

УДК 550.834+539.4

ПОЛНОВОЛНОВОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ В СЕЙСМОРАЗВЕДКЕ НА ОСНОВЕ ЦИФРОВОЙ ГЕОЛОГИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДА СПЕКТРАЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Ю.П. Ампилов¹, А.В. Вершинин^{1,2}, В.А. Левин¹, К.А. Петровский³, И.И. Приезжев⁴, Я.И. Штейн⁵

¹ Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, 119991, Москва, Ленинские горы, 1, Россия

² Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, 123242, Москва, Б. Грузинская ул., 10, стр. 1, Россия

³ ООО «Фидесис», 119234, Москва, Ленинские горы, 1, стр. 75, Россия

⁴ Российский государственный университет нефти и газа им. И.М. Губкина,
119991, Москва, Ленинский просп., 65, Россия

⁵ ООО «Арктический научно-проектный центр шельфовых разработок»,
119607, Москва, Раменский бульвар, 1, Россия

Рассмотрено решение трехмерной динамической задачи теории упругости применительно к моделированию всех типов сейсмических волн, распространяющихся в реальных геологических средах. Излагаются элементы алгоритма на основе метода спектральных элементов (МСЭ) для численного решения поставленных задач. Представлены основные преимущества и особенности МСЭ (высокий порядок дискретизации по пространству, явная схема интегрирования по времени) в сравнении с классическим подходом, основанным на методе конечных элементов (МКЭ). Рассматриваются особенности массивно-параллельной реализации данного алгоритма на графических процессорах с использованием технологии CUDA. Анализируется эффективность распараллеливания на гибридных системах при различных порядках МСЭ и параметрах численной схемы интегрирования по времени. Приведены результаты решения трехмерной задачи моделирования распространения сейсмических волн в неоднородной геологической среде с разломами и резко изменяющимися свойствами пластов по вертикали и горизонтали. В качестве исходных данных взята детальная цифровая геологическая модель, построенная для одного из месторождений Арктики с помощью наиболее распространенного в мире программного комплекса геологического моделирования Petrel. Она была конвертирована на гексаэдральную сетку для выполнения эффективных расчетов МСЭ на отечественном программном комплексе CAE Fidesys, разработанном ранее с участием авторов статьи для широкого круга других инженерных задач прочностного анализа. Модель далее обобщена для типовых сейсмогеологических условий Западной Сибири, чтобы на основе такого моделирования можно было проводить широкий спектр исследований по возможностям сейсморазведки для изучения основных нефтегазоносных комплексов в данном регионе. В последующем могут быть апробированы и другие регионы с иным геологическим строением. Выходные результаты полноволнового моделирования записываются в международном формате SEG-Y, пригодном для всех видов промышленной сейсмической обработки. Проводится анализ полученных модельных сейсмограмм и волновых полей. Делается вывод о практической значимости проведенных исследований, результаты которых в будущем могут быть использованы для широкого круга прикладных задач в различных регионах и условиях.

Полноволновое моделирование, сейсморазведка, цифровая геологическая модель, метод спектральных элементов, параллельные вычисления, гибридные системы, нефть и газ, Западная Сибирь

FULL-WAVEFORM SEISMIC MODELING BASED ON DIGITAL GEOLOGICAL MODEL USING SPECTRAL ELEMENT METHOD: APPLICATIONS TO SEISMIC EXPLORATION

Yu.P. Ampilov, A.V. Vershinin, V.A. Levin, K.A. Petrovskii, I.I. Priezzhev, Ya.I. Shtein

The three-dimensional dynamic problem solution of the theory of elasticity as it applies to modeling of all types of seismic waves propagating in real geological media is considered. The elements of the 3D forward modeling algorithm based on the spectral element method (SEM) for the numerical solution of the problems posed are presented. The SEM's main characteristics (high order spatial discretization, explicit time integration scheme) and its advantages are compared with the classical finite element method (FEM). Distinctive features of massively parallel implementation of this algorithm on NVidia's GPU using CUDA (Compute Unified Device Architecture) are considered. The efficiency of parallelization on hybrid systems at different orders of SEM and parameters of the numerical scheme of time integration is analyzed. Results of solving a three-dimensional problem of modeling seismic wave propagation in a heterogeneous geological medium with faults and strongly

varying (vertically and horizontally) properties of the investigated layers are presented. A highly detailed digital geological model constructed for one of the petroleum fields in the Arctic region using Petrel, the world's most popular geological modeling tool, is used as input datasets. The problem was solved on a mesh of hexahedral elements in 3D to perform efficient SEM calculations in the CAE Fidesys software developed earlier with the authors participation for engineering simulations (strength analysis, etc.). The derivation of the model was based on the typical seismogeological conditions of Western Siberia so that the modeling allows investigating look-ahead capabilities of numerous seismic exploration methods for an in-depth study of major oil-and-gas-bearing complexes in this region. The prospects of model implementation for other candidate regions with different geological structure are equally promising. Outputs of the full-waveform seismic modeling is stored in the standard SEG-Y format currently widely used worldwide in industry for seismic data processing. The obtained synthetic seismograms and seismic wave fields are analyzed. The practical significance of the conducted research whose results can be utilized in the future for solving a wide range of applied tasks for regions with different geological conditions is deduced.

Full-waveform seismic modeling, seismic survey, digital geological model, spectral element method, parallel computing, hybrid systems, oil and gas, Western Siberia

ВВЕДЕНИЕ

В сейсморазведке задача моделирования распространения волн [Ampilov, 2010; Костин и др., 2011, 2013; Charara et al., 2011b; Лисица, Чеверда, 2014; Левин, Вершинин, 2015; Сабинин и др., 2022] далеко не всегда входит в базовые потребности метода. Моделирование не присутствует в стандартных графах обработки и интерпретации и потому практически не востребовано в производственном режиме. Если оно и используется, то преимущественно в исследовательских целях и в упрощенном варианте лучевого метода, естественные ограничения которого (прежде всего, его высокочастотная асимптотика) находятся в противоречии с масштабом неоднородностей реальной геологической среды.

