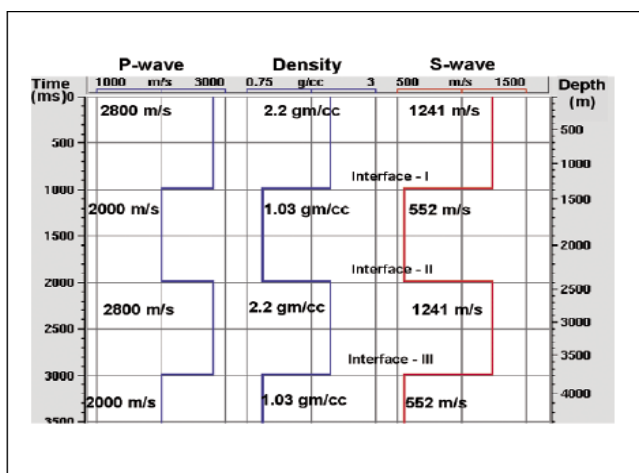


Рисунок 1 Вязкоупругая модель, используемая для построения синтетической сейсмограммы ОСТ.

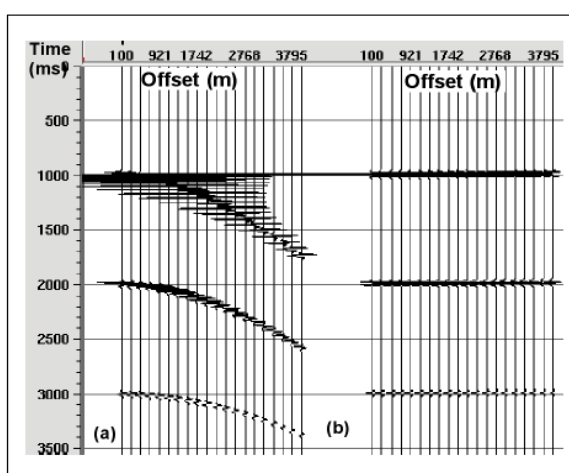


Рисунок 2(а) Подборка синтетических трасс на основе волнового уравнения упругих волн, (б) Сейсмограмма после ввода кинематической поправки.

* Petronas Carigali, Level 16, Tower 2, Petronas Towers, Kuala Lumpur 50088

E-mail: yeshpal_singh@petronas.com.my.

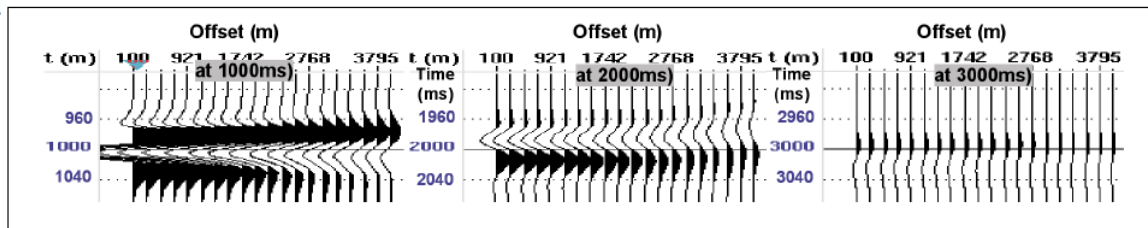


Рисунок 3 Увеличенное изображение синтетической сейсмограммы на Рисунок 2b, на котором указываются как амплитудные так и фазовые изменения со временем.

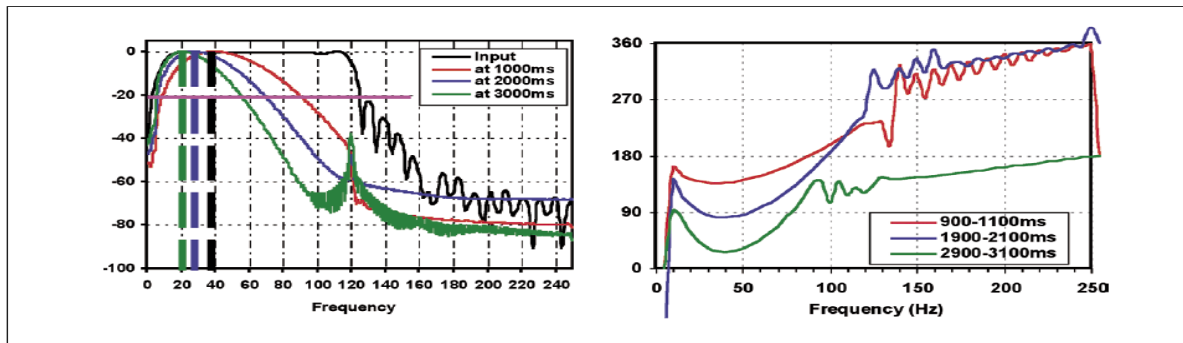


Рисунок 4 Амплитудный и фазовый спектры импульса источника, используемые при моделировании (Рисунок 3) импульсы отраженных волн для всех трех границ для временного окна 200 мс (± 100 мс). Черным показан амплитудный спектр импульса источника, а красным, синим и зеленым – спектры для границ I, II, и III, соответственно. Фаза импульса источника - нулевая. Легендой к графику амплитудного спектра является положение границы в величине двойного времени пробега. Легендой к графику фазового спектра являются временные окна, используемые для расчета амплитудного и фазового спектра.

