

О1 **ОБОСНОВАНИЕ ВЫДЕЛЕНИЯ ПЛАСТОВЫХ ЗОН РАЗВИТИЯ МЕЗОТРЕЩИН ПО АНОМАЛИЯМ АМПЛИТУД РАССЕЯННЫХ ОБМЕННЫХ ВОЛН**

И.Е. Квасов*, В.Б. Левянт**, И.Б. Петров*
(*Московский физико-технический институт, **ОАО «ЦГЭ»)

SUBSTANTIATION OF DISCOVERY OF LAYERED ZONES WITH MESOFRACTURES USING AMPLITUDE ANOMALIES OF SCATTERED CONVERTED WAVES

I.E. Kvasov*, V.B. Leviant**, I.B. Petrov*
(*Moscow Institute of Physics and Technology, **CGE JSC, Moscow)

Аннотация. В работе с использованием сеточно – характеристического метода выполнено численное 2D моделирование сейсмического отклика от пласта, содержащего субвертикальные флюидонасыщенные трещины размером в первые метры – мезотрещины. Исследован состав и характер волнового отклика при регистрации горизонтальной и вертикальной компонент колебаний, а также влияние на него изменений параметров трещиноватости. Установлено, что наиболее интенсивным и устойчивым элементом отклика от зоны мезотрещин является фронт рассеянных обменных волн, регистрируемый на горизонтальной компоненте. Анализом волновых процессов внутри трещиноватого пласта подтверждено аномально высокое затухание при распространении в нем поперечных колебаний. Это объясняет образование обменного фронта только от первых рядов трещин, его независимость от мощности пласта и выявление трещиноватости в пластах малой мощности. В условиях субгоризонтального разреза обоснована возможность картирования зон трещиноватости по прямым волновым откликам от них при 3С регистрации.

Abstract. In this study by means of grid-characteristic method the numerical 2D simulation of seismic response from the reservoir with fluid-filled subvertical fractures up to the first meters (mesofractures) was conducted. The composition and nature of the wave response as well as influence of fracture parameters was investigated with registering both horizontal and vertical recording components. It was found that the most intense and resistant response element from the mesofractured zone is scattered converted wave front recorded on the horizontal component. Analysis of wave processes in fractured reservoir confirmed abnormally high attenuation of transverse vibrations in fractured zone, which in turn explains the formation of the converted front on the first rows of fractures and reservoirs of low thickness only. In a sub-horizontal section the possibility of mapping fractured zones by means of direct wave responses from them was demonstrated.

Введение

Термин «мезотрещина» предполагает, согласно градации Е.А.Козлова (Козлов, 2006), трещины, много меньшие длины сейсмической волны – высотой первые метры и раскрытостью от миллиметра до десятых его долей (сотен микрон). Этот тип трещин широко распространен в плотных породах: карбонатах, глубоко залегающих хрупких песчаниках и кремнистых сланцах. Они визуально наблюдаются в образцах керна. Информацию о мезотрещинах получают при исследовании скважин сканерами (FMI и FMC), а также дипольным акустическим каротажем (X-МАК).

Оценка концентрации (плотности) мезотрещин, их ориентации (направления трещиноватости) и других характеристик – важная задача, стоящая перед сейсмическими исследованиями на этапе детальной разведки. Ее решение до настоящего времени связывалось с использованием анизотропии физических свойств пород, содержащих системы однонаправленных субвертикальных мезотрещин. На базе такого подхода был выполнен большой объем исследований (Hilterman; L. Thomsen; A. Ruger; I. Tsvankin; E. Kozlov; V. Grechka et. al.). На их основе разработан ряд методов обработки и интерпретации широкоазимутальной сейсмической информации с целью оценки анизотропии параметров сейсмических отражений для последующего определения характеристик поля мезотрещин (Helbig, Thomsen, 2005) Этот подход использует косвенную (через свойства волн, генерируемых другими объектами) оценку параметров трещиноватости. Несмотря на широкое применение в практике детальной сейморазведки таких широкоазимутальных съемок 3D, адекватность отображения трещиноватой среды не всегда подтверждается последующими гидродинамическими исследованиями (оценками гидропроводности, проницаемости и т.д.). Это определяло необходимость продолжения поисков решения этой задачи. Перспективным, с учетом результатов численного моделирования откликов от систем макротрещин (Левянт и др., 2012), представлялось исследование возможности использования прямых волновых откликов от пластовых зон развития мезотрещин при многокомпонентной (3С) регистрации сигналов.