Поэтому полномасштабное моделирование с учетом всех видов возникающих поверхностных и объемных волн в таких случаях, бесспорно, является необходимым. Разумеется, оно значительно более затратное по времени и вычислительным ресурсам, нежели очень упрощенное лучевое, но в целях научной объективности и адекватности получаемых результатов без него не обойтись. Дополнительной трудностью является то, что не существует стандартных и широко апробированных методов такого моделирования применительно к детальным цифровым геологическим моделям месторождений, которые сейчас стали необходимым звеном процесса разведки и освоения недр. Такие модели строятся нефтегазодобывающими компаниями как в известных зарубежных пакетах типа Petrel, так в наступившую эпоху импортозамещения и в отечественных системах DV-geo, Geoplat, T-навигатор. Но ни в какой из указанных технологических цепочек не предусмотрено последующее построение полномасштабной сейсмической трехмерной модели на этой основе. В статье, по сути, изложены первые попытки успешных исследований в этом направлении. Она подготовлена авторами из разных организаций, объединившихся для решения данной, весьма интересной и перспективной, исследовательской задачи, которая в дальнейшем может приобрести весьма значимую практическую ценность при исследованиях недр.

Рассмотрена трехмерная динамическая задача теории упругости применительно к полномасштабному моделированию сейсморазведки в геологических средах. Алгоритм основан на методе спектральных элементов (МСЭ) для численного решения задач в неоднородных трехмерных средах с резко изменяющимися свойствами пород. Представлены основные преимущества и особенности МСЭ (высокий порядок дискретизации по пространству, явная схема интегрирования по времени) в сравнении с классическим подходом, основанном на методе конечных элементов (МКЭ) [Марчук, Агошков, 1981; Аки, Ричардс, 1983; Zienkiewicz, Taylor, 2000b]. Рассматриваются технические особенности массивно-параллельной реализации данного алгоритма на графических процессорах с использованием технологии CUDA. Анализируется эффективность распараллеливания на гибридных системах при различных порядках МСЭ и параметрах численной схемы интегрирования по времени.

Приведены результаты решения трехмерной задачи моделирования распространения сейсмических волн в неоднородной геологической среде с разломами и резко изменяющимися свойствами пропластков. Проводится анализ полученных сейсмограмм и волновых полей.

В статье делается упор на геолого-геофизическую информативность предлагаемого моделирования, в то время как основные математические и вычислительные обоснования рассмотрены в предшествующих работах соавторов [Левин, Вершинин, 2015; и др.]. Кроме того, планируются дополнительные публикации по этим вопросам в профильных изданиях, посвященных применению суперкомпьютерных технологий.

МЕТОДЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Решается задача о распространении трехмерных сейсмических волн в неоднородной тонкослоистой среде с произвольными границами раздела и разрывными нарушениями сплошности пород. Для расчетов волнового поля использовалась геологическая модель, построенная на основе данных по реальному участку недр Российской Арктики, достаточно хорошо изученному 3D сейсморазведкой и глубоким бурением. По вертикали модель (рис. 1) охватывает разрез осадочного чехла от поверхности рельефа до кровли складчатого основания платформы. В нижнем интервале присутствуют разрывные нарушения с изменяющимися по латерали и вертикали смещениями, ориентация структурной сетки выбрана в соответствии с простираем тектонических швов. Размеры моделируемой области в плане выбраны таким образом, чтобы получить на выходе пригодный для полноценной обработки объем сейсмических данных 3D (16×12 км по латерали и от 0 до -4100 м по вертикали).

Пространственная сетка и модель свойств построена в специализированном программном комплексе геологического моделирования с выполнением вертикального ремасштабирования на заключительном этапе. Зоны и подзоны модели разделены на слои ячеек в соответствии с принятой региональной концепцией осадконакопления. Итоговая расчлененность разреза позволяет отразить все наиболее значимые детали строения разреза и сохранить баланс между детальностью, скоростью и самой возможностью выполнения дальнейших расчетов. 3D сетка построенной модели содержит 144 слоя по 39 961 значимых ячеек в каждом слое (среднее разрешение сетки по латерали 70×70 м). Среднее вертикальное разрешение сетки составляет от 13—15 м в УВ продуктивной зоне разреза до 25—60 м в остальных частях. Всего сетка содержит около 6 млн значимых ячеек.

Смоделированный разрез включает в себя несколько нефтегазоносных комплексов с доказанной продуктивностью и региональных экранов, распространенных в Западной Сибири. Участок моделирования выбран таким образом, чтобы включать в себя как части открытых залежей УВС, так и подстилающие водонасыщенные зоны. Моделирование литологии разреза основано на результатах глубокого бурения — материалах интерпретации ГИС и лабораторных исследованиях кернового материала. В верхней части смоделирована зона распространения многолетнемерзлых горных пород с изменяющейся мощностью. Итоговая модель содержит данные о продольных и поперечных скоростях упругих волн, плотности пород, модуле Юнга и коэффициенте Пуассона, а также декременте поглощения среды.

Построения выполнены с соблюдением всех основных отраслевых требований, предъявляемых к геологическим моделям, используемым для подсчета запасов УВС и проектирования разработки. Контроль качества выполненных геологических построений осуществлен с использованием сравнительного анализа ранее полученных карт изохрон по основным ОГ и карт, рассчитанных на построенной модели.

Математическая постановка задачи расчета полного волнового поля состоит из уравнений линейной динамической теории упругости в перемещениях [Ильюшин, Победря, 1970; Седов, 1994], записанных в трехмерной декартовой системе координат [Carcione et al., 1992], граничных условий (приближенные неотражающие условия на внешней границе области и свободной поверхности с заданным массовым источником, зависящим от времени, на ней) и нулевых начальных условий. Предусмотрено и задание частотно-зависимого поглощения в породах.