сжатие синтетической сейсмограммы для того, чтобы сделать увязку. Однако технически оправданным является принудительное улучшение привязки таким способом без всякого подтверждающего доказательства. Сжатие и растяжение может указывать на проблему, но оно не является правильным средством: крайне важно понимать физическую причину невязок. В настоящей работе предприняты шаги в данном направлении.

Рассеивающая среда действует как ослабляющий фильтр и вводит амплитудные, фазовые и временные искажения (Stewart et al., 1984). Такие искажения могут быть источником неправильной интерпретации сейсмических данных при обнаружении углеводородов. Неэластичность и многократное рассеяние вызывают дисперсию скорости, которая может быть оценена приблизительно с помощью частотно-зависимого коэффициента добротности Q (Kjartansson, 1979). Точная оценка и поправка за Q помогает комплексировать сейсмическую и скважинную информацию в целях получения свойств коллектора. Целью настоящей работы является понимание влияния затухания на сейсмические наблюдения посредством моделирования, и комплексирование реальных сейсмических данных с данными сейсмокаротажа для оптимальной привязки скважин без сжатия и растяжения.

Упругое моделирование

Модель среды на рисунке 1, состоящая из четырех изотропных слоев, была использована для построения синтетических сейсмограмм до суммирования.

Имеется три границы на 1000 мс, 2000 мс и 3000 мс, которые в дальнейшем будем называть границы I, II, и III. Плотность и скорость различных слоев была выбрана таким образом, чтобы коэффициенты отражения Р-волны были +0.5 или -0.5. Низкая плотность около 1.03 г/см³ может быть нереалистичной, но значения ± 0.5 характеризуют максимальные изменения коэффициентов отражения в среде. Затухание за счет неидеальной упругости моделируется с постоянной Q равной 80 и опорной частотой 90 Гц для того, чтобы не усложнять модель.

Была построена синтетическая сейсмограмма ОСТ без учета кратных волн с использованием алгоритма моделирования на основе волнового уравнения упругих волн с диапазоном входных частот 6-125 Гц и для нулевой фазы. Кратные волны не включаются в расчеты ввиду того, что их интерференция с однократными меняет амплитуду и фазу однократных отражений. Для реальных сейсмических данных, целью обработки является подавление кратных перед использованием поправки Q . Построенная синтетическая сейсмограмма и синтетическая сейсмограмма, с введенной кинематической поправкой приведены на рисунке 2. Функция скорости Р-волны в модели использовалась для расчета кинематических поправок. На рисунке 3 показано влияние ослабления амплитуд и фазовых искажений на сигналы отраженных волн, которое меняется со временем и удалением, для границ I (слева), II (в середине), и III (справа), соответственно. В случае среды без поглощения, границы I, II, и III были бы

представлены минимумом, пиком и минимумом, соответственно (увеличение акустического импеданса соответствует максимуму).

На рисунке 4 показаны амплитудные и фазовые спектры импульса источника и отраженные вейвлеты во временных окнах на рисунке 3 для трассы малых удалений (100 м). Розовая линия, которая отмечает относительное затухание в 20 дБ на оси амплитуд, указывает на срез в области высоких частот ~90 Гц на границе I, ~70 Гц на границе II, и ~55 Гц на границе III, с соответствующими максимумами доминирующей частоты, которые показаны в виде пунктирных вертикальных линий на 40, 30, и 20 Гц, соответственно. Фазовые спектры (Рисунок 4) меняются нелинейно со временем и частотой, что указывает на то, что фазовые искажения являются сложным явлением.

Синяя кривая с залитыми кружочками на рисунке 5 отображает влияние постоянной Q в виде образования временных сдвигов, которые меняются нелинейно со временем пробега. Временные сдвиги оцениваются как разность времен между наблюдаемыми временами прихода минимума (1000 мс), максимума (2000 мс), и минимума (3000 мс) относительно входных времен пробега 1000, 2000, и 3000 мс для отражающих границ только для близких удалений. Влияние рассеяния будет еще сложнее на больших удалениях виду растяжения сейсмических сигналов после введения кинематических поправок и нелинейным приращением времени пробега. Временная задержка величиной 15 мс на 3000 мс приводит к тому, что средняя скорость оценивается в 2520 м с^{-1} вместо 2533 м с^{-1} и большим изменениям в интервальной скорости. Более того, основные сложности геологического строения, такие как фациальная изменчивость, подразумевающая переменную в пространстве Q , вводят еще большие затруднения.

Компенсация Q

Синтетическая сейсмограмма без введенных кинематических поправок использовалась в качестве входной для ввода компенсации Q , и впоследствии применялись кинематические поправки с использованием модели скоростей P -волн. Hargreaves и Calvert (1991), Wang (2002, 2006, 2007), и другие опубликовали процедуры компенсации Q . В настоящей работе используется метод Hargreaves и Calvert (1991) для демонстрации фазовых искажений и переменных во времени задержек.

