

Анализ сечений кажущихся сопротивлений на выборочных разносах АВ показал, что значения КС исследуемой территории меняются в пределах от 30 до 150 Ом·м. На малых разносах ($AB/2=50$ м.), соответствующих эффективной глубине 15 – 20 м, сечение КС характеризует электрические свойства пород в верхней части ТКТ. Сквозная область высоких значений (135-150 Ом·м) в юго-восточной части наблюдается с разноса $AB/2=200$ метров и на последнем разносе прослеживается по горизонтали вдоль всего 8 профиля, что согласуется с глубиной залегания опорного геоэлектрического горизонта (кровли переходной пачки и покровной каменной соли). В северо-западной части рассматриваемого фрагмента наблюдается область пониженного сопротивления, которая распространяется на все глубины. Она может быть связана с наличием зон повышенной трещиноватости, по которым происходит активный водообмен, либо с литологическими особенностями пород слагающих разрез.

Выводы

Результаты электроразведки методом ВЭЗ позволили повысить степень изученности Восточно-Талицкого участка и выделить в северной части зоны пониженных электрических сопротивлений (30-80 Ом·м), приуроченной по глубине к отложениям терригенно-карбонатной и соляно-мергельной толщ, а также верхней соли.

*Работа выполнена в рамках Программы ФНИ, проект № 0422-2019-0146-С-02
(Регистрационный номер темы НИОКТР: АААА-А18-118040690028-5).*

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Петротектонические основы безопасной эксплуатации Верхнекамского месторождения калийно-магниевых солей / под ред. Н.М. Джиноридзе. – СПб; Соликамск, 2000. – 400 с.
2. Колесников В.П. Основы интерпретации электрических зондирований / ГИ УрО РАН. – М.: Науч. мир, 2007. – 247 с.
3. Кудряшов А.И. Верхнекамское месторождение солей / ГИ УрО РАН; [отв. ред. В.И. Раевский]. – Пермь: [Соликам. тип.], 2001. – 429 с.: ил.
4. Степанов Ю.И. О необходимости учета влияния техногенных факторов при истолковании результатов ВЭЗ в условиях ВКМС // Стратегия и процессы освоения георесурсов: сб. науч. тр. Вып. 11 / ГИ УрО РАН. – Пермь, 2013. – С. 213-215.

УДК 550.8.05

DOI:10.7242/echo.2020.1.15

ОСОБЕННОСТИ ВОЛНОВЫХ ПОЛЕЙ ПРИ МАЛОГЛУБИНЫМ И ШАХТНЫМ СЕЙСМИЧЕСКИМ ИССЛЕДОВАНИЯМ

М.В. Тарантин

Горный институт УрО РАН, г. Пермь

Аннотация: Лучевое приближение сейсмики предполагает изменение амплитуд отраженных и проходящих волн в слоистой среде в соответствии с углами их распространения относительно границ. Это вступает в противоречие с принятыми при определении скоростей допущениями о постоянстве искомым на сейсмограммах сигналов. Рассмотрено влияние этих противоречий на суммарный сигнал при некоторых вариантах обработки для случая небольших глубин исследования, когда глубины ожидаемых отражений существенно меньше длины используемой расстановки.

Ключевые слова: сейсмическая разведка, скоростной анализ, отраженные волны, поперечные волны, моделирование.

Скоростной анализ является обязательным этапом обработки сейсмических материалов. Обычно он опирается на карту когерентности получаемых сейсмограмм [1]. При ее вычислении происходит интегрирование волнового поля вдоль параметрически заданной кривой – годографа выделяемой или искомой волны. Предполагается, что в пределах выбранной совокупности трасс форма отраженных сигналов одинаковая, что при верном подборе параметров годографа обеспечивает существенный максимум критерия. Вместе с тем, из общей теории известно, что при отражении упругих волн происходит изменение волнового пакета, и на этом факте построен широко известный анализ вариаций амплитуд – AVO [2], учитывающий изменения амплитуды отраженного сигнала от расстояния “источник-приемник”.

