

ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ МЕТОДА CSP ПРИ ВЫДЕЛЕНИИ РАССЕИВАЮЩИХ ОБЪЕКТОВ.

Введение

Общепризнанно, что от 25% до 50% общемировых запасов углеводородов находятся в резервуарах трещинного и трещинно-кавернозного типа. Поиск и разведка таких резервуаров с помощью традиционных технологий сейсморазведки весьма затруднительны. Причина этого заключается в том, что эти технологии ориентированы на резервуары с поровыми коллекторами и используют для поиска и разведки отраженные волны. В ловушках трещинно-кавернозного типа распределение нефти по разрезу контролируется каналами миграции флюидов, которые, в свою очередь, связаны с зонами трещиноватости, кавернозности и/или карстования. Эти объекты не отражают, а рассеивают сейсмическую энергию. При этом амплитуда рассеянных волн на несколько порядков слабее отраженных волн [1], которые в данном случае являются очень сильными волнами-помехами.

Все существующие на сегодняшний день подходы для изучения коллекторов трещинно-кавернозного типа стремятся максимально ослабить (вычесть) отраженные волны. Так в методе МИРО (Миграционное Изображение Рассеивающих Объектов) [2-3] для этого используются оптико-геометрические представления о распространении энергии вдоль сейсмических лучей и их зеркального отражения. Аналогичные, по сути, идеи эксплуатируются и в фокусирующих преобразованиях [4-5].

Метод CSP [6-7] (Common Scattering Point) базируется на решении обратной задачи рассеяния акустических волн по данным МОГТ в приближении Борна. Рассеяние волн описывается с помощью волнового уравнения

$$\begin{cases} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = c^2 [1 + a(\vec{r})] \Delta u + \delta(t) \delta(\vec{r} - \vec{r}_0) \\ u|_{t < 0} = 0 \end{cases} \quad (1)$$

а обратная задача заключается в определении неоднородностей среды $a(\vec{r})$ по рассеянному полю $u_0(\vec{p}, \vec{p}_0, t) = u(\vec{r}, \vec{r}_0, t)|_{z=z_0=0}$, зарегистрированному на дневной поверхности. Здесь $\vec{r}_0, \vec{r} \in \mathbb{R}^3$, t – время, $c = \text{const}$ – скорость акустических волн во вмещающей среде.

В результате решения этой задачи в явном виде построены два линейных интегральных оператора \hat{L}_{refl} , \hat{L}_{diffr} , действие которых на полное поле МОГТ $u_0(\vec{p}, \vec{p}_0, t)$ приводит к его расщеплению на отраженную и рассеянную компоненты

$$u_{\text{refl}} = \hat{L}_{\text{refl}} \cdot u \quad (2)$$

$$u_{\text{diffr}} = \hat{L}_{\text{diffr}} \cdot u \quad (3)$$

Затем, с помощью престоковой волновой миграции \hat{M} отдельно вычисляются распределения по пространству рассеивающих и отражающих элементов:

$$a_{\text{diffr}}(\vec{r}) = \hat{M} \cdot u_{\text{diffr}} \quad (4)$$

$$a_{\text{refl}}(\vec{r}) = \hat{M} \cdot u_{\text{refl}}, \quad (5)$$

причем $a(\vec{r}) = a_{\text{diffr}}(\vec{r}) + a_{\text{refl}}(\vec{r})$. Рассеивающие объекты мы далее будем называть дифракторами, а отражающие площадки – рефлекторами. Единственным параметром, который необходимо задать для их отдельного вычисления (кроме, конечно, геометрии и скорости вмещающей среды) является наибольший угол наклона отражателей. Такие же операторы были построены и для 2D случая, которым мы и ограничимся в настоящей работе.

Многочисленные примеры тестирования метода CSP на синтетических данных и его применения для прогнозирования трещинно-кавернозных коллекторов, в том числе и по данным 3D МОГТ, описаны в работах [6-7].

