



УДК 517.95, 519.711.3

А. Н. Данилин, Л. Н. Пестов, В. А. Седайкина

### АЛГОРИТМ ПЕРЕСЧЕТА ВОЛНОВОГО ПОЛЯ НА НОВЫЙ УРОВЕНЬ

Описывается процедура переноса волнового поля со свободной границы на некоторый уровень, располагающийся ниже зоны малых скоростей, с целью исключить искажающее влияние этой зоны. Численное решение данной задачи основано на продолжении волнового поля в обратном времени. Новым элементом является вырезание волн-помех на основании расчета характеристик. Приводятся результаты численного моделирования.

127

The article describes the wave equation datuming is the procedure in seismic exploration that used for removing of the influence of Weathering Velocity Zone. It means transform the wave field at free boundary to some level below that Zone. Numerical procedure for solving this problem based on reverse time wave continuation. The new thing is that we cut of the ghost waves using characteristics. The results of numerical modeling are represented.

**Ключевые слова:** пересчет волнового поля на новый уровень, численное моделирование.

**Key words:** wave equation datuming, numerical modeling.

Одной из процедур, применяемых в сейсморазведке с целью исключить искажающее влияние ЗМС (зона малых скоростей), является пересчет волнового поля со свободной границы  $z = 0$  на некоторый уровень  $z_0 > 0$  [1; 2]. При этом в полосе  $z \in [0, z_0]$  среда считается известной, при  $z > z_0$  среда, вообще говоря, неизвестна. В статье описывается процедура численного решения этой задачи, основанная на продолжении волнового поля в обратном времени [3]. Новым элементом является вырезание «паразитных» волн на основании расчета характеристик.

#### 1. Постановка задачи

Сформулируем начально-краевую задачу (прямую) для уравнения акустики в двумерной среде:

$$\begin{aligned} \rho u_{tt} - u_{xx} - u_{zz} &= 0, \quad x \in R, z > 0, t \in (0, T), \\ u(x, z, 0) &= 0, \quad u_t(x, z, 0) = 0, \quad u_z(x, 0, t; x_s) = f(t)\delta(x - x_s), \end{aligned} \quad (1)$$

где  $\rho(x, z)$  — плотность ( $c(x, z) = \sqrt{1/\rho(x, z)}$  — скорость волн);  $x_s$  — координата точечного граничного источника;  $f(x, t)$  — импульс Рикера. Пусть нам известна функция  $u_0(x, t; x_s) = u(x, 0, t; x_s)$ . Пусть  $\rho(x, z)$  известна в полосе  $[0, z_0]$ , далее на отрезке  $[z_0, z_1]$   $\rho = \rho_0 = \text{const}$ , а при  $z > z_1$  функция  $\rho$  неизвестна. Сформулируем другую задачу с объемными точечными источниками на линии  $z = z_0$ :



$$\begin{aligned} \rho' u'_{tt} - u'_{xx} - u'_{zz} &= f(t)\delta(x - x_s)\delta(z - z_0), \quad x \in R, z > 0, t \in (0, T), \\ u'(x, z, 0) &= 0, \quad u'_t(x, z, 0) = 0, \quad u'_z(x, 0, t; x_s) = 0, \end{aligned} \quad (2)$$

Теперь слой  $[0, z_1]$  однородный,  $\rho'|_{[0, z_1]} = \rho_0$  и  $\rho'(z) = \rho(z)$  при  $z > z_1$ .

Задача пересчета ставится так: требуется по заданной функции  $u_0(x, t; x_s)$  найти функцию  $u_1(x, t; x_s) = u'(x, z_0, t; x_s)$ . Легко видеть, что задача некорректна. Но она имеет важное значение в сейсморазведке (wave equation datuming). Эта процедура — «опускание источников и приемников» — часто основана на продолжении волнового поля в обратном времени. Ниже описан алгоритм, основанный на продолжении в обратном времени и вырезании «лишних» волн, возникающих при продолжении. Затем даны результаты численного моделирования.

