

01 ИСПОЛЬЗОВАНИЕ АМПЛИТУДНЫХ АНОМАЛИЙ ФРОНТА РАССЕЙАННЫХ ОБМЕННЫХ ВОЛН ПРИ ЗС-РЕГИСТРАЦИИ ДЛЯ ОБНАРУЖЕНИЯ СИСТЕМ СУБВЕРТИКАЛЬНЫХ МАКРОТРЕЩИН

В.Б. Левянт*, И.Б. Петров**, М.В. Муратов**
(* ОАО «ЦГЭ», ** МФТИ(ГУ), Москва)

APPLICATION OF DIFFRACTED CONVERTED WAVES AMPLITUDE ANOMALIES IN ЗС-REGISTRATION FOR DETECTION OF SUBVERTICAL MACROFRACTURE SYSTEMS

V.B. Leviant*, I.B. Petrov**, M.V. Muratov**
(* CGE JSC, Moscow, ** MIPT, Moscow)

Аннотация.

С использованием сеточно-характеристического метода было выполнено численное 2D-моделирование сейсмического отклика от системы (кластера) однонаправленных субвертикальных макротрещин, сопоставимых по высоте с длиной сейсмической волны и заполненных жидкостью или газом. Исследован состав и характер волнового отклика при регистрации горизонтальной и вертикальной компоненты записи колебаний. Установлено, что наиболее энергетически выраженную основу отклика составляют многофазные фронты: а) рассеянных продольных колебаний при заполнении трещин газом и регистрации вертикальной компоненты и б) рассеянных поперечных колебаний при заполнении макротрещин жидкостью и регистрации горизонтальной компоненты. Показано, что в наиболее распространенных условиях разведки нефтяных резервуаров с субгоризонтальными отражающими границами и продуктивными пластами, насыщенными жидкостью (водой или нефтью), наилучшие возможности выявления систем флюидопроводящих макротрещин обеспечиваются регистрацией горизонтальной компонентой записи фронта рассеянных обменных (дифрагированных) волн. При газонасыщении резервуара также задача лучше решается регистрацией вертикальной компонентой фронта рассеянных продольных дифрагированных волн.

Abstract.

Grid-characteristic method was used to perform a numeric 2D-simulation of seismic response from unidirectional gas- and fluid-saturated subvertical macrofracture system. The height of fractures was comparable with seismic wave length. Composition and wave response character of vertical and horizontal oscillation component were investigated. It was shown that energy-expressed response basis consists mostly of multiphase wave fronts. The recorded horizontal component of converted diffracted wave front proved to be the most important in common cases of oil exploration where the reservoir has subhorizontal refracting bounds and the detection of fluidconductive macrofracture systems is desired. In cases when reservoir is filled with gas, the above problem can be better solved by registration of vertical component of diffracted longitudinal diffracted waves.

Тезисы.

Для нефтяных и газовых месторождений в карбонатах и плотных песчаниках характерно развитие систем субвертикальных трещин разного масштаба. Их роль в фильтрационных свойствах продуктивных резервуаров весьма значительна, что

определяет важность оценок их пространственного положения и характеристик. Различаются несколько категорий трещин: *макротрещины* с протяженностью по высоте от первых десятков до первых сотен метров; *мезотрещины* с высотой, равной первым метрам и *микротрещины* протяженностью по высоте первые сантиметры. В последнее время выявление систем однородно ориентированных субвертикальных трещин и определение их параметров основывается на оценке эффекта анизотропии кинематических и динамических характеристик продольных сейсмических волн. Исходными данными при этом в основном являются записи широкоазимутальных съемок с регистрацией вертикальной (Z) компоненты продольных волн. Принципиально новые возможности в исследовании систем однородно ориентированных субвертикальных макротрещин наметились исследованиями с применением численного моделирования распространения упругих волн. На первом их этапе, при использовании только вертикальной (Z) компоненты и соответственно только продольных волн [1-3], было выявлено 1) образование многофазного фронта продольных рассеянных (дифрагированных) волн, так называемой «коды» волн и 2) ослабление волн, проходящих через трещинную зону. Из-за низкой интенсивности многофазных фронтов «коды» на фоне отражений от границ слоистого разреза широкого применения этих результатов не было.