Чувствительность метода CSP

Рассмотрим задачу количественной оценки возможностей метода CSP. Эти возможности, прежде всего, определяются тем, насколько хорошо нам удастся вычесть из полного поля МОГТ

отраженные волны. Качество вычитания отраженных волн будем описывать с помощью коэффициента деструкции k_{de} , равного отношению амплитуды рефлектора, полученного без процедуры вычитания к максимальному значению остатков от рефлектора, оставшихся после применения этой процедуры.

Вычитание отраженных волн влияет на рассеянное поле. Для количественной характеристики этого влияния определим коэффициент восстановления (реконструкции k_{re}) дифрактора как отношение амплитуды дифрактора, восстановленного после процедуры вычитания, к амплитуде дифрактора, вычисленного без применения этой процедуры. Очевидно, что этот коэффициент всегда меньше единицы и чем он ближе к единице – тем лучше.

Чувствительность метода – это возможность обнаружения с его помощью на временных разрезах слабых объектов. Будем считать, что дифрактор расположен на затеняющем его рефлекторе (наихудший случай) и что амплитуды рассеянной и отраженной волн (в апексе их годографов) равны. Определим коэффициент чувствительности k_{se} как отношение амплитуды дифрактора, вычисленного после вычитания отраженных волн, к максимальной амплитуде остатков от рефлектора. Коэффициент чувствительности показывает - во сколько раз рассеянное поле может быть слабее отраженного поля, чтобы этот дифрактор мог быть выявлен на временном разрезе с помощью метода CSP. Нужно понимать, что это предельное значение, т.к. при таком отношении амплитуда восстановленного дифрактора и остатков от рефлектора будут равны. Очевидно, что для надежной идентификации дифрактора амплитуда остатков должна быть в несколько раз меньше чем амплитуда целевого объекта.

Определенные выше коэффициенты зависят от геометрии профиля, точки расположения дифрактора, угла наклона и положения рефлектора, скорости миграции, скорости волн во вмещающей среде и наибольшего угла наклона вычитаемых рефлекторов. Для исследования этих зависимостей было использовано моделирование синтетических волновых полей, которые затем обрабатывались по методу CSP. Приближение Борна, в рамках которого решалась задача (1) – это приближение однократного рассеяния/отражения. Поэтому для моделирования рассеянного поля мы использовали однократное рассеяние от точечного дифрактора, а для моделирования отражения – зеркальное приближение.