128

1. Опускание приемников на уровень  $z = z_0$ . Рассмотрим задачу продолжения поля  $u_0(x, t; x_s)$  в обратном времени:

$$\begin{aligned} \rho_1 v_{tt} - v_{xx} - v_{zz} &= 0, \quad x \in R, z > 0, t \in (0, T), \\ v(x, z, T) &= 0, \quad v_t(x, z, T) = 0, \quad v(x, 0, t; x_s) = u_0(x, t; x_s). \end{aligned} \quad (3)$$

Здесь  $\rho_1 = \rho$  в слое  $[0, z_1]$  и  $\rho = \rho_0$  при  $z > z_1$ . Поле  $u_0(x, t; x_s)$  является здесь источником типа Дирихле и содержит отражения, возникшие в слое  $[0, z_0]$ , которые выступают помехами. Чтобы удалить их, рассчитываем времена прихода  $\tau(x, x_s; z_1)$  отраженных волн от фиктивной границы, расположенной на уровне  $z = z_1$ . Вместо  $u_0$  вводим функцию  $\tilde{u}_0$ , обрезая  $u_0(x, t; x_s)$  при  $t < \tau(x, x_s; z_1)$ , и решаем задачу продолжения (3) с заменой  $u_0$  на  $\tilde{u}_0$ . Обозначим  $u_1(x, t; x_s) = v(x, z_0, t; x_s)$ . Это и есть результат опускания приемников. Заметим, что при решении этой задачи функция  $v$ , вообще говоря, не удовлетворяет условию  $v(x, z, t; x_s) = 0$  при  $t < \tau(x, z; x_s)$  (где  $\tau(x, z; x_s)$  — время распространения волны от источника до точки  $(x, z)$ ), которому удовлетворяет функция  $u$  (решение задачи (1)). Поэтому функция  $v(x, z_0, t; x_s)$  также обрезается с учетом требования  $v(x, z_0, t; x_s) = 0$  при  $t < \tau(x, z_0, x_s)$ .

2. Опускание источников на уровень  $z = z_0$ . Волновое поле удовлетворяет принципу взаимности: если  $u(x, z, t; x_s, z_s)$  — волна, возбужденная источником, расположенным в точке  $(x_s, z_s)$ , то имеет место равенство  $u(x, z, t; x_s, z_s) = u(x_s, z_s, t; x, z)$ . Тогда функция  $w_0(x_s, t; x, z_0) = v(x, z_0, t; x_s)$  приобретает смысл волнового поля, возбуждаемого источниками, расположенными в точках  $(x, z_0)$ , и измеряемого в точках  $(x_s, 0)$ . Теперь опять ставим задачу продолжения поля в обратном времени (здесь мы меняем обозначения  $x$  и  $x_s$  местами):

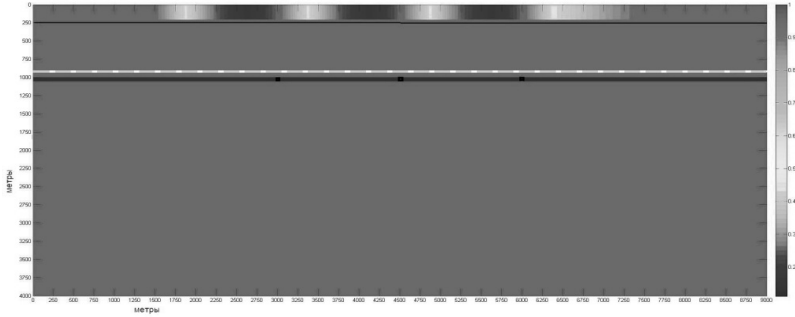
$$\begin{aligned} \rho_1 w_{tt} - w_{xx} - w_{zz} &= 0, \quad x \in R, z > 0, t \in (0, T), \\ w(x, z, T) &= 0, \quad w_t(x, z, T) = 0, \quad w(x, 0, t; x_s) = w_0(x, t; x_s). \end{aligned}$$

В результате получаем поле  $w(x, z_0, t; x_s, z_0)$  (с теми же оговорками, про обрезание волн ниже характеристик, что и в предыдущем пункте).



## 2. Результаты численного моделирования

Был разработан алгоритм и программа погружения волнового поля. Шаг по сетке выбирался из условия, что длина волны (в смысле расстояния между передним и задним фронтом) укладывается в 10 точек. Ниже представлены рисунки, иллюстрирующие все этапы процедуры погружения (рис. 1–5).



