

ЧИСЛЕННЫЙ РАСЧЕТ ВЛИЯНИЯ ПРОЦЕССА МИГРАЦИИ МЕТАНА НА РЕЗУЛЬТАТЫ СЕЙСМИЧЕСКОЙ РАЗВЕДКИ В ЗОНАХ ВЕЧНОЙ МЕРЗЛОТЫ¹⁾

© 2024 г. Е. К. Гусева^{1,*}, В. И. Голубев^{1,**}, И. Б. Петров^{1,***}

¹ 141701 Долгопрудный, М.о., Институтский пер., 9, МФТИ (НИУ), Россия

*e-mail: guseva.ek@phystech.edu

**e-mail: golubev.vi@mipt.ru

***e-mail: petrov@mipt.ru

Поступила в редакцию 23.02.2024 г.

Переработанный вариант 27.04.2024 г.

Принята к публикации 31.05.2024 г.

На протяжении длительного времени в шельфовых и прибрежных зонах Арктического региона наблюдается интенсивная эмиссия метана в атмосферу из недр вечной мерзлоты. Из-за потенциальной опасности этого явления для окружающей среды и инфраструктуры появляется необходимость периодического мониторинга газовых карманов, в том числе, с помощью проведения наземной сейсморазведки. Настоящая работа содержит результаты исследования данного процесса методами численного моделирования. Построена модель слоистого многолетнемерзлого песчаного грунта с криволинейными границами между пластами, отражающая основную специфику региона. Исследован процесс миграции газа в вертикальном и горизонтальном направлениях с помощью увеличения количества метановых резервуаров. Используется определяющая гиперболическая система линейной теории упругости. Задача решается сеточно-характеристическим методом в двумерной постановке на прямоугольной сетке, в каждой ячейке которой задаются упругие характеристики слоев. Подробно изучаются образующиеся волновые структуры на полученных синтетических волновых картинах и сейсмограммах, позволяющие определить направление распространения газа. Полученные результаты можно использовать для трактовки подобных натуральных экспериментов. Библ. 22. Фиг. 5. Табл. 1.

Ключевые слова: численное моделирование, прямая задача сейсморазведки, вечная мерзлота, миграция газа, сеточно-характеристический метод.

DOI: 10.31857/S0044466924090119, EDN: WJPVOQ

1. ВВЕДЕНИЕ

Численное моделирование является эффективным инструментом изучения волновых процессов, возникающих в различных динамических задачах (см. [1]). Одним из подобных процессов является сейсморазведка, широко используемая для изучения структуры геологических сред (см. [2]), в том числе, с целью обнаружения полезных ископаемых, таких как нефть и газ. Значительное внимание к себе привлекают прибрежные и шельфовые зоны Арктического региона, богатые запасами природных ресурсов. Однако низкие температуры создают ряд специфических особенностей, влияющих на результаты полевых измерений. Одной из главных отличительных черт области является наличие пластов вечной мерзлоты (см. [3]) – слоев мерзлого грунта, находящегося под воздействием отрицательных температур на протяжении длительного времени. Структура грунта неоднородна, в слоях присутствует много пустот, ледовых и газовых включений, границы между пластами оказываются существенно криволинейны. Моделирование сейсморазведки при таких условиях позволяет оценить влияние подобных особенностей на результаты измерений. Таким образом, одной из целей настоящей работы является отражение основных характеристик региона и создание модели грунта, приближенной к реальным условиям многолетнемерзлых песчаных пород в полярных и приполярных прибрежных зонах.

В дополнение к этому, работа сосредоточена на изучении явления миграции газа. Арктический регион богат своими запасами газа, часто в форме метангидрата, занимающего образующиеся в грунте пустоты. В стандартных условиях данные образования окружены замёрзшим грунтом и не представляют угрозы. Однако в связи с глобальным потеплением лед начинает оттаивать, и на протяжении многих лет стабильно наблюдается эмиссия метана в атмосферу в шельфовых и прибрежных зонах (см. [4], [5]). Подобные явления представляет собой

¹⁾ Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 21-71-10015).

проблему для окружающей среды и инфраструктуры региона (см. [6]) и могут вызвать дополнительной рост температуры из-за нарастающего парникового эффекта и лавинообразного усиления процесса. В отдельных ситуациях газ выходит на поверхность вместе с сильным взрывом, образующим воронку (см. [7], [8]). Существует гипотеза о том, что подобные метановые бомбы в случае всеобщего взрыва могут привести к глобальным негативным последствиям (см. [9]). Дополнительную угрозу подобные образования представляют в случае разработки месторождений. Бурение может растопить сдерживающие газ мерзлые пласты и привести к детонации и разрушению всего бурового оборудования и окружающих строений. Таким образом, обнаружение и мониторинг метановых карманов является актуальной и необходимой задачей.

