

УДК 519.63

**ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОЛНОВЫХ ПРОЦЕССОВ  
В СЛОИСТЫХ СРЕДАХ С ГАЗОНАСЫЩЕННЫМИ ВКЛЮЧЕНИЯМИ:  
СРАВНЕНИЕ ДВУМЕРНЫХ И ТРЁХМЕРНЫХ МОДЕЛЕЙ****П. В. Стогний<sup>1,\*</sup>, Н. И. Хохлов<sup>1,2,\*\*</sup>, член-корреспондент РАН И. Б. Петров<sup>1,2,\*\*\*</sup>**

Поступило 20.08.2019 г.

В настоящее время изучение Арктического региона — приоритетное направление для исследований в нашей стране в связи с расположенными там огромными запасами неизведанных месторождений нефти и газа. Большие запасы углеводородов находятся на акватории Северных морей. Осложняют разработку месторождений на акватории газовые взрывы, которые происходят в результате непреднамеренного вскрытия и дальнейшего распространения газа. В связи с невозможностью проведения частого мониторинга территории с газовыми залежами проводится численное моделирование территорий с обнаруженными газонасыщенными слоями. В данной работе представлены результаты численного моделирования распространения сейсмических волн в слоистых моделях геологических сред с газонасыщенными включениями для четырёхлетнего периода с помощью сеточно-характеристического метода. Получены волновые картины сейсмических откликов и сейсмограммы для рассматриваемой постановки задачи. Проведено сравнение полученных волновых картин и сейсмограмм для двумерного и трёхмерного случая. Результаты показали хорошее совпадение.

*Ключевые слова:* Арктика, газонасыщенные среды, сейсморазведка, сеточно-характеристический метод.

**DOI:** <https://doi.org/10.31857/S0869-56524894351-354>

**ВВЕДЕНИЕ**

Зона Арктического шельфа — важный регион для исследований. Там расположены огромные залежи углеводородов, запасы нефти в которых оцениваются в 13%, а запасы газа — в 30% всех неисследованных ресурсов Земли [1]. Добычу углеводородов в Арктике, помимо суровых климатических условий, осложняют взрывы газа в атмосферу [2, 3]. Залежи газа, взрыв которых наблюдается, являются запасами газа с аномально высоким давлением внутри. Также их ещё называют газовыми карманами [4]. Залежи газа, как правило, окружены плотным слоем различных геологических пород или многолетнемерзлыми породами. Иногда происходит непреднамеренное вскрытие залежи буровой установкой. Газ постепенно начинает распространяться по пространству, в том числе вверх, к поверхности. Как результат поднятия газа, происходит газовый взрыв в атмосферу. Подобный взрыв может привести к пол-

ному уничтожению буровой установки и даже гибели людей.

Для предотвращения подобных катастроф проводится мониторинг территории с газовыми карманами для своевременного принятия мер по эвакуации бурового оборудования и экипажа. Частый мониторинг не представляется возможным в связи с высокой стоимостью проведения подобного рода сейсмических работ. С этой целью проводится исследование территории с газовыми карманами.

В данной работе представлены результаты численного моделирования распространения упругих волн в геологических средах с газовыми карманами для четырёхлетнего периода. Проводится сравнительный анализ распространения упругих волн в геологических средах с газонасыщенными породами для двумерных и трёхмерных моделей.

**МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ**

Для моделирования распространения упругих волн в геологических средах использовалась система линейно-упругих уравнений [5]:

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

$$\frac{\partial}{\partial t} \sigma = \lambda (\nabla \cdot v) I + \mu (\nabla \times v + (\nabla \times v)^T). \quad (2)$$

<sup>1</sup> Московский физико-технический институт  
(национальный исследовательский университет),  
Долгопрудный Московской обл.

<sup>2</sup> Научно-исследовательский институт  
системных исследований

Российской Академии наук, Москва

\*E-mail: stognii@phystech.edu

\*\*E-mail: k\_h@inbox.ru

\*\*\*E-mail: petrov@miph.ru

В (1), (2)  $\rho$  — плотность геологической среды,  $v$  — скорость упругих волн,  $t$  — время,  $\sigma$  — тензор напряжений Коши,  $\lambda$  и  $\mu$  — параметры Ляме, описывающие свойства упругого материала.

