

УДК 517.95, 519.6

**А. Н. Данилин¹, Г. Н. Ерохин, А. Н. Кремлев, Л. Н. Пестов¹,
Б. Саломонс, Ф. тен Круд**

**ЧИСЛЕННОЕ РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ
СВЕРХСЛАБЫХ ДИФРАКТОРОВ
В СЛОЖНОЙ АКУСТИЧЕСКОЙ СРЕДЕ**

115

Описываются результаты численного моделирования в задаче обнаружения сверхслабых дифракторов в сложной акустической среде. Сверхслабость здесь означает то, что дифракторы не определяются стандартной глубинной миграцией. Для решения задачи обнаружения мы используем две процедуры: Reverse Time Datuming (RTD) и Common Scattering Point (CSP). Первая процедура (RTD) продолжает волновое поле в обратном времени с дневной поверхности на некоторый уровень, достаточно близко расположенный к дифракторам. Затем дифракторы определяются методом CSP. Цифровая модель среды и синтетические данные были рассчитаны в исследовательской группе компании «Шелл». Дальнейшая обработка выполнялась в НИИ ПИиМГ БФУ им. И. Канта.

Some results of numerical simulating of the problem of detecting of ultraweak diffractors in a complex acoustical medium are represented. The term "ultraweak" here means that the diffractors are not determined by standard depth migration. To solve the problem of detecting we use two procedures: Reverse Time Datuming (RTD) and Common Scattering Point (CSP). The first procedure (RTD) extends (synthetic) wave field from the day surface down to some level that is sufficiently close to diffractors. Then the diffractors are determined by CSP-method. The numerical model of an acoustical medium and synthetic data were obtained in Shell company. Further processing has been performed in RIAIMG of Immanuel Kant Baltic Federal University.

Ключевые слова: уравнение акустики, пересчет волнового поля, общая рассеивающая точка, дифрактор, численное моделирование.

Key words: acoustic equation, redatuming of wave field, common scattering point, diffractor, numerical modeling.

Запишем задачу Коши для уравнения акустики в двумерной среде с постоянной плотностью 1 и переменной скоростью звука $c(x, z)$:

$$\begin{aligned} \frac{1}{c^2(x, z)} u_{tt} - u_{xx} - u_{zz} &= f(t)\delta(x - x_s)\delta(z), \\ (x, z) \in R^2, t \in (0, T), \\ u(x, z, 0) = 0, u_t(x, z, 0) &= 0. \end{aligned} \tag{1}$$

¹ Автор частично поддержан грантом РФФИ 12-01-00260а.



Здесь $f(t)$, $f(t)|_{t<0}=0$ – импульс Рикера; $\delta(x-x_s)$ – функция Дирака, моделирующая точечный источник в точке $(x_s, 0)$ прямой $z=0$. В (1) не указаны краевые условия, вместо них могут использоваться либо поглощающие границы, либо поглощающие слои (PML – perfectly matched layers). На рисунке 1 представлена модель скорости звука.

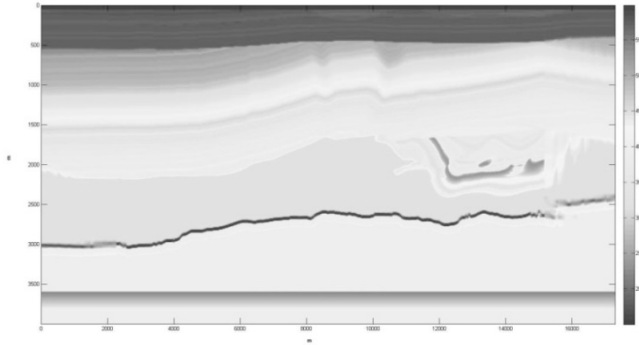


Рис. 1. Модель скорости звука

На глубине 3600 м расположен рефлектор шириной 200 м, содержащий 7 дифракторов. Коэффициент отражения на глубине 3600 м представлен на рисунке 2.

