

УДК 519.63

Численное моделирование распространения упругих волн в геологических средах с газовыми полостями с использованием сеточно-характеристического метода*

П.В. Стогний¹, Н.И. Хохлов², И.Б. Петров^{1,2}

¹Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет), пер. Институтский, 9, Долгопрудный, Московская обл., 141707

²Институт системных исследований Российской академии наук, просп. Нахимовский, 36, корп. 1, Москва, 117218

E-mails: stognii@phystech.edu (Стогний П.В.), k_h@inbox.ru (Хохлов Н.И.), petrov@mipt.ru (Петров И.Б.)

Английская версия этой статьи печатается в журнале “Numerical Analysis and Applications” № 3, Vol. 13, 2020.

Стогний П.В., Хохлов Н.И., Петров И.Б. Численное моделирование распространения упругих волн в геологических средах с газовыми полостями с использованием сеточно-характеристического метода // Сиб. журн. вычисл. математики / РАН. Сиб. отд-ние. — Новосибирск, 2020. — Т. 23, № 3. — С. 325–338.

Приповерхностный газ в донных геологических слоях водного пространства представляет большую опасность для буровых установок в случае случайного вскрытия его залежей. Газ начинает устремляться к поверхности воды, что грозит рано или поздно выбросом в атмосферу. Важно уметь прогнозировать данные выбросы с течением времени с целью предотвращения катастрофических последствий с гибелью не только буровых установок, но и людей.

В работе представлены результаты численного моделирования распространения сейсмических волн в моделях с газовыми залежами сквозь слоистую структуру грунта к поверхности водного пространства для трехмерного случая. Моделирование проводилось в течение 4-х лет для залежей, расположенных на расстоянии 1000 м от дна моря. Результаты расчетов (волновые картины и сейсмограммы) показали приближение газа к поверхности воды на 4-й год расчета. Важным результатом является согласованность результатов 3D-моделирования с ранее полученными результатами 2D-моделирования.

DOI: 10.15372/SJNM20200307

Ключевые слова: газовые карманы, численное трехмерное моделирование, сеточно-характеристический метод, Арктический шельф.

Stognii P.V., Khokhlov N.I., Petrov I.B. The numerical modeling of the elastic waves propagation in the geological media with gas cavities using the grid-characteristic method // Siberian J. Num. Math. / Sib. Branch of Russ. Acad. of Sci. — Novosibirsk, 2020. — Vol. 23, № 3. — P. 325–338.

The shallow gas in the ground geological layers of the water space is of great danger for the drilling rigs in the case of an accident opening of the gas deposits. Gas starts rising towards the surface of water, and sooner or later, the gas emission into the atmosphere threatens the environment. It is very important to be able to forecast the gas emissions in order to prevent the catastrophic consequences with the destruction of drilling rigs and people fatalities.

This paper presents the results for the numerical modeling of seismic waves propagation in models with gas deposits through the layered soil towards the surface of water for the 3D case. The modeling was carried out for the 4-year period for the layers, which are located at the depth of 1000 m from the bottom of the sea.

*Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (проект № 2.9901.2017/8.9).

The results of the computations (the wave pictures and seismograms) show the approach of gas to the surface of water for the 4th year of the computations. The consistency of the results for the 3D problem with the results for the 2D problem, early obtained by the authors, is very important for the further research into the area in question.

Keywords: *gas pockets, numerical 3D modelling, grid-characteristic method, Arctic shelf.*

1. Введение

Газовые карманы или приповерхностный газ — залежи газа с аномально высоким пластовым давлением (АВПД) [1–4]. Такой газ может располагаться как на небольших глубинах от дна моря (30–100 м), так и на значительных глубинах (1000 м). Ранее считалось, что сам по себе газ не опасен, так как самопроизвольные выбросы случались крайне редко. Но в последнее время, из-за глобального потепления, участились случаи произвольных выбросов газа в атмосферу. Это связано с тем, что многие газовые карманы, ранее скрытые многолетнемерзлыми породами, разгерметизируются и начинают распространяться в пространстве, устремляясь к поверхности воды. Также выбросы газа в атмосферу усиливаются за счет землетрясений [5].

Более часто происходит случайное вскрытие газовых залежей буровыми установками. В связи с повышенным давлением внутри залежи газ начинает подниматься к поверхности, и в результате происходит прорыв газа в атмосферу. Такой прорыв влечет за собой гибель людей, потерю буровых установок и загазованность водной толщи. Крупнейшая авария, одной из причин которой был прорыв газа с АВПД, произошла в Мексиканском заливе в 2010 году, в результате которой погибли 11 человек, была уничтожена современная буровая установка, а в залив попало значительное количество нефти (около 0.7 млн. тонн). Для своевременного принятия мер по избежанию серьезных последствий от подобных выбросов периодически проводится мониторинг территории с имеющимися газовыми залежами.

Газовые карманы — довольно распространенное явление в Северных морях. Например, в Охотском море только известных газовых залежей насчитывается около 200 [6], на шельфе Нидерландов — 150 [7]. Также газовые карманы встречаются в Баренцевом, Печорском и Карском морях [8]. Мониторинг всех таких газовых залежей становится труднее с каждым годом из-за роста их количества и высокой стоимости проведения геологоразведочных работ. Чтобы не проводить частый мониторинг территорий с наличием газовых карманов, предлагается моделировать распространения уже выявленных газовых залежей, чтобы своевременно принимать меры по избежанию катастрофических последствий, связанных с выбросами газа в атмосферу.

