

ОЦЕНКА МЕТОДАМИ МАТЕМАТИЧЕСКОГО И ФИЗИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ОБМЕННЫХ РАССЕЯННЫХ ВОЛН ДЛЯ ПРЯМОГО ОБНАРУЖЕНИЯ И ХАРАКТЕРИСТИКИ СИСТЕМ МАКРОТРЕЩИН*

Н.А. Караев¹, В.Б. Левянт², И.Б. Петров³, Г.Н. Караев¹, М.В. Муратов³

¹ФГУНПП “Геологоразведка”

192019, Санкт-Петербург, ул. Книппович, д. 11/2, Россия; e-mail: geo@geolraz.com

²ОАО “Центральная геофизическая экспедиция”

123298, Москва, ул. Народного Ополчения, д. 38, корп. 3, Россия; e-mail: vbleviant@gmail.com

³Московский физико-технический институт (университет)

141700, Московская обл., Долгопрудный, Институтский пер., 9, Россия;

e-mail: petrov@mipt.ru, max.muratov@gmail.com

Статья посвящена проверке методом физического моделирования основных эффектов сейсмических откликов от систем макротрещин в продуктивных породах, выявленных численным моделированием с применением сеточно-характеристического метода. Авторами подтвержден факт формирования обменных дифрагированных волн от концов трещин, в т. ч. достаточно амплитудно выраженного и устойчивого их фронта от кластера (системы) макротрещин, установлена адекватность численного и физического моделирования. В процессе физического моделирования вероятность обнаружения кластера макротрещин по обменным рассеянным волнам была существенно повышена за счет важного признака – различия волнового поля на разных флангах приема. Определены возможные перспективы использования метода обменных рассеянных волн для прогноза систем макротрещин в продуктивных резервуарах.

Обменные рассеянные волны, системы макротрещин, дифракция, физическое моделирование, математическое моделирование

ASSESSMENT BY METHODS MATHEMATICAL AND PHYSICAL MODELLING OF POSSIBILITY OF USE OF THE EXCHANGE SCATTERED WAVES FOR DIRECT DETECTION AND CHARACTERISTICS OF SYSTEMS OF MACROCRACKS

N.A. Karayev¹, V.B. Levyant², I.B. Petrov³, N.G. Karayev¹, M.V. Muratov³

¹Geological exploration

192019, St. Petersburg, Knippovich St., 11/2, Russia; e-mail: geo@geolraz.com

²Central Geophysical Expedition

123298, Moscow, Narodnogo Opolcheniya St., 38, building 3, Russia; e-mail: vbleviant@gmail.com

³Moskovsky Physics and Technology Institute (University)

141700, Moscow Region, Dolgoprudny, Institutsky Lane, 9, Russia

e-mail: petrov@mipt.ru, max.muratov@gmail.com

The paper describes how physical modeling verifies (reconfirms) major effects produced by seismic response from macro-fracture systems in productive formations and identified by (prior) numerical modeling where grid-characteristic method was involved. The fact has been reconfirmed that converted diffractions form from the ends of fractures, including sustainable and sufficiently amplitude-pronounced front of diffractions from the macro-fracture cluster (system). This approach has also helped establish the adequacy of both numerical and physical modeling. In the course of physical modeling, the probability of detecting macro-fracture clusters on scattered converted events has essentially been enhanced by establishing an important indication – distinction between the wavefields of those events recorded on different receiver lines (left and right) with a split-spread. Possible ways are suggested of using the scattered converted events to predict the existence of macro-fracture systems in productive reservoirs.

Exchange scattered waves, systems of macrocracks, diffraction, physical modeling, mathematical modeling

ВВЕДЕНИЕ

Для месторождений углеводородов в мощных толщах карбонатных пород и глубоко залегающих песчаников характерно развитие разномасштабных трещин. В большинстве случаев они образуют системы субвертикальных однородно-ориентированных трещин. Прогноз их положения в массиве продуктивного резервуара, а также диагностика их характеристик имеют важное значение для выбора оптимальных режимов его разработки. Очевидно, что успешное решение поставленных задач при поисках столь сложного геологического объекта находится в непосредственной зависимости от того, насколько адекватны целевым объектам поиска эффективные сейсмические модели.