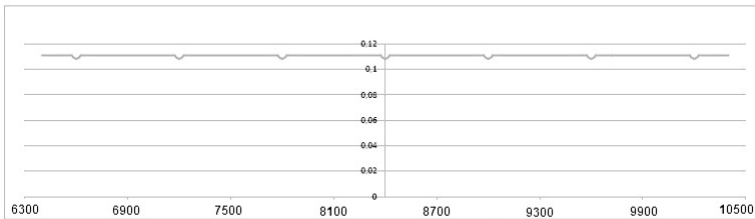


Рис. 2. Коэффициент отражения на глубине 3600 м

Наша цель – получить изображение дифракторов (предполагая их неизвестными) по синтетическому волновому полю $u_0(x, t; x_s) = u(x, 0, t; x_s)$, рассчитанному для модели скорости на рисунке 1. При этом скорость выше рефлектора (и только там) считается известной.

Первоначальные данные не содержали кратных отражений, связанных со свободной верхней границей, поскольку использовалось условие поглощающей границы при $z=0$. Тем не менее данные содержали внутренние кратные волны. Эти волны обычно слабы, но когда мы стали рассматривать ультраслабые дифракторы, их влияние оказалось неожиданно существенным. Чтобы подавить эти внутренние отражения была использована линеаризация относительно сглаженной скорости $c_0(x, z)$. Разность между c и c_0 обозначим через $\delta c(x, z) = c(x, z) - c_0(x, z)$. В результате приходим к паре уравнений



$$\frac{1}{c_0^2(x, z)} \frac{\partial^2 u_0}{\partial t^2} - \Delta u_0 = f(t) \delta(x - x_s), \quad (2)$$

$$\frac{1}{c_0^2(x, z)} \frac{\partial^2 u_1}{\partial t^2} - \Delta u_1 = \frac{2\delta c}{c_0^3} \frac{\partial^2 u_0}{\partial t^2}.$$

Если c_0 достаточно гладка, то поле u_0 представляет собой проходящую волну, и u_1 является волной первого порядка рассеяния. Функция u_1 может также рассматриваться как приближение Борна относительно рассеивающего потенциала $2\delta c / c_0^3$. Поскольку внутренние отражения соответствуют более высокому порядку аппроксимации, то они не присутствуют в u_1 . Необходимо иметь в виду два обстоятельства при применении такого приближения. Во-первых, сглаживание c меняет кинематику волн. Чтобы уменьшить влияние этого, лучше сглаживать медлительность $1/c$. Вышенаписанные уравнения легко переписать в терминах медлительности и его возмущения. Во-вторых, сглаживанием невозможно удалить большие контрасты в скорости/медлительности, что означает, что u_0 никогда не будет чисто проходящей волной, но всегда будет содержать некоторое «засорение» рассеянной энергией. Поэтому в правой части второго уравнения в (2) u_1 никогда не будет чисто линейной частью рассеяния. Тем не менее метод линеаризации достаточно эффективен для подавления внутренних кратных волн в модели, представленной на рисунке 1.

На рисунке 3 дан пример сейсмограммы общей точки взрыва (ОТВ), рассчитанной без кратных волн. На ней практически не видны волны, рассеянные на дифракторах. Более того, они не видны и после глубинной миграции (см. рис. 4, где хорошо виден только рефлектор).

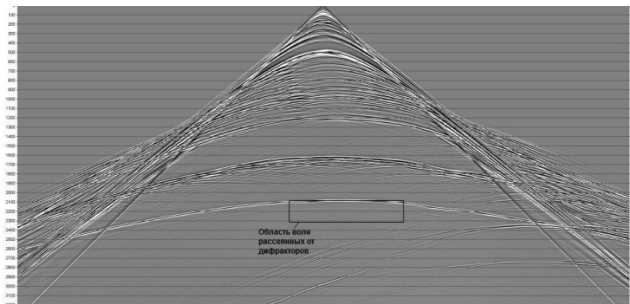


Рис. 3. Пример сейсмограммы ОТВ

Для обнаружения дифракторов сначала было пересчитано волновое поле на уровень 3250 м с помощью метода Reverse Time Datuming (RTD). Беррихил предложил в 1979 г. этот метод [1], основанный на продолжении волн в обратном времени [2] (см. также [3], где приведен пример численного моделирования). На рисунке 5 представлен пример сейсмограмм после RTD, на котором уже слабо видны волны, рассеянные от дифракторов.



