



А. Н. Кремлев

## КОЛИЧЕСТВЕННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ МЕТОДА CSP

Предложены и исследованы количественные характеристики метода Common Scattering Point (CSP), позволяющие оценивать его эффективность при изучении геологических сред по рассеянным сейсмическим волнам, в частности, при поиске трещинных коллекторов углеводородов. Наиболее практически важный из них – коэффициент чувствительности, который показывает, насколько слабые, по сравнению с отражающими границами, рассеивающие объекты могут быть обнаружены методом CSP. Численно исследована зависимость этих характеристик от геометрии систем регистрации сейсмических волн и других параметров.

*The quantitative characteristics of the CSP method, which poses to estimate its effectiveness for fracture hydrocarbon reservoirs imaging using scattered seismic waves, are defined and investigated. The most important is the sensitivity coefficient, which shows how small diffractors, compared with the shadowed reflectors, may be detected by the CSP method. These dependencies from acquisition geometry and other parameters are numerically studied.*

**Ключевые слова:** метод CSP, рассеянные волны, дифракторы, трещинно-кавернозный коллектор, коэффициент чувствительности.

**Key words:** CSP method, scattered waves, fracture cavernous reservoir, sensitivity coefficient.

## 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 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 [1], являющихся очень сильными волнами-помехами.

Все существующие сегодня подходы для изучения коллекторов трещинно-кавернозного типа стремятся максимально ослабить (вычистить) отраженные волны. Так, в методе МИРО (миграционное изображение рассеивающих объектов) [2] 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 [3; 4].



## 1. Метод CSP

Метод CSP (Common Scattering Point) [5–7] базируется на решении обратной задачи рассеяния акустических волн по данным МОГТ в приближении Борна. Рассеяние волн описывается волновым уравнением

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

а обратная задача заключается в определении неоднородностей среды  $a(\vec{r})$  по рассеянному полю  $u_0(\vec{\rho}, \vec{\rho}_0, t) = u(\vec{r}, \vec{r}_0, t)|_{z=z_0=0}$ , зарегистрированному на дневной поверхности для различных положений приемника  $\vec{\rho}$  и источника  $\vec{\rho}_0$ . Здесь  $\vec{r}, \vec{r}_0 \in R^3$ ;  $\vec{\rho}, \vec{\rho}_0 \in R^2$ ;  $t$  — время;  $c = \text{const}$  — скорость акустических волн во вмещающей среде.

В результате решения задачи в явном виде построены два линейных интегральных оператора  $\hat{L}_{\text{refl}}$  и  $\hat{L}_{\text{diff}}$ , действие которых на полное поле МОГТ  $u_0(\vec{\rho}, \vec{\rho}_0, t)$  приводит к его расщеплению на отраженную и рассеянную компоненты соответственно  $u_{\text{diff}} = \hat{L}_{\text{diff}} \cdot u_0$  и  $u_{\text{refl}} = \hat{L}_{\text{refl}} \cdot u_0$ .

Затем с помощью престоковой волновой миграции  $\hat{M}$  отдельно вычисляются распределения по пространству рассеивающих и отражающих элементов соответственно  $a_{\text{diff}}(\vec{r}) = \hat{M} \cdot u_{\text{diff}}$  и  $a_{\text{refl}}(\vec{r}) = \hat{M} \cdot u_{\text{refl}}$ , причем  $a(\vec{r}) = a_{\text{refl}}(\vec{r}) + a_{\text{diff}}(\vec{r})$ . Рассеивающие объекты мы далее будем называть дифракторами, а отражающие площадки — рефлекторами. Единственным параметром, который необходимо задать для их раздельного вычисления (кроме, конечно, геометрии профиля и скорости вмещающей среды), является наибольший угол наклона отражателей  $\alpha_{\text{max}}$ . Такие же операторы были построены также и для 2D случая, которым мы и ограничимся в настоящей работе.

Многие 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 [5–7].

## 2. Количественные характеристики метода CSP

Рассмотрим задачу количественной оценки возможностей метода CSP. Эти возможности прежде всего определяются тем, насколько хорошо нам удастся вычесть (устранить) 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 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, так как при таком отношении амплитуда восстановленного дифрактора и остатков от рефлектора равны. Очевидно, что для надежной идентификации дифрактора амплитуда остатков должна быть в несколько раз меньше амплитуды целевого объекта.

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

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 равен  $\alpha_{max} = 5^\circ$ .