Все расчёты были выполнены с помощью секционно-характеристического метода сквозным счётом [6–9]. Для этого в каждом геологическом слое задавались свои параметры среды: плотность, продольная и поперечная скорость звука. Таким образом, описание контактных условий на границе раздела двух геологических сред не требовалось. Все расчёты моделей были выполнены с помощью схемы Русанова третьего порядка точности. На контактной границе раздела геологических сред порядок точности снижался до первого.

## РЕЗУЛЬТАТЫ

Было проведено численное моделирование распространения упругих волн в слоистой среде с газонасыщенными породами для двумерных и трёхмерных моделей. Базовая модель состояла из 9 слоёв (геологические слои сверху вниз, рис. 1): водный слой, илистый слой, слой глины, слой влагонасыщенного песка, второй слой глины, второй слой влагонасыщенного песка, третий слой глины, третий слой влагонасыщенного песка, нефтеносный слой. Глубина водного слоя была равна 200 м, глубина каждого из остальных восьми слоёв составляла 150 м для двумерных и трёхмерных моделей. Ширина расчётной области для двумерных моделей была равна 200 м, для трёхмерных моделей —  $2000 \times 2000$  м<sup>2</sup>. В первый год условно считалось, что газовые карманы отсутствуют. В данной работе решается статическая задача. Для моделирования динамики рас-

пространения газа в слоистых геологических средах с каждым годом добавлялся один газовый карман в вышерасположенном слое влагонасыщенного песка, а ширина текущего газового кармана увеличивалась на 200 м. Поэтому во второй, третий и четвёртый годы были один, два и три газовых кармана соответственно. В моделях все газовые карманы располагались в слоях влагонасыщенного песка, так как слой глины, расположенный между слоями песка, не задерживает газ из-за большой плотности среды — 2500 кг/м<sup>3</sup>. Параметры остальных геологических слоёв следующие, кг/м<sup>3</sup>: плотность воды — 1000, ила — 1600, песка — 1200, нефтеносного слоя — 850, газа — 900.

На боковых границах моделей и нижней границе было установлено неотражающее граничное условие, на границе вода–воздух — условие свободной границы.

Параметры расчётов моделей были следующими. Шаг по пространству (по оси  $x$  — для двумерных моделей и по осям  $x, y$  — для трёхмерных моделей) был равен 1 м, шаг по глубине (по оси  $y$  — для двумерных моделей и по оси  $z$  — для трёхмерных моделей) составлял 1 м. Шаг по времени был равен  $10^{-4}$  с. Во всех моделях использовался точечный источник импульса Рикера с центральной частотой 30 Гц, который был расположен на поверхности водного слоя в центре расчётной области. Ряд приёмников сигнала располагался рядом с источником: 200 приёмников — в двумерных моделях, 100 приёмников — в трёхмерных моделях.

Волновые картины сейсмических откликов на 3-й год расчёта для двумерной (рис. 1а) и трёх-