1. Особенности методики численного моделирования пластовых зон мезотрещин.

Для изучения характера распространения упругих волн, вызванных прохождением падающего (продольного) волнового фронта через трещиноватую среду, был использован гибридный сеточно-характеристический метод на треугольных неравномерных сетках, разработанный и развиваемый на кафедре информатики Московского физико-технического института под руководством проф. И.Б. Петрова.

Использовалась модель идеального изотропного линейно-упругого материала. Замкнутая система дифференциальных уравнений с частными производными описывает состояние элементарного объема упругого материала в приближении малых деформаций следующими выражениями (Кондауров, Фортов, 2002):

$$\rho \frac{\partial v_x}{\partial t} = \frac{\partial T_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial T_{xy}}{\partial y}, \quad \rho \frac{\partial v_y}{\partial t} = \frac{\partial T_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial T_{yy}}{\partial y},$$

$$\frac{\partial T_{xx}}{\partial t} = (\lambda + 2\mu) \frac{\partial v_x}{\partial x} + \lambda \frac{\partial v_y}{\partial y}, \quad \frac{\partial T_{yy}}{\partial t} = \lambda \frac{\partial v_x}{\partial x} + (\lambda + 2\mu) \frac{\partial v_y}{\partial y}, \quad \frac{\partial T_{xy}}{\partial t} = \mu \frac{\partial v_y}{\partial x} + \mu \frac{\partial v_x}{\partial y},$$

где ρ – средняя плотность среды, λ , μ – параметры Ламе, v_x и v_y – горизонтальная и вертикальная составляющая скорости, T_{xx} , T_{yy} , T_{xy} – напряжения в среде.

Рассмотрены условия контакта массивной породы с заполненными газом или жидкостью трещинами:

1. Постановка граничных условий на поверхности раздела породы и трещины в явном виде позволяет: а) ослабить ограничения на положение и ориентацию неоднородностей; б) учитывать неоднородности с практически нулевым объемом, но конечной площадью поверхности (трещины); в) повысить точность расчета микрон неоднородностей с размерами, сопоставимыми с одной ячейкой сетки.

2. Использование неструктурированной треугольной разностной сетки позволяет описать любую форму неоднородностей (полостей) внутри массивной породы: и каверн, и плоских трещин.

Решения построены на основе сеточно-характеристического метода, относящегося к схемам типа Куранта-Изаковского-Риса для нерегулярных сеток. Поле восстанавливалось не линейной интерполяцией в каждом треугольнике, а по значениям в узлах как непрерывная кусочно-квадратичная функция. Это обеспечивает численному методу свойство монотонности и позволяет избежать нефизических осцилляций решения. Подробное его изложение приведено в работе (Магомедов, 1988). Предложенная методика моделирования оригинальна. Она обеспечивает высокоточный расчет волновых полей в произвольно заданных случайно неоднородных средах.

2. Характеристика моделей с мезотрещиноватыми пластами

Расчеты выполнялись для следующей модели. Протяженность приемной расстановки 6000 м, интервал между пунктами приема 100 м. Вмещающая среда двухслойная: 1-й слой с параметрами $V_p = 4500 \text{ м/с}$; $V_s = 2500 \text{ м/с}$; $\rho = 2500 \text{ кг/м}^3$ и мощностью $H = 2400 \text{ м}$; 2-й слой с параметрами $V_p = 5500 \text{ м/с}$; $V_s = 3000 \text{ м/с}$; $\rho = 2600 \text{ кг/м}^3$ и $H = 1100 \text{ м}$. Граница между слоями формирует горизонтальное отражение, с которым сопоставляется отклик от зоны мезотрещин. Трещиноватый пласт находится в 1-м слое на глубине 2000–2100 м, его мощность (толщина) равна 100 м. Трещиноватая зона в нем расположена посередине базы приема. Ее протяженность по горизонтали – 3000 м. Параметры среды в трещиноватой зоне совпадают с параметрами среды в 1-м слое (рис. 1).