В данной работе приведены результаты трехмерного моделирования распространения сейсмических волн в моделях с газовыми карманами сквозь слоистую структуру грунта к поверхности воды. Такая работа уже была проведена для двумерного случая, и результаты оказались близкими к реальности [9, 10]. В связи с этим было решено провести аналогичное исследование для трехмерного случая с целью получения более полной информации о волновых процессах в средах с газовыми залежами. Получены волновые картины откликов [11] от газонасыщенных сред для 2-го, 3-го и 4-го годов расчетов, которые показали приближение газа к поверхности воды на 4-й год расчетов. Также сейсмограммы для 2-го, 3-го и 4-го годов расчетов (за вычетом сейсмограммы 1-го года расчета, для которого условно считалось отсутствие газовых карманов) показали приближение газа к поверхности водного пространства на 4-й год расчетов. Результаты

трехмерного моделирования оказались аналогичными результатам двумерного моделирования распространения сейсмических волн в моделях с газонасыщенными породами в течение 4-х лет. Это позволит в дальнейшем заменять трехмерную модель двумерной с целью упрощения и ускорения расчетов.

2. Математическая модель

Для описания различных динамических процессов, происходящих в гетерогенных геологических средах, использовалась система уравнений для линейно-упругой среды [12]:

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

$$\frac{\partial}{\partial t} \boldsymbol{\sigma} = \lambda(\nabla \cdot \mathbf{v})\mathbf{I} + \mu(\nabla \otimes \mathbf{v} + (\nabla \otimes \mathbf{v})^\top), \quad (2)$$

где ρ — плотность материала, $\mathbf{v}$ — скорость, $\boldsymbol{\sigma}$ — тензор напряжений Коши, λ и μ — параметры Ляме, определяющие свойства упругого материала, $\mathbf{I}$ — единичный тензор, p — давление. В проведенном исследовании водная среда также описывалась уравнениями линейной упругости (1), (2) с близкой к нулю поперечной скоростью звука.

3. Описание численного метода

В данной работе для численного решения системы уравнений (1), (2) использовался сеточно-характеристический метод [13, 14], который позволяет строить корректные численные алгоритмы расчета точек на границах и точек, лежащих на поверхностях раздела двух сред с разными плотностями и разными параметрами Ляме. Представим систему уравнений (1), (2) в следующем виде:

$$\rho \frac{\partial}{\partial t} \mathbf{v}_j = \frac{\partial \sigma_{ji}}{\partial x_i}, \quad (3)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \sigma_{ij} = \lambda \left(\sum_k \frac{\partial v_k}{\partial x_k} \right) I_{ij} + \mu (\nabla_i v_j + \nabla_j v_i). \quad (4)$$

Перепишем систему уравнений (3), (4) в матричном виде:

$$\frac{\partial \mathbf{q}}{\partial t} + \mathbf{A}_1 \frac{\partial \mathbf{q}}{\partial x_1} + \mathbf{A}_2 \frac{\partial \mathbf{q}}{\partial x_2} + \mathbf{A}_3 \frac{\partial \mathbf{q}}{\partial x_3} = 0, \quad (5)$$

где $\mathbf{q}$ — вектор, состоящий из трех компонент скорости и шести компонент симметричного тензора напряжений:

$$\mathbf{q} = \{v_x, v_y, v_z, \sigma_{xx}, \sigma_{yy}, \sigma_{zz}, \sigma_{xy}, \sigma_{xz}, \sigma_{yz}\}^\top. \quad (6)$$

В (5) матрицы $\mathbf{A}_1$, $\mathbf{A}_2$, $\mathbf{A}_3$ имеют следующий вид:

$$\mathbf{A}_1 = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & -1/\rho & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1/\rho & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1/\rho & 0 \\ -\lambda - 2\mu & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\lambda & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\lambda & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\mu & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\mu & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}, \quad (7)$$

$$\mathbf{A}_2 = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1/\rho & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1/\rho & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1/\rho \\ 0 & -\lambda & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\lambda - 2\mu & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\lambda & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\mu & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\mu & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}, \quad (8)$$

$$\mathbf{A}_3 = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1/\rho & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1/\rho \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1/\rho & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\lambda & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\lambda & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\lambda - 2\mu & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\mu & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\mu & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}. \quad (9)$$

После применения к уравнению (5) метода расщепления по пространственным координатам получаем три системы одномерных уравнений [15]:

$$\frac{\partial \mathbf{q}}{\partial t} = \mathbf{A}_j \frac{\partial \mathbf{q}}{\partial x_j}, \quad j = 1, 2, 3. \quad (10)$$

Каждая из систем (10) является гиперболической и обладает полным набором собственных векторов с действительными собственными значениями. Следовательно, каждую из систем (10) можно представить в виде

$$\frac{\partial \mathbf{q}}{\partial t} = \mathbf{\Omega}_j^{-1} \mathbf{\Lambda}_j \mathbf{\Omega}_j \frac{\partial \mathbf{q}}{\partial x_j}, \quad (11)$$

где $\mathbf{\Omega}_j$ — матрица, состоящая из собственных векторов, $\mathbf{\Lambda}_j$ — диагональная матрица с собственными значениями на диагонали. Далее, для упрощения обозначений, индекс j опускается, подразумевая, что рассматривается случай только для одной из пространственных координат.

Для всех координат матрица $\mathbf{\Lambda}$ будет выглядеть:

$$\mathbf{\Lambda} = \text{diag}\{c_1, -c_1, c_2, -c_2, c_2, -c_2, 0, 0, 0\}, \quad (12)$$

где $c_1 = \sqrt{(\lambda + 2\mu)/\rho}$ — продольная скорость звука, $c_2 = \sqrt{\mu/\rho}$ — поперечная скорость звука.