Для решения данной проблемы используют различные методики проведения измерений, в том числе, и сейсморазведку, позволяющую детектировать отражения исходного волнового фронта от интересующих включений, которыми в рассматриваемом случае являются метановые резервуары. С одной стороны, выделение таких полезных волн (см. [10]) позволяет обнаружить подобные потенциально опасные объекты. С другой стороны, многочисленные отклики, возникающие в слоистых грунтах, затрудняют трактовку полученных результатов измерений. Проведение периодических натурных измерений – дорогой и длительный процесс, поэтому численное моделирование позволяет более экономно провести детальный анализ синтезированных волновых картин и сейсмограмм в процессе миграции газа. Таким образом, в настоящей работе предлагается использовать сеточно-характеристический метод из [11] для решения этой динамической задачи. Данный метод нашел широкое применение в подобных проблемах из-за возможности точного воспроизведения волновых структур в объектах сложной формы (см. [12], [13]). В работе используются определяющие уравнения линейной теории упругости (см. [14]). Главным отличием от предыдущих подобных исследований [15], [16] является использование усовершенствованной двумерной постановки задачи. Вводятся криволинейные границы между слоями, выбираются типичные для региона упругие и геометрические характеристики пластов. Миграция газа моделируется как последовательное увеличение числа метановых включений в вертикальном и горизонтальном направлениях. Значительная часть работы посвящена детальному анализу итоговых волновых структур и возможности обнаружения распространения газа.

2. ОПРЕДЕЛЯЮЩАЯ СИСТЕМА УРАВНЕНИЙ И МЕТОД РАСЧЕТА

Для описания динамического поведения грунта использовались уравнения линейной теории упругости (см. [14]). Неизвестными выступали скорость точек среды \mathbf{v} и тензор напряжений σ :

$$\rho \dot{\mathbf{v}} = \nabla \cdot \sigma + \mathbf{f}, \tag{1}$$

$$\dot{\sigma} = \lambda(\nabla \cdot \mathbf{v})\mathbf{I} + \mu(\nabla \otimes \mathbf{v} + (\nabla \otimes \mathbf{v})^T). \tag{2}$$

Здесь ρ – это плотность среды, \mathbf{f} – вектор внешней силы, λ и μ – параметры Ламе. В рамках данной модели возникают продольные и поперечные волны со скоростями $c_p = \sqrt{\frac{\lambda+2\mu}{\rho}}$ и $c_s = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}}$. Плотность и скорости упругих волн полностью задают поведение упругого материала.

В работе динамическая задача рассматривалась в двумерной постановке. Как было показано ранее в [17], преимуществами данного подхода является значительное сокращение времени расчетов при сохранении основных свойств получаемых волновых картин. Для решения определяющей системы уравнений гиперболического типа (1)–(2) использовался сеточно-характеристический метод [11]. Согласно методу сначала формируется вектор неизвестных $\mathbf{U} = (v_x, v_y, \sigma_{xx}, \sigma_{yy}, \sigma_{xy})^T$ и система преобразуется к каноническому виду

$$\frac{\partial \mathbf{U}}{\partial t} + A_x \frac{\partial \mathbf{U}}{\partial x} + A_y \frac{\partial \mathbf{U}}{\partial y} = \mathbf{g}. \tag{3}$$

Здесь вводятся матрицы A_i вида

$$A_x = - \begin{pmatrix} 0 & 0 & 1/\rho & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1/\rho \\ \lambda + 2\mu & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \lambda & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \mu & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}, \quad A_y = - \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 1/\rho \\ 0 & 0 & 0 & 1/\rho & 0 \\ 0 & \lambda & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \lambda + 2\mu & 0 & 0 & 0 \\ \mu & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}.$$

Затем проводится расщепление по координатам и физическим процессам. Для начала делается шаг алгоритма вдоль оси x : $\frac{\partial \mathbf{U}}{\partial t} + A_x \frac{\partial \mathbf{U}}{\partial x} = 0$, потом вдоль y : $\frac{\partial \mathbf{U}}{\partial t} + A_y \frac{\partial \mathbf{U}}{\partial y} = 0$, а в конце проводится необходимая коррекция решения согласно $\frac{\partial \mathbf{U}}{\partial t} = \mathbf{g}$. Для получившихся уравнений используется условие гиперболичности системы (3)

для представления матриц $A_i, i = \{x, y\}$, в форме $A_i = L_i^{-1}\Lambda_i L_i$, где L_i – матрица собственных векторов, $\Lambda_i = \text{diag}\{0, -c_s, c_s, -c_p, c_p\}$ – матрица собственных значений. Таким образом, появляется возможность ввести новые переменные – инварианты Римана: $\mathbf{w}_i = L_i \mathbf{U} = (w_i^1, w_i^2, w_i^3, w_i^4, w_i^5)^T$. В результате система (3) вдоль каждого направления преобразуется к системе одномерных независимых линейных уравнений переноса вида

$$\frac{\partial \mathbf{w}_i}{\partial t} + \Lambda_i \frac{\partial \mathbf{w}_i}{\partial \xi_i} = 0. \tag{4}$$

На данном этапе для решения каждого уравнения в (4) использовалась сеточно-характеристическая схема третьего порядка аппроксимации [18], монотонизированная с помощью сеточно-характеристического критерия монотонности [19]:

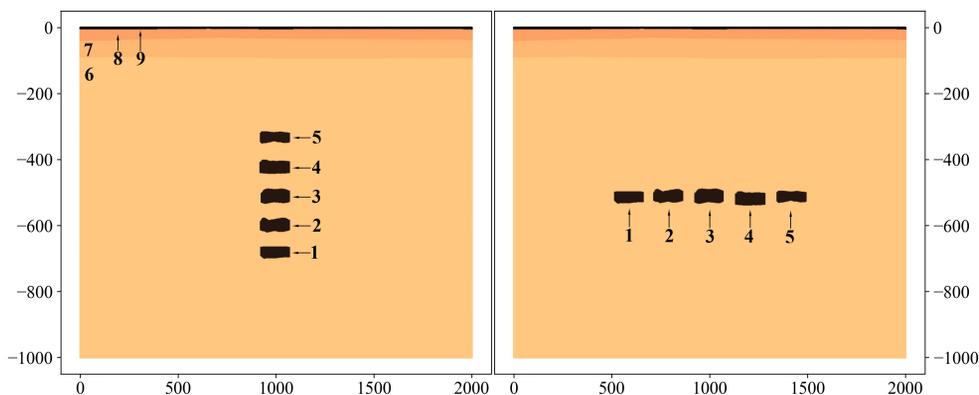
$$[w_i^j]_m^{n+1} = [w_i^j]_m^n + \frac{c_i^j}{2}([w_i^j]_{m-1}^n - [w_i^j]_{m+1}^n) + \frac{c_i^{j2}}{2}([w_i^j]_{m-1}^n - 2[w_i^j]_m^n + [w_i^j]_{m+1}^n) - \frac{c_i^j(1 - c_i^{j2})}{6}([w_i^j]_{m-2}^n - 3[w_i^j]_{m-1}^n + 3[w_i^j]_m^n - [w_i^j]_{m+1}^n).$$

Здесь вводится число Куранта $c_i^j = \frac{\lambda_i^j \tau}{h_i}$, где λ_i^j – соответствующее собственное значение, h_i – пространственный шаг, $j = \{1, 5\}$. При расчетах значение данного числа было задано меньше единицы, таким образом, выполнялось условие устойчивости расчетной схемы. Согласно критерию монотонности, если $[w_i^j]_m^{n+1} \leq \min [w_i^j]_1^n, [w_i^j]_2^n$, то проводилась коррекция $[w_i^j]_m^{n+1} = \min [w_i^j]_1^n, [w_i^j]_2^n$. При $[w_i^j]_m^{n+1} \geq \max [w_i^j]_1^n, [w_i^j]_2^n$ считалось, что $[w_i^j]_m^{n+1} = \max [w_i^j]_1^n, [w_i^j]_2^n$. В данном случае $[w_i^j]_1^n, [w_i^j]_2^n$ – это значения сеточной функции при $t = t_n$ в двух ближайших к характеристике точках.

3. РАСЧЕТНАЯ ОБЛАСТЬ

Для проведения расчетов рассматривался прибрежный участок вечной мерзлоты, размером 2 км по ширине и 1 км по глубине, изображенный на фиг. 1. В качестве основы рассматривалась модель многолетнемерзлого песчаного грунта, сформулированная и обобщенная в работе [20] на основе результатов ряда полевых исследований, проведенных различными коллективами. Было создано 4 слоя, границы между которыми задавались существенно криволинейными. Верхний слой представлял собой узкий пласт талого грунта, под которым располагались мерзлые слои с постепенно увеличивающейся акустической жесткостью и плотностью. Упругие и геометрические характеристики пластов приведены в табл. 1.

В нижнем слое грунта на характерных глубинах залегания располагались резервуары с метангидратом типичного размера с упругими параметрами, взятыми из [15]. В процессе моделирования число включений варьировалось. Предполагалась миграция газа в вертикальном направлении от 1 резервуара (в обозначениях фиг. 1) до 5 и в горизонтальном направлении от центрального резервуара 3. Форма резервуаров с одинаковыми номерами задавалась одинаковой, отличающейся от прямоугольной криволинейными верхней и нижней границами. Для сравнения была протестирована постановка в отсутствии включений, что позволило оценить как влияние слоистого грунта, так и вклад каждого резервуара в полученные результаты расчетов.



Фиг. 1. Макет расчетной области.

Таблица 1. Упругие и геометрические характеристики слоев, номера соответствуют фиг. 1

№	c_1 , м/с	c_2 , м/с	ρ , кг/м ³	Глубина слоя, м	Толщина слоя, м	Ширина слоя, м
1	1000	707	900	662–664	29–37	150
2	1000	707	900	575–586	27–43	152
3	1000	707	900	487–500	29–46	148
4	1000	707	900	399–406	34–42	154
5	1000	707	900	313–318	28–37	152
6	4100	2300	2750	87–93	907–913	1000
7	3900	2150	2650	30–40	50–60	1000
8	3500	1950	2650	3–5	27–25	1000
9	900	490	2100	0	3–5	1000

Для моделирования была создана одна прямоугольная сетка с пространственными шагами вдоль горизонтальной и вертикальной осей, равным 2 м и 1 м соответственно. Шаг по времени был задан равным 0.1 мс. Источник сигнала в форме импульса Рикера с частотой 30 Гц помещался в центр области на глубину 1 м. На верхней дневной поверхности через каждые 4 м размещались приемники сигнала для построения сейсмограмм. В каждом узле расчетной области хранились упругие параметры соответствующих слоев. Дневная поверхность, считалась свободной, на остальных границах ставилось характеристическое условие поглощения волн. Использовалась форма граничных условий, описанная в [11].