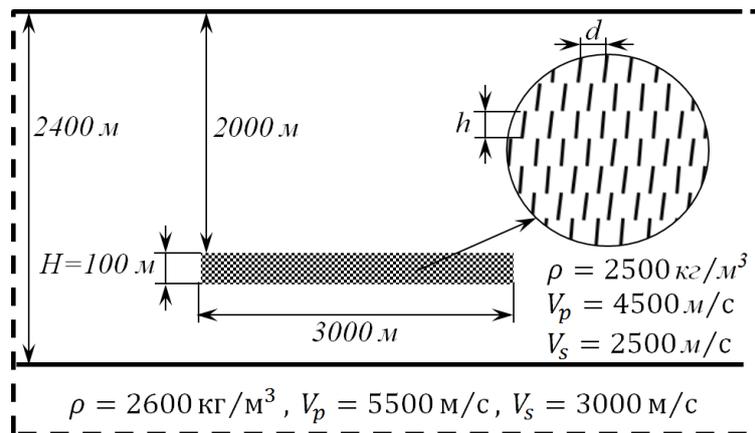


Рис. 1. Модель пластовой зоны мезотрещин в двухслойной среде.

H – толщина (мощность) трещиноватого пласта, d – расстояние между соседними мезотрещинами, h – высота мезотрещины.

Трещины заполняют всю трещиноватую зону равномерными рядами со смещением следующего ряда трещин относительно предыдущего на половину расстояния между трещинами, как это показано в круговом фрагменте рисунка 1. Расстояние между трещинами по горизонтали (в пределах одного ряда трещин) составляет 2 м. В случае неравномерного распределения трещин их высота одинакова для всех рядов трещин. Угол наклона трещин к вертикали принят равным 5 градусам (у всех трещин одинаковый наклон). Высота трещин равна 2 м.

3. Общая характеристика волнового отклика от мезотрещиноватого пласта

Основные элементы волновых откликов от зоны мезотрещин на дневной поверхности зарегистрированы на сейсмограммах горизонтальной X и вертикальной Z компонентах записи (рис. 2).

На сейсмограмме с записью горизонтальной X компоненты регистрируются:

- 1) однофазный интенсивный фронт рассеянных обменных волн ($t = 0,85$ с) (а), образованный падающим плоским фронтом на трещины верхнего ряда. Его горизонтальная часть совпадает с трещиноватой зоной. За ее пределами следятся гиперболы краевых обменных дифрагированных волн (б, в), существенно более слабые.
- 2) аналогичный предыдущему, но заметно слабее, фронт рассеянных обменных волн $t = 1,04$ с (г), образованный распространяющейся снизу отраженной волной (е). Разность времени относительно фронта (а) – $0,180$ с, расчетная – $0,185$ с.
- 3) слабые проявления гипербол одиночных дифрагированных волн от концов трещиноватой зоны (б, в) при прохождении через нее продольных фронтов: падающего ($t = 0,5$ с) и отраженного ($t = 0,67$ с).

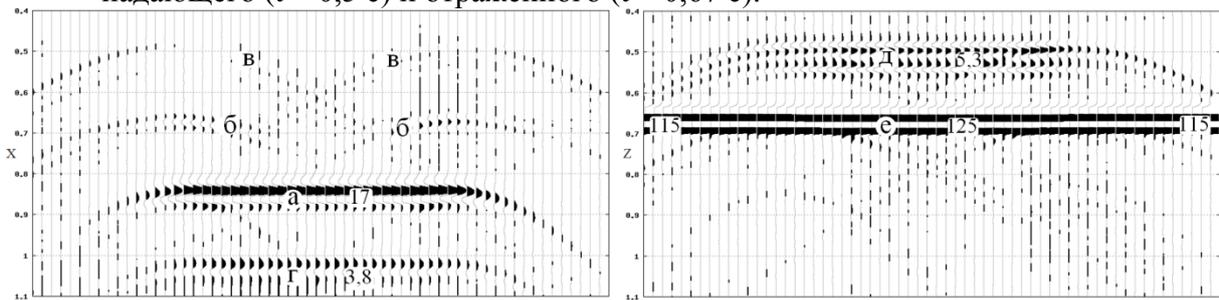


Рис. 2. Характеристика отклика от зоны флюидонасыщенных мезотрещин в пласте.

X – сейсмограмма с записью горизонтальной компоненты.

Z – сейсмограмма с записью вертикальной компоненты.

а – фронт рассеянных обменных волн

б – дифрагированные волны от краев трещиноватой зоны, вызванные отраженной волной, идущей снизу.

в – дифрагированные волны от краев трещиноватой зоны, вызванные падающим фронтом продольных волн.

г – вторичный обменный рассеянный фронт, вызванный отраженной волной, идущей снизу.

д – фронт рассеянных (дифрагированных) продольных волн.

е – волна отраженная от горизонтальной границы.

Цифры на фоне отдельных волн характеризуют оценку их интенсивности.