Значение Q и опорная частота являются двумя важными параметрами для правильной фазовой компенсации. Для изучения эффекта влияния опорной частоты на фазовую поправку в моделировании прямой задачи, было использовано значение Q равное 80. В общем, преобладающая частота данных на интервале коллектора выбирается в качестве опорной частоты, поскольку она соответствует наибольшим амплитудам в данных. Опорная частота не смещается по фазе с помощью компенсации Q . Все другие частоты регулируются относительно этой опорной частоты. Из-за уменьшения полосы частот со временем, крайне трудно выбрать оптимальное значение опорной частоты.

Для понимания роли опорной частоты в поправке за фазу был протестирован полный диапазон от 20 Гц (преобладающая частота на границе III) до 100 Гц (высокочастотный край амплитудного спектра импульса источника). На рисунке 5 показаны переменные во времени сдвиги для трассы малых удалений (100м) после компенсации Q для различных опорных частот. Для каждой опорной частоты наблюдается относительно линейное увеличение временной задержки со временем.

Временные задержки уменьшаются по мере того, как опорная частота приближается к высокочастотному краю амплитудного спектра импульса источника. Они минимальны (близки к нулю) для опорной частоты 90 Гц и становятся временными опережениями на 100 Гц. Можно отметить, что временные задержки после Q -компенсации с различными опорными частотами увеличиваются почти линейно со временем или глубиной по сравнению с нелинейным увеличением во входных данных синтетики.

Были рассчитаны фазовые спектры для всех опорных частот, но для ясности на рисунке 6 изображены только результаты для частот 20 Гц и 100 Гц. Сравнение фазового спектра до (Рисунок 4) и после поправки за фазу (Рисунок 6) указывает на то, что фазовая Q -компенсация с опорной частотой 90 Гц делает фазу нулевой, она и является фазой входного импульса. Фазовые спектры для опорной частоты 20 Гц являются линейными с крутизной, которая соответствует временным сдвигам, вызванным использованием неправильной опорной частоты. Используя опорную частоту 100 Гц, развернутые фазовые спектры близки к нулю для отражений 1000 и 2000 мс, хотя фаза для отражения 3000 мс

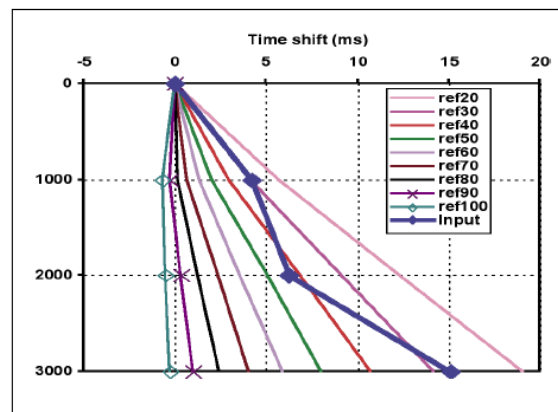


Рисунок 5 Временные сдвиги, наблюдаемые на синтетических данных после ввода фазовой Q компенсации с опорными частотами от 20 Гц до 100 Гц.

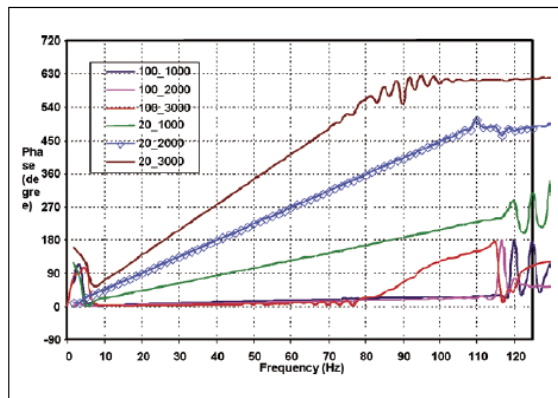


Рисунок 6 Фазовые спектры для всех трех границ после ввода фазовой Q компенсации с опорными частотами 20 Гц и 100 Гц. В легенде, первое значение указывает на опорную частоту, а второе - на глубину до границы в мс.

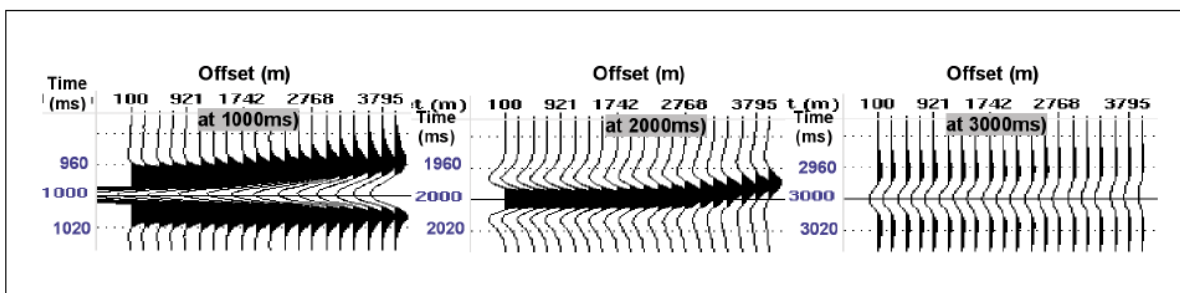


Рисунок 7 Синтетические сейсмограммы после фазовой Q компенсации для опорной частоты 90 Гц на 1000, 2000, и 3000 мс, соответственно.