После замены переменных $\boldsymbol{\nu} = \mathbf{\Omega}\mathbf{q}$ каждая из систем (11) распадается на девять независимых скалярных уравнений переноса:

$$\frac{\partial \boldsymbol{\nu}}{\partial t} + \mathbf{\Lambda} \frac{\partial \boldsymbol{\nu}}{\partial x} = 0. \quad (13)$$

Одномерные уравнения переноса можно решить методом характеристик или конечно-разностной схемой. После того, как все компоненты $\boldsymbol{\nu}$ перенесены, можно найти само решение

$$\mathbf{q}^{n+1} = \mathbf{\Omega}^{-1} \boldsymbol{\nu}^{n+1}. \quad (14)$$

Для решения уравнений переноса (13) использовался сеточно-характеристический метод на основе схемы Русанова 3-го порядка точности [16, 17]:

$$\nu_m^{n+1} = \alpha_{-2} \nu_{m-2}^n + \alpha_{-1} \nu_{m-1}^n + \alpha_0 \nu_m^n + \alpha_1 \nu_{m+1}^n, \quad (15)$$

где коэффициенты $\alpha_{-2}, \alpha_{-1}, \alpha_0, \alpha_1$ можно найти из условия 3-го порядка аппроксимации схемы, разложив ее в ряд Тейлора относительно, например, точки (x_m^n) . Условия для 2-го, 3-го и т. д. порядков аппроксимаций определяются условием

$$-(-\sigma)^k + \sum_{\mu, \nu} (\mu - \nu \sigma)^k \alpha_\mu^\nu(\sigma) = 0, \quad (16)$$

где $k = 2, 3, \dots$; $\mu = 0, \pm 1, \dots$; $\nu = 1, 0, -1, \dots$; $\sigma = \frac{\Lambda \tau}{h}$, λ — скорость переноса, τ — шаг интегрирования по времени, h — шаг интегрирования по координате.

У нас — 3-й порядок аппроксимации, следовательно получим 4 уравнения вида (16) для $k = 0, 1, 2, 3$ для нахождения коэффициентов $\alpha_{-2}, \alpha_{-1}, \alpha_0, \alpha_1$:

$$\alpha_{-2} + \alpha_{-1} + \alpha_0 + \alpha_1 = 1, \quad (17)$$

$$-2\alpha_{-2} - \alpha_{-1} + \alpha_1 = -\sigma, \quad (18)$$

$$4\alpha_{-2} + \alpha_{-1} + \alpha_1 = \sigma^2, \quad (19)$$

$$-8\alpha_{-2} - \alpha_{-1} + \alpha_1 = -\sigma^3. \quad (20)$$

Для регуляризации численного решения использовался критерий монотонности [16]. Для положительных значений $\lambda > 0$ критерий выглядит следующим образом:

$$\min\{\nu_m^n, \nu_{m-1}^n\} \leq \nu_m^{n+1} \leq \max\{\nu_m^n, \nu_{m-1}^n\}, \quad (21)$$

для отрицательных значений $\lambda < 0$ критерий будет симметричным.

4. Описание граничных условий

Для вычисления точек на границах области интегрирования использовалось следующее уравнение [18]:

$$Bq^{n+1} = b, \quad (22)$$

где B — матрица 3×9 , b — трехмерный вектор, q^{n+1} — вектор значений скорости и компонент тензора напряжений в точке на границе области интегрирования на следующем временном слое $n + 1$.

Решение (14) на следующем временном слое $n + 1$ будет выглядеть так:

$$q^{n+1} = \Omega^{(\text{in})} \nu^{n+1(\text{in})} + \Omega^{(\text{out})} \nu^{n+1(\text{out})} = q^{n+1(\text{in})} + \Omega^{(\text{out})} \nu^{n+1(\text{out})}, \quad (23)$$

где $\Omega^{(\text{in})}$ и $\Omega^{(\text{out})}$ — матрицы, составленные из столбцов, соответствующих входящим или выходящим характеристикам матрицы Ω^{-1} ; $\nu^{n+1(\text{in})}$ можно вычислить аналогично ν^{n+1} для внутренних точек; $\nu^{n+1(\text{out})}$ выражается из граничных условий (22):

$$\nu^{n+1(\text{out})} = (B\Omega^{(\text{out})})^{-1} (b - Bq^{n+1(\text{in})}). \quad (24)$$

Подставим (24) в (23) и получим общую формулу для расчета точек на границах области интегрирования:

$$q^{n+1} = q^{n+1(\text{in})} + \Omega^{(\text{out})} (B\Omega^{(\text{out})})^{-1} (b - Bq^{n+1(\text{in})}). \quad (25)$$

В данной работе используются следующие граничные условия: условие свободной границы и условие поглощения. Для описания свободной границы использовалось уравнение

$$\sigma n = 0, \quad (26)$$

где n — вектор нормали на внешней стороне границы, σ — тензор напряжений Коши. Правая часть уравнения (3) — плотность внешних сил на границе (равна нулю для случая свободной границы). Для описания условия поглощения использовалось уравнение

$$B = \Omega^{(*)}, \quad b = 0, \quad (27)$$

где матрица $\Omega^{(*)}$ составлена из столбцов матрицы собственных значений Λ , соответствующих выходящим характеристикам.