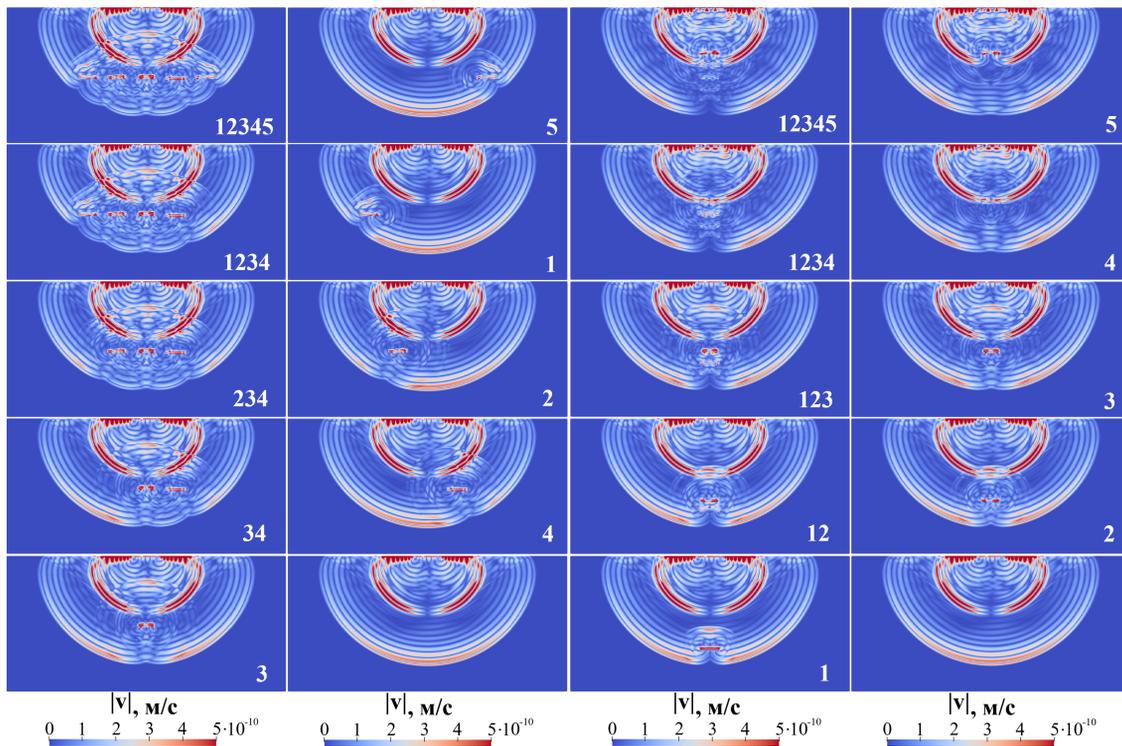
Отметим, что использование прямоугольной расчетной сетки вносит дополнительную ошибку аппроксимации при описании геометрии криволинейных границ раздела слоев модели. Однако, как было показано ранее [16], данный подход сохраняет все особенности сейсмического сигнала, незначительно повышая амплитуды отдельных волн. Его преимуществами является значительное повышение скорости расчета и снижением объема используемой оперативной памяти.

4. РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ

4.1. Волновые картины

Первым результатом проведенных расчетов являются волновые картины, изображенные на фиг. 2. Постановка без включений позволяет проанализировать волновой фронт, распространяющийся от источника, и оценить влияние структуры грунта на приходящий к дневной поверхности сигнал. Исходный сигнал имеет стандартную форму, состоящую из продольной и поперечной волн. Из-за наличия криволинейных границ картина оказывается слегка несимметричной. Наличие узких приповерхностных пластов приводит к возникновению кратных волн (см. [21]), многократных переотражений исходного фронта, которые приносят дополнительные осцилляции в его структуру. К тому же, на дневной поверхности вместе с изначальной волной распространяются волны Рэлея (см. [22]), вызывающие круговые структуры на картинах. Подобные волны значительно зашумляют интересующие отклики от различных включений и затрудняют анализ результатов натуральных измерений.

Согласно фиг. 2 выделенные волны вызывают осцилляции также в отраженных от включений волнах, принимающих характерную сферическую форму. В случае миграции газа в горизонтальном направлении отклики от каждого включения формируют треугольную структуру совокупного отклика. При рассмотрении волновых картин в постановке со всеми резервуарами и с последовательным удалением боковых включений можно наблюдать вклад каждого метанового слоя в общее отражение. Резервуар 3 формирует центральную часть фронта, которая первая возвращается на дневную поверхность. Отклики от остальных включений оказываются несимметричными, до них исходная волна доходит позднее, что приводит к формированию наклонных структур в совокупном отражении. Таким образом, можно сделать вывод о том, что распространение газа в горизонтальном направлении, приводит к постепенному расширению отраженного от резервуаров волнового фронта. В дополнение к этому можно ожидать прихода данного сигнала на большее количество приемников на дневной поверхности.