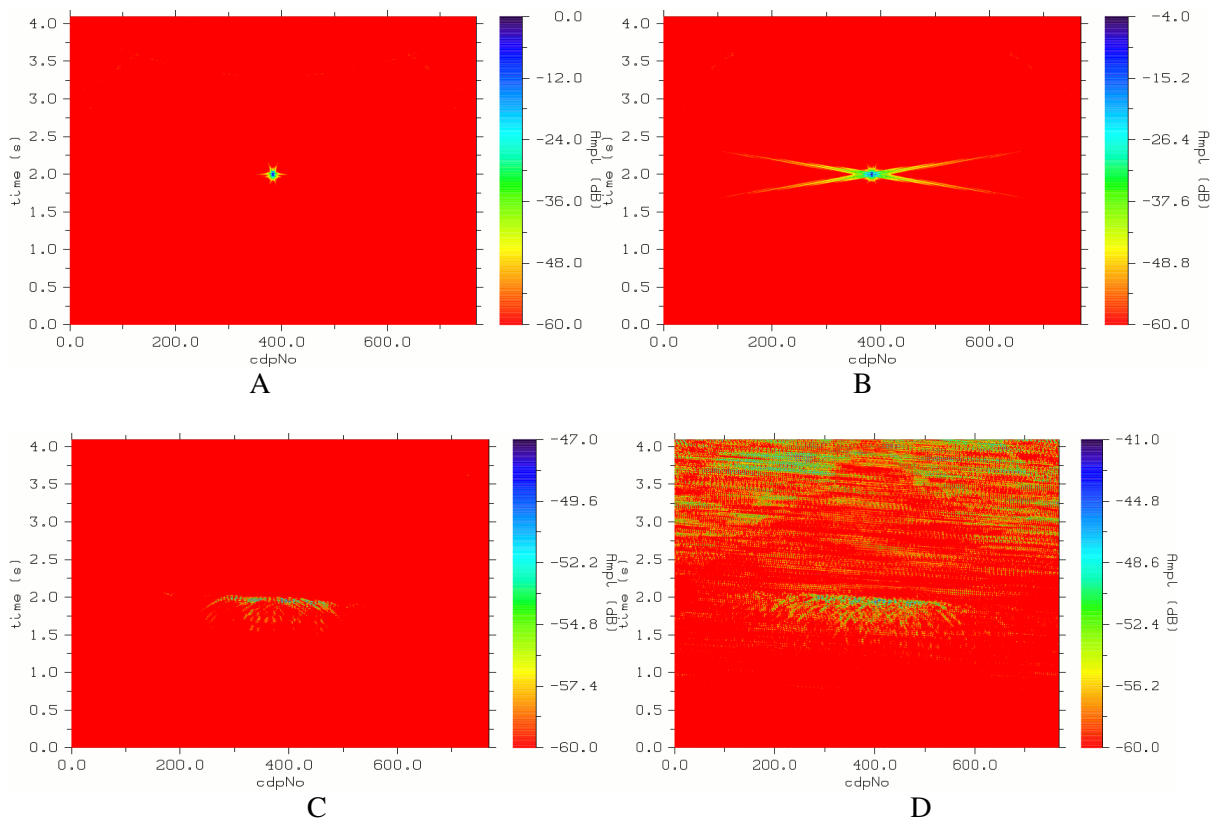


Рисунок 1. А, В - временной разрез (в логарифмическом масштабе) точечного дифрактора. С, D – остатки от отражающей плоскости для $\Delta s = 25$ м, D – тоже для $\Delta s = 100$ м.

Моделирование 2D волновых полей МОГТ проводилось на апертуре 9.6 км. Источники располагались на отрезке [0, 3.2] км с интервалом $\Delta s = 25$ м. База приема составляла 6.4 км, интервал между приемниками $\Delta r = 25$ м. Вынос первого источника в расстановке равнялся -3200 м, а вынос последнего +3200 м. Скорость волн во вмещающей среде равнялась 2 км/с, форма сигнала – импульс Риккера с доминантной частотой 20 Гц, шаг между временными отсчетами $\Delta t = 2$ мс. Обработка синтетических полей МОГТ проводилась по методу CSP на апертуре, занимающей отрезок [-3.2, 6.4] км для скорости миграции 2 км/с. Принималось, что наибольший угол наклона рефлекторов равнялся $\alpha_{max} = 5^\circ$.

На рисунке 1-А в логарифмическом масштабе изображен временной разрез точечного дифрактора, восстановленного по синтетическим данным без применения процедуры вычитания отраженных волн, а на рисунке 1-В после применения этой процедуры. Эти разрезы нормированы на амплитуду дифрактора, вычисленного без применения вычитания.

На рисунке 1-С представлены остатки от рефлектора, наклоненного под углом 2° , после CSP-вычитания. Слева - для $\Delta s = 25$ м, а справа – для $\Delta s = 100$ м. Эти разрезы также были нормированы на амплитуду рефлектора, вычисленного без применения процедуры вычитания.

Из рисунка 1-А видно, что качество фокусировки, используемой в методе CSP, весьма высокое. Практически на всем временном разрезе, кроме непосредственной окрестности дифрактора, уровень шумов ниже -60 дВ, т.е. более чем в 1000 раз слабее амплитуды самого дифрактора. Процедура «вычитания» приводит к появления дополнительного шума (рисунок 1-В), имеющего специфическую крестообразную форму с уровнем шума порядка -37 дВ, т.е. более чем в 70 раз слабее амплитуды дифрактора.