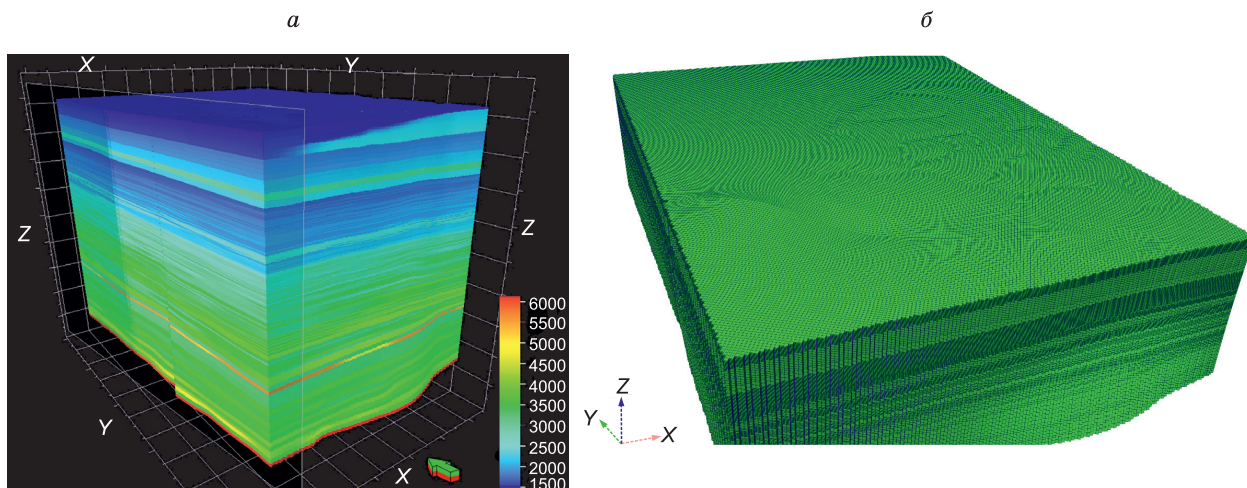


Рис. 1. Геологическая модель (а) и гексаэдральная сетка (б) для дискретизации по пространству.

Цветом показано распределение скорости продольных волн (м/с).

Пусть $\mathbf{u}(x, t)$ — вектор смещения точки x в момент времени t , ρ — плотность, σ — тензор напряжений, $\mathbf{S} = S(x, t)$ — функция источника. Выпишем систему дифференциальных уравнений, описывающих распространение упругих волн [Ильюшин, Победря, 1970; Седов, 1994]:

$$\rho \frac{\partial^2 \mathbf{u}}{\partial t^2} = \nabla \cdot \hat{\sigma} + \mathbf{S}.$$

Рассмотрим упругие материалы, подчиняющиеся закону Гука:

$$\hat{\sigma} = \hat{\mathbf{c}} : \hat{\epsilon},$$

где $\hat{\epsilon} = \frac{\nabla \mathbf{u} + \mathbf{u} \nabla}{2}$ — тензор деформации, $\hat{\mathbf{c}}$ — тензор Гука 4-го ранга.

Ввиду симметрии тензора Гука, его можно представить в виде матрицы, используя замену индексов [Ильюшин, Победря, 1970; Седов, 1994] (нотация Фойгта): $(1, 1) \rightarrow 1, (2, 3) \rightarrow 4, (2, 2) \rightarrow 2, (1, 3) \rightarrow 5, (3, 3) \rightarrow 3, (1, 2) \rightarrow 6$. Тогда закон Гука примет вид:

$$\begin{pmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{33} \\ \sigma_{23} \\ \sigma_{13} \\ \sigma_{12} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & C_{14} & C_{15} & C_{16} \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} & C_{24} & C_{25} & C_{26} \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} & C_{34} & C_{35} & C_{36} \\ C_{41} & C_{42} & C_{43} & C_{44} & C_{45} & C_{46} \\ C_{51} & C_{52} & C_{53} & C_{54} & C_{55} & C_{56} \\ C_{61} & C_{62} & C_{63} & C_{64} & C_{65} & C_{66} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \epsilon_{11} \\ \epsilon_{22} \\ \epsilon_{33} \\ 2\epsilon_{23} \\ 2\epsilon_{13} \\ 2\epsilon_{12} \end{pmatrix}.$$

В случае изотропной среды компоненты тензора Гука зависят лишь от двух величин, являющихся коэффициентами (параметрами) Ламе — λ, μ :

$$C_{i,j} = \begin{pmatrix} \lambda + 2\mu & \lambda & \lambda & 0 & 0 & 0 \\ \lambda & \lambda + 2\mu & \lambda & 0 & 0 & 0 \\ \lambda & \lambda & \lambda + 2\mu & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \mu & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \mu & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \mu \end{pmatrix}.$$

В этом случае закон Гука принимает вид:

$$\sigma_{ij} = \lambda \epsilon_{kk} \delta_{ij} + 2\mu \epsilon_{ij}.$$

Для численного решения уравнений в неоднородной трехмерной среде использовался МСЭ [Komatitsch, Tromp, 1999; Komatitsch et al., 2000; Kononov et al., 2017], обладающий высоким (спектральным) порядком аппроксимации решения по пространству и полностью явной схемой интегрирования по времени ввиду диагональной матрицы масс.

ТЕСТИРОВАНИЕ МЕТОДА СПЕКТРАЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ НА ЗАДАЧЕ ЛЭМБА

Первоначально была проверена достоверность решения прямой задачи с помощью МСЭ на примере классической задачи Лэмба [Аки, Ричардс, 1983] для однородного упругого полупространства, поскольку в этом случае можно рассчитать аналитическое решение и сравнить с полученным по МСЭ. От точечного источника на границе полупространства распространяются как объемные P - и S -волны, так и поверхностные рэлеевские, которые по интенсивности значительно превосходят объемные (рис. 2).

Параметры среды были заданы следующие:

- модуль Юнга $E = 2e8$ Па;
- коэффициент Пуассона $\nu = 0.3$;
- плотность $\rho = 1900$ кг/м³.

Сопоставление результатов аналитического и расчетного решения по МСЭ

Наименование переменной	Переменная, м	Значение по «теории»	Результаты CAE Fidesys	Относительная погрешность, %
Компоненты вектора перемещений в узлах сетки на шаге 6	Смещение X	-0.00110025	-0.0011002442	<< 0.01
Компоненты вектора перемещений в узлах сетки на шаге 6	Смещение Y	0.000517095	0.000517075	<< 0.01
Компоненты вектора перемещений в узлах сетки на шаге 8	Смещение X	-4.78016e-05	-4.77981e-05	<< 0.01
Компоненты вектора перемещений в узлах сетки на шаге 8	Смещение Y	0.000445372	0.0004453707	<< 0.01

Значения скоростей распространения продольной v_P и поперечной v_S волн, а также скорости волны Рэлея v_r находятся по следующим формулам [Аки, Ричардс, 1983]:

$$v_P = \sqrt{\frac{K + \frac{4}{3}\mu}{\rho}}, \quad v_S = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}}, \quad v_r = \frac{0.87 + 1.12\nu}{1 + \nu} v_S,$$

где $\mu = \frac{E}{2(1+\nu)}$ — модуль сдвига, а $K = \frac{E}{3(1-2\nu)}$ — модуль всестороннего сжатия.