Изучению возможности выявления залежей углеводородов сейсмическими методами в последнее десятилетие посвящен ряд работ. Так, численное моделирование волнового отклика от скоплений однонаправленных субвертикальных трещин, результаты которых изложены в работах [Nakagawa et al., 2002; Willis et al., 2004; Bakulin et al., 2005], выявило следующие эффекты: 1) ослабление проходящих волн, вызванное рассеянием; 2) увеличение амплитуд рассеянной компоненты при повышении угла падения лучей по отношению к вертикали; 3) появление “коды” (многофазной последовательности) волн вследствие многократного

отражения между плоскостями трещин. Широкого практического использования этих результатов не было, по-видимому, из-за низкой относительной интенсивности этих волн на фоне продольных отражений слоистого разреза. Выявление систем макротрещин на основе использования эффекта анизотропии предложено [Willis et al., 2006], однако и этот метод не нашел практического применения. Сейсмические отклики от отдельной макротрещины и от системы трещин рассматривали [Fang et al., 2010; Zheng et al., 2011]. Несмотря на определенные результаты, в их характеристике следует отметить ряд ограничений, а именно: волновые отклики рассматривались как облако рассеянной энергии, а не как суперпозиция конкретных волн; и общим для всех выше упомянутых работ является анализ записей только вертикальной (Z) компоненты.

В серии работ [Левянт и др., 2011, 2012, 2013] на основе использования оригинального сеточно-характеристического метода [Петров и др., 1990] двумерного численного моделирования приведены расчеты волновых полей, формируемых на системах макро- и мезотрещин при широкой вариации параметров трещинности и при различных режимах флюидонасыщения. При этом обеспечивалось раздельное описание каждой трещины, задание граничных условий на их поверхностях и очень высокое, близкое к реальным пяти порядкам, соотношение высоты и раскрытости (толщины) макротрещин. По результатам численного моделирования был установлен факт формирования обменных дифрагированных волн от концов субвертикальных трещин – как от одиночной трещины, так и от систем трещин. Авторами сделан важный вывод о перспективе обнаружения и диагностики трещинных систем на основе использования обменных дифрагированных волн при регистрации X -компонент записи.

Н.А. Караевым с соавторами [2008а,б, 2010] предложена новая технология объемного физического моделирования, оригинальность которой заключается в возможности воспроизведения фрагментарных порово-трещинных систем с гидравлической связью и с наперед заданными параметрами трещин и пор при различных режимах газо- и флюидозаполнения межпорового и трещинного пространств. Главная особенность созданной технологии моделирования состоит в том, что на объемной твердотельной составной физической модели с фрагментарными моделями возможны тестирование и оптимизация современных 2D и 3D современных сейсмических технологий, применяемых при изучении трещинных систем, имитирующих коллекторы углеводородов. Модельными исследованиями по отношению к традиционному методу продольных отраженных волн установлена высокая информативность метода поперечных волн при локализации и диагностике трещинных и порово-трещинных систем.

Для решения ряда методологических вопросов весьма перспективным представляется проведение сейсмического моделирования путем сочетания методов численного и физического моделирования. В статье приведены первые результаты комбинирования методов, как при изучении особенности волновых полей, формируемых целевыми трещинными объектами, так и при обосновании признаков обнаружения и диагностики в поле обменных отраженных волн. На первом этапе главной задачей являлось подтверждение физическим моделированием эффектов, выявленных математическим моделированием при изучении макротрещин, и поиск приемов их практического

использования.

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

(основные результаты)

Исследованиями, проведенными методом численного моделирования сейсмического отклика от единичной макротрещины, близкой к вертикали, показано, что основная информация о положении трещины в разрезе связана с дифрагированными волнами от ее концов (рис. 1, а) несут информацию о ней на дневную поверхность. Проведенные исследования были положены в основу изучения сейсмического отклика от системы субвертикальных макротрещин, с которыми сталкиваются при разработке нефтегазовых резервуаров. Установлено, что основная информация о положении и структуре горизонтальной системы (кластера) субвертикальных однонаправленных макротрещин связана с полем рассеянных волн, в составе которого выявлены обменные дифрагированные волны, излучаемые от концов трещин. Существенным фактором при этом является наблюдаемая зависимость энергетических характеристик рассеяния от флюидонасыщения трещин. При насыщении трещин флюидами обменный фронт рассеяния существенно интенсивнее продольного, при газонасыщении он несколько слабее. Отмечается также, что формирование фронта рассеянных обменных волн (на X-компоненте) от зоны трещин достаточно устойчиво в широком диапазоне значений интервалов между трещинами, при умеренных уровнях неровности (ступенчатости), а также дисперсии интервалов между трещинами и углами их наклона. Формирование волновых фронтов, формируемых кластером, связано с эффектом наложения рассеянных (дифрагированных) волн от серии макротрещин кластера. При падении на макротрещину (с небольшим отклонением от вертикали) концентрического фронта точечного источника наблюдаются значительные различия кинематических и динамических характеристик дифрагированных волн, наблюдаемых по разные стороны от пункта возбуждения, которые возрастают с увеличением угла отклонения трещин от вертикали.

—