5. Результаты численного моделирования

Моделировалось распространение сейсмических волн для моделей с газонасыщенными породами сквозь слоистую структуру грунта для трехмерного случая. Базовая модель состояла из 9 геологических слоев: воды, ила, трех слоев влагонасыщенного песка, трех слоев глины и нефтесодержащего слоя. Схематичное изображение базовой модели представлено на рисунке 1. Числами слева 0, 200, 350, ..., 1400 отмечены глубины геологических слоев. Верхняя граница слоя воды и нижняя граница нефтесодержащего слоя были гладкими, остальные границы — криволинейные. Числами справа 150, 250, ..., 1170 отмечены максимальные значения нижних криволинейных границ геологических слоев. Числами сверху обозначены длина и ширина модели, равные 2000 метрам.

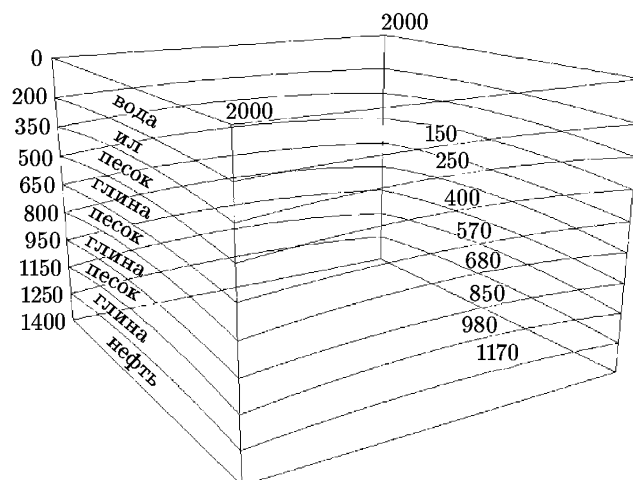


Рис. 1. Схематичное изображение модели размером 2000×2000 метров

Как правило, газовые карманы образуются в порах песчаного слоя и начинают распространяться во все стороны с течением времени из-за повышенного давления внутри кармана [4]. Схематичное изображение распространения газонасыщенных пород сквозь слоистую структуру грунта можно увидеть на рис. 2. Нижним прямоугольником обозначен образовавшийся газовый карман в слое песка. Стрелками показано направление распространения газа. Также на рис. 2 схематично изображена постановка системы источник–приемники (перевернутый треугольник — источник сигнала, треугольники по бокам источника — приемники сигнала). В качестве источника сигнала использовался импульс Рикера с центральной частотой 30 Гц. Источник располагался в центре расчетной области на поверхности слоя воды. 100 приемников сигнала были установлены в центре расчетной области на поверхности водного слоя с шагом 10 м. На верхней границе расчетной области было установлено свободное граничное условие [19], на боковых и нижней границах — неотражающие граничные условия.

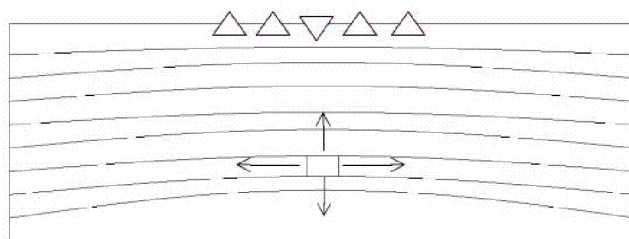
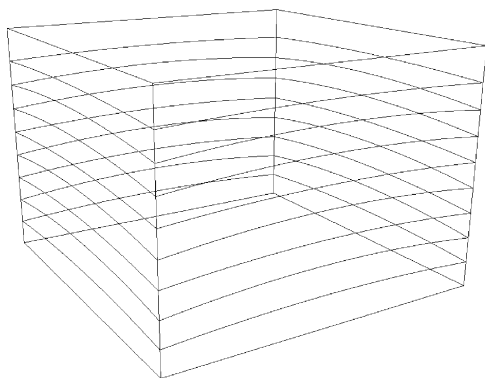


Рис. 2. Схематичное изображение распространения газа сквозь слоистую структуру грунта и постановки системы источник–приемники

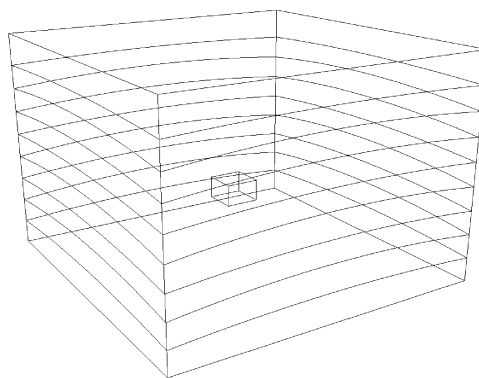
Геологические слои модели имели следующие параметры. Плотность воды составляла 1000 кг/м^3 , скорость продольных волн в воде — 1500 м/с . Плотность ила была равна 1600 кг/м^3 , скорости продольных и поперечных волн в слое ила — 1600 м/с и 1131 м/с соответственно. Плотность влагонасыщенного песка составляла 1200 кг/м^3 , скорости продольных и поперечных волн в песчаном слое — 1600 м/с и 1131 м/с соответственно. Плотность глины была равна 2500 кг/м^3 , скорости продольных и поперечных волн в глинистом слое — 2000 м/с и 1414 м/с соответственно. Плотность нефтесодержащего слоя со-

ставляла 850 кг/м^3 , скорости продольных и поперечных волн в слое нефти — 1400 м/с и 1000 м/с соответственно. Плотность газа была равна 900 кг/м^3 , скорости продольных и поперечных волн в газовом кармане — 1000 м/с и 707 м/с соответственно. Все слои базовой модели на рис. 1, кроме верхнего слоя воды, имели среднюю ширину 150 м . Средняя ширина слоя воды составляла 200 м . Площадь всей области интегрирования была равна $4 \times 10^6 \text{ м}^2$.