отклоняется от нуля для частотного диапазона 80-120 Гц. Эти результаты теста указывают на то, что частота среза импульса источника (максимальные частоты) должна использоваться в качестве опорной частоты в целях точной поправки за фазу.

На рисунке 7 показана синтетическая сейсмограмма после ввода фазовой Q -компенсации для опорной частоты 90 Гц. Все три границы для ближних удалений почти не имеют временных сдвигов относительно входной модели. Однако трассы дальних удалений, кажется, избыточно скорректированы, особенно это касается границы II. Для бесшумных синтетических данных, излишняя коррекция может быть вызвана или плохим выбором опорной частоты или влиянием изменения интервальной скорости (от 2800 до 2000 м с⁻¹) на временах пробега для дальних трасс.

Пример с реальными данными

Фазовые искажения и временные сдвиги изучались на вертикальной скважине совместно с данными наземной сейсморазведки и коридорного суммирования ВСП. Сейсмические данные 3D были переобработаны и был построен один выходной набор данных без ввода амплитудной и фазовой коррекции. Постоянное значение Q и переменная во времени функция Q были рассчитаны по данным амплитудного спектра нисходящего поля волн ВСП с помощью метода спектрального отношения (Xu and Stewart, 2006). Спектральное отношение между сигнатурой источника в дальней зоне и обработанными данными на временном интервале 1700-2000 мс использовалось для расчета постоянного значения Q , равного 90. Временное окно 200 мс использовалось для оценки переменной во времени функции Q (Q_{log}). На рисунке 8 показана переменная во времени

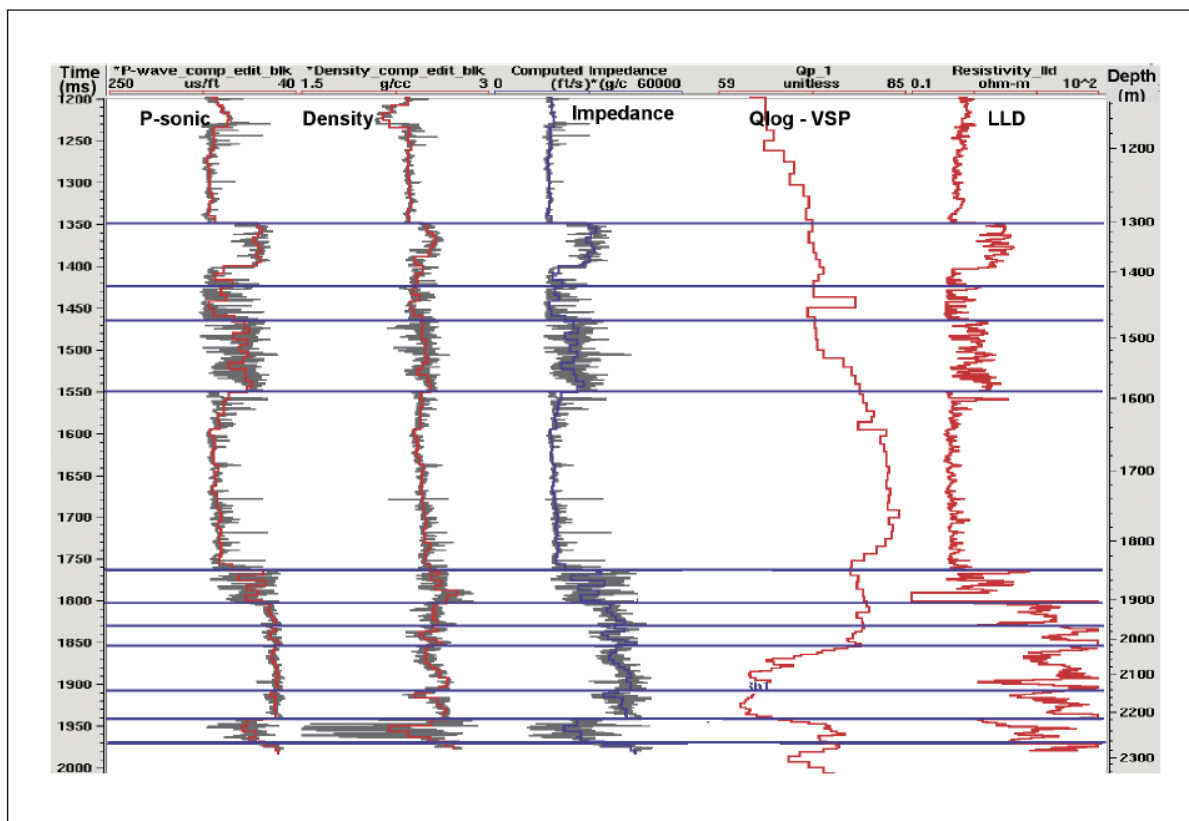


Рисунок 8 Кривые АК на P-волнах, плотностного каротажа, акустического импеданса, Q , и сопротивлений с длинным зондом (LLD) по скважине. Каротажные кривые, показанные серым – исходные кривые, а соответствующие кривые, в виде блоков, использованные для оценки импеданса и построения синтетических сейсмограмм показаны красным.

функция Q вместе с кривыми гамма каротажа, импеданса и сопротивлений с длинным зондом (LLD). Петрофизическая интерпретация и другие геологические данные указывают на то, что интервал коллектора находится в диапазоне 1850-2275 м.