При изменении ν от 0 до 0.5 фазовая скорость рэлеевской волны монотонно изменяется от $0.87 v_S$ до $0.96 v_S$.

Уравнения для компонент вектора перемещения точек среды в двумерном случае при прохождении волны Рэлея на поверхности [Аки, Ричардс, 1983]:

$$u_r \sim \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} -2iQe^{\frac{i\pi}{4}} \left[\frac{2}{c_R} \left(\frac{1}{v_r^2} - \frac{1}{v_s^2} \right)^{\frac{1}{2}} \right] \exp \left[i\omega \left(\frac{r}{v_r} - t \right) \right] \exp \left[-\omega \left(\frac{1}{v_r^2} - \frac{1}{v_p^2} \right)^{\frac{1}{2}} h \right] \exp(i\omega t) d\omega,$$

$$w_r \sim \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} -2iQe^{\frac{i\pi}{4}} \left[\frac{2}{v_r^2} - \frac{1}{v_s^2} \right] \exp \left[i\omega \left(\frac{r}{v_r} - t \right) \right] \exp \left[-\omega \left(\frac{1}{v_r^2} - \frac{1}{v_p^2} \right)^{\frac{1}{2}} h \right] \exp(i\omega t) d\omega,$$

где $Q = A \left(\frac{2\pi\omega}{rv_r} \right)^{1/2} \frac{\omega}{v_s^2 R' \left(\frac{1}{v_r} \right)}$.

Аналитические и полученные численным моделированием по МСЭ значения смещений сопоставлялись в одной фиксированной точке с координатами (70.4225, 4.31214e-15, 0.0). Результаты представлены в таблице, из которой следует, что величины практически совпадают с относительной погрешностью менее чем сотые доли процента.

На рисунке 2 представлено сопоставление смещений во времени в той же точке. Видно, что они также совпадают практически везде за исключением экстремумов колебаний. При необходимости и эти различия можно устранить, повышая порядок в МСЭ, однако это увеличит время расчета. Поэтому необходимо использовать принцип разумной достаточности при увеличении точности расчетов. Правда, это требует дополнительных обоснований. В данном примере применения МСЭ ограничились третьим порядком.

РАСЧЕТ ПОЛНОГО ВОЛНОВОГО ПОЛЯ ДЛЯ СЛОЖНОЙ ТРЕХМЕРНОЙ МОДЕЛИ С РАЗЛОМАМИ

Для случая рассмотренной в данной работе цифровой геологической модели (см. рис. 1) решение ищилось на гексаэдральной сетке, состоящей из 5 634 343 спектральных элементов 5-го порядка с общим числом интерполяционных спектрально-элементных узлов порядка 1.2 млрд. Важной особенно-

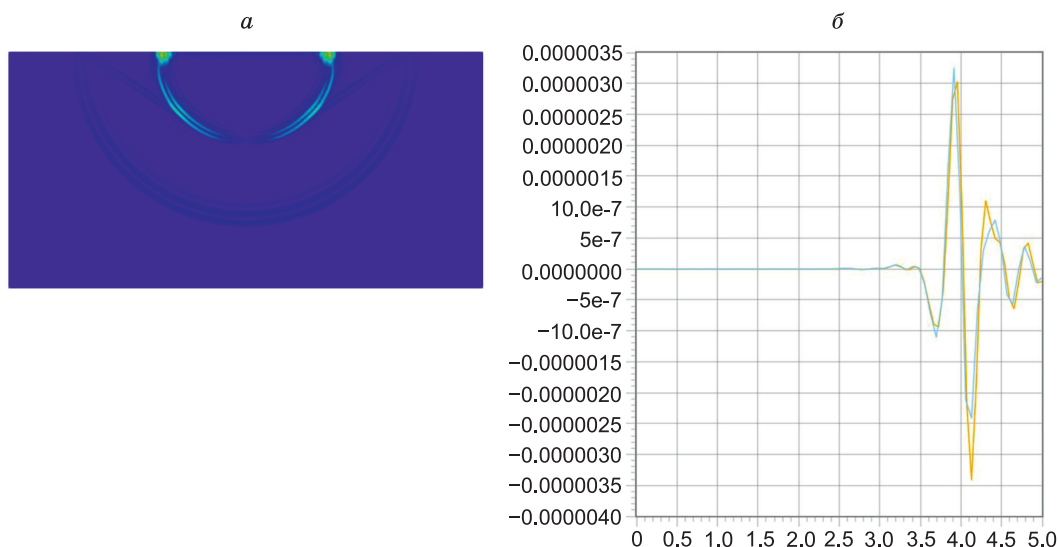


Рис. 2. Волновые поля в задаче Лэмба (а) и графическое сравнение численного (голубая линия) и аналитического (оранжевая линия) решений задачи Лэмба (б) в фиксированной точке на поверхности.

стью является адаптация сетки под слоистую геометрию задачи, позволяющей точно моделировать разрывы в параметрах среды при переходе волны из слоя в слой. В качестве приближенных неотражающих граничных условий на внешней границе области в данном случае использовалась комбинация локальных характеристических условий [Komatitsch et al., 2000] и поглощающего слоя с нарастающей степенью поглощения при приближении к границам области [Ампилов, 1992; Левин, Вершинин, 2015].

Источник задавался в виде объемного импульсного давления (объемный взрыв) с пространственным затуханием по закону Гаусса и показателем экспоненты, равным двум размерам спектральных элементов вблизи источника. Зависимость импульса от времени соответствовала импульсу Рикера.

