

УДК 504.5.06

DOI 10.29222/ipng.2078-5712.2018-23.art91

## ПРИМЕНЕНИЕ СЕТОЧНО-ХАРАКТЕРИСТИЧЕСКОГО МЕТОДА ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ СЕЙСМИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА

Стогний П.В.<sup>1</sup>, Хохлов Н.И.<sup>1,2</sup>, Петров И.В.<sup>1,2</sup>

1 – Московский физико-технический институт (государственный университет),

2 – Научно-исследовательский институт системных исследований

Российской академии наук

E-mail: stognii@phystech.edu

**Аннотация.** В работе представлены результаты сейсмического моделирования для состояния газонасыщенных пород в различные периоды времени от одного до 4-х лет для двумерной и трехмерной постановки задачи. Проводится сравнительный анализ волновых картин откликов от газонасыщенных пород. Делается вывод о правомерности замены трехмерной модели двумерной с целью упростить расчеты.

**Ключевые слова:** газонасыщенные породы, сейсмическое моделирование, сейсмический мониторинг.

## APPLICATION OF THE NETWORK-CHARACTERISTIC METHOD FOR THE SEISMIC MONITORING TASK

Stognii P.V.<sup>1</sup>, Khokhlov N.I.<sup>1,2</sup>, Petrov I.B.<sup>1,2</sup>

1 – Moscow Institute of Physics and Technology (State University), 2 – Research Institute for System Studies of the Russian Academy of Sciences

E-mail: stognii@phystech.edu

**Abstract.** The paper presents the results of seismic modeling for the gas-saturated rock state in different periods of time from one to four years for the two-dimensional and three-dimensional formulation of the problem. A comparative analysis of response wave patterns from gas-saturated rocks was held. The conclusion is made about the legitimacy of replacing the three-dimensional model with two-dimensional in order to simplify the calculations.

**Keywords:** gas saturated rocks, seismic modelling, seismic monitoring.

### Введение

Задача сейсмического мониторинга состоит в проведении анализа изменения сейсмического отклика от залегающих под платформой грунтовых пород с содержанием газа с течением времени. Решение данной задачи крайне важно, так как при установке нефтяных платформ часто возникают опасные ситуации, связанные с возможными выбросами газа [1] на поверхность. С целью их предотвращения, необходимо

прогнозировать возможные места скопления газа [2]. Для этого проводится сейсмический мониторинг добычи нефти и газа, во время которого система источник – приемники помещается на поверхности воды и на дне (4D сейсморазведка) [3].

Проведение работ такого рода требует значительных денежных ресурсов. Поэтому перед проведением сейсмических работ проводится моделирование распространения газонасыщенных пород через слои грунта.

### Математическая модель и методы расчета

Для описания динамических процессов, которые происходят в гетерогенных геологических средах, в работе используются уравнения линейной упругости (1), (2) и акустики (3), (4):

$$\rho \frac{\partial}{\partial t} v = (\nabla \cdot \sigma)^T, \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \sigma = (\rho c_{p^2} - 2\rho c_{s^2})(\nabla \cdot v)I + \rho c_{s^2}(\nabla v + (\nabla v)^T), \quad (2)$$

$$\rho \frac{\partial}{\partial t} v = -\nabla p, \quad (3)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} p = -\rho c^2(\nabla \cdot v), \quad (4)$$

где  $v$  – скорость движения,  $\sigma$  – тензор напряжений Коши,  $\rho$  – плотность материала;  $I$  – единичный тензор,  $a \cdot b$  – тензорное произведение векторов  $a$  и  $b$ ,  $t$  – время,  $p$  – давление,  $c$  – скорость звука в идеальной жидкости,  $t$  – время.

Для численного решения систем уравнений (1), (2) и (3), (4) применяется сеточно-характеристический метод [4]. Он позволяет строить корректные численные алгоритмы расчета точек на границах [5] и точек, лежащих на поверхностях раздела двух сред с разными плотностями и разными параметрами Ляме. Во всех вычислениях использовался сеточно-характеристический метод на основе схемы Русанова 3-го порядка точности.

### Модель газовых карманов – 2D

Моделировалось распространение сейсмических волн в слоистом грунте для двумерного случая. Базовая модель состояла из девяти слоев: водного слоя, ила, влагонасыщенного песка (3 слоя), глины (3 слоя), нефтеносного слоя. Схематичное изображение слоистой структуры грунта для базовой модели представлено на рис.1а. Проводились расчеты распространения сейсмических волн в 1, 2, 3 и 4 года. Считается, что в 1 году газонасыщенные осадки отсутствуют. Данный случай согласуется с моделью

на рис.1а. Начиная со 2 года, область газонасыщенных пород распространяется снизу вверх и в стороны. Схематичные изображения моделей во 2, 3 и 4 года представлены на рис. 1б, в, г.