Точность постоянного Q значения и переменной функции Q были оценены с использованием метода White (1992). Спектральная когерентность между спектром источника и зарегистрированным полем нисходящих волн всегда превышала 0.96 для полосы частот 10-80 Гц. Относительная ошибка и стандартное отклонение для Q меняется с изменением времени пробега, величиной Q , полосой частот и когерентностью. Среднее стандартное отклонение и относительная ошибка для временного окна 1350-1975 мс равны 6.3 и 0.11, соответственно. Переменное во времени Q варьирует в диапазоне 60-85 в точке скважины и имеет меньшие значения в коллекторе, чем в вышележащем интервале.

Q-компенсация для синтетических данных

Синтетические сейсмограммы были рассчитаны для случая без убывания, постоянной Q и переменной Q . Полоса сейсмических частот 8-60 Гц на интервале коллектора использовалась в качестве амплитудного спектра нульfazового импульса источника. Синтетические сейсмограммы до и после Q -компенсации показаны на Рисунке 9.

Рисунок 9b – синтетика, построенная по сверточной модели. Рисунок 9c отображает синтетику для упругих волн без убывания. Она была получена по кривой акустического импеданса и контрольного сейсмокаротажа, и является опорной моделью для расчета временных сдвигов, среднеквадратичных погрешностей, и взаимной корреляции. На рисунке 9d показана упругая синтетика с переменным во времени Q , с использованием Q_{log} , построенного по данным ВСП. Поскольку в текущих процедурах калибровки АК используются некомпенсированные времена контрольных взрывов, представляется вероятным, что они уже включают грубую компенсацию за временные сдвиги, вызванные дисперсией. Сравнение Рисунка 9d с Рисунками 9b и 9c показывает временные сдвиги и различие фаз для различных отражающих границ. Чтобы понять причину временных сдвигов, синтетические данные на Рисунке 9d были скомпенсированы за Q с помощью метода компенсации фазы Nargreaves и Calvert (1991) для различных комбинаций Q и опорной частоты, приведенных в таблице 1. На рисунке 9e представлены три панели, скомпенсированные за Q для фазы с постоянным значением Q , равным 90 и опорными частотами 40, 90, и 500 Гц, соответственно. На рисунке 9f показаны

Модель	Q	Опорная частота (Гц)
Пример 1	90	40
Пример 2	90	90
Пример 3	90	500
Пример 4	Q_{log}	40
Пример 5	Q_{log}	90
Пример 6	Q_{log}	500

Таблица 1 Параметры, взятые для ввода Q -поправки за фазу.

три панели, скомпенсированные за Q , только для фазы с переменным значением Q для тех же самых трех опорных частот. Панели на рисунках 9e и 9f для опорной частоты 40 Гц очень похожи на Рисунок 9d. Причиной этого является то, что опорная частота 40 Гц является доминирующей частотой для интервала коллектора.

Временные сдвиги относительно опорного максимума/минимума, соответствующего кровлям основных формаций были рассчитаны для

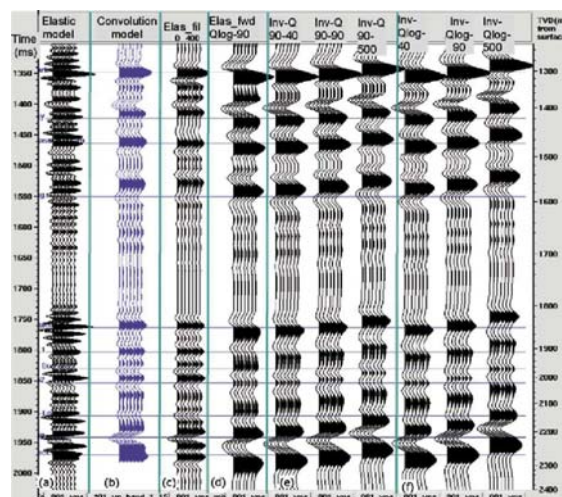


Рисунок 9 Синтетические сейсмограммы в точке скважины, (a) Синтетика для упругих волн для импульса источника 5-100 Гц без затухания, (b) Сверточная синтетика для импульса источника 5-60 Гц. (c) Синтетика в (a) дается после применения фильтра низких частот, (d) Синтетика для упругих волн, смоделированная с использованием переменной во времени функции Q (Q_{log}) и полосы частот 5-60 Гц. (e) Скомпенсированный за Q вариант рисунка (d) с постоянной Q , равной 90 и опорными частотами 40, 90, и 500 Гц. (f) Скомпенсированный за Q вариант рисунка (d) с переменными во времени Q (Q_{log}) и опорными частотами 40, 90, и 500 Гц.