Представляемые исследования выполнялись на основе численного моделирования с применением сеточно-характеристического метода [4-5]. В отличие от широко применяющегося конечно-разностного моделирования с использованием метода эффективной среды [6], этот метод делает возможным обчислять все неоднородные включения в геологической среде. С использованием данного численного метода было выполнено моделирование волновых откликов от единичных субвертикальных макротрещин [7] и от систем однородно ориентированных таких трещин [8]. Исследование устойчивости выявленного эффекта [9] подтвердило возможность широкого использования аномалий амплитуд рассеянных обменных волн для прямого обнаружения зон субвертикальных трещин. На базе перечисленных работ и дополнительных исследований, обоснован метод поиска зон развития субвертикальных макротрещин, которому посвящено данное сообщение.

Методика численного моделирования

Использовалась модель идеального изотропного линейно-упругого материала. Приведенная ниже система уравнений в частных производных описывает состояние элементарного объема упругого материала в приближении малых деформаций следующими выражениями:

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

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

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 контакта¹ массивной породы с заполненными газом или жидкостью кавернами и трещинами:

1. Постановка граничных условий на поверхности раздела породы и трещины в явном

¹ Контакт с жидкостью задавался условием свободного скольжения на границе, контакт с газом при заполнении трещин газом задавался условием свободной границы (как дневной поверхности).

виде, что позволяет: а) ослабить ограничения на положение и ориентацию неоднородностей; б) учесть 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, позволяющей описать любую форму неоднородностей (полостей) внутри массивной породы: каверн и плоских трещин.

Решения построены на основе сеточно-характеристического метода [4-5], относящегося к схемам типа Куранта-Изаксона-Риса для нерегулярных сеток. Поле восстанавливалось не линейной интерполяцией в каждом треугольнике, а по значениям в узлах сетки как непрерывная кусочно-квадратичная функция. Это обеспечивает монотонность численного метода и позволяет избежать нефизических осцилляций решения. Предложенная методика обеспечивает высокоточный расчет волновых полей в произвольно заданных неоднородных средах.

Результаты численного моделирования откликов от субвертикальных трещин.

Для моделей с отдельными трещинами и системами макротрещин использовались параметры среды близкие к карбонатным породам. Скорости $V_p = 4500$ м/с, $V_s = 2500$ м/с и плотность $\rho = 2,5$ г/см. Размер расчетной области – 6 км * 3 км. Глубина расположения макротрещин составляла 2 км как в модели «полупространство», так и в модели «слоистый разрез». Возбуждение проводилось горизонтальной продольной волной типа «плоский фронт». Сигнал задавался прямоугольным импульсом с частотой 30 Гц. Результаты представлялись в виде сейсмограмм на дневной поверхности с записью вертикальной и горизонтальной компонент.

Анализ отклика от субвертикальной макротрещины. Отклик состоит из продольных и обменных дифрагированных волн. Они генерируются верхним и нижним концами трещины. При высоте макротрещины порядка длины сейсмической волны (λ) и более фиксируется их раздельная регистрация. При уменьшении высоты трещины одноименные волны сближаются и формируют единую волну.

Влияние заполнения субвертикальной макротрещины газом или флюидом на характер ее отклика весьма значительно. При насыщении ее газом интенсивность волн отклика в несколько раз выше чем при заполнении жидкостью. Существенно также отличие в характере фазового прослеживания (смены фаз) одноименных дифрагированных волн.

При заполнении макротрещины жидкостью наилучшие условия ее выделения (интенсивность и отсутствие смены фаз) обеспечиваются регистрацией обменной дифрагированной волны при записи горизонтальной (X) компоненты. При заполнении газом наилучшие условия для выделения макротрещины обеспечиваются на вертикальной (Z) компоненте для продольной дифрагированной волны. Остальные волны осложнены сменой полярности или обширной зоной ослабления.