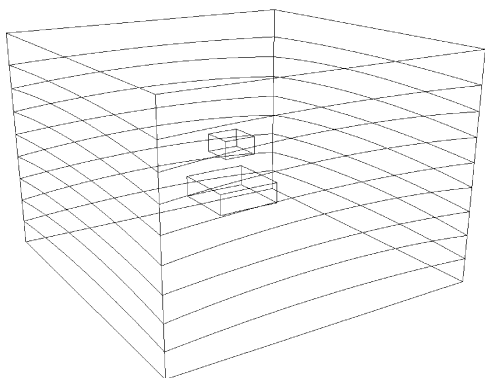
Схематичные изображения моделей в 1-й, 2-й, 3-й и 4-й годы расчетов представлены на рис. 3. Высота всех газовых карманов составляла 150 м , длина и ширина — 200 м во 2-й год расчетов (рис. 3б); 400 м и 200 м — в 3-й год расчетов (рис. 3в); 600 м , 400 м и 200 м — в 4-й год расчетов (рис. 3г).



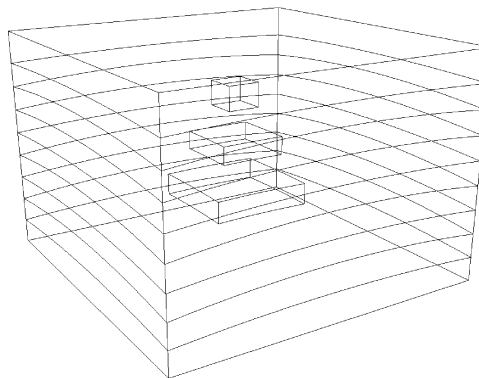
а) модель для 1-го года расчетов,
нет газовых карманов



б) модель для 2-го года расчетов,
1 газовый карман



в) модель для 3-го года расчетов,
2 газовых кармана



г) модель для 4-го года расчетов,
3 газовых кармана

Рис. 3. Схематичное изображение моделей

В расчетах шаги по осям x , y , z во всех моделях составляли 5 м . Шаг по времени был равен 10^{-4} сек . Всего было выполнено 20000 шагов по времени. Расчет всех четырех моделей был выполнен при помощи метода сквозного счета: для каждой точки расчетной области были заданы соответствующие значения плотности и скоростей продольных и поперечных волн. Все расчеты были сделаны с помощью схемы Русанова 3-го порядка точности [16]. Время расчета одной трехмерной модели на стационарном 4-х ядерном компьютере составило 12 часов, двумерной модели — 4 часа.

На рис. 4 представлены волновые картины сейсмических откликов.

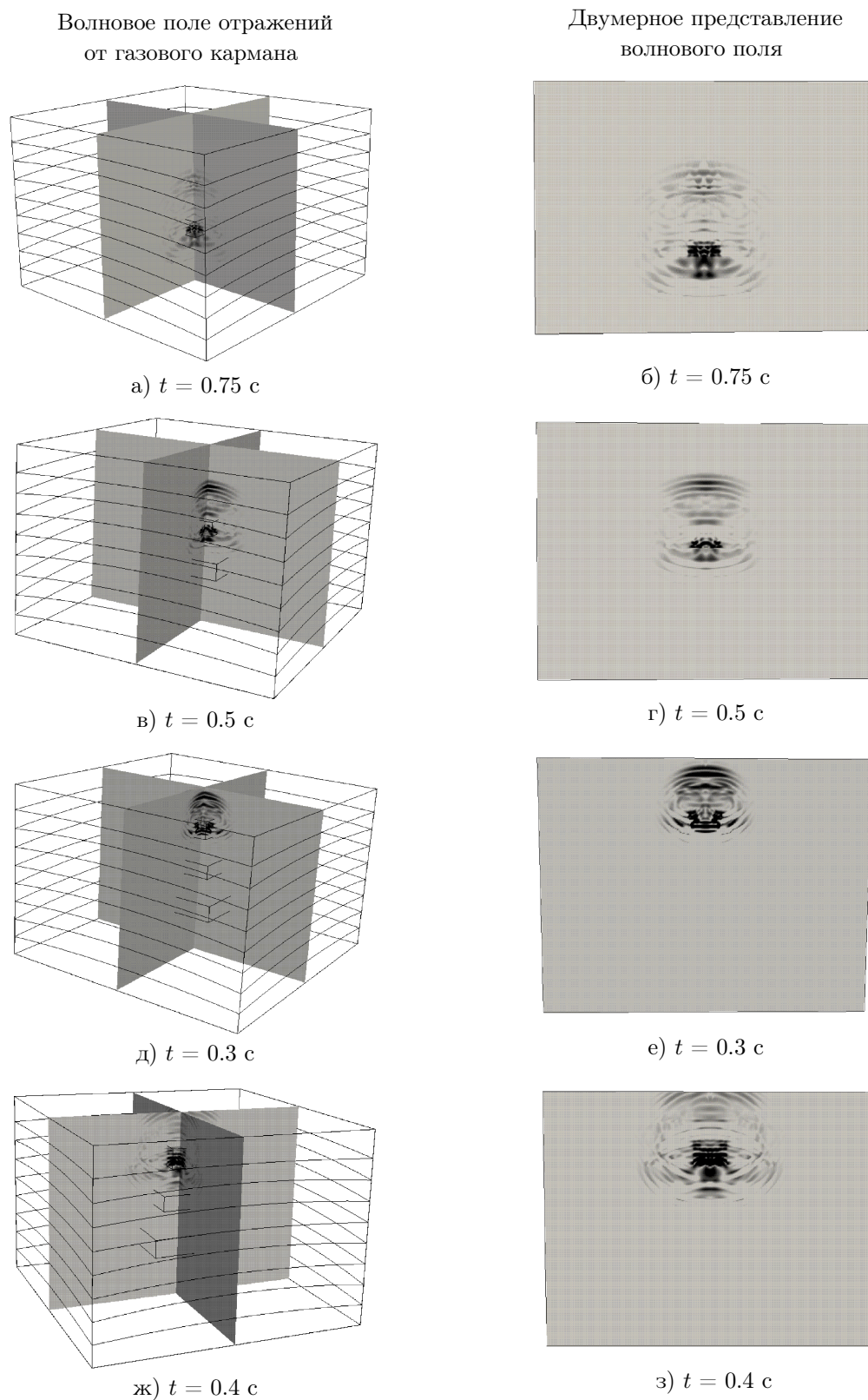
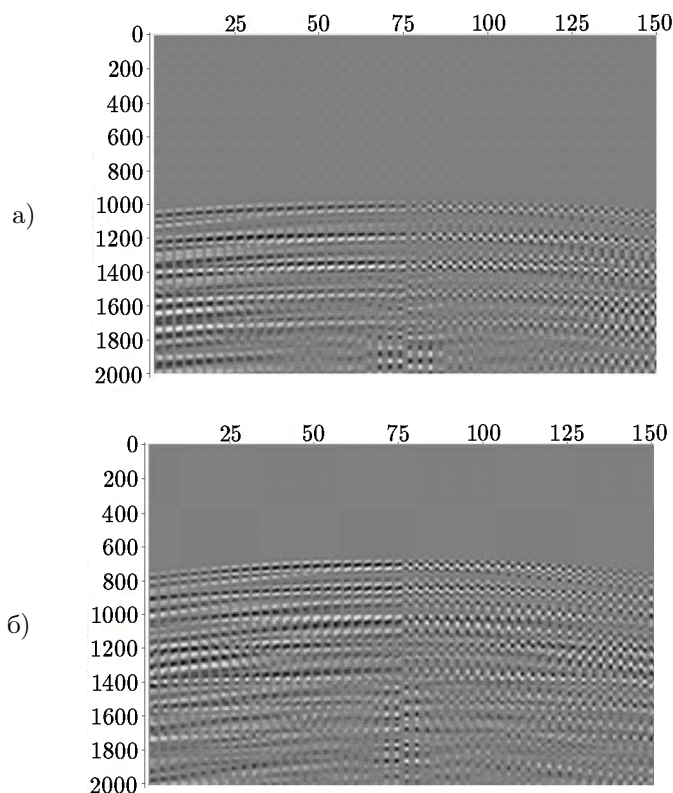


