

Из формулы (1) можно найти толщину пластины при регистрации с той же стороны, где находится источник:

$$H_1 = 2c_p \cdot t_{2P} \cdot$$

$$H_2 = 2c_s \cdot t_{2S} \cdot$$

$$H_3 = \frac{c_p c_s}{c_p + c_s} \cdot t_{PS} \cdot$$

Аналогично находятся все  $H_i$  для остальных измеренных  $t_{nPmS}$ . Усреднив, найдем итоговую толщину пластины:

$$H = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N H_i \cdot$$

Если регистрация времени проводится на обеих сторонах пластины, то можно аналогичным образом вычислить  $h_j$  для  $t_p$ ,  $t_s$ ,  $t_{ps}$  и т.д. и учесть их при усреднении по формуле (9).

$$h_1 = c_p \cdot t_p \cdot$$

$$h_2 = c_s \cdot t_s \cdot$$

$$h_3 = \frac{c_p c_s}{c_p + 2c_s} \cdot t_{PS} \cdot$$

$$H = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N H_i + \frac{1}{M} \sum_{j=1}^M h_j \cdot$$

В выражениях (5) и (9)  $N$  – число различных  $t_{nPmS}$ , измеренных с той же стороны, где источник,  $M$  – со стороны, противоположной источнику.

#### Заключение

Найден способ нахождения толщины льда и тонких пластин на основе измерения кратных волн. Работа была выполнена при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (№ 2.9901.2017/8.9).

#### Литература

1. Болотских П.А., Травин Г.А. Лазерное возбуждение ультразвуковых колебаний // Научные ведомости БГУ. – 1997. – № 2. – С. 52–53.
2. Stognii P.V., Petrov D.I., Khokhlov N.I., Petrov I.B. Simulation of seismic processes in geological exploration of Arctic shelf // Russian Journal of Numerical Analysis and Mathematical Modelling. – 2017. – V. 32, N 6. P. 381–392.

Получено 14.05.2018

УДК 517.9

П. В. Стогний

Московский физико-технический институт  
(государственный университет)  
E-mail: stognii@phystech.edu

## ПОЛУЧЕНИЕ КРАТНЫХ ВОЛН В МОДЕЛИ С ЛЕДЯНЫМ ПОЛЕМ С ПОМОЩЬЮ СЕТОЧНО-ХАРАКТЕРИСТИЧЕСКОГО МЕТОДА

Целью данной работы является получение кратных волн в слое льда в результате моделирования волновых процессов в условиях Арктического шельфа. Построена трехмерная модель ледяного поля, получены волновые картины многократных переотражений в слое льда и в слое воды.

**Ключевые слова:** ледяное поле, сеточно-характеристический метод

### Введение

Зона Арктического шельфа представляет собой сложный для проведения геологоразведочных работ регион в связи с присутствием большого количества различных ледовых образований: айсбергов, торосов, ледяных полей. Дополнительные трудности вносят многочисленные переотражения в слое льда и воды, которые образуются при отражении сигнала от свободной границы (лед-воздух), границы лед-вода и границы вода-грунт. Получение кратных волн в слое льда и воды представляет интерес для исследований с целью их дальнейшего отделения от отражений от различных геологических слоев: нефтегазового слоя, слоя грунта и других.

### Математическая модель и результаты расчетов

В данной работе представлены результаты расчетов трехмерной модели, состоящей из следующих геологических слоев: слоя льда, водного слоя и слоя грунта. Общая площадь интегрирования по осям  $x$ ,  $y$  составила 25 000 м<sup>2</sup>. Высота слоя льда равнялась 2.5 м [1], слоя воды — 70 м, слоя грунта — 200 м. Шаг по времени составлял 10<sup>-5</sup> с. Всего было сдела-

© П. В. Стогний, 2018

© Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Московский физико-технический институт (государственный университет)», 2018

но 50 тыс. шагов по времени. В качестве источника сейсмического сигнала использовался импульс Рикера. Источник сигнала располагался на поверхности слоя льда расчетной области.