Характер откликов от систем однородно ориентированных субвертикальных макротрещин. Результаты моделирования в полупространстве позволяет отметить:

1. Система (кластер) однородно ориентированных субвертикальных макротрещин образует при падении на нее плоской волны продольных колебаний многофазные фронты рассеянных продольных и обменных волн, образованных интерференцией дифрагированных волн от верхних концов трещин. Вне зон этих фронтов регистрируются на порядок более слабые фрагменты гипербол дифрагированных волн от краевых макротрещин.

2. Отмечается резкое различие в характере фронтов в зависимости от насыщения макротрещин кластера жидкостью или газом. В первом случае при регистрации

горизонтальной (X) компоненты обменный 2-3хфазный фронт на порядок сильнее продольного фронта на вертикальной (Z) компоненте. Во втором – при регистрации вертикальной (Z) компоненты 4-5фазный фронт рассеянных продольных волн в 2-3 раза сильнее обменного. При этом в обоих случаях интенсивная часть фронта совпадает с положением и шириной кластера.

В широко распространенных условиях, слоистого разреза, субгоризонтальных границ и продуктивного пласта, насыщенного флюидом, актуальных для нефтеразведки, преимущество записи горизонтальной (X) компоненты для выявления систем субвертикальных трещин многократно возрастает. Это связано с почти полным отсутствием отражений от границ разреза на этой компоненте. Высокая относительная интенсивность амплитудной аномалии фронта рассеянных обменных волн позволяет рассматривать его как благоприятный показатель наличия трещиноватой зоны. Выше сказанное иллюстрируется на рис. 1 сейсмограммами, полученными для 5-тислоного разреза с горизонтальными границами карбонатного типа пластов.

Анализ устойчивости формирования фронта рассеянных обменных волн от зон развития субвертикальных флюидонасыщенных макротрещин при X-регистрации. С применением численного моделирования исследовалось влияние 4-х основных факторов, не учтенных в выше приведенных разделах: а) зависимость от размера интервала между макротрещинами в широком диапазоне их значений (от 50м до 300м); б) зависимость от размера высоты макротрещины (от 50м до 20м); в) изменчивость (дисперсия) интервалов между трещинами и их углов наклона в кластере (10 – 60%); г) эквивалентность точечного возбуждения типа «центр расширения» (с вводом поправок за «расхождение») выше применявшемуся «плоскому фронту».

На рис. 2 приведено сравнение выделения зоны трещин при обоих видах возбуждения. Показано, что при возбуждении в точке, вводе поправок за расхождение сферического фронта и раздельном суммировании правых и левых частей записи (учет смены фаз) при системе МОГТ качество выделения на X-компоненте фронта рассеянных обменных волн от зоны субвертикальных трещин не ниже, чем при «плоском фронте».

Выводы:

1. Установлено, что отклики от субвертикальных макротрещин, состоящие из продольных и обменных дифрагированных волн, существенно различаются в зависимости от заполнения их газом или флюидом. Отличие проявляется: а) в несколько раз меньшей интенсивности отклика в целом при заполнении флюидом; б) в изменении соотношения интенсивностей выше указанных волн; в) наличии или отсутствии переходов на фазу над трещиной

2. Отклик от системы субвертикальных однонаправленных макротрещин образует не только многофазный фронт рассеянных продольных волн – «коду волн», но и фронт рассеянных обменных волн. При насыщении трещин флюидами обменный фронт существенно интенсивнее продольного, при газонасыщении он несколько слабее. В условиях широко распространенного субгоризонтального слоистого разреза при заполнении трещин флюидами преимущество обменного фронта по отношению к продольному многократно возрастает. Это связано с низким уровнем отраженных волн от границ разреза при регистрации горизонтальной компоненты.

3. Амплитудные аномалии на сейсмограммах горизонтальной компоненты, обусловленные фронтом рассеянных обменных волн, могут рассматриваться как вероятный показатель системы субвертикальных макротрещин..

4. Формирования фронта рассеянных обменных волн от зоны трещин при X-регистрации достаточно устойчиво при умеренных (до 30-40%) уровнях дисперсии

интервалов между трещинами и углами их наклона. Оно практически не зависит от типа возбуждения («плоский фронт» или «центр расширения»), хотя при «ц. р.» необходим ввод поправок за расхождение.

