

УДК 550.832, 519.6

ИМПУЛЬСНОЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ БАЖЕНОВСКОЙ СВИТЫ: ВЫСОКОПРОИЗВОДИТЕЛЬНЫЕ ВЫЧИСЛЕНИЯ ДЛЯ ОБОСНОВАНИЯ НОВОЙ ГЕОФИЗИЧЕСКОЙ ТЕХНОЛОГИИ

М.И. Эпов, О.В. Нечаев, В.Н. Глинских, К.Н. Даниловский

*¹Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН
630090, Новосибирск, просп. Академика Коптюга, 3, Россия*

Работа посвящена теоретическому обоснованию новой технологии импульсного электромагнитного зондирования для изучения нетрадиционных залежей углеводородов. Разрабатывается математическая модель, описывающая процесс зондирования с помощью импульсного источника возбуждения электромагнитного поля, для дискретизации по времени которой используется преобразование Фурье, а по пространственным координатам — векторный метод конечных элементов. Для повышения быстродействия рассматривается способ организации параллельных вычислений, учитывающий особенности построенной дискретной модели трехмерной задачи. С использованием ресурсов Сибирского суперкомпьютерного центра СО РАН на вычислительных узлах KNL и Broadwell проводятся расчеты электромагнитных сигналов, которые показывают высокую эффективность разработанной вычислительной схемы и производительность реализованного алгоритма. Результатами компьютерного моделирования обосновывается новая геофизическая технология изучения сложнопостроенных геологических сред.

Электромагнитное зондирование, метод переходных процессов, прямая трехмерная задача, вычислительный алгоритм, геоэлектрическая модель, баженовская свита

PULSED ELECTROMAGNETIC SOUNDING OF THE BAZHENOV FORMATION: HIGH-PERFORMANCE COMPUTING TO JUSTIFY A NEW GEOPHYSICAL TECHNOLOGY

M.I. Epov, O.V. Nechaev, V.N. Glinskikh, K.N. Danilovskiy

The work is concerned with the theoretical substantiation of a new geophysical technology for studying a unique geologic object with unconventional hard-to-recover hydrocarbon reserves. The technology is based on transient electromagnetic sounding from a spatially distributed system of highly deviated wells drilled in target objects near the Bazhenov Formation. The results of computer modeling predetermine a new direction for the geological exploration of unconventional hydrocarbon deposits. We consider a numerical solution to the 3D direct problem of pulsed electromagnetic sounding and, on its basis, develop a computational scheme and a computer program. A mathematical model is constructed, which describes the sensing process through a pulsed source for electromagnetic-field excitation. The Fourier transform is used for time discretization, and the vector finite element method, for spatial discretization. This approach makes it possible to obtain many independent 3D problems and solve them in parallel by applying the modern multiprocessor technology. Using the KNL and Broadwell computing nodes of the Siberian Supercomputer Center SB RAS, we performed calculations of electromagnetic signals, which showed a high efficiency of the devised computing scheme and a high performance of the implemented algorithm. Despite the fact that the total peak performance of the KNL nodes is 2.5 times higher than that of the Broadwell nodes, their practical application for performing large-scale 3D modeling on the cluster shows a high efficiency of the latter. When choosing the most suitable computing architecture for the implementation of mass calculations, one should not rely on their formal characteristics only; significant performance is achieved when taking into account the peculiarities of the computational methods employed for solving a specific problem. The implemented more efficient ways of performing parallel matrix-vector operations did not significantly increase the performance for this computational scheme. The created computational tools form the basis for further design of the configuration of a pulsed electromagnetic sounding system and for identifying the capabilities of the new geophysical technology for examining complex geologic media.

Electromagnetic sounding, transient method, direct 3D problem, computational algorithm, geoelectric model, Bazhenov Formation

ВВЕДЕНИЕ

В последние годы в отечественной практике получают развитие геофизические методы исследований в нефтегазовых скважинах (ГИС), что во многом обусловлено масштабной реализацией программ импортозамещения геофизического оборудования и программного обеспечения. Созданы высокоточ-

ные приборы для каротажа с полным комплексом геофизических методов на всех этапах строительства скважин как во время бурения, так и при каротаже на кабеле и бурильных трубах [Каюров и др., 2014; Эпов и др., 2015]. Произошел переход к численной инверсии данных ГИС в рамках реалистичных моделей, учитывающих не только пространственное распределение физических параметров, но и различные эффекты взаимодействия геофизических полей с геологической средой [Михайлов и др., 2017; Эпов и др., 2018]. Однако вовлечение нетрадиционных залежей углеводородов приводит к необходимости обоснования новых геофизических технологий каротажа и совершенствования способов интерпретации данных ГИС при изучении сложнопостроенных геологических объектов.