Обычно при начальной обработке материалов предполагаются плоские границы слоев исследуемого пространства. Выражения для коэффициентов отражения упругих волн от плоской границы следуют из анализа системы уравнений и довольно громоздки в общем виде [3], так как учитывают возможность конверсии волн. Лишь в случаях нормального падения, когда тип волны сохраняется, выражения для коэффициентов отражения R и прохождения T принимают известный вид (1) зависимостей от плотностей ρ граничащих сред и скоростей v волн в них. В общем случае, когда угол падения волны на границу раздела отличен от нуля, для вычислений приходится пользоваться комплексными величинами и тригонометрическими функциями, а соответствующие выражения не так просты в анализе.

$$\begin{aligned} R &= (Z_1 - Z_2)/(Z_1 + Z_2) \\ T &= 2Z_1/(Z_1 + Z_2) \\ Z_i &= \rho_i v_i \end{aligned} \quad (1)$$

В сложнопостроенной неоднороднослоистой среде, каковой является геологический разрез, падение упругой волны на возможно границу раздела областей с различными свойствами может породить образование сразу нескольких типов волн, при этом их форма может существенно отличаться от формы исходного пакета. Анализ выражений для амплитуд отраженных волн, используемых в методе МОВ ОГТ при сейсмических исследованиях на ВКМКС [4], показал, что при увеличении угла падения волны на границу раздела амплитуда сигналов может убывать до нуля и менять свой знак. Небольшие изменения амплитуды могут быть нивелированы применением процедуры ее выравнивания по трассам, однако смена знака такому исправлению не поддается. Такое поведение регистрируемых сигналов оказывается критичным при шахтных исследованиях, когда расстояние до потенциально отражающих границ мало по сравнению с длиной расстановки, а соответствующие углы падения волн – велики. При наземных наблюдениях о таких эффектах также необходимо помнить.

При углах падения и отражения, близких к нулевым, в геологических средах форма волны сохраняется и алгоритм построения карты когерентности работает в соответствии с ожиданиями. При приближении углов падения и отражения сигнала к критическим возможны ситуации, когда алгоритм даст “неверные” результаты даже на чистых синтетических данных (рис.1). Как видно, для времени 100 мс ожидаемый максимум когерентности распался на два, равной интенсивности; для времени 240 мс, где амплитуда отражения сохраняет свой знак для всех удалений на сейсмограмме, ошибка выражается лишь во временном смещении границы. Численные значения критических углов зависят от соотношения свойств граничащих пород; для продольных волн в реальных средах они лежат в окрестности 30-40 градусов, для поперечных – еще меньше.