Рис. 4. Волновые картины сейсмических откликов от газовых карманов для 2-го года расчетов (а, б), 3-го года расчетов (в, г), 4-го года расчетов (д, е, ж, з) в различные моменты времени

На рис. 4 (слева) представлены разности волновых картин для 2-го, 3-го и 4-го годов расчетов с 1-м годом, когда газовые карманы отсутствуют, для получения волновых откликов непосредственно от газовых карманов, а справа — увеличенные срезы двумерных волновых картин для волновых полей, представленных в левой части рис. 4. На волновых картинах градацией серого цвета изображены значения нормальных компонент скорости в геологических средах со значениями от 0 м/с (отсутствие линий на рисунках) до 5.5 м/с (линии черного цвета на рисунках). Из рисунков 4в и 4г следует, что газовые карманы приближаются к поверхности воды, что грозит скорым выбросом газа в атмосферу. Следует предпринять соответствующие меры во избежание дальнейших катастрофических последствий.

Важным результатом является получение так называемой “газовой трубы” [20] — соответствующих каналов миграции газа, уходящих на большие глубины, которые можно увидеть на рисунках 4а–4з. При проведении геологоразведочных работ данные газовые трубы всегда видны на сейсмограммах, при моделировании же получить их гораздо сложнее.

На рис. 5 представлены сейсмограммы волновых откликов от газовых карманов для 2-го, 3-го и 4-го годов расчетов. Сейсмограммы на рис. 5 являются разностями сейсмограмм с 1-м годом расчетов с целью получения сейсмических сигналов только от газовых карманов. На диаграммах рис. 5 градацией серого цвета представлены значения нормальных компонент скорости, где по оси x отложены номера сейсмотрасс 1–150, по оси y — время прихода сигнала 0–2000 мс. Из сейсмограмм на рис. 5 видна динамика поднятия сигнала со временем от 2-го до 4-го годов расчетов. На 4-й год расчетов (рис. 5в) газ приближается к поверхности воды и грозит выбросом в атмосферу. Данный результат согласуется с аналогичным результатом приближения газа к поверхности воды на волновых картинах в 4-й год расчетов — рисунки 4д–4з.



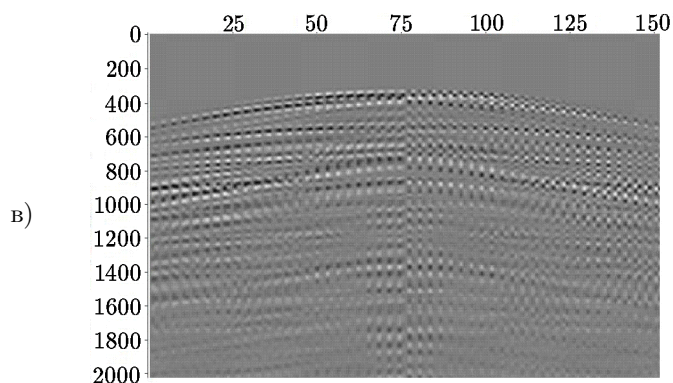


Рис. 5. Сейсмограммы волновых откликов для 2-го (а), 3-го (б) и 4-го (в) годов расчетов, где градацией серого цвета изображены нормальные компоненты скорости, по оси x — номера сейсмотрасс, по оси y — время прихода сигнала в мс

6. Выводы

В работе представлены результаты численного моделирования распространения сейсмических волн в моделях с газонасыщенными породами сквозь слоистую структуру грунта в трехмерном случае.