Огромный научно-технологический интерес вызывает уникальная нефтепроизводящая формация в Западно-Сибирской нефтегазоносной провинции — баженовская свита [Гурари, 1961]. Несмотря на то, что баженовская свита существенно отличается от вмещающих ее горных пород по физическим характеристикам, она является труднодиагностируемой с применением существующих технологий ГИС. Как показывают результаты последних научных исследований, ее изучению в комплексе с другими методами ГИС способствуют электромагнитные зондирования [Эпов и др., 2019; Глинских, Федосеев, 2019]. Геоэлектрические особенности отложений баженовской свиты создают благоприятные условия для метода высокочастотного электромагнитного и диэлектрического каротажей, поскольку на измеряемые сигналы, наряду с диффузионными, значительное влияние оказывают волновые процессы.

Представленные в статье результаты исследований связаны с созданием новой технологии каротажного зондирования и возможностью пространственной локализации отложений баженовской свиты с использованием системы вертикальных, наклонных и горизонтальных скважин. Объект исследования слабо изучен, геологические разрезы этих отложений вскрыты только вертикальными скважинами, за редким исключением горизонтальными. Наша идея заключается в том, что изучение баженовской свиты становится возможным из субгоризонтальных скважин, пробуренных на нижележащие целевые объекты, находящиеся на расстоянии нескольких десятков метров от нее. Поэтому повсеместное наклонно направленное бурение скважин, ориентированное на другие нижепогруженные объекты, обеспечивает уникальную возможность прослеживания изменения толщи баженовской свиты, выявления латеральных неоднородностей и их пространственной локализации. Основная решаемая задача данной работы состоит в теоретическом обосновании результатами компьютерного моделирования новой технологии каротажа на основе электромагнитного зондирования методом переходных процессов (МПП) с произвольным токовым импульсом.

На данном этапе исследований необходимо получить численное решение трехмерной прямой задачи импульсных электромагнитных зондирований баженовской свиты с пространственно-распределенной системой наклонно-горизонтальных скважин и на его основе разработать вычислительную схему и реализовать компьютерную программу. Предлагается оригинальный подход к разработке математической модели, описывающей процесс зондирования МПП с произвольным токовым импульсом, основанный на векторном методе конечных элементов (МКЭ) в сочетании с преобразованием Фурье [Mulder et al., 2008]. Суть состоит в том, что с использованием прямого преобразования Фурье по времени осуществляется переход исходной задачи из временной области в частотную, последующее решение которой выполняется с помощью векторного МКЭ. В этом случае существенно упрощается анализ формы токового импульса, что обусловлено фундаментальным решением задачи по времени и его свертки с конкретным видом возбуждающего импульса, без решения множества трехмерных задач. Тем более, что такой подход позволяет получить множество независимых друг от друга трехмерных задач, которые могут быть эффективно решены параллельно с использованием современной многопроцессорной техники, включая графические ускорители [Glinskikh et al., 2017]. Необходимо отметить, что наиболее близкие к тематике исследования результаты, связанные со сравнительным анализом двух подходов вычисления импульсных электромагнитных зондирований в околоскважинном пространстве нефтегазовых коллекторов, представлены в [Эпов и др., 2011]. Другие геофизические приложения для нефтегазовой отрасли, основанные на численных решениях прямых задач, рассмотрены в [Мариненко и др., 2019].

МКЭ хорошо зарекомендовал себя при решении различных задач геоэлектродинамики и широко нами применяется для моделирования электромагнитных процессов в сложной по электрофизическим параметрам и геометрическому строению трехмерной области [Эпов и др., 2007], к которым относится и баженовская свита. С помощью МКЭ дискретизация по пространству осуществляется с использованием векторных базисных функций [Bossavit, 1998; Monk, 2003; Hiptmair, 2007], что обеспечивает выполнение как законов сохранения, так и непрерывность соответствующих компонент электромагнитного поля на границах раздела сред. Иерархические базисы высоких порядков [Webb, 1999] позволяют для решения систем линейных алгебраических уравнений (СЛАУ) применять многоуровневые методы [Nechaev et al., 2008; Aghabarati, Webb, 2013], обладающие большой вычислительной эффективностью.

Широкое использование таких вычислительных алгоритмов делает возможным не только анализ электромагнитных сигналов в геоэлектрических моделях изучаемых сред, но и в дальнейшем выбор оптимальных параметров зондирующей установки, а также учет конструктивных особенностей прибора при его проектировании.

Безусловно, численные решения задач электродинамики в полных математических постановках оказываются чрезвычайно ресурсоемкими. Для повышения их быстродействия требуется реализация параллельных вычислительных схем для расчетов на многопроцессорных компьютерных системах. Известно много работ, посвященных эффективному решению задач прикладной геофизики, в том числе промысловой, с применением кластеров, включая Сибирский суперкомпьютерный центр СО РАН (ССКЦ СО РАН) [Костин и др., 2008; Эпов и др., 2013; Глинский и др., 2015; Puzyrev et al., 2016]. В рамках данной работы используются современные вычислительные узлы Broadwell кластера НКС-1П на базе ССКЦ СО РАН как основы масштабного численного моделирования.