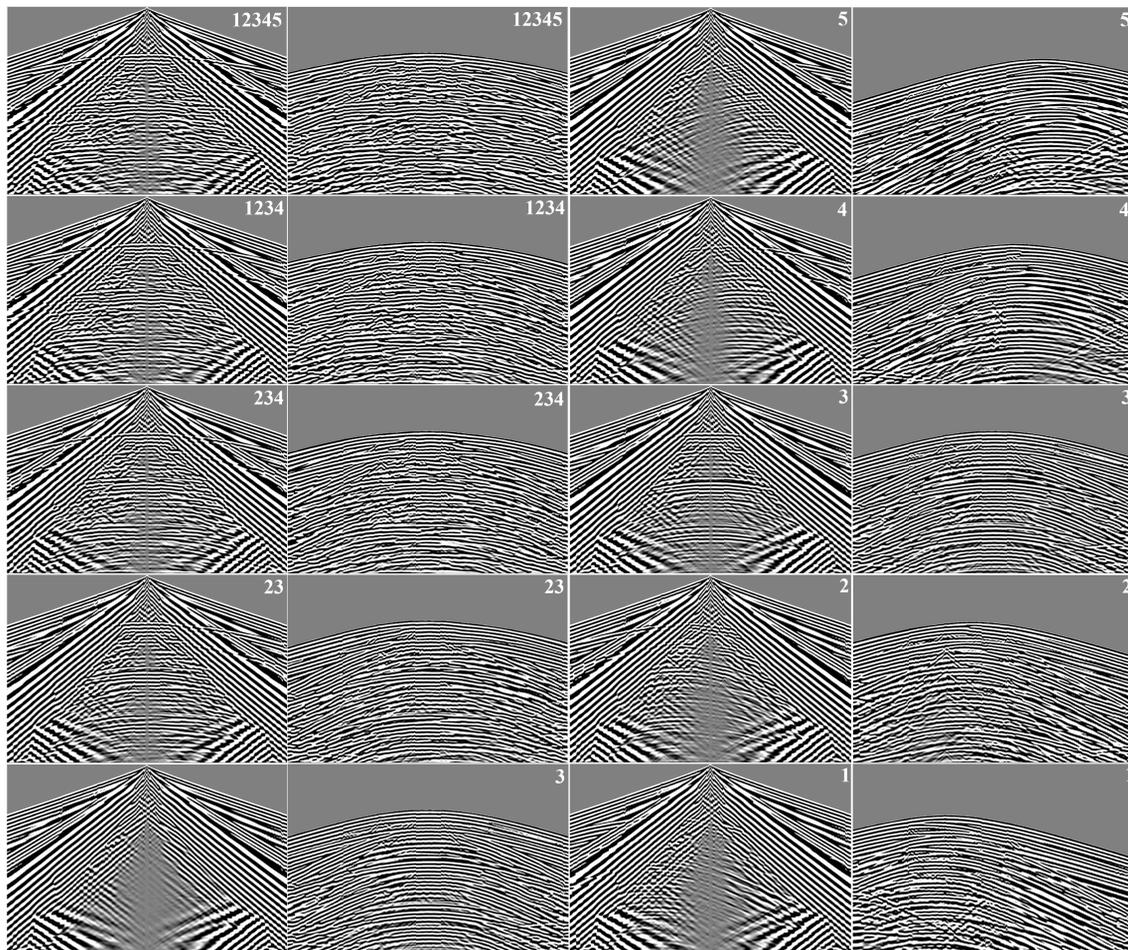


Фиг. 2. Волновые картины в момент времени 0.2 мс. Случай с горизонтальным распространением резервуаров слева, с вертикальным – справа. Цифрами указаны номера резервуаров, включенных в расчетную область.

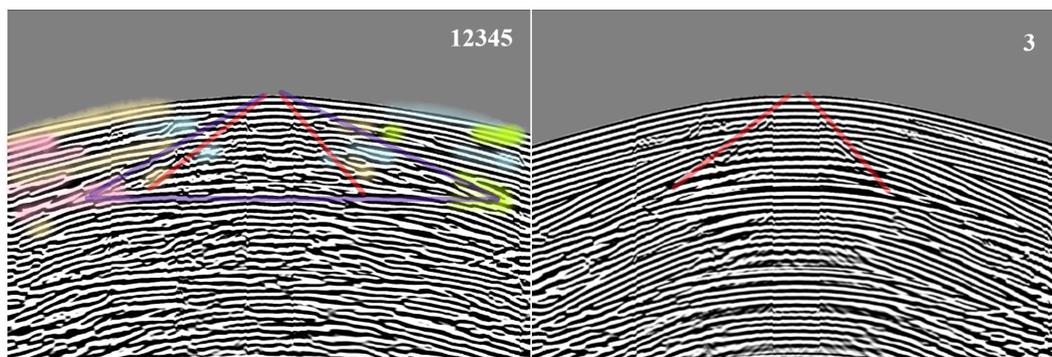
Другая картина формируется в случае миграции газа в вертикальном направлении. При подобных условиях форма основного отклика зависит преимущественно от наиболее близкого к поверхности резервуара. На фиг. 2 это проявляется в сходстве картин в постановках с несколькими включениями и при наличии только верхнего из них. Нижние резервуары привносят лишь дополнительные осцилляции в волновой фронт, которые приходят к дневной поверхности значительно позднее. Фиг. 2 также демонстрирует, как при увеличении числа резервуаров и приближении газа к поверхности первое отражение происходит раньше. В результате, хотя по приходящему к дневной поверхности сигналу точное число резервуаров может быть сложно определить, уменьшение времени прихода откликов гарантирует распространение газа в вертикальном направлении. Таким образом, благодаря периодическим измерениям и последовательным их сравнениям появляется возможность обнаружить миграцию метана и предотвратить потенциальный урон, связанный с выбросом газа и образованием воронок.

4.2. Синтетические сейсмограммы

Выводы, полученные при рассмотрении волновых картин, подтверждаются синтезированными сейсмограммами, изображенными на фиг. 3, 4 для случая с горизонтальным распространением метана и на фиг. 5 для миграции газа в вертикальном направлении. Для начала, так как волновой фронт имеет большое число осцилляций, многократные отклики также проявляются на сейсмограммах. Таким образом, наглядно демонстрируется негативное влияние кратных волн на возможность интерпретации результатов. Сходно с волновыми картинками на фиг. 2, несимметричность отражений из-за криволинейных границ областей также видна на сейсмограммах. К тому же, на необработанных картинах наблюдается распространение исходного фронта и видны поверхностные волны, сильно скрывающие отклики от резервуаров. В дополнение к этому во второй половине расчета появляются отражения от боковых границ расчетной области, артефакты, связанные с несовершенством выбранных граничных условий. С одной стороны, данные волны нефизичны и поэтому представляют собой проблему. Однако, с другой стороны, они появляются ближе к концу расчетов, значительно позднее того, как начинают регистрироваться интересные отражения. В связи с подобными эффектами возникает необходимость вычисления разности между сигналами в постановке с включениями и без них. В итоге появляется возможность анализировать только полезные волны, а именно, отклики от резервуаров.