На рисунке 1, а в логарифмическом масштабе дан временной разрез точечного дифрактора, восстановленного по синтетическим данным без применения процедуры вычитания отраженных волн, а на рисунке 1, б 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  $2^\circ$ , 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  $-60$  dB, то есть более чем в 1000 раз слабее амплитуды самого дифрактора. Процедура «вычитания» приводит к появления дополнительного шума (рис. 1, b), имеющего специфическую крестообразную форму с уровнем шума порядка  $-37$  dB, то есть более чем в 70 раз слабее амплитуды дифрактора.

На рисунке 1, с при  $\Delta s = 25$  м уровень шумов от остатков рефлектора практически везде ниже  $-47$  dB (в 224 раза), а при  $\Delta s = 100$  м —  $-41$  dB, то есть в 112 раз слабее амплитуды исходного рефлектора. Увеличение уровня остатков рефлектора при росте интервала между приемниками связано с эффектом эляйсинга. Тем не менее в обоих случаях эти остатки существенно меньше амплитуды исходного рефлектора.

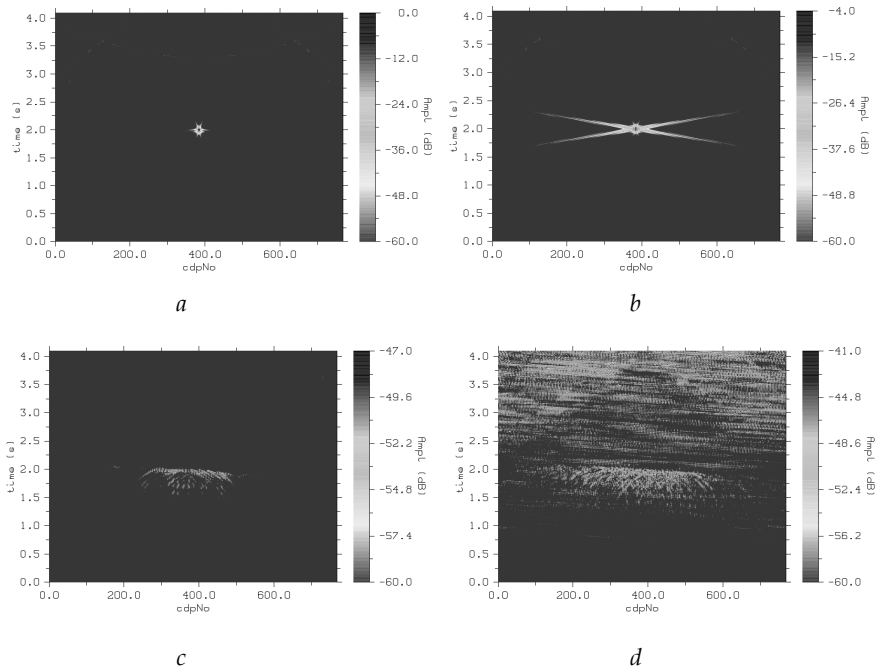


Рис. 1. Логарифмические временные разрезы точечного дифрактора и остатков от рефлектора:

*a, b* — временной разрез (в логарифмическом масштабе) точечного дифрактора до (*a*) и после (*b*) применения метода CSP; *c, d* — остатки от рефлектора для  $\Delta s = 25$  м и  $\Delta s = 100$  м соответственно

На рисунке 2 приведен результат реконструкции точечного дифрактора после вычитания проходящего через него рефлектора. Угол наклона рефлектора  $2^\circ$ , амплитуда рассеянной волны в 100 раз меньше



амплитуды отраженной волны. Хорошо видно, что этот достаточно слабый дифрактор, который при стандартной обработке совершенно не виден на временном разрезе, очень отчетливо проявляется на разрезе CSP-дифракторов.

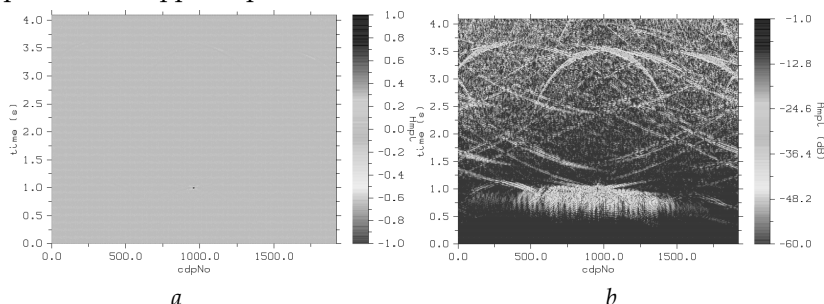


Рис. 2. Результат реконструкции дифрактора, затененного рефлексором. Амплитуда рассеянной волны в 100 раз меньше амплитуды отраженной волны: *a* – разрез в линейном; *b* – в логарифмическом масштабах

На рисунке 3 слева приведена зависимость коэффициента реконструкции дифрактора  $k_{re}$  от времени  $t_0$  его расположения на временном разрезе. Видно, что его относительная величина порядка 80 % и незначительно уменьшается при увеличении глубины расположения дифрактора. Эта зависимость соответствует шагу по источникам  $\Delta s = 25$  м. Практически точно такие же графики получается и для  $\Delta s = 50, 100, 200$  м.