5. Обоснован переход к апробации метода поиска систем макротрещин по аномалиям рассеянных обменных волн на записях горизонтальной компоненты в условиях субгоризонтального разреза

Рисунки:

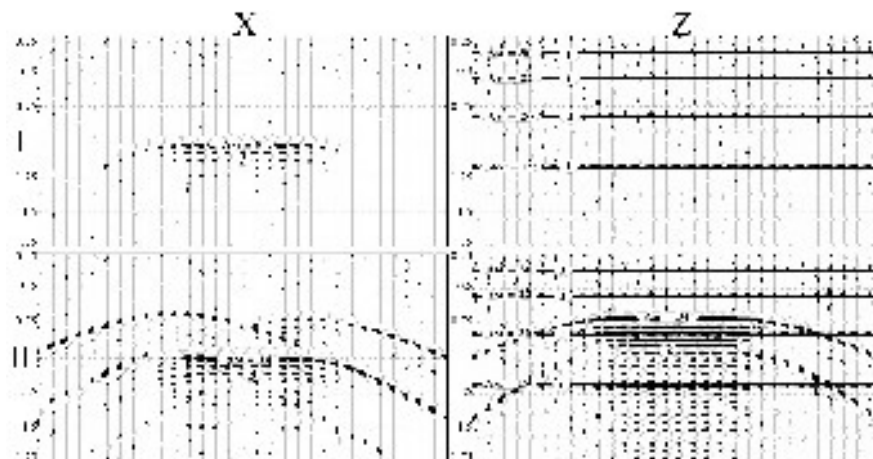


Рис. 1. Характер отклика – фронта рассеянных волн в многослойном разрезе от кластеров водо- (I) и газо- (II) насыщенных макротрещин. 1 – отражения от границ, 2 и 3 – фронты рассеянных продольных и обменных волн; Ам = 22 — оценки максимальных амплитуд.



Рис. 2. Выделение кластера макротрещин по аномальной интенсивности фронта рассеянных обменных волн при многокомпонентной (X и Z) регистрации с возбуждением типа «плоский фронт» (А) и при точечном возбуждении с регистрацией в системе МОГТ (Б). База приема при «ПФ» - 4 км, при МОГТ – 6 км. Кластер протяженностью 2 км; число трещин 21; глубина отражающей границы - 1,9 км, кластера -2,0км. |----| - граница кластера. Оценки интенсивности – 2.0 у.е.

Литература:

1. Bakulin A., Grechka V., Karaev N., Anisimov A, Kozlov E. Physical modeling and theoretical studies of seismic reflections from a fault zone // SEG, 2004, P. 1674 – 1677.
2. Nakagawa S., Nihei K.T., Mayer L.R. Numerical modeling of 3D elastic wave scattering off a layer containing parallel periodic fractures // SEG, 2002, P. 1967 – 1970.
3. Willis M.E., Burns D., Rao R. Spatial orientation and distribution of reservoir fractures from scattered energy // SEG, 2004.
4. Магомедов К.М, Холодов А.С. Сеточно-характеристические численные методы.

Наука, 1988, 288с.

5. Иванов В.Д., Петров И.Б. и др. Сеточно-характеристический метод расчета динамических деформаций на нерегулярных сетках // Математическое моделирование, Т11, №7, 1999, С. 188-197

6. Coates R.T., Shoenberg M. Finite-difference modeling of faults and fractures // Geophysics, V. 60, 1995, P. 1514 – 1523.

7. Левянт В.Б., Петров И.Б., Квасов И.Е. Численное моделирование волновых откликов от субвертикальных макротрещин, вероятных флюидопроводящих каналов // Технологии сейсморазведки, №4, 2011, с. 41 – 61.

8. Левянт В.Б., Петров И.Б., Муратов М.В. Численное моделирование волновых откликов от системы (кластера) субвертикальных макротрещин // Технологии сейсморазведки, №1, 2012, с. 5 – 21.

9. Левянт В.Б., Петров И.Б., Муратов М.В., Быко С.А. Исследование устойчивости образования фронта рассеянных обменных волн от зоны макротрещин // Технологии сейсморазведки, №1, 2013.