На этапе подготовки к расчетам возникла еще одна проблема, которая поначалу казалась авторам не столь существенной, но на деле отняла основное время у группы исследователей. Конвертировать простую декартову сетку геологической модели в пригодную для расчетов методом спектральных элементов сетку оказалось трудноразрешимой технической и алгоритмической задачей при наличии разломов в среде. Исходный разрез моделировался напрямую в Petrel путем сдвига ячеек вдоль разлома без нарушения конформности сетки. Это приводило к скошенным и вытянутым гексаэдрам в зоне разлома, что повлияло на шаг интегрирования по времени в соответствии с условием Куранта. При попытках сохранить конфигурацию разрывных нарушений ячейки неконтролируемо деформировались, изменяя свои размеры, что в конечном счете приводило к численной дисперсии рассчитанных рэлеевских волн на сейсмических частотах от 20 Гц и выше.

При отсутствии разломов в среде с этим проблем не возникало. Если изначально строить цифровую геологическую модель, скажем, в среде CAE Fidesys (www.cae-fidesys.com), то этих проблем тоже не возникнет, но это слишком длительный и трудоемкий процесс, требующий обучения персонала геологических «модельеров» в компаниях, а также доработки CAE Fidesys конкретно под эти задачи. Однако в компаниях за предыдущие десятилетия построены сотни и тысячи геологических моделей месторождений в среде Petrel, и было бы весьма полезным, если бы они изначально были пригодны для полномасштабного моделирования по предлагаемой технологии. Для типовой модели «Западная Сибирь», которую авторы статьи подготовили для указанных расчетов (см. рис. 1), им удалось решить данный спектр проблем, но в общем случае требуется еще доработка технологии конвертации сеток при наличии разнонаправленных наклонных тектонических нарушений сложной конфигурации. При отсутствии разломов проблема решена полностью.

Далее использование спектральных элементов высокого порядка и явной схемы интегрирования по времени позволило, с одной стороны, сократить общее число степеней свободы в дискретной модели (в сравнении с классическим методом конечных элементов [Zienkiewicz, Taylor, 2000a, 2000b], достаточно одного-двух спектральных элементов на минимальную длину волны), а с другой, — повысить шаг интегрирования по времени (определяемый из условия Куранта [Марчук, Агошков, 1981; Левин, Вершинин, 2015]) за счет более крупных элементов.

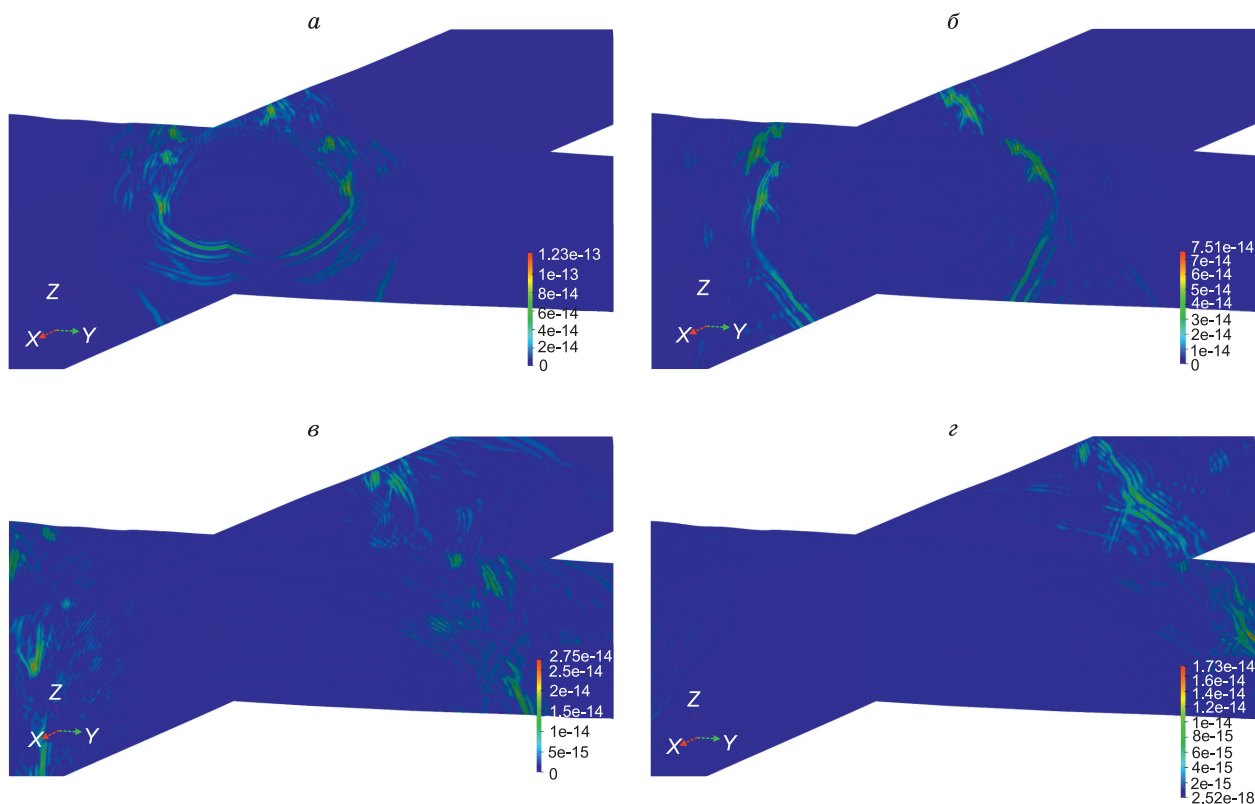


Рис. 3. Волновые поля от источника, расположенного в центре модели, представленной на рис. 1, в различные моменты времени (а—г).

Цветовые шкалы — модуль вектора скорости.

Волновые поля в различные моменты времени представлены на взаимно-перпендикулярных пространственных сечениях на рис. 3. Для их численных расчетов применялись расчетные ядра в составе пакета CAE Fidesys на базе технологии CUDA [Kirk, Hwu, 2008], благодаря чему были задействованы возможности массивно-параллельных вычислительных устройств. Для проведения расчетов использовалась рабочая станция HPE Mercury на базе четырех графических ускорителей NVIDIA Tesla A100, установленная на кафедре вычислительной механики механико-математического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова.

ЧИСЛЕННАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ И РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ

При расчетах был реализован безматричный алгоритм [Сабинин и др., 2022] интегрирования по пространству (ассемблирование вектора внутренних и внешних усилий [Zienkiewicz, Taylor, 2000a; Charara et al., 2011a, b] с явной схемой интегрирования по времени на многоуровневой архитектуре графического процессора. В рамках данной реализации спектрально-элементная сетка естественным образом отображается на сетку из мультипроцессоров графической карты, а соответственно каждый спектральный элемент отображается на потоковый блок, в рамках которого отдельные узлы внутри элемента обрабатываются соответствующими им потоками внутри блока. Данный подход позволяет эффективно задействовать возможности разделяемой памяти для кэширования данных внутри спектрального элемента при формировании вектора внутренних усилий на нем, что значительно увеличивает пропускную способность параллельной версии алгоритма, производительность которой ограничена именно скоростью доступа к глобальной графической памяти, а не вычислительной скоростью ядер графического процессора. Кроме того, использование графов позволило объединить последовательные выполнения операций ассемблирования и интегрирования по времени (шаг схемы Ньюмарка [Zienkiewicz, Taylor, 2000a; Левин, Вершинин, 2015]) в единый граф операций на CUDA, осуществляющий несколько шагов интегрирования по времени за один вызов. За счет применения данных подходов получен итоговый прирост производительности порядка 100 раз в сравнении с реализацией МСЭ с помощью

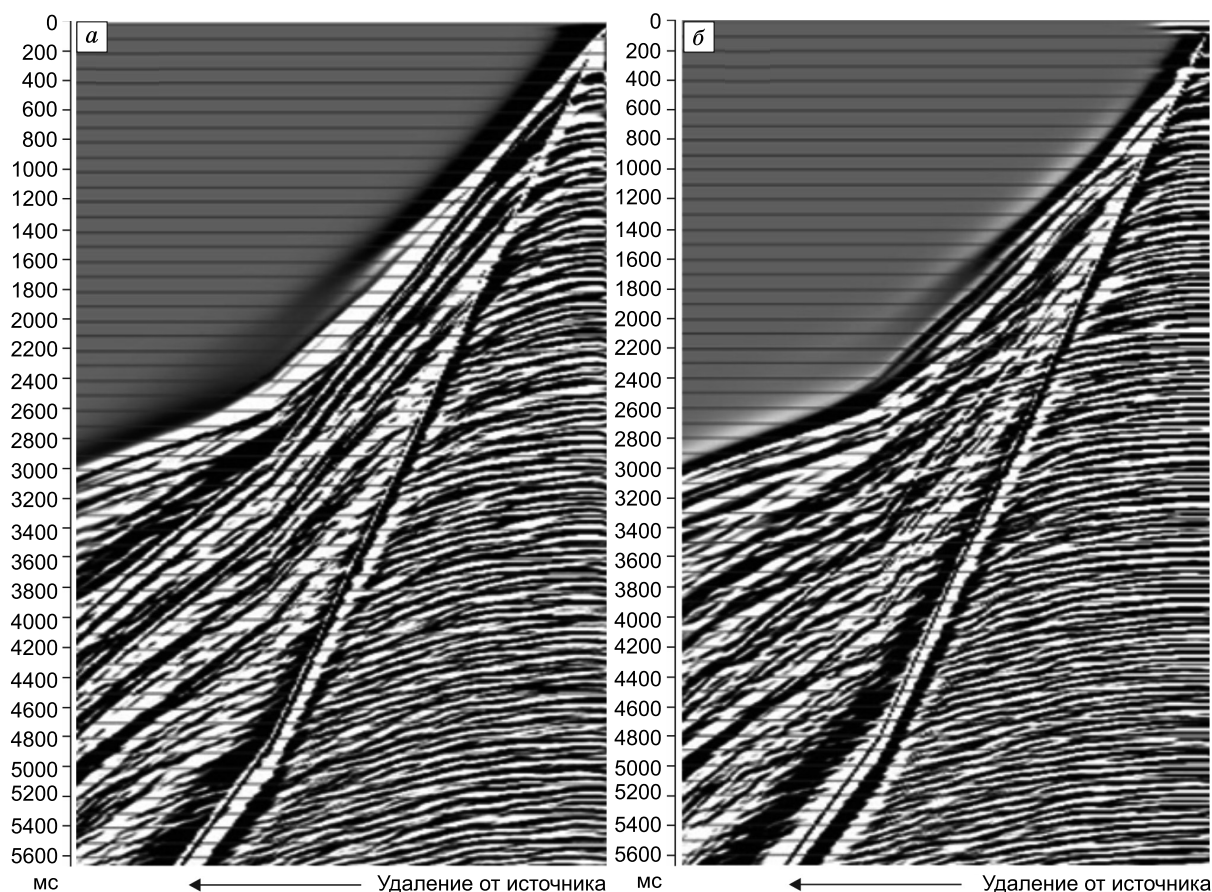


Рис. 4. Сейсмограммы вертикальной (а) и горизонтальной (б) скорости смещения частиц земной поверхности, полученные для источника колебаний типа центр расширения, расположенного на поверхности в центре модели, изображенной на рис. 1.

OpenMP на центральном процессоре Intel Xeon. Полученные результаты свидетельствуют об эффективности применения технологии CUDA к поставленной задаче.

На рисунке 4 приведены сейсмограммы для вертикальной v_z и горизонтальной v_x (вдоль профиля наблюдений) компонент скорости смещения частиц дневной поверхности. Зарегистрировано большое количество отраженных волн, что вполне естественно, поскольку исходная цифровая модель среды имела около 500 слоев по вертикали толщиной, меньшей, чем длина волны. Но среди них немало обменных и частично-кратных волн-спутников, которые интерферируют с полезными однократными. Разделить их стандартными методами сейсмической обработки не представляется возможным. А для того, чтобы применить различные нестандартные схемы, включая вычитания и иные специальные процедуры, необходимо по возможности детально знать скоростные характеристики среды. Если их неоткуда взять, применяют скоростной анализ сейсмограмм, пытаясь определить скоростной закон для полезных однократных волн.