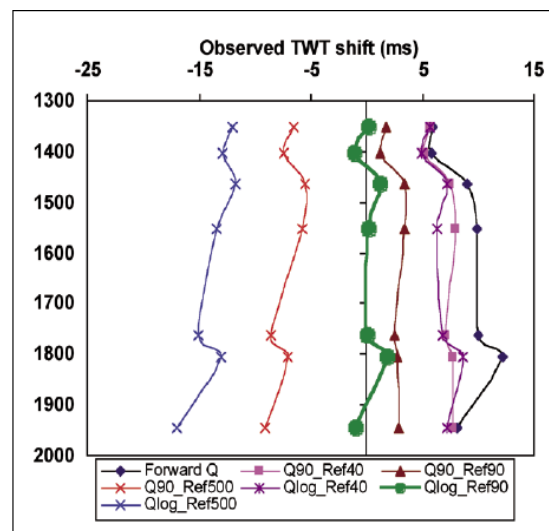


Рисунок 10 Временные сдвиги относительно упругой синтетики без затухания в качестве опорной модели. Первое значение в легенде указывает на Q , а второе значение указывает на опорную частоту в Гц, использованную для Q -компенсации.

Параметры обратного фильтра Q		Синтетическая модель		Сейсмика	
Q	Опорная частота	Взаимная корреляция (%)	Среднеквадр. Ошибка	Взаимная корреляция (%)	Среднеквадр. Ошибка
90	40	30.0	7.05	7.3	9.32
90	90	78.0	2.69	45.0	5.07
90	500	52.0	7.23	54.0	6.27
Qlog	40	42.0	6.79	7.7	9.35
Qlog	90	90.0	1.03	61.11	3.72
Qlog	500	21.7	13.69	7.7	12.17
Коридорное суммирование ВСП				84.0	3.26
Сейсмика без компенсации Q				-20.4	10.02

Таблица 2 Коэффициенты взаимной корреляции и среднеквадратичные ошибки после обратной Q фильтрации реальных сейсмических данных во временном окне 1350-1975 мс. Синтетическая сейсмограмма, используемая для сравнения, была построена без учета затухания.

всех случаев, перечисленных в Таблице 1. Рисунок 10 демонстрирует временные сдвиги для всех шести случаев, перечисленных в Таблице 1. Сдвиги являются максимальными для синтетических данных, в которых нет компенсации Q (черные кривые с закрашенными ромбами). Временные сдвиги для всех основных отражающих границ являются минимальными для переменной во времени функции Q и опорной частоты 90 Гц, которые являются параметрами, используемыми в моделировании прямой задачи. Опорная частота была постоянной во времени и могла быть не оптимальной для всего интервала (1300-2050 мс). Вторым наилучшим набором параметров для компенсации временных сдвигов является постоянное значение Q, равное 90 с опорной частотой 90 Гц. Результаты для опорной частоты 500 Гц являются перекомпенсированными относительно временных сдвигов.

Синтетические сейсмограммы после Q-компенсации для всех этих случаев также были коррелированы с синтетическими данными, построенными без учета затухания. На рисунке 11 представлена корреляция между синтетикой, построенной при помощи скважинного каротажа на временном интервале 1350-1975 мс с обработанными сейсмическими данными после ввода Q-компенсации с использованием переменной во времени функции Q и опорной частоты 90 Гц. Коэффициент взаимной корреляции во временном окне 1350-1975 мс равен 0.90. Это также указывает на то, что для идеального случая (точно такие же параметры прямой и обратной задачи), коэффициент взаимной корреляции будет равен 0.90, а не 1. В таблице 2 обобщаются коэффициенты взаимной корреляции и среднеквадратичные ошибки для всех случаев. Для переменной во времени функции Q и опорной частоты равной 90 Гц, среднеквадратичная ошибка равная 1.03 является минимальной, а коэффициент взаимной корреляции 0.9 - максимальный. Второй удачный вариант относится к тому же постоянному значению Q, равному 90 и той же опорной частоте 90 Гц.

Q-компенсация сейсмических данных в точке положения скважины

Поправка за фазу Q была протестирована на реальных сейсмических данных вблизи скважины. Если посмотреть на рисунок 12, можно увидеть, что коридорное суммирование ВСП (Рисунок 12b) хорошо коррелируется

с синтетикой на основе сверточной модели (Рисунок 12a) и синтетикой на основе упругих представлений без затухания (Рисунок 12c). И напротив, сейсмические данные, полученные с поверхности (Рисунок 12e) хорошо коррелируются с синтетикой на основе упругих представлений, смоделированной с переменным во времени Q (Рисунок 12d). Компенсация за фазу Q данных сейсмики, полученных на поверхности была протестирована на предмет качества - рассчитаны взаимная корреляция и среднеквадратичная ошибка по отношению к данным синтетики на основе упругих представлений без затухания (Рисунок 12c) для всех шести случаев, перечисленных в Таблице 1. На Рисунке 12f показаны сейсмические данные после ввода постоянной компенсации Q за фазу, а на Рисунке 12g представлен результат фазовой компенсации Q с переменным по времени Q. Переменная во времени