Для численного расчета использовался сеточно-характеристический метод, который показал хорошие результаты для решения задач данного класса [2].

На рис. 1 представлены результаты расчетов описанной выше модели — волновые картины отражений в различные моменты времени. На рис. 1а представлена общая картина отражений в слое льда, воды и грунта. На рис. 1б изображены кратные волны в слое льда. На рис. 1в можно увидеть кратные волны в слое воды.

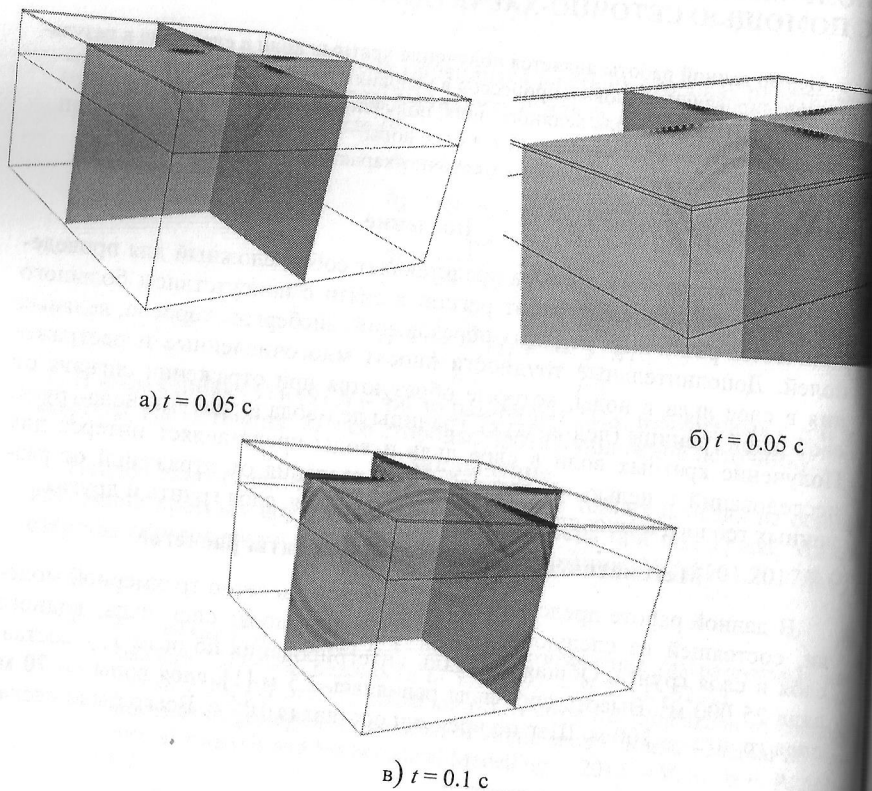


Рис. 1. Волновые картины отражений в модели с ледяным полем

## Результаты

Было проведено исследование волновых процессов для трехмерной модели в ледяном поле. Получены волновые картины отражений от различных геологических слоев: лед, вода, грунт. Получены многократные перестраивания в слое льда и воды. Представленные результаты показывают хорошую применимость сеточно-характеристического метода для получения кратных волн в геологических слоях, чтобы в дальнейшем их отделить от волновых отражений от других геологических слоев.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 16-07-00233 а.

## Литература

1. Фролов С.В., Федяков В.Е., Третьяков В.Ю., Клейн А.Э., Алексеев Г.В. Новые данные об изменении толщины льда в Арктическом бассейне // Доклады Академии Наук. 2009. Т. 425, № 1. С. 104–108.
2. Stagnit P.V., Petrov D.I., Khokhlov N.I., Petrov I.B. Simulation of seismic processes in geological exploration of Arctic shelf // Russian journal of numerical analysis and mathematical modelling. – 2017. – V. 32, № 6. – P. 381–392.

Получено 30.04.2018