Даны уравнения, описывающие распространение упругих волн в линейно-упругой среде. Представлено описание сеточно-характеристического метода, использующегося в расчетах. Дано описание граничных условий, которые применялись во всех расчетах моделей. Охарактеризована базовая модель слоистой среды, которая использовалась во всех расчетах. Даны все характеристики геологических слоев модели: плотность, геометрические размеры, скорости продольных и поперечных волн.

Проведен анализ волновых картин сейсмических откликов от газовых карманов, показано приближение газонасыщенных пород на 4-й год расчетов к поверхности водного пространства, что грозит скорым выбросом в атмосферу.

Приведены сейсмограммы откликов для моделей 2-го, 3-го и 4-го годов расчетов. Проведенный анализ, аналогично результату анализа волновых картин, показал приближение газа к поверхности водного слоя на 4-й год расчетов.

Результаты проведенного моделирования распространения сейсмических волн в трехмерных моделях с газонасыщенными породами на криволинейных сетках методом сквозного счета показали хорошее совпадение с реальными результатами геологоразведочных работ для похожей постановки задачи. Полученные волновые картины и сейсмограммы для трехмерных моделей хорошо совпадают с результатами аналогичных исследований для двумерных моделей, полученных авторами ранее [9, 10]. Такой результат является крайне важным, так как в дальнейшем это значительно упростит проведение подобных расчетов с помощью замены трехмерных моделей двумерными в похожих постановках задач.

Литература

1. **Миронюк С.Г.** Морские инженерные изыскания и оценка опасности субаквальных геологических процессов // Инженерные изыскания. — 2014. — Т. 4. — С. 60–64.
2. **Александров Б.Л.** Аномально высокие пластовые давления в нефтегазоносных бассейнах. — М.: Недра, 1987.

3. **Hovland M., Judd A.G.** Seabed Pockmarks and Seepages. Impact on Geology, Biology and the Marine Environment. — London: Graham and Trotman, 1988.
4. **Judd A., Hovland M.** Seabed Fluid Flow: The Impact on Geology, Biology and the Marine Environment. — Cambridge, 2007.
5. **Сывороткин В.Л.** Глубинная дегазация Земли и геоэкологические проблемы приграничных территорий России // Альманах Пространство и Время. Спец. выпуск “Пространство и время границ”. — 2013. — Т. 3, № 1. — С. 1–19.
6. **Богоявленский В.И., Керимов В.Ю., Ольховская О.О., Мустаев Р.Н.** Повышение эффективности и безопасности поисков, разведки и разработки месторождений нефти и газа на акватории Охотского моря // Территория Нефтегаз. — 2016. — Т. 10. — С. 24–32.
7. **Boogaard M., Hoetz G.** Seismic characterisation of shallow gas in the Netherlands // Abstract FORCE Seminar. — Stavanger, 2015.
8. **Рокос С.И.** Газонасыщенные отложения верхней части разреза Баренцево-Карского шельфа: Автореферат дис. ... канд. геогр. наук: 25.00.28. — Мурманск, 2009.
9. **Stognii P.V., Khokhlov N.I.** 2D seismic prospecting of gas pockets // Smart Innovations, Systems and Technologies. — 2019. — Vol. 133. — P. 156–166.
10. **Stognii P., Breus A., Khokhlov N.** Numerical modelling of seismic waves spread with the presence of gas layers in the Arctic region // Proc. 20th Conference on Oil and Gas Geological Exploration and Development “Geomodel 2018”, 2018. — P. 465–469.
11. **Stognii P.V., Petrov D.I., Khokhlov N.I., Petrov I.B.** Simulation of seismic processes in geological exploration of Arctic shelf // Russ. J. Numer. Anal. Math. Model. — 2017. — Vol. 32, № 6. — P. 381–392.
12. **Новацкий В.** Теория упругости / Пер. с польск. Б.Е. Победри. — М.: Мир, 1975.
13. **Magomedov K.M., Kholodov A.S.** Grid-Characteristic Numerical Methods. — М.: Nauka, 1988.
14. **Khokhlov N., Stognii P.** Novel approach to modeling the seismic waves in the areas with complex fractured geological structures // Minerals. — 2020. — Vol. 10, № 2. — P. 122. — URL: <https://doi.org/10.3390/min10020122>.
15. **Golubev V.I., Petrov I.B., Khokhlov N.I.** Numerical simulation of seismic activity by the grid-characteristic method // Computational Mathematics and Mathematical Physics. — 2013. — Vol. 53, № 10. — P. 1523–1533.
16. **Холодов А.С., Холодов Я.А.** О критериях монотонности разностных схем для уравнений гиперболического типа // Журн. вычисл. матем. и мат. физики. — 2006. — Т. 46, № 9. — С. 1638–1667.
17. **Ivanov A.M., Khokhlov N.I.** Parallel implementation of the grid-characteristic method in the case of explicit contact boundaries // Computer Research and Modeling. — 2018. — Vol. 10, № 5. — P. 667–678.
18. **Голубев В.И., Петров И.Б., Хохлов Н.И., Шульц К.И.** Численный расчет волновых процессов в трещиноватых средах на гексаэдральных сетках сеточно-характеристическим методом // Журн. вычисл. матем. и мат. физики. — 2015. — Т. 55, № 3. — С. 512–522.
19. **Favorskaya A., Golubev V., Khokhlov N.** Two approaches to the calculation of air subdomains: theoretical estimation and practical results // Procedia Computer Science. — 2018. — Vol. 126. — P. 1082–1090.