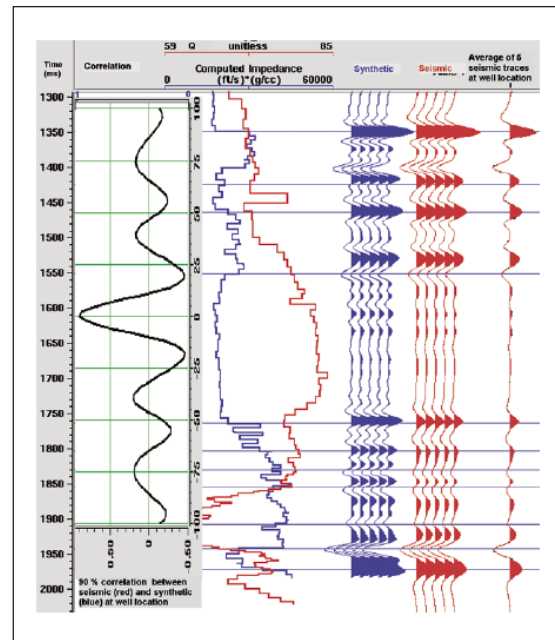


Рисунок 11 Корреляция между синтетической сейсмограммой (синим) без затухания и данными сейсмики, полученными на поверхности (красным), обработанными с фазовой компенсацией Q с использованием переменной во времени Q и опорной частоты 90 Гц.

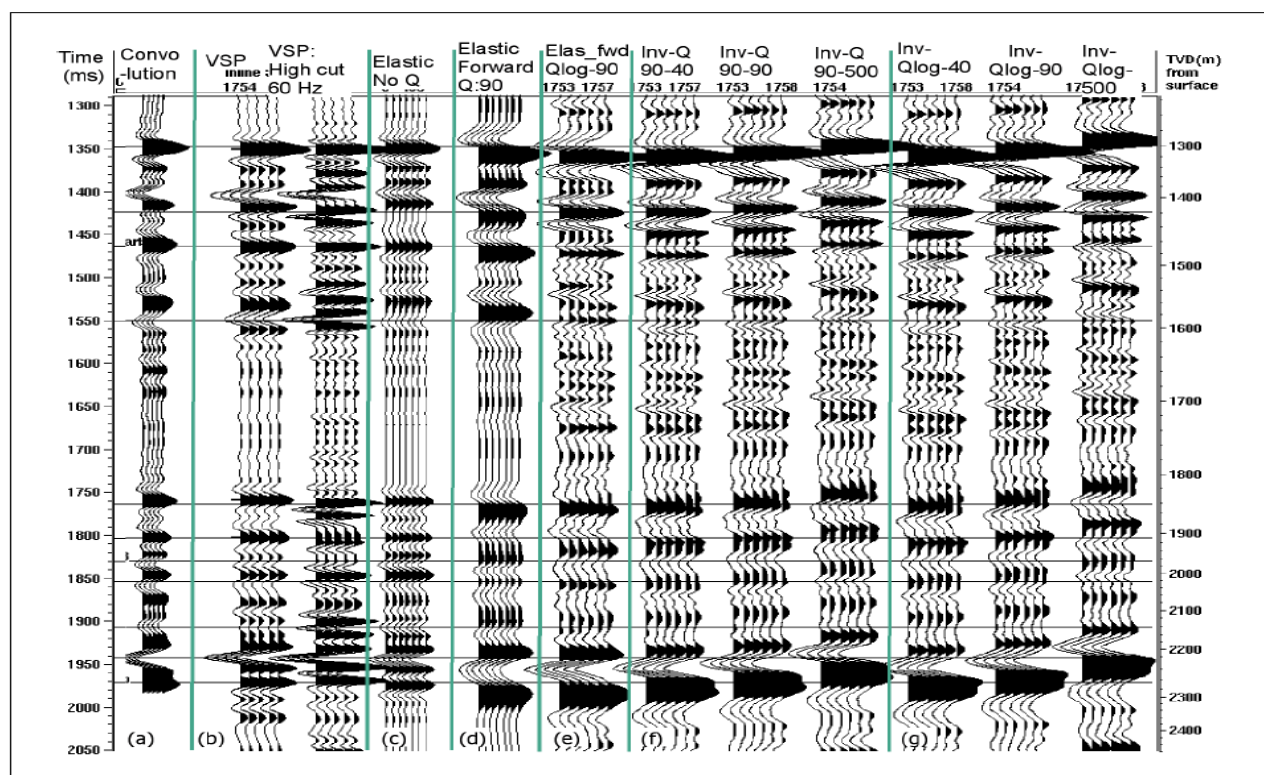
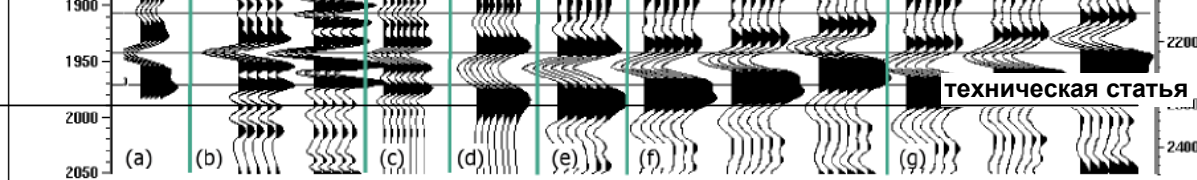


Рисунок 12 Привязка к скважине по данным ВСП и данным сейсмоки, полученными на поверхности, (а) Синтетика на основе сверточной модели трассы без затухания за счет неидеальной упругости, (б) данные коридорного суммирования ВСП с полосовыми фильтрами 5-60 Гц и 5-100 Гц. (с) Синтетика, построенная на основе упругих представлений без затухания, (д) Синтетика, смоделированная на основе упругих представлений, с переменной по времени Q и опорной частотой 90 Гц. (е) Сейсмические данные в точке скважины без Q компенсации, (ф) сейсмические данные с Q -компенсацией с постоянным Q , равным 90 и опорными частотами 40, 90, и 500 Гц. (г) Q -компенсированные сейсмические данные с переменным по времени Q и опорными частотами 40, 90, и 500 Гц, соответственно.