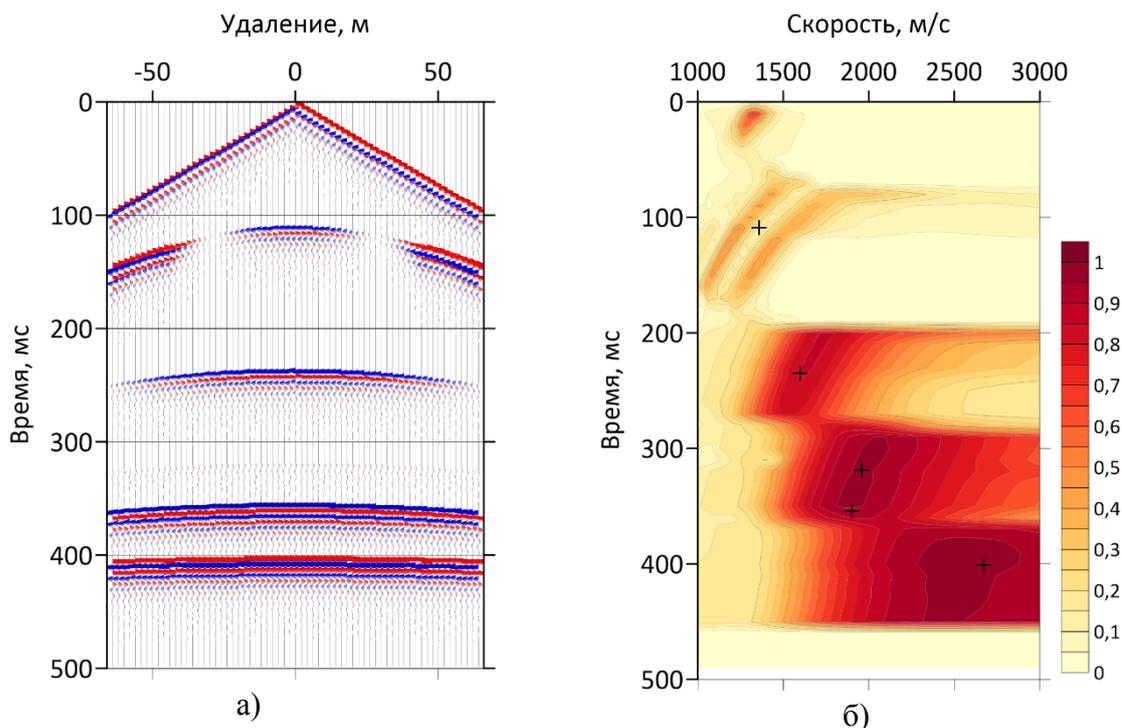


Рис. 1. Модельная сейсмограмма (а) для поперечных (SV) волн и ее карта когерентности (б) с отмеченными параметрами границ (время и скорость выше)

Эти аномалии обусловлены непредусмотренным в алгоритме вычисления когерентности изменением амплитуды или знака отраженного сигнала (рис.2). Соответственно, чем более выражены вариации амплитуды сигнала на сейсмограмме, тем значительнее «искажения» карты когерентности. Для отражения на 100 мс на рис.1 регулировка амплитуд не дает положительного эффекта. Критические углы падения / отражения для геологических сред соответствуют отношению разнос / глубина около двух, что многими исследователями считается граничным значением при скоростном анализе [5]. Если не приближаться к этой области, ограничивая при скоростном анализе возможные углы отражения небольшими величинами, указанных неточностей не возникает. Однако при рассмотрении поперечных волн предельное отношение разнос / глубина оказывается меньше, что может ограничивать количество анализируемых трасс и достоверность получаемых волновых форм.

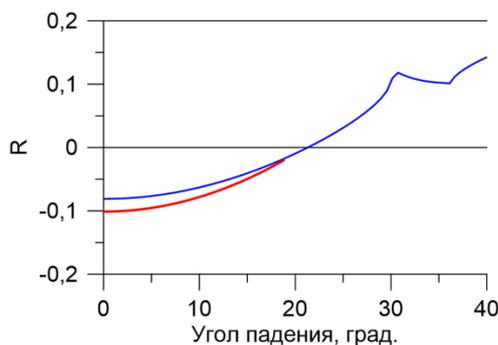


Рис. 2. Зависимость коэффициента отражения упругих поперечных (SV) волн от угла падения для времен 100 и 240 мс на рис.1

Одним из возможных путей обхода такого ограничения можно предполагать использование весовых множителей (или делителей) при вычислениях когерентности, осно-

ванных на прямом моделировании. Однако для получения модельного значения коэффициента отражения необходимо знать или предполагать не только строение верхней части пространства, скорость в которой мы определяем в конкретный момент, но и строение нижней части, которая в этот момент совершенно не известна. Кроме того, важным фактором является плотность среды, которая здесь никак не учитывается, и ее изменение остается неизвестным.