Рис. 4. Результат стандартной миграции

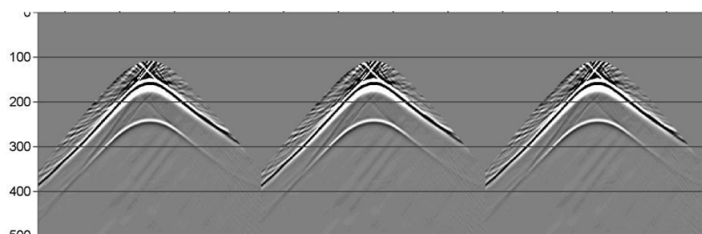


Рис. 5. Примеры сейсмограмм после RTD

Далее применяем метод CSP, который обнаруживает сверхслабые дифракторы по рассеянным волнам (Кремлев, 2008 [4], Ерохин, 2012 [5]). Он эффективно работает для сред, близких к горизонтально-слоистым, или слабо-неоднородных. Для рассматриваемой сложной скоростной модели применение CSP непосредственно к исходному полю u_0 не дает результата. Но если CSP применяется после выполнения RTD, то дифракторы становятся хорошо видны, рисунок 6.



Рис. 6. Дифракторы после RTD + CSP

Таким образом, в результате последовательного выполнения процедур RTD и CSP получено хорошее изображение дифракторов.

Список литературы

1. Berryhill John R. Wave-equation datuming // Geophysics. 1979. Vol. 44. P. 1329–1344.
2. Петрашень Г. И., Нахамкин С. А. Продолжение волновых полей в задачах сейсморазведки. Л., 1973.



3. Данилин А. Н., Пестов Л. Н., Седайкина В. А. // Вестник Балтийского федерального университета им. И. Канга. 2013. Вып. 10. С. 127–130.

4. Kremlev A. N., Erokhin G. N., Starikov L. E. et al. Reservoir fracture prediction-cavernous type on scattered seismic waves // Seismic prospecting technologies. 2008. №3. P. 36–39.

5. Erokhin G. N., Kremlev A. N., Starikov L. E. et al. CSP-method prospecting of fracture-cavernous reservoirs in the Bazhen formation of the Salym oilfield // Extended abstract. 74th EAGE Conference & Exhibition. Copenhagen, 2012. Y028.

Об авторах

Александр Николаевич Данилин – науч. сотр., Балтийский федеральный университет им. И. Канга, Калининград.

E-mail: ADanilin@kantiana.ru

Геннадий Николаевич Ерохин – д-р физ.-мат. наук, проф., Балтийский федеральный университет им. И. Канга, Калининград.

E-mail: GErokhin@kantiana.ru

Андрей Николаевич Кремлев – канд. физ.-мат. наук, доц., Балтийский федеральный университет им. И. Канга, Калининград.

E-mail: ankremlev@gmail.com

Леонид Николаевич Пестов – д-р физ.-мат. наук, доц., Балтийский федеральный университет им. И. Канга, Калининград.

E-mail: lpestov@kantiana.ru

Будевейн Саломонс – исследователь компании «Шелл», Рейсвейк, Нидерланды.

E-mail: Boudewijn.Salomons@shell.com

Фонс тен Кроуд – д-р, исследователь компании «Шелл», Рейсвейк, Нидерланды.

E-mail: A.TenKroode@shell.com

About the authors

Researcher Alexandr Danilin – I. Kant Baltic Federal University, Kaliningrad.

E-mail: ADanilin@kantiana.ru

Prof. Gennady Erokhin – I. Kant Baltic Federal University, Kaliningrad.

E-mail: GErokhin@kantiana.ru

Dr Andrey Kremlev – Ass. Prof., I. Kant Baltic Federal University, Kaliningrad.

E-mail: ankremlev@gmail.com

Prof. Leonid Pestov – I. Kant Baltic Federal University, Kaliningrad.

E-mail: lpestov@kantiana.ru

Researcher Boudewijn Salomons – Shell Research, Rijswijk, Netherland.

E-mail: Boudewijn.Salomons@shell.com

Dr Fons ten Kroode – Shell Research, Rijswijk, Netherland.

E-mail: A.TenKroode@shell.com