Из рисунка 1-С видно, что при $\Delta s = 25$ м уровень шумов от остатков рефлектора практически везде ниже -47 дВ (в 224 раза), а при $\Delta s = 100$ м ниже -41 дВ, т.е. в 112 раз слабее амплитуды исходного рефлектора. Увеличение уровня остатков рефлектора при увеличении интервала между приемниками связано с эффектом эляйсинга. Тем не менее, в обоих случаях эти остатки существенно меньше амплитуды исходного рефлектора.

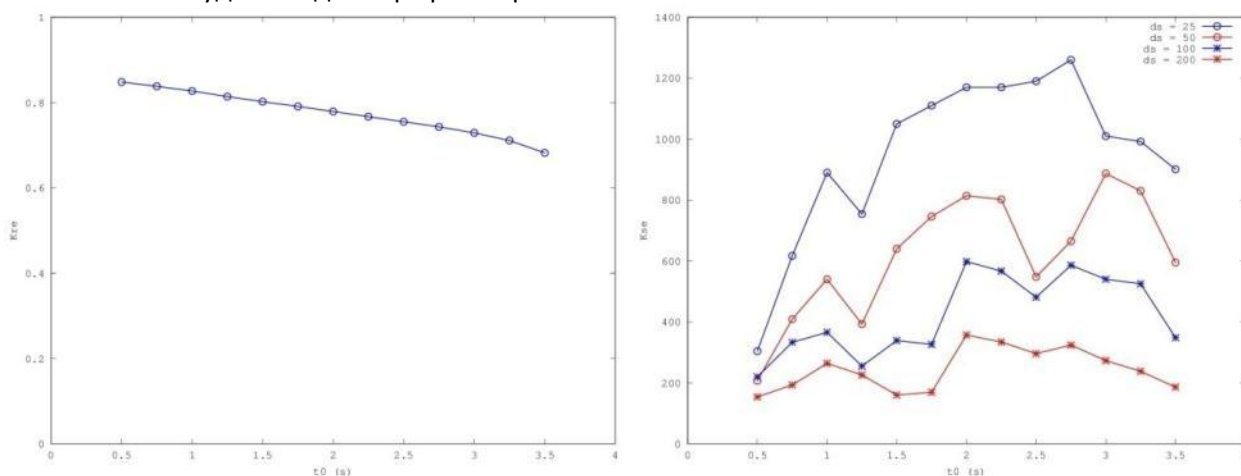


Рисунок 2. Слева - зависимость коэффициента реконструкции точечного дифрактора k_{re} от t_0 . Справа – зависимость коэффициента чувствительности $k_{se}(t_0)$ для различных значений Δs .

На рисунке 2 слева приведена зависимость коэффициента реконструкции дифрактора k_{re} от времени его расположения на временном разрезе t_0 . Видно, что его величина порядка 80% и незначительно уменьшается при увеличении глубины расположения дифрактора. Эта зависимость соответствует шагу по источникам $\Delta s = 25$ м. Практически такой же график получается и для $\Delta s = 50, 100$ и 200 м.

Справа на рисунке 2 изображены графики зависимости коэффициента чувствительности метода CSP для $\Delta s = 25, 50, 100$ и 200 м. Видно, что для всех этих Δs увеличение времени от 0.5 до 3 с приводит к увеличению коэффициента чувствительности, а затем - к его снижению. Увеличение шага между источниками монотонно уменьшает коэффициент чувствительности. Если в качестве целевого выбрать время 2 сек, то $k_{se} = 1200$ при $\Delta s = 25$ м и $k_{se} = 300$ при $\Delta s = 200$ м. Эти

значения для коэффициента чувствительности метода CSP, особенно когда шаг между приемниками и источниками равен 25 м – очень высокие.