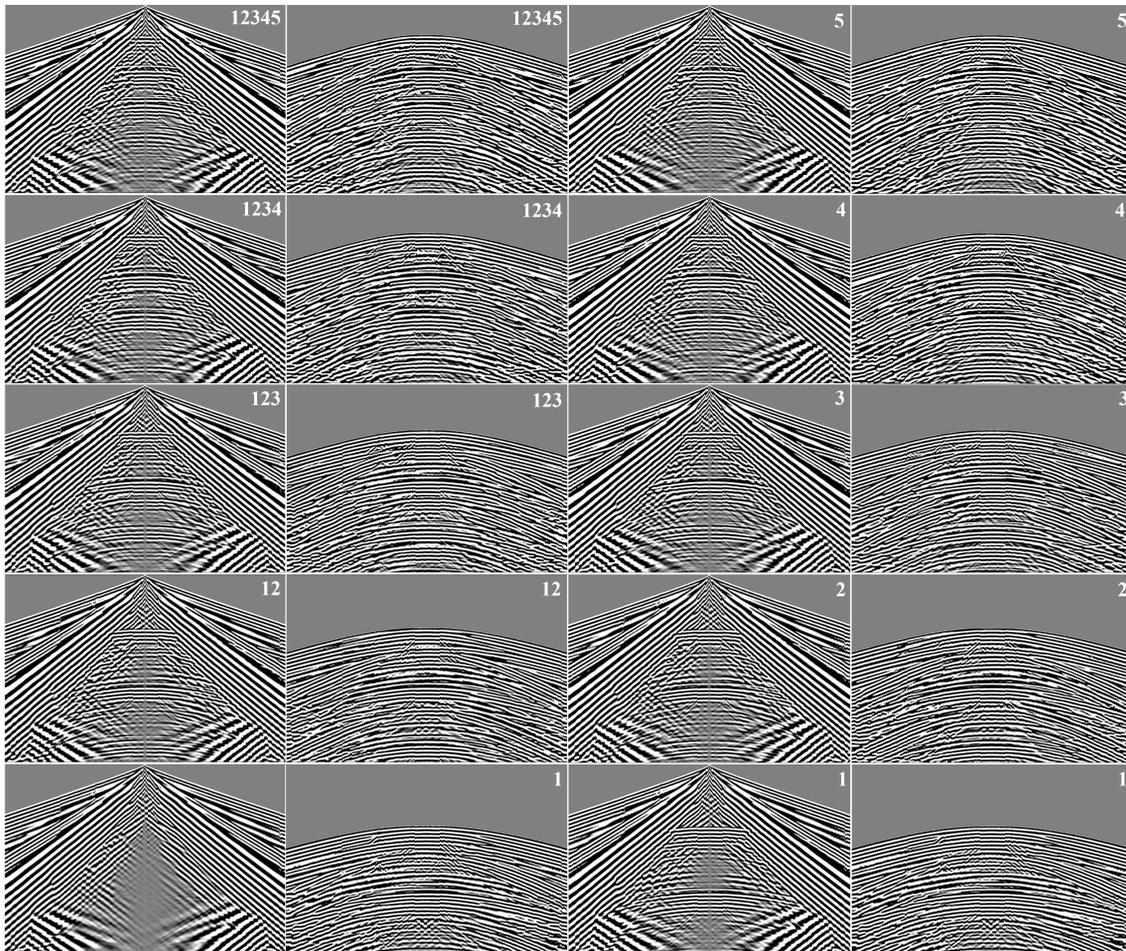


Фиг. 3. Сейсмограммы в случае с горизонтальным распространением резервуаров. Первый, третий столбцы – изначальные сейсмограммы, второй и четвертый – разница между постановками с резервуарами и без них. Цифрами указаны номера резервуаров, включенных в расчетную область.



Фиг. 4. Обработанные сейсмограммы в случае с горизонтальным распространением резервуаров. Слева – постановка с 5 резервуарами, справа – только с центральным. Цветами обозначены части картины, вызванные определенными включениями, линии соответствуют визуально выделяемым структурам.

Согласно нижним двум рядам на фиг. 3 отражение от каждого резервуара в отдельности соответствует их расположению по отношению к источнику сигнала. Отклик от центрального резервуара оказывается более симметричным по сравнению с остальными. Отраженные волны от включений, располагающихся ближе к ис-



Фиг. 5. Сейсмограммы в случае с вертикальным распространением резервуаров. Расположение аналогично фиг. 3.

точнику, приходят к дневной поверхности раньше остальных и фиксируются вначале приемниками, находящимся непосредственно над ними. Данные отклики наблюдаются как на обработанных сейсмограммах, так и на исходных. В случае наличия нескольких резервуаров отражения от каждого включения накладываются друг на друга, что затрудняет их идентифицирование. Тем не менее, при рассмотрении обработанных сейсмограмм последовательно, начиная со случая с одним включением и заканчивая постановкой со всеми, появляется возможность проследить возникновение дополнительных волн. Таким образом, удастся заметить постепенное нарушение исходной картины и появление новой структуры. На исходных сейсмограммах отличия видны гораздо хуже. Однако при миграции газа амплитуда откликов постепенно становится больше и уже при наличии трех включений она оказывается сопоставима с поверхностными волнами. В итоге совокупный отклик получается легче идентифицировать.