Q -компенсация с опорной частотой 90 Гц приводит к лучшей корреляции с синтетикой на основе свертки (Рисунок 12а) и синтетикой на основе упругих представлений без затухания (Рисунок 12с). Для расчета временных сдвигов, коэффициентов взаимной корреляции и среднеквадратичных погрешностей не применялось сжатие-растяжение.

На рисунке 13 показаны наблюдаемые временные сдвиги для Q -компенсации с различными опорными частотами. Можно отметить, что настоящая попытка представляет собой шаг вперед на пути к получению хорошей привязки сейсмоки к скважине без сжатия и растяжения. Благодаря преимуществам геометрии наблюдения и высокому соотношению сигнал-шум, коридорное суммирование ВСП дает наибольшую корреляцию с наименьшими временными сдвигами и среднеквадратичной ошибкой.

Точность результатов была проанализирована во временном окне 1350-1975 мс. Временные сдвиги для всех отражающих границ (Рисунок 13), среднеквадратичные ошибки, и коэффициенты взаимной корреляции (Таблица 2) указывают на то, что переменная во времени функция Q с опорной частотой 90 Гц являются наилучшими параметрами

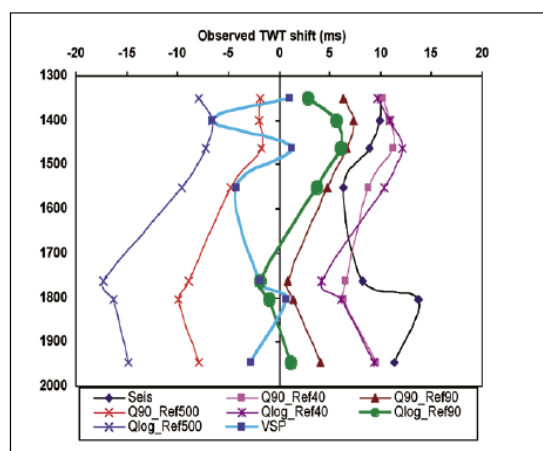


Рисунок 13 Временные сдвиги, относительно синтетических данных на основе упругих представлений без затухания (Рисунок 12с) для реальных сейсмических данных до и после фазовой компенсации Q . Первое значение в легенде - Q , второе значение - опорная частота в Гц, используемая для Q -компенсации.

для точной компенсации переменных по времени временных сдвигов и фазовых искажений в сейсмических данных. Опорная частота является ключевым параметром.

Заключение

Путем моделирования прямой задачи было установлено, что затухание в среде, как для моделей с постоянным Q , так и с переменным во времени Q , вводит нелинейные временные сдвиги и фазовые искажения. Тестирование параметров на предмет фазовой Q -компенсации показано, что выбор опорной частоты крайне важен для правильной поправки за временные сдвиги и фазовые искажения. Для теста на реальных сейсмических данных, величина Q -компенсации за фазу с переменным Q и опорной частотой 90 Гц приводят к лучшей привязке скважины к сейсмическим данным на поверхности, ВСП и синтетическим сейсмограммам без всякого растяжения и сжатия.

Благодарности

Я благодарен Roy White за его конструктивный отзыв и предложения по улучшению рукописи.

Литература

Gretener, P.E.E [1961] An analysis of the observed time discrepancies between continuous and conventional well velocity surveys. *Geophysics*, 26, 1-11.

Hargreaves, N.D. and Calvert, A.J. [1991] Inverse- Q filtering by Fourier transform. *Geophysics*, 56, 591-527.

Kjartansson, E. [1979] Constant Q , wave propagation and attenuation. *Journal of Geophysical Research*, 84, 4737-4748.

Richard, V. and Brae, J. [1988] Wavelet analysis using well-log information. 58th SEG Annual Meeting, Expanded Abstracts, 946-949.

Stewart, R.R., Huddleston, P.D. and Kan, T.K. [1984] Seismic versus sonic velocities: a vertical seismic profiling study. *Geophysics*, 49, 1153-1168.

Xu, C. and Stewart, R.R. [2006] Seismic attenuation (Q) estimation from VSP data and Q_p versus V_p/V_s . 76th SEG Annual Meeting, Expanded Abstracts, 1938-1942.

Wang, Y. [2002] A stable and efficient approach to inverse Q filtering. *Geophysics*, 67, 657-663.

Wang, Y. [2006] Inverse Q -filter for seismic resolution enhancement. *Geophysics*, 71, V51-V60

Wang, Y [2007] Seismic time-frequency spectral decomposition by matching pursuit. *Geophysics*, 71, V13—V20.

White, R.E. [1992] The accuracy of estimation Q from seismic data. *Geophysics*, 57, 1508-1511.

White, R.E. and Simm, R. [2003] Tutorial: Good practice in well ties. *First Break*, 21(10), 75-83.

Received 15 August 2007; accepted 22 November 2007.