Таким образом, учет возможных амплитудных вариаций сигнала практически невозможен, из-за чего наиболее надежным методом становится ограничение максимальных используемых удалений. Возможно также вычислять когерентность для малых и больших углов падения/отражения по отдельности; это исключает переходную зону в амплитудах сигналов и повышает надежность результатов. Однако, этот подход годится только для материалов с низким уровнем помех, когда целевой сигнал на малых и больших удалениях источник-приемник может быть выделен.

Для адекватной оценки характера возможных вариаций сигнала и выбора стратегии его обработки необходимо прямое моделирование. Моделирование регистрируемых волновых картин должно учитывать все возможные варианты поведения сигналов, в том числе вблизи критических углов. Используемый программный модуль fModel [6] не учитывает влияние углов падения/отражения, полагая их малыми и используя выражения (1), а оперирует лишь временами регистрации сигналов. Для повышения достоверности его результатов до альтернативных продуктов (например, [7, 8]) его следует доработать; это позволит учитывать также обменные волны, возникающие на границах сред с различными свойствами.

Первоначальные сравнения показали, что при расчете картины отраженных волн при наблюдениях с дневной поверхности по алгоритму с учетом угловых вариаций амплитуд изменения в амплитудах продольных волн меньше, чем в амплитудах поперечных. Если использовать выравнивание амплитуд в пределах сейсмограммы, то различия почти полностью исчезают. Отличия результатов моделирования поперечных волн заметнее из-за большей зависимости коэффициентов падения/отражения от угла падения на границу раздела. При исследованиях с дневной поверхности ближайшие контрастные границы оказываются на глубине, сравнимой с половиной наибольшего удаления сейсмоприемника от источника колебаний, что почти всегда обеспечивает докритические значения углов падения/отражения упругих волн и малые соответствующие погрешности при обработке.

При шахтных наблюдениях неоднородность среды, требующая учета, может располагаться на удалениях существенно меньше длины линии наблюдения. Это обеспечивает большее угловое разнообразие и, соответственно, больший шанс получения около или закритических углов падения/отражения сигналов, когда фаза отражения изменяется на противоположную относительно (1). Соответственно, амплитуда таких волн существенно отличается от ожидаемой.

Построение суммотрасс без учета возможности инверсии сигнала аналогично построению карты когерентности способно привести к ложному подавлению волнового пакета и крайне низкой прослеживаемости отражения на временном разрезе. На рис. 3 приведено сравнение суммотрасс по материалам рис.1, полученных различными путями, и трассы «1» из сейсмограммы, которая соответствует нулевому удалению и является эталоном согласно идеологии ввода кинематических поправок. Для такого модельного случая, когда скоростной закон точно известен, использование его для ввода поправок и суммирования трасс дает кривую «2», если получаемую карту когерентности обработать вручную, получим вариант «3», автоматизированные стандартные алгоритмы приводят к кривым «4» и, при ограничении растяжения трассы, «5», использование алгоритма из работы [9] приводит к трассе «6». Как видно, в случае частичной

инверсии отраженного сигнала (время 100 мс на рис.1) даже знание точного скоростного закона не позволяет получить суммотрассу, похожую на эталон; наиболее «точными» представляются трассы «5» и «6». В случае осложненного помехами сейсмического поля вероятна потеря отраженного сигнала на суммарном разрезе.