Фигура 4 позволяет оценить сейсмограммы до и после миграции газа в горизонтальном направлении. Цветами дополнительно показаны вклады откликов от отдельных включений в общее отражение. Светло-розовым цветом указано влияние отклика от 1 резервуара, голубым — от 2, светло-желтым — от 4, ярко-зеленым — от 5. Резервуар 3 создает базу, на которую накладываются остальные волны. Отклики только от центрального включения формируют треугольную структуру, выделенную красными линиями. При миграции газа данная структура расширяется до фиолетового треугольника, аналогично эффектам на волновых картинах на фиг. 2. Таким образом, детектирование распространения газа в горизонтальном направлении требует последовательных измерений и детального анализа изменения структур откликов на сейсмограммах.

В отличие от случая миграции метана в горизонтальном направлении, отслеживание его перемещения к поверхности значительно упрощается за счет возможности фиксации постепенного уменьшения времени прихода первого отклика. Данный эффект наблюдается на исходных и обработанных сейсмограммах на фиг. 5. К тому же, аналогично волнам на фиг. 2 в случае наличия нескольких включений структуры откликов, в ос-

новном, определяются отражениями от наиболее близкого к верхней границе резервуара. При этом вклад в регистрируемый сигнал остальных резервуаров начинает проявляться позднее, что особенно заметно в трассах из отдаленных от центра приемников сигнала. Таким образом, хотя в каждой сейсмограмме может быть затруднительно определить конкретное число резервуаров, последовательное сравнение измерений позволяет эффективно регистрировать миграцию газа.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате настоящей работы методами численного моделирования были решены прямые задачи сейсморазведки в условиях вечной мерзлоты при миграции метана в горизонтальном и вертикальном направлениях. Была создана постановка задачи, отражающие реальные упругие и геометрические характеристики многолетнемерзлых песчаных пород в полярных и приполярных прибрежных зонах Арктического региона. Грунт разделялся на узкий верхний талый слой, под которым располагались более плотные пласты. Все границы между слоями задавались криволинейными. Распространение газа моделировалось с помощью постепенного увеличения числа метановых включений. Использование сеточно-характеристического метода позволило с достаточной точностью воспроизвести сложные волновые структуры и отражения от различных областей расчетной постановки.

Подробно изучено волновое многообразие на полученных волновых картинах и сейсмограммах. Таким образом, были обнаружены волны Рэлея на свободной дневной поверхности. К тому же наличие слоистой структуры привело к возникновению кратных волн, привносящих осцилляции в изначальный фронт и значительно затрудняющих трактовку построенных сейсмограмм. Для облегчения анализа результатов были дополнительно рассмотрены сейсмограммы разности между измерениями с включениями и без них. В случае миграции газа в горизонтальном направлении было обнаружено образование треугольных структур на волновых картинах и сейсмограммах, с увеличивающимся основанием при постепенном добавлении в постановку большего числа включений. При распространении метана к дневной поверхности оказалось, что основной вклад в результаты измерений вносит только верхний резервуар. В итоге появляется возможность связать появление новых газовых карманов с уменьшением времени регистрации первого отклика. Таким образом, были зафиксированы характерные структуры на волновых картинах и сейсмограммах, позволяющие определить направление распространения газа.

Предложенные постановки задачи могут использоваться при решении обратных задач сейсморазведки. Представленный анализ результатов может помочь в трактовке подобных измерений. Дальнейшие улучшения построенных моделей заключаются в рассмотрении дополнительных ледовых включений, возможных полостей и нефтенасыщенных слоев. К тому же, опора на конкретные геологические разрезы и сравнение с натурными данными могут значительно повысить качество проводимого анализа. Для получения результатов, наиболее приближенных к реальным условиям, представляется необходимым проведение трехмерных расчетов. Все указанные задачи являются направлениями предстоящей работы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Li L.* Special issue on numerical modeling in civil and mining geotechnical engineering // *Processes*. 2022. V. 10. № 8. 1571.
2. *Bath M.* Introduction to seismology. V. 27. Birkhauser, 2013.
3. *Romanovsky V.E., Drozdov D.S., Oberman N.G., Malkova G.V., Kholodov A.L., Marchenko S.S., Moskalenko N.G., Sergeev D.O., Ukraintseva N.G., Abramov A.A., Gilichinsky D.A., Vasiliev A.A.* Thermal state of permafrost in Russia // *Permafrost Periglac.* 2010. V. 21. P. 136–155.
4. *Bogoyavlensky V.I., Kishankov A., Yanchevskaya A., Bogoyavlensky I.V.* Forecast of gas hydrates distribution zones in the Arctic Ocean and adjacent offshore areas // *Geosciences*. 2018. V. 8. № 12. P. 453.
5. *Anisimov O., Zimov S.* Thawing permafrost and methane emission in Siberia: Synthesis of observations, reanalysis, and predictive modeling // *Ambio*. 2021. V. 50. P. 2050–2059.
6. *Sireletskiy D.A., Clemens S., Lanckman J.-P., Shiklomanov N.I.* The costs of Arctic infrastructure damages due to permafrost degradation // *Environmental Res. Lett.* 2023. V. 18. № 1. 015006.
7. *Bogoyavlensky V.I., Bogoyavlensky I.V., Nikonov R.A., Kargina T.N., Chuvilin E., Bukhanov B., Umnikov A.* New catastrophic gas blowout and giant crater on the Yamal Peninsula in 2020: Results of the expedition and data processing // *Geosciences*. 2021. V. 11. № 2. P. 71.