Обычно при стандартной сейсморазведке регистрируется только вертикальная компонента v_z , и задача идентификации и устранения поперечных и обменных волн усложняется.

Наиболее распространенный метод анализа спектра скоростей является, по сути, первым шагом на пути поиска решения обратной кинематической задачи сейсморазведки, которое не является единственным.

На рисунке 5 представлены спектры скоростей для анализируемой сейсмограммы v_z , рассчитанной для центра цифровой геологической модели. Интерпретатор, который не знал исходной модели, провел желтую линию (см. рис. 5, б), полагая, что эти скорости соответствуют однократным отраженным продольным волнам. Далее с этими скоростями будут построены итоговые временные разрезы, которые в дальнейшем станут основой структурных геологических построений. Однако, зная исходную модель, можно обнаружить, что в среднем интервале глубин есть отдельные участки на этом скоростном графике, где интерпретатор «соскочил» на обменную волну от более мелкого отражающего гори-

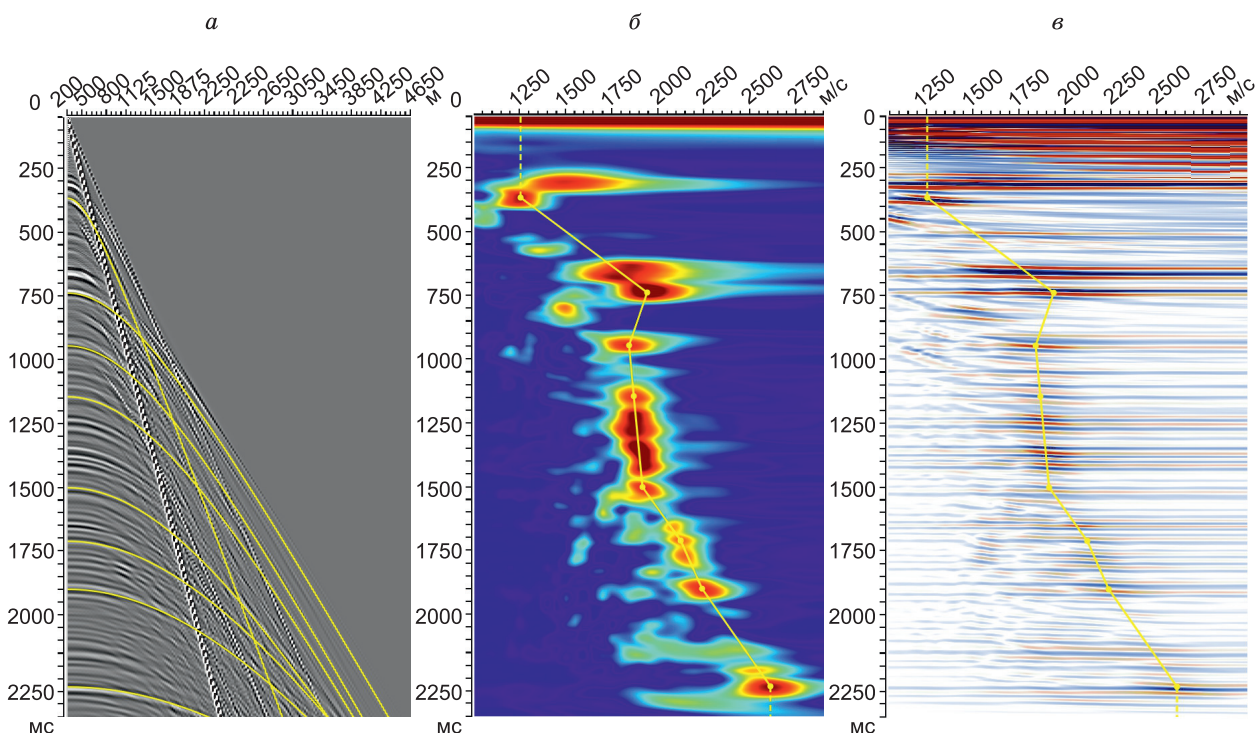


Рис. 5. Результаты предварительного кинематического анализа волнового поля, рассчитанного на поверхности в центре модели, изображенной на рис. 1:

а — сейсмограмма вертикальной скорости смещения v_z ; *б* — скоростной спектр, рассчитанный по ней; *в* — результаты перебора скоростей для суммирования.

зонта. Это означает, что на отчетном разрезе эта волна будет воспринята как однократная продольная, и дальнейшая интерпретация в этой части разреза пойдет по ложному пути.

На практике так нередко и происходит, особенно в сложных сейсмогеологических условиях.

Данное полноволновое моделирование с последующим тестированием и подбором корректных процедур обработки позволит изучить и устранить такие эффекты, которые в каждом районе исследований могут быть различными. В свою очередь, такая работа поможет устранить элементы ложной геологической интерпретации сейсмических временных разрезов, а значит сэкономить значительные средства на последующее поисковое, разведочное и эксплуатационное бурение.

Это лишь одно из возможных многочисленных практических приложений. В более общем случае такое полноволновое моделирование, в отличие от упрощенных распространенных методов, поможет определить, каковы реальные возможности сейсмической обработки и интерпретации при решении региональных и детальных геологических задач. Это актуально и для сравнительно новых методов полноволновой инверсии [Silvestrov et al., 2013; Tcheverda, Gadylshin, 2021], информативность которых может быть исследована на таких моделях.

ВЫВОДЫ

До настоящего времени основные виды прикладного моделирования в сейсмике осуществляются упрощенным лучевым методом, причем, как правило, для монотипных волн. Волновое моделирование применяется крайне редко и в основном для простых однородно-слоистых моделей сред с большими толщинами слоев [Ampilov, 2010]. Такие модели не могут адекватно отражать свойства реальной геологической среды.

В данной работе впервые осуществлено полноволновое моделирование методом спектральных элементов для детальной модели, содержащей около 6 млн ячеек и 1 млрд расчетных МСЭ узлов. Причем рассчитаны как поверхностные волны Рэлея, так и полный набор объемных отраженных, преломленных и рефрагированных волн, продольных, поперечных и обменных. Учитываются всевозможные факты дифракции и многократных отражений — словом, все то, что происходит в реальной среде.