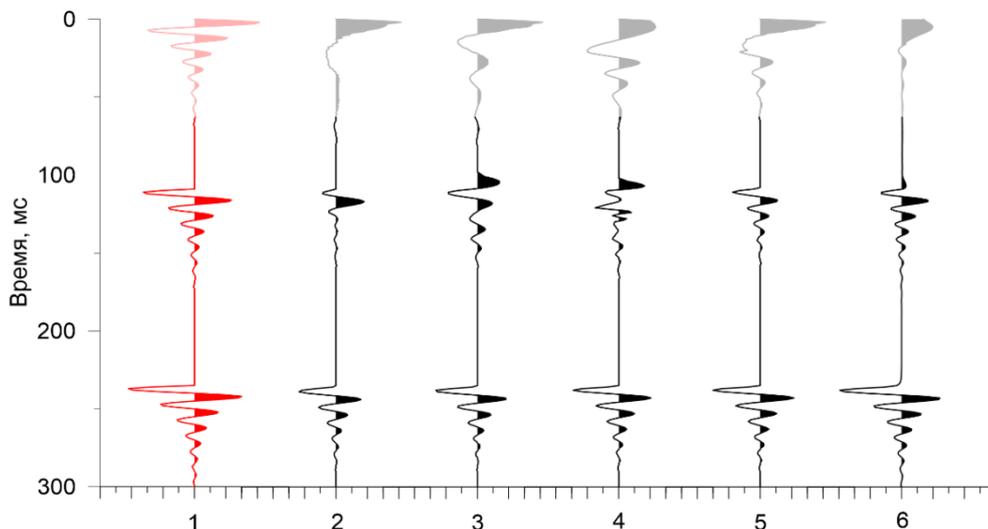


Рис. 3. Результаты построения суммотрасс при различных методах вычисления и ввода кинематических поправок в сигнал рис.1. Пояснения в тексте

Таким образом, известные изменения амплитуд отраженных сейсмических волн с увеличением расстояния «источник-приемник» вступают в неустранимое противоречие с предположениями при построении карт когерентности (или сембланса). Для поперечных волн влияние этих изменений проявляется ярче, чем для продольных, что делает прослеживание годографов отраженных поперечных волн на сейсмограммах ОГТ еще более затрудненным. Неучет зависимостей амплитуд от углов отражений при анализе волновых материалов может приводить к искажению представления о скоростном строении исследуемой толщи на небольших глубинах. Для адекватной оценки материалов представляется целесообразным расширение функционала используемого блока моделирования с учетом сложности ожидаемых волновых полей.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Fomel S. Velocity analysis using AB semblance // *Geophysical Prospecting*. – 2009. – V. 57, № 3. – P. 311-321. DOI: 10.1111/j.1365-2478.2008.00741.x
2. Chopra S., Castagna J.P. Amplitude versus offset / SEG. – 2014. – 304 p.
3. Сейсморазведка: Справ. геофизика / под ред. И.И. Гурвича, В.П. Номоконова. – М.: Недра, 1981 – 464 с.: ил.
4. Санфиоров И.А., Бабкин А.И., Ярославцев А.Г., Никифорова А.И. Сейсморазведочный комплекс информационного сопровождения горных работ в пределах Верхнекамского месторождения калийных солей // *Горн. журн.* – 2018. – № 6. – С. 8-12.
5. Бляс Э.А. Новый взгляд на скорости ОГТ в слоистых латерально-неоднородных средах: аналитическое и численное исследование // *Технологии сейсморазведки*. – 2005. – № 3. – С. 7-25.
6. Пригара А.М. Прогноз строения и свойств горного массива на основе сейсмомоделирования: дис. ... канд. техн. наук: 25.00.16: защищена 28.11.03 / Пригара Андрей Михайлович. – Пермь, 2003. – 140 с.
7. Tesseract: Описание программного обеспечения. – Текст электронный. – URL: <http://www.tesseract-geo.com/documentation/ru/general/ProductsOfTesseractTechnologies-ru.pdf>. (дата обращения 12.03.2020).
8. Гонтаренко И.А., Гуленко В.И. Разработка программных средств для экспресс моделирования сейсмических волновых полей // *Георесурсы*. – 2012. – № 1(43). – С. 15-18.
9. Тарантин М.В., Голярчук Н.А. Квантовомеханический подход к построению временных разрезов при малоглубинных сейсмических исследованиях // *Инженерная геофизика 2020: Материалы 16-й науч.-практ. конф. и выставки, сентябрь 2020* (принято к печати).