8. *Богоявленский В.И., Богоявленский И.В., Никонов Р.А., Каргина Т.Н.* Мониторинг развития Мордыянского объекта взрыва газа на Ямале на основе данных дистанционного зондирования Земли // Арктика: экология и экономика. 2022. Т. 12. № 4. С. 513–523.
9. *Glikson A.* The methane time bomb // *Energy Procedia*. 2018. V. 146. P. 23–29.
10. *Favorskaya A.V., Petrov I.B.* Wave responses from oil reservoirs in the Arctic shelf zone // *Dokl. Earth Sc.* 2016. V. 466. P. 214–217.
11. *Favorskaya A.V., Petrov I.B.* Grid-Characteristic Method // In: *Favorskaya, A., Petrov, I. (eds) Innovations in Wave Processes Modelling and Decision Making. Smart Innovation, Systems and Technologies*. 2018. V. 90. P. 117–160.
12. *Petrov I.B., Kozhemyachenko A.A., Favorskaya A.V.* Simulation of Vibrations of Railway Structures by the Grid-Characteristic Method // *Dokl. Phys.* 2023. V. 68. P. 30–34.
13. *Golubev V.I., Nikitin I.S., Beklemysheva K.A.* Model of fractured medium and nondestructive control of composite materials // *Chinese J. Aeronautics*. 2023. V. 37. № 2. P. 93–99.
14. *Новацкий В.* Теория упругости. М.: Мир, 1975.
15. *Stognii P.V., Petrov I.B., Khokhlov N.I.* Numerical modelling of the reflected waves from gas cavities and methane bombs in the heterogeneous media of the Northern regions // *IOP Conf. Ser.: Materials Science and Engineering*. 2020. V. 927. № 1. 012006.
16. *Stognii P.V., Khokhlov N.I., Petrov I.B., Favorskaya A.V.* The comparison of two approaches to modeling the seismic waves spread in the heterogeneous 2D medium with gas cavities // In: *Favorskaya, M.N., Favorskaya, A.V., Petrov, I.B., Jain, L.C. (eds) Smart Modelling For Engineering Systems. Smart Innovation, Systems and Technologies*. 2021. V. 214 P. 101–114.
17. *Stognii P.V., Khokhlov N.I., Petrov I.B.* Numerical modeling of wave processes in multilayered media with gas-containing layers: comparison of 2D and 3D models // *Dokl. Math.* 2019. V. 100. P. 586–588.
18. *Rusanov V.V.* Difference schemes of the third order of accuracy for the forward calculation of discontinuous solutions // *Doklady Akademii Nauk*. 1968. V. 180. P. 1303–1305.
19. *Guseva E.K., Golubev V.I., Petrov I.B.* Linear quasi-monotone and hybrid grid-characteristic schemes for the numerical solution of linear acoustic problems // *Numer. Analys. Appl.* 2023. V. 16. P. 112–122.
20. *Трифонов Б.А., Милановский С.Ю., Несынов В.В.* Оценка сейсмических воздействий в условиях деградации мерзлоты // *Вестник КРАУНЦ. Сер.: Науки о Земле*. 2022. Т. 56. № 4. С. 59–74.
21. *Fatyanov A.G.* A wave method of suppressing multiple waves for any complex subsurface geometry // *Numer. Analys. Appl.* 2012. V. 5. P. 187–190.
22. *Nkemzi D.* A new formula for the velocity of Rayleigh waves // *Wave Motion*. 1997. V. 6. № 2. P. 199–205.

NUMERICAL CALCULATION OF THE EFFECT OF THE METHANE MIGRATION PROCESS ON THE RESULTS OF SEISMIC EXPLORATION IN PERMAFROST ZONES

E. K. Guseva*, V. I. Golubev**, I. B. Petrov***

141701 Dolgoprudny, Institutsky Lane, 9, MIPT (National Research University), Russia

* e-mail: guseva.ek@phystech.edu

** e-mail: golubev.vi@mipt.ru

***e-mail: petrov@mipt.ru

Received: 23.02.2024

Revised: 27.04.2024

Accepted: 31.05.2024

Abstract. For a long time, intense methane emissions into the atmosphere from the subsurface of permafrost have been observed in the shelf and coastal zones of the Arctic region. Due to the potential danger of this phenomenon to the environment and infrastructure, there is a need for periodic monitoring of gas pockets, including through ground-based seismic exploration. This paper contains the results of a study of this process using numerical modeling. A model of layered frozen sandy soil with curvilinear boundaries between the sheets is constructed, reflecting the main specifics of the region. The process of gas migration in vertical and horizontal directions is reconstructed by increasing the number of methane reservoirs. The defining system of hyperbolic equations of the linear theory of elasticity is used. The problem is solved by the grid-characteristic method in a two-dimensional formulation on a rectangular grid, in each cell of which the elastic characteristics of the layers are set. The resulting wave structures are studied in detail on the obtained synthetic wave patterns and seismograms, which make it possible to determine the direction of gas propagation. The results obtained can be used to interpret similar field experiments.

Keywords: numerical modeling, direct seismic survey, permafrost, gas migration, grid-characteristic method.