20. **Богоявленский В.И.** Угроза катастрофических выбросов газа из криолитозоны Арктики. Воронки Ямала и Таймыра // Бурение и нефть. — 2014. — Т. 9. — С. 13–18.

Поступила в редакцию 11 апреля 2019 г.

После исправления 12 июня 2019 г.

Принята к печати 16 апреля 2020 г.

Литература в транслитерации

1. **Mironyuk S.G.** Morskie inzhenerne izyskaniya i otsenka opasnosti subakval'nyh geologicheskikh protsessov // Inzhenernye izyskaniya. — 2014. — Т. 4. — С. 60–64.
2. **Aleksandrov B.L.** Anomal'no vysokie plastovye davleniya v neftegazonosnyh basseinaх. — М.: Nedra, 1987.
3. **Hovland M., Judd A.G.** Seabed Pockmarks and Seepages. Impact on Geology, Biology and the Marine Environment. — London: Graham and Trotman, 1988.
4. **Judd A., Hovland M.** Seabed Fluid Flow: The Impact on Geology, Biology and the Marine Environment. — Cambridge, 2007.
5. **Syvorotkin V.L.** Glubinnaya degazatsiya Zemli i geoekologicheskie problemy prigranichnykh territorii Rossii // Al'manah Prostranstvo i Vremya. Spets. vypusk "Prostranstvo i vremya granits". — 2013. — Т. 3, № 1. — С. 1–19.
6. **Bogoyavlenskii V.I., Kerimov V.Yu., Ol'hovskaya O.O., Mustaev R.N.** Povyshenie effektivnosti i bezopasnosti poiskov, razvedki i razrabotki mestorozhdenii nefti i gaza na akvatorii Ohotskogo morya // Territoriya Neftegaz. — 2016. — Т. 10. — С. 24–32.
7. **Boogaard M., Hoetz G.** Seismic characterisation of shallow gas in the Netherlands // Abstract FORCE Seminar. — Stavanger, 2015.
8. **Rokos S.I.** Gazonasyschennye otlozheniya verkhnei chasti razreza Barentsevo-Karskogo shel'fa: Avtoreferat dis. ... kand. geogr. nauk: 25.00.28. — Murmansk, 2009.
9. **Stognii P.V., Khokhlov N.I.** 2D seismic prospecting of gas pockets // Smart Innovations, Systems and Technologies. — 2019. — Vol. 133. — P. 156–166.
10. **Stognii P., Breus A., Khokhlov N.** Numerical modelling of seismic waves spread with the presence of gas layers in the Arctic region // Proc. 20th Conference on Oil and Gas Geological Exploration and Development "Geomodel 2018", 2018. — P. 465–469.
11. **Stognii P.V., Petrov D.I., Khokhlov N.I., Petrov I.B.** Simulation of seismic processes in geological exploration of Arctic shelf // Russ. J. Numer. Anal. Math. Model. — 2017. — Vol. 32, № 6. — P. 381–392.
12. **Novatskii V.** Teoriya uprugosti / Per. s pol'sk. B.E. Pobedri. — М.: Mir, 1975.
13. **Magomedov K.M., Kholodov A.S.** Grid-Characteristic Numerical Methods. — М.: Nauka, 1988.
14. **Khokhlov N., Stognii P.** Novel approach to modeling the seismic waves in the areas with complex fractured geological structures // Minerals. — 2020. — Vol. 10, № 2. — P. 122. — URL: <https://doi.org/10.3390/min10020122>.
15. **Golubev V.I., Petrov I.B., Khokhlov N.I.** Numerical simulation of seismic activity by the grid-characteristic method // Computational Mathematics and Mathematical Physics. — 2013. — Vol. 53, № 10. — P. 1523–1533.
16. **Holodov A.S., Holodov Ya.A.** O kriteriyah monotonnosti raznostnykh skhem dlya uravnenii giperbolicheskogo tipa // Zhurn. vychisl. matem. i mat. fiziki. — 2006. — Т. 46, № 9. — С. 1638–1667.

17. **Ivanov A.M., Khokhlov N.I.** Parallel implementation of the grid-characteristic method in the case of explicit contact boundaries // Computer Research and Modeling.— 2018.— Vol. 10, № 5.— P. 667–678.
18. **Golubev V.I., Petrov I.B., Hohlov N.I., Shul'ts K.I.** CHislennyi raschet volnovykh protsessov v treschinovatykh sredakh na geksaedral'nykh setkakh setochno-harakteristicheskimi metodami // Zhurn. vychisl. matem. i mat. fiziki.— 2015.— T. 55, № 3.— S. 512–522.
19. **Favorskaya A., Golubev V., Khokhlov N.** Two approaches to the calculation of air subdomains: theoretical estimation and practical results // Procedia Computer Science.— 2018.— Vol. 126.— P. 1082–1090.
20. **Bogoyavlenskii V.I.** Ugroza katastroficheskikh vybrosov gaza iz kriolitozony Arktiki. Voronki Yamala i Taimyra // Burenie i nef't'.— 2014.— T. 9.— S. 13–18.