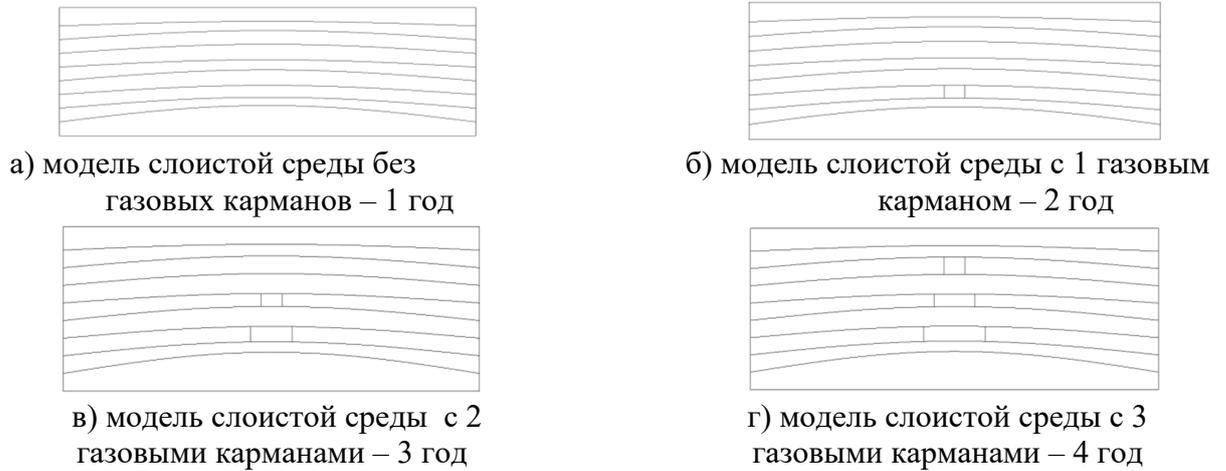


Рис. 1. Схематичное изображение моделей с газовыми карманами в 1, 2, 3 и 4 год

На рисунке 2 представлены разности волновых картин отражений для 2, 3 и 4 года с волновой картиной 1 года в различные моменты времени. Разности на рис. 2 являются явно выделенными отражениями от газовых карманов. Из рис. 2в, г видно, что волновые отражения от газового кармана в 4 год расчета приближаются к поверхности воды.