На сейсмограмме с записью вертикальной Z компоненты регистрируются:

- 1) фронт рассеянных продольных волн (д), сложная 3-4-фазная структура которого связана с генерацией двух фронтов рассеянных (дифрагированных) волн от верхнего кровельного ряда ($t = 0,48$ с) и от нижнего подошвенного ряда ($t = 0,55$ с) мезотрещин;
- 2) отражение от горизонтальной границы 1-го и 2-го слоя $t = 0,67$ с (е).

Для сравнения интенсивности волн использовалась оценка среднего по фронту значения максимальной амплитуды. Согласно расчетам, интенсивность обменного рассеянного фронта (17 у.е.) в три раза выше интенсивности продольного рассеянного фронта (5,3 у.е.). Преобладающая частота фронта обменных волн 20 – 22 Гц, а фронта продольных волн 28 – 30 Гц.

4. Влияние на волновой отклик изменения параметров мезотрещиноватого пласта

Результаты исследования реакции волнового отклика (амплитуд рассеянных и продольных волн) на изменения параметров мезотрещиноватого пласта представлены на рис. 3.

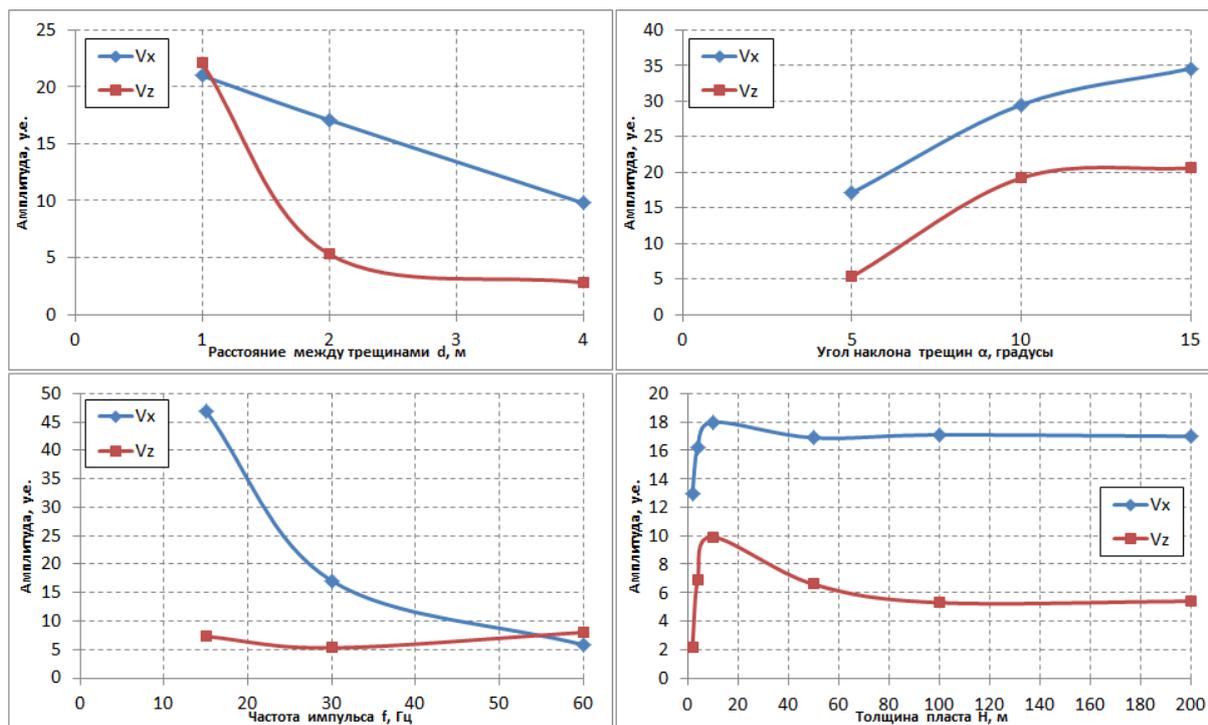


Рис. 3. Влияние на волновой отклик изменения параметров мезотрещиноватого пласта.

Из проведенного анализа можно сделать следующие выводы:

1. Изменение высоты трещин и мощности трещиноватого пласта почти не влияет на волны отклика (исключение – амплитуда сигнала продольного фронта при малых H), тогда как изменение плотности размещения трещин, их наклона и частотного диапазона оказывают на него существенное влияние.
2. Фронт обменных рассеянных волн характеризуется существенно большей стабильностью по сравнению с продольным рассеянным фронтом при рассмотренных изменениях параметров, характеризующих зоны мезотрещин.
3. Интенсивность фронта обменных рассеянных волн практически всегда выше, а во многих случаях в разы больше, чем у продольного рассеянного фронта, при этом ее можно еще увеличить смещением спектра в область низких частот.