Заключение

Введенные нами коэффициенты позволяют количественно оценить возможности метода CSP для поиска трещинно-кавернозных коллекторов. Эти коэффициенты можно назвать паспортными данными метода CSP. Они дают количественные характеристики применяемого метода обработки и повышают надежность интерпретации и вытекающих из нее интерпретационных выводов. Ограничения чувствительности метода CSP и других характеристик этого метода определяются фундаментальными свойствами волновых процессов и дискретных преобразований, используемых для обработки волновых полей МОГТ. Эти ограничения весьма высоки. Например, при $\Delta s = \Delta r = 25$ м коэффициент чувствительности порядка 1000. Значения этих ограничений близки к предельным и вряд ли могут быть увеличены другими методами.

Литература

1. Кузнецов О.Л. и др. Экспериментальные исследования. – М.: ГНЦ РФ – ВНИИгеосистем, 2004. – 362 с. (Сейсмоакустика пористых и трещиноватых геологических сред: В 3 т. Т.2)
2. Е.А.Козлов, Н.Л.Баранский, В.Ф.Семенов, В.А.Аксенов. Изображение рассеивающих объектов маскируемых зеркальными отражениями // Геомодель-2004
3. Kozlov, E., N. Baransky, E.Korolev, A.Antonenko, and E.Koshchuk, 2004, Imaging scattering objects masked by specular reflections: 74th Annual International Meeting, SEG, Expanded Abstracts, 1131-1134
4. С.В.Гольдин, М.Ю.Смирнов, В.А.Поздняков, В.А.Чеверда, 2004. Построение сейсмических изображений в рассеянных волнах как средство детализации сейсмического разреза. Ж. Геофизика, специальный выпуск, с.23-29
5. В.А.Поздняков, Д.В.Сафонов, В.А.Чеверда, 2000. Оптимизация параметров фокусирующих преобразований с использованием численного моделирования. Ж. Геология и геофизика, т.41, №6, с.930-938
6. A.N.Kremlev, G. N. Erokhin, L. E. Starikov, S.V.Rodin. Fracture and cavernous reservoirs prospecting by the CSP prestack migration method// Extended Abstracts of 73th EAGE Conference & Exhibition, Vienna, Austria, May 23-26, 2011 (<http://www.earthdoc.org/detail.php?pubid=50142>)
7. G.N.Erokhin, A.N.Kremlev, L.E.Starikov, V.V.Maltcev, S.E.Zdolnik. CSP-Method Prospecting of Fracture-cavernous Reservoirs in the Bazhen Formation of the Salym Oilfield. Extended abstract, 74th EAGE Conference & Exhibition, Copenhagen, Denmark, June 3-7, 2012 (<http://www.earthdoc.org/detail.php?pubid=59720>)

Устинова В.Н., Волегов Д. В., Пракойо Ф.С.

(Томский политехнический университет)

СЕЙСМОГЕОЛОГИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ НЕФТЯНЫХ И ГАЗОВЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ.

Введение. Важность материалов сейсморазведки для решения поисковых и разведочных задач на нефтяных и газовых месторождениях бесспорна. Сейсморазведка – один из основных источников информации для нефтяной геологии. Сейсмические структурные карты, сейсмические параметры: скорости, амплитуды отражённой волны дают представление о структурно-литологических характеристиках нефтегазоносного разреза. Временные, глубинные сейсмические разрезы, сейсмические структурные карты, сейсмические параметры и атрибуты позволяют создать геологическую модель среды, вмещающей залежи углеводородов, изучить основные неоднородности разреза, тесным образом связанные с её нефтегазоносностью. Сейсморазведка находит применение при сейсмолитологических построениях, тектонических реконструкциях на месторождениях нефти и газа. Сейсмические параметры и атрибуты позволяют оценивать коэффициенты пористости, проницаемости, эффективного нефтегазонасыщения коллекторов.

Описание методов и результатов. В современных обрабатывающих системах Landmark, Paradigm Geophysical, Omega-2 в процедурах обработки и интерпретации сейсмоданных