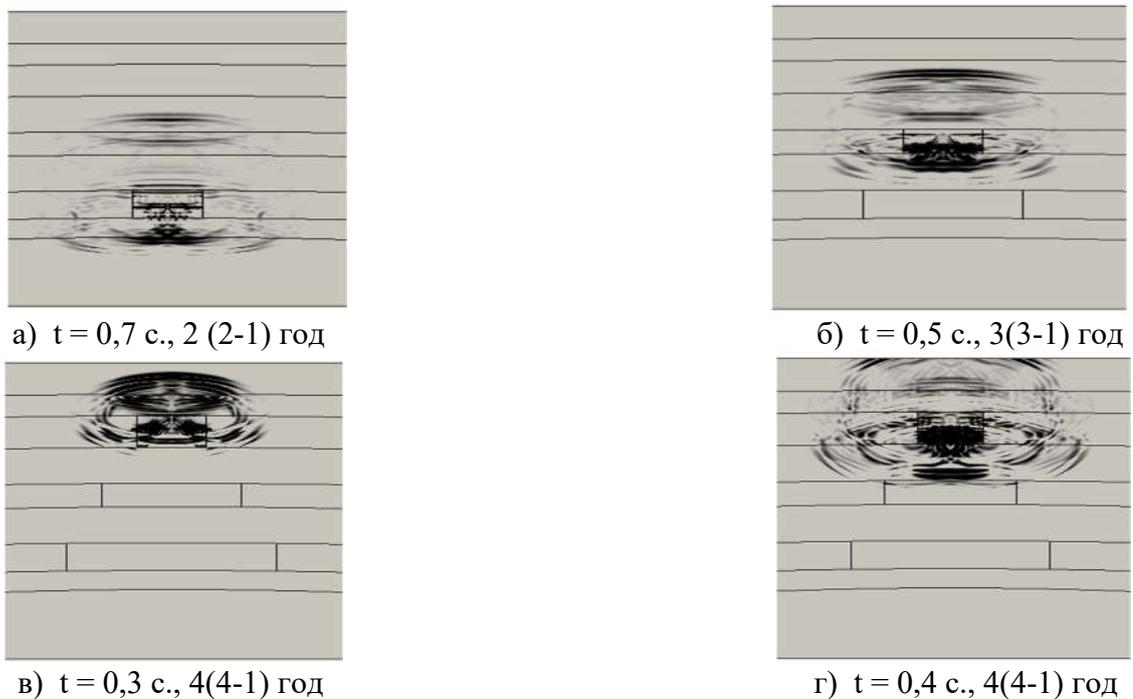


Рис. 2. Разности волновых картин для 2, 3 и 4 года с волновыми картинками 1 года – отражения от газовых карманов

### Модель газовых карманов – 3D

Были проведены аналогичные расчеты распространения сейсмических волн в слоистой структуре грунта для трехмерной модели на прямоугольных сетках. На рисунке 3 представлены разности волновых картин отражений для 2, 3 и 4 года с волновой картиной 1 года в различные моменты времени. Разности на рис. 3 являются явно выделенными отражениями от газовых карманов. Из рис. 3в видно, что волновые отражения от газового кармана в 4 год расчета приближаются к поверхности воды. Результаты аналогичны результатам 2D расчетов.

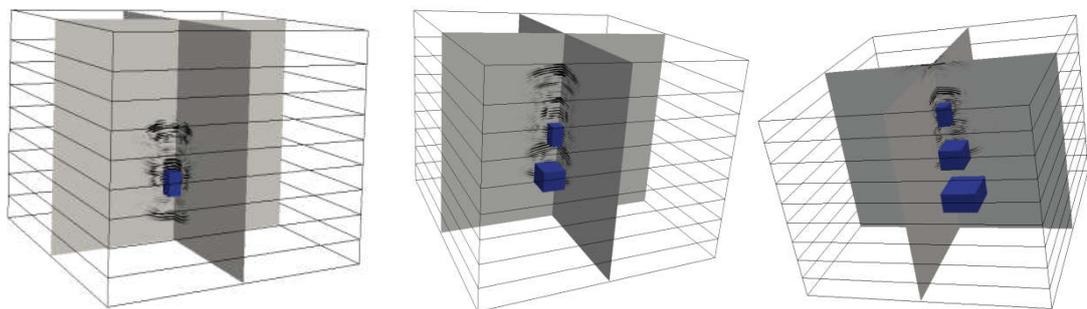
а)  $t = 0,45$  с (2-1) годб)  $t = 0,65$  с (3-1) годв)  $t = 0,3$  с (4-1) год

Рис. 3. Разности волновых картин для 2, 3 и 4 года с волновыми картинами 1 года – отражения от газовых карманов

**Выводы.** В работе представлены результаты моделирования распространения сейсмических волн в слоистой структуре грунта в присутствии газонасыщенных карманов для двумерной и трехмерной постановки задачи. Представлены разности волновых картин для 2, 3 и 4 года расчета с 1 годом для явного отображения сейсмических откликов от газонасыщенных пород для двумерных и трехмерных моделей. Волновая картина сейсмических откликов от газонасыщенных карманов на 4 год расчета показала приближение отраженных волн к поверхности расчетной области. Результат подтверждает правомерность замены трехмерной модели двумерной для упрощения расчетов.

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

#### ЛИТЕРАТУРА

1. *Миронюк С.Г.* Морские инженерные изыскания и оценка опасности субаквальных геологических процессов. Инженерные изыскания на акваториях. №4,2014
2. *Анисимов Л.А., Маштаков А.С.* Геодинамические риски при эксплуатации нефтяных платформ и самоподъемных буровых установок в северной части Каспийского моря. Вестник ВолГАСУ. Сер.: Стр-во и архит. 2012. Вып. 26 (45). С. 12–15.
3. *Богоявленский В.И.* Чрезвычайные ситуации при освоении ресурсов нефти и газа в Арктике и Мировом океане. Безопасность деятельности человека в Арктике. Арктика: экология и экономика. № 4 (16). 2014.
4. *Магомедов К.М., Холодов А.С.* Сеточно-характеристические численные методы. М.:Наука, 1988.
5. *Golubev V.I., Petrov I.B., Khokhlov N.I.* Numerical simulation of seismic activity by the grid-characteristic method. Computational Mathematics and Mathematical Physics. V. 53, No 10. P.1523–1533, 2013.