129

Рис 1. Расчетная область: линия 250 м – уровень погружения волнового поля; область, обозначенная черной толстой линией (на уровне 1000 м) – слой толщины 50 м, содержащий три дифрактора; светлая пунктирная линия – виртуальная граница, для которой рассчитываются времена отраженных волн

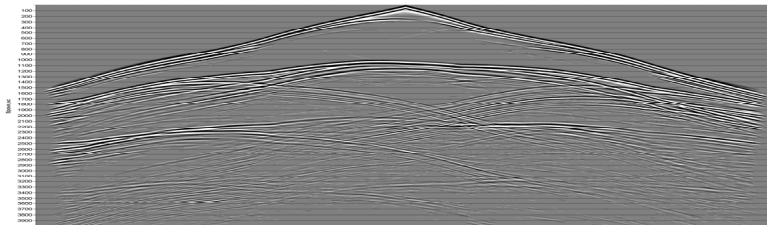


Рис. 2. Сейсмограмма решения прямой задачи – волновое поле  $u_0$

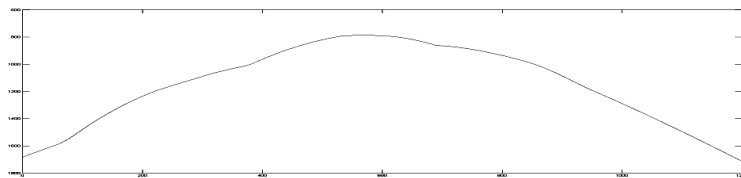


Рис. 3. Пример годографа отраженной волны

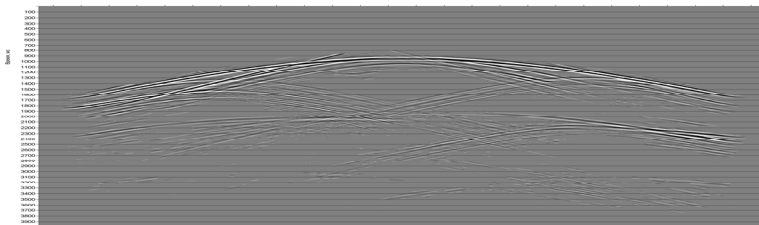


Рис. 4. Сейсмограмма после опускания приемников

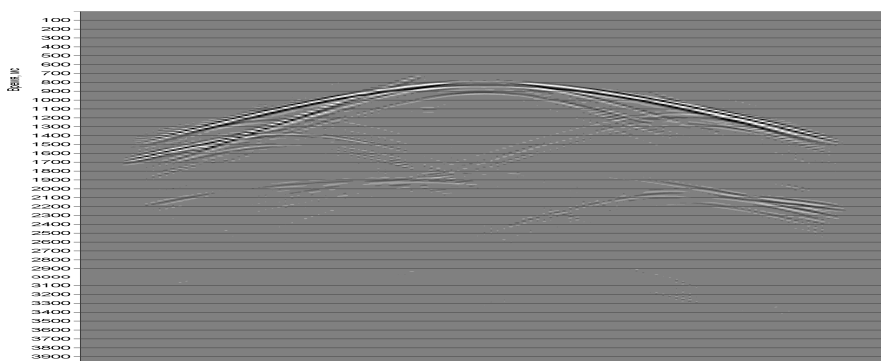


Рис. 5. Окончательный результат погружения источников и приемников: рассеянные волны от рефлектора и трех дифракторов

*Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект 12-01-00260а).*

### Список литературы

1. *Berryhill John R. Wave-equation datuming // Geophysics. 1979. Vol. 44. P. 1329–1344.*
2. *Berryhill John R. Wave-equation datuming before stack // Geophysics. 1984. Vol. 49. P. 2064–2066.*
3. *Петрашень Г. И., Нахамкин С. А. Продолжение волновых полей в задачах сейсморазведки. Л., 1973.*

### Об авторах

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

E-mail: ADanilin@kantiana.ru

Леонид Николаевич Пестов – гл. науч. сотр., Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Калининград.

E-mail: lpestov@kantiana.ru

Валерия Александровна Седайкина – программист, Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Калининград.

E-mail: VSedaikina@kantiana.ru

### About the authors

Alexandr Danilin – Scientist, Immanuel Kant Baltic Federal University, Kaliningrad.

E-mail: ADanilin@kantiana.ru

Leonid Pestov – Principal Scientist, I. Kant Baltic Federal University, Kaliningrad.

E-mail: lpestov@kantiana.ru

Valeriia Sedaikina – programmer, Immanuel Kant Baltic Federal University, Kaliningrad.

E-mail: VSedaikina@kantiana.ru