Такое полноценное волновое моделирование весьма важно для исследования возможностей современных методов обработки и интерпретации данных сейсморазведки [Ampilov et al., 2019], которые

исходят из упрощенных предположений о строении среды. Мы допускаем, что предстоит широкое внедрение данной технологии в повседневную практику сейсморазведочных работ.

Область применения данного моделирования может включать широкий круг прикладных задач, в том числе:

- создание эталонных моделей среды для основных нефтегазоносных регионов России с целью детального исследования закономерностей формирования волновой картины;
- исследования реальных возможностей современных методов обработки и интерпретации данных сейсморазведки;
- использование полноволновых моделей заказчиками сейсмической обработки (в режиме «скрытых» исходных данных) для объективной технической преквалификации исполнителей в рамках тендеров;
- моделирование 4D сейсмического сигнала для разрабатываемых месторождений углеводородов, подземных хранилищ газа и потенциальных резервуаров для захоронения CO₂.

Исследования были проведены в Институте физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН за счет средств гранта Российского научного фонда (проект № 19-77-10062) в части разработки математической модели и проведения численного моделирования и в Московском государственном университете им. М.В. Ломоносова при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (соглашение о предоставлении грантов № 075-15-2022-1106) в части разработки методов численной дискретизации и распараллеливания на гибридных высокопроизводительных вычислительных системах на основе технологии CUDA.

ЛИТЕРАТУРА

Аки К., Ричардс П. Количественная сейсмология. Теория и методы. Т. 1. Пер. с англ. М., Мир, 1983, 520 с.

Ампилов Ю.П. Поглощение и рассеяние сейсмических волн в неоднородных средах. М., Недра, 1992, 160 с.

Ильюшин А.А., Победря Б.Е. Основы математической теории термовязкоупругости. М., Наука, 1970, 280 с.

Костин В.И., Лисица В.В., Решетова Г.В., Чеверда В.А. Конечно-разностный метод численного моделирования распространения сейсмических волн в трехмерно-неоднородных разномасштабных средах // Вычислительные методы и программирование, 2011, т. 12, с. 321—329.

Костин В.И., Лисица В.В., Решетова Г.В., Чеверда В.А. Локальное пространственно-временное измельчение сеток для конечно-разностного моделирования упругих волн в трехмерно-неоднородных разномасштабных средах // Сибирский журнал вычислительной математики, 2013, т. 16, № 1, с. 45—55.

Левин В.А., Вершинин А.В. Численные методы. Параллельные вычисления на ЭВМ Т. 2. Нелинейная вычислительная механика прочности. М., ФИЗМАТЛИТ, 2015, 544 с.

Лисица В.В., Чеверда В.А. Комбинирование разрывного метода Галеркина и метода конечных разностей для учета сложного строения верхней части разреза при численном моделировании сейсмических полей // Технологии сейсморазведки, 2014, № 4, с. 60—67.

Марчук Г.И., Агошков В.И. Введение в проекционно-сеточные методы. М., Наука, 1981, 416 с.

Сабинин Г.В., Мокин А.К., Вершинин А.В., Чичинина Т.И. Полноволновое моделирование в средах с мезоскопическими трещинами безматричным методом конечных элементов на графических процессорах // Физическая мезомеханика материалов. Физические принципы формирования многоуровневой структуры и механизмы нелинейного поведения. Тезисы докладов Международной конференции, 5—8 сентября 2022 г. Томск, Россия. Новосибирск, ИПЦ НГУ, 2022, с. 359—360.

Седов Л.И. Механика сплошной среды. Т. 2. М., Наука, 1994, 560 с.

Ampilov Yu.P. From seismic interpretation to modelling and assessment of oil and gas fields. European Association of Geoscientists and Engineers, Houten, Netherlands, 2010, p. 1—274.

Ampilov Yu.P., Terekhina Ya.E., Tokarev M.Yu. Applied aspects of different frequency bands of seismic and water acoustic investigations on the shelf // Izv. Atmos. Oceanic Phys., 2019, v. 55, p. 705—720, doi: 10.1134/S0001433819070028.

Carcione J.M., Kosloff D., Behle A., Seriani G. A spectral scheme for wave propagation simulation in 3-D elastic-anisotropic media // Geophysics, 1992, v. 57 (12), p. 1593—1607.

Charara M., Vershinin A., Deger E., Sabitov D., Pekar G. 3D spectral element method simulation of sonic logging in anisotropic viscoelastic media // SEG. Expanded Abstracts 30, 2011a, p. 432—437.

Charara M., Vershinin A., Sabitov D., Pekar G. SEM wave propagation in complex media with tetrahedral to hexahedral mesh // 73rd European Association of Geoscientists and Engineers Conference and Exhibition. Vienna, 2011b, p. 41—45.

Kirk D., Hwu Wen-mei. CUDA textbook. NVIDIA, UIUC, 2008, 280 p.

Komatitsch D., Tromp J. Introduction to the spectral element method for three-dimensional seismic wave propagation // *Geophys. J. Int.*, 1999, v. 139, p. 806—822.

Komatitsch D., Barnes C., Tromp J. Wave propagation near a fluid-solid interface: a spectral-element approach // *Geophysics*, 2000, v. 65 (2), p. 623—631.

Konovalov D., Vershinin A., Zingerman K., Levin V. The implementation of spectral element method in a CAE system for the solution of elasticity problems on hybrid curvilinear meshes // *Modell. Simul. Eng.*, 2017, v. 2017, 1797561, p. 1—7.

Silvestrov I., Neklyudov D., Kostov C., Tcheverda V. Full-waveform inversion for macro velocity model reconstruction in look-ahead offset vertical seismic profile: Numerical singular value decomposition-based analysis // *Geophys. Prospect.*, 2013, v. 61 (6), p. 1099—1113.

Tcheverda V., Gadyshin K. Elastic full-waveform inversion using migration-based depth reflector representation in the data domain // *Geosciences (Switzerland)*, 2021, v. 11 (2), p. 1—15.

Zienkiewicz O.C., Taylor R.L. The finite element method. The basis, v. 1. 2000a, 707 p.

Zienkiewicz O.C., Taylor R.L. The finite element method. Solid mechanics, v. 2. 2000b, 479 p.