На рисунке 3, *b* изображены графики зависимости коэффициента чувствительности метода CSP для  $\Delta s = 25, 50, 100, 200$  м. Видно, что для всех этих  $\Delta s$  увеличение времени от 0,5 до 3 с приводит к росту коэффициента чувствительности, а затем – к его снижению. Увеличение шага между источниками монотонно уменьшает коэффициент чувствительности. Если в качестве целевого выбрать время 2 с, то  $k_{sc} = 1200$  при  $\Delta s = 25$  м и  $k_{sc} = 300$  при  $\Delta s = 200$  м. Эти значения для коэффициента чувствительности метода CSP, особенно когда шаг между приемниками и источниками равен 25 м, очень высоки.

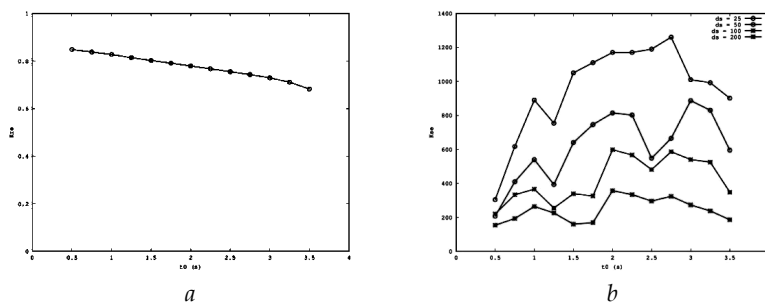


Рис. 3. Зависимость коэффициента реконструкции точечного дифрактора  $k_{re}$  от  $t_0$  (*a*) и зависимости коэффициента чувствительности  $k_{sc}$  от  $t_0$  для различных значения  $\Delta s$  (*b*)



## 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. Это показывает очень высокую чувствительность метода CSP, которая обуславливает его эффективность при поиске трещинных и трещинно-кавернозных резервуаров углеводородов. Такие значения чувствительности близки к предельным и вряд ли могут быть превзойдены другими методами.

## Список литературы

1. Кузнецов О. Л. и др. Экспериментальные исследования // Сейсмоакустика пористых и трещиноватых геологических сред : в 3 т. М., 2004. Т. 2.
2. Kozlov E. et al. Imagingscattering objects masked by specular reflections // 74th Annual International Meeting, SEG. Expanded Abstracts. 2004. P. 1131 – 1134.
3. Гольдин С. В. и др. Построение сейсмических изображений в рассеянных волнах как средство детализации сейсмического разреза // Геофизика, специальный выпуск. 2004. С. 23 – 29.
4. Поздняков В. А., Сафонов Д. В., Чеверда В. А. Оптимизация параметров фокусирующих преобразований с использованием численного моделирования // Геология и геофизика. 2000. Т. 41, №6. С. 930 – 938.
5. Кремлев А. Н. и др. Прогноз коллекторов трещинно-кавернозного типа по рассеянным сейсмическим волнам // Технологии сейсморазведки. 2008. №3. С. 36 – 39.
6. Kremlev A. N. et al. Fracture and cavernous reservoirs prospecting by the CSP prestack migration method // Extended Abstracts of 73th EAGE Conference & Exhibition. Vienna, Austria. 2011. URL: <http://www.earthdoc.org/detail.php?pubid=50142>.
7. Erokhin G. N. et al. CSP-method respecting of fracture-cavernous reservoirs in the Bazhen formation of the Salym oilfield // Extended abstract. 74th EAGE Conference & Exhibition. Copenhagen, Denmark. 2012. URL: <http://www.earthdoc.org/detail.php?pubid=59720>.

## Об авторе

Андрей Николаевич Кремлев – канд. физ.-мат. наук, доц., Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Калининград.  
E-mail: [ankremlev@gmail.com](mailto:ankremlev@gmail.com)

## About the author

Dr Andrey Kremlev – Ass. Prof., I. Kant Baltic Federal University, Kaliningrad.  
E-mail: [ankremlev@gmail.com](mailto:ankremlev@gmail.com)