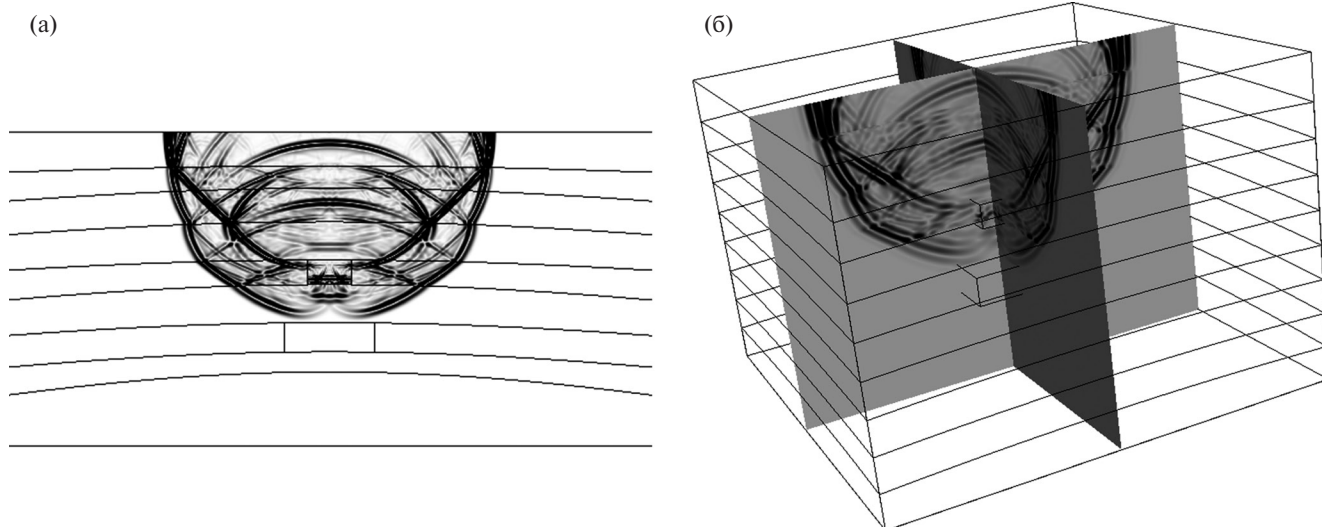
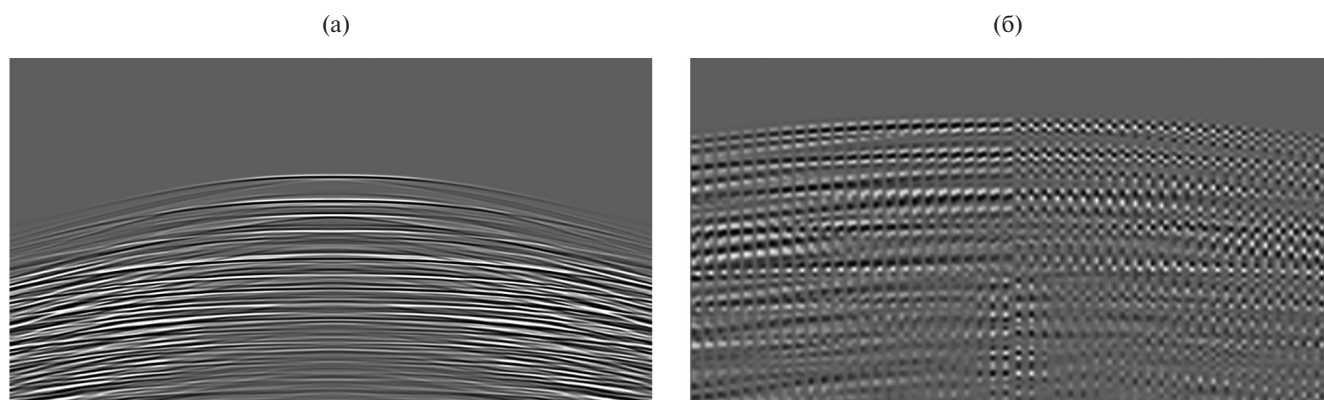


Рис. 1. Волновое поле сейсмических скоростей в момент времени 0,5 с в моделях с газонасыщенными средами для 3-го года расчёта: а — для двумерной модели, б — для трёхмерной модели.



**Рис. 2.** Сейсмограммы для моделей с газонасыщенными средами для 3-го года расчёта: а — для двумерной модели, б — для трёхмерной модели.

мерной (рис. 1б) модели в момент времени 0,5 с представлены на рис. 1. Отчётливо видны отражения от контактных границ вода–ил, ил–песок–глина, а также от верхнего газового кармана, расположенного в слое песка. До нижнего газового кармана импульс в момент времени 0,5 с, для которого представлены волновые картины на рис. 1, ещё не успел пройти. Волновые поля на рис. 1 совпадают, поэтому в дальнейшем возможно заменять трёхмерные модели на двумерные во время проведения подобных расчётов.

Были получены сейсмограммы для двумерных и трёхмерных моделей. Сейсмограммы для 3-го года расчёта представлены на рис. 2. На сейсмограммах рис. 2 изображены значения нормальных компонент скорости в зависимости от времени. Сейсмограмма для двумерной модели (рис. 2а) имеет более чёткую структуру, чем сейсмограмма для трёхмерной модели (рис. 2б), так как в данном случае приёмников было больше. Для двумерных и трёхмерных моделей расчёты проводились в течение одинакового промежутка времени — 2 с, поэтому по вертикали сейсмограммы имеют одинаковые значения. Таким образом, обе сейсмограммы отображают одинаковые результаты по величине нормальных компонент скорости.

### ВЫВОДЫ

В данной работе представлены результаты численного моделирования распространения упругих волн в слоистых геологических средах с газонасыщенными включениями.