Перспективный для выявления пластовых зон развития мезотрещин фронт обменных рассеянных волн может образовываться от трещиноватых пластов любой мощности в том числе и весьма малой, вплоть до первых метров.

5. Исследование механизма распространения волны в пласте с субвертикальными флюидонасыщенными мезотрещинами

Для объяснения характера образования рассеянных фронтов от пластовых зон мезотрещин были выполнены расчеты распространения в них продольных и поперечных колебаний, инициированных падающей плоской продольной волной. Из проведенного анализа следует:

1. Затухание поперечных колебаний при распространении их внутри трещиноватого пласта (вдоль плоскости трещин) весьма значительно. Оно, по-видимому, связано с рассеянием упругой энергии в результате отражения поперечных колебаний от субвертикальных поверхностей мезотрещин.
2. Обменный фронт от трещин подошвенного ряда, движущийся вверх, изначально слабый, затухает в пределах трещиноватого пласта.
3. Регистрируемый на дневной поверхности фронт обменных рассеянных волн образуется только от первых (кровельных) рядов мезотрещин.

Затухание продольных колебаний в аналогичных условиях незначительно, и фронты рассеянных продольных волн образуются от кровельного и от подошвенного ряда мезотрещин.

Выводы

На основе выполненного численного 2D моделирования волновых откликов от зон развития мезотрещин в пластах установлено:

1. Пластовая зона субвертикальных флюидонасыщенных мезотрещин формирует при падении на нее плоской волны продольных колебаний отклик из фронтов рассеянных продольных и обменных волн, образованных интерференцией дифрагированных волн от мезотрещин.
2. Наиболее интенсивным и устойчивым элементом отклика является фронт рассеянных обменных волн с 1-1.5-фазной формой сигнала, регистрируемый горизонтальной компонентой записи.
3. Фронт рассеянных продольных волн, как правило, заметно слабее обменного фронта, форма его сигнала существенно зависит от мощности трещиноватого пласта.
4. Значительное затухание поперечных колебаний при распространении их в пласте с субвертикальными мезотрещинами является причиной формирования фронта рассеянных обменных волн только от первых (кровельных) рядов мезотрещин, что делает возможным обнаружение трещиноватых слоев толщиной до нескольких метров.
5. Показана возможность оценки скорости распространения продольных и поперечных колебаний, их коэффициентов затухания и коэффициентов отражения в трещиноватой среде с явным учетом трещин и особенностей распространения волн в подобных средах (без использования эффективных моделей), что будет предметом последующих исследований.
6. Выполненным численным моделированием обоснована возможность картирования в условиях субгоризонтального разреза пластовых зон развития мезотрещин по прямым волновым откликам от них с применением многокомпонентной 3С регистрации.

Литература

1. Козлов Е.А. Модели среды в разведочной сейсмологии. Тверь, «Изд. Герс», 478с.
2. Левянт В.Б., Петров И.Б., Муратов М.В. Численное моделирование волновых откликов от системы (кластера) субвертикальных макротрещин. Технологии сейсморазведки. 2012, № 1, С. 5 – 21.
3. Левянт В.Б., Петров И.Б., Квасов И.Е. Численное моделирование волнового отклика от субвертикальных макротрещин, вероятных флюидопроводящих каналов. Технологии сейсморазведки. 2011, №4, С 41 – 61.
4. Левянт В.Б., Петров И.Б., Муратов М. В., Быко С. А. Исследование устойчивости образования фронта рассеянных обменных волн от зоны макротрещин. Технологии сейсморазведки. 2013 № 1, С.32 – 45.
5. Магомедов К.М., Холодов А.С. Сеточно-характеристические численные методы. М., Наука. 1988. 288 с.
6. Д. Уайт. Возбуждение и распространение сейсмических волн. М., Недра. 1986. 261 с.
7. Кондауров В.И., Фортов В.Е. Основы термомеханики конденсированной среды. М., МФТИ. 2002. 336 с.
8. Helbig K., Thomsen L. 75-plus years of anisotropy in exploration and reservoir seismics: A historical review of concepts and methods. Geophysics. 2005, 70, 9ND – 23ND.