Дано описание общей проблемы идентификации и мониторинга распространения газа с течением времени на акватории Северных морей Арктического шельфа.

Представлены уравнения, которые использовались при описании геологических слоёв моделей.

Дано описание численного метода, применявшегося для расчёта моделей.

Были получены волновые картины сейсмических откликов для моделей с газонасыщенными включениями для двумерного и трёхмерного случая. Схематичные изображения волновых картин показали аналогичные результаты. В дальнейшем можно заменять трёхмерные модели на двумерные при решении подобных задач, что упростит и ускорит расчёты. Также были получены сейсмограммы для описанных постановок задач для двумерных и трёхмерных моделей. Аналогично волновым картинам сейсмограммы показали похожие результаты для двумерных и трёхмерных моделей.

Таким образом, в данной работе показана правомерность замены трёхмерных моделей двумерными при решении задач распространения сейсмических волн в моделях с газонасыщенными включениями.

**Источник финансирования.** Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ, проект № 19–07–00366.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Goodway W., Enachescu M. Introduction to this Special Section: Arctic/ATC. The Leading Edge. 2013. V. 32. № 5. P. 522–523.
2. Фаворская А.В., Петров И.Б. и др. Численное моделирование волновых процессов в слоистых средах в условиях Арктики // Матем. моделирование. 2015. Т. 27. № 11. С. 63–75.
3. Петров И.Б. Вычислительные проблемы моделирования природных и промышленных процессов в Арктической зоне Российской Федерации // Чебышевский сб. 2017. Т. 18. № 3. С. 428–443.
4. Богдавленский В.И., Керимов В.Ю., Ольховская О.О. и др. Повышение эффективности и безопасности поисков, разведки и разработки месторождений

- нефти и газа на акватории Охотского моря // Территория “НЕФТЕГАЗ”. 2016. № 10. С. 24–32.
5. *Новацкий В.* Теория упругости. М.: Мир, 1975. 872 с.
  6. *Muratov M., Petrov I., Leviant V.* Grid-Characteristic Method as Optimal Tool of Fracture Formations Research. Saint Petersburg 2018: Innovations in Geosciences, 2018. DOI: 10.3997/2214-4609.201800290.
  7. *Магомедов К.М., Холодов А.С.* Сеточно-характеристические численные методы. М.: Наука, 1988. 288 с.
  8. *Khokhlov N.I., Golubev V.I.* On the Class of Compact Grid-Characteristic Schemes // Smart Innovation, Systems and Technologies. 2019. V. 133. P. 64–77. DOI: 10.1007/978-3-030-06228-6\_7.
  9. *Petrov I., Favorskaya A., Favorskaya M., et al.* Development and Applications of Computational Methods // Smart Innovation, Systems and Technologies. 2019. V. 133. P. 3–7. DOI: 10.1007/978-3-030-06228-6\_1.

## NUMERICAL MODELLING OF WAVE PROCESSES IN MULTILAYERED MEDIA WITH GAS-CONTAINING LAYERS: THE COMPARISON OF 2D AND 3D MODELS

**P. V. Stognii<sup>1</sup>, N. I. Khokhlov<sup>1,2</sup>, Corresponding Member of the RAS I. B. Petrov<sup>1,2</sup>**

<sup>1</sup>*Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University),  
Dolgoprudnyi, Moscow Oblast, Russian Federation*

<sup>2</sup>*Scientific Research Institute for System Analysis of the Russian Academy of Sciences,  
Moscow, Russian Federation*

Received August 20, 2019

Today the Arctic region exploration is one of the most important courses for research in our country because large amounts of unexplored oil and gas deposits are located there. Large deposits of hydrocarbons are situated in water areas of the North seas. Gas explosions complicate the development of hydrocarbon deposits in these water areas. They occur as a result of an accident opening and further spread of gas. It is impossible to carry out the frequent exploration of the area with gas layers, then the numerical modelling of the area with already detected gas deposits is conducted. In this work, we present the results of numerical modelling of seismic waves spread in multilayered geological models with gas-containing inclusions during the four-year period with the use of the grid-characteristic method. Then, the wave patterns of seismic reflections and seismograms for the described problem were obtained. We conducted the comparison of wave patterns and seismograms for the 2-dimensional and 3-dimensional cases. The results demonstrated a good coincidence.

*Keywords:* Arctics, gas-containing layers, seismology, grid-characteristic method.