Для разработки параллельной вычислительной схемы преобразование Фурье по времени является одним из оптимальных решений с учетом особенностей вычислительных ресурсов ССКЦ СО РАН и предоставляемого машинного времени. Поскольку для выполнения оперативного моделирования необходимо решать множество независимых и ресурсоемких трехмерных задач, решения которых учитываются вместе только при выполнении обратного преобразования Фурье. Последнее является относительно малозатратной процедурой по сравнению с трехмерным моделированием на отдельной частоте, и такая операция осуществляется один раз. Предложенный подход дает существенное преимущество по сравнению с распараллеливанием матрично-векторных операций. Исходя из этого, в данной работе в качестве способа формирования набора параллельно решаемых задач выбран более высокоуровневый способ в отличие от распараллеливания операций линейной алгебры. Перейдем к изложению сути рассматриваемой задачи, описанию методов ее решения и полученных результатов.

ПОСТАНОВКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ ЗАДАЧИ И ЕЕ РЕШЕНИЕ

Для получения математической модели, описывающей процесс зондирования с использованием импульсного источника возбуждения электромагнитного поля в сложной по физическому и геометрическому строению трехмерной области, воспользуемся системой уравнений Максвелла. В качестве границы расчетной области Ω будем использовать поверхность $\partial\Omega$, удаленную от источника настолько, что можем полагать значения искомых полей на ней равными нулю. Поскольку источник электромагнитного поля будет возбуждаться токовым импульсом, начальные значения полей примем нулевыми. Воспользовавшись уравнениями состояния, исключим из системы уравнений Максвелла векторы электрической и магнитной индукции, в результате получим следующую математическую модель (1)—(8):

$$\operatorname{rot} \mathbf{E} = -\mu_0 \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t}, \quad (1)$$

$$\operatorname{rot} \mathbf{H} = \varepsilon_0 \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} + \sigma \mathbf{E} + \mathbf{J}_0, \quad (2)$$

$$\operatorname{div} \varepsilon_0 \mathbf{E} = \rho, \quad (3)$$

$$\operatorname{div} \mu_0 \mathbf{H} = 0, \quad (4)$$

$$\mathbf{E}|_{t=t_0} = 0, \quad (5)$$

$$\mathbf{H}|_{t=t_0} = 0, \quad (6)$$

$$\mathbf{E} \times \mathbf{n}|_{\partial\Omega} = 0, \quad (7)$$

$$\mathbf{H} \times \mathbf{n}|_{\partial\Omega} = 0, \quad (8)$$

где $\mathbf{E}$ — напряженность электрического поля, $\mathbf{H}$ — напряженность магнитного поля, $\mathbf{J}_0$ — плотность стороннего электрического тока, σ — тензор удельной электропроводности, ρ — объемная плотность электрических зарядов, ε_0 — диэлектрическая и μ_0 — магнитная проницаемости.

Используя прямое преобразование Фурье по времени

$$f(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) e^{-i\omega t} dt,$$

перейдем из временной области в частотную. Математическая модель (1)—(8) примет следующий вид:

$$\operatorname{rot} \mathbf{E} = i\omega\mu_0 \mathbf{H}, \quad (9)$$

$$\operatorname{rot} \mathbf{H} = -i\omega\varepsilon_0 \mathbf{E} + \sigma \mathbf{E} + \mathbf{J}_0, \quad (10)$$

$$\operatorname{div} \varepsilon_0 \mathbf{E} = \rho, \quad (11)$$

$$\operatorname{div} \mu_0 \mathbf{H} = 0, \quad (12)$$

$$\mathbf{E} \times \mathbf{n}|_{\partial\Omega} = 0, \quad (13)$$

$$\mathbf{H} \times \mathbf{n}|_{\partial\Omega} = 0. \quad (14)$$

Поскольку необходимо знать значения электромагнитных полей в нескольких точках X_k ($k=1, \dots, n$) измерений, будем для каждой точки строить интерполянт $I_k(\omega)$, основанный на некотором наборе решений задачи (9)—(14) для различных частот $\omega = \omega_j$ ($j=1, \dots, m$). Применяя обратное преобразование Фурье по частоте

$$f(t) = \frac{1}{\pi} \operatorname{Re} \left(\int_0^\infty f(\omega) e^{i\omega t} d\omega \right)$$

к интерполянту $I_k(\omega)$, получим искомые компоненты электромагнитных полей в момент времени t в точке измерения X_i [Mulder et al., 2008].

Исключая из уравнений (9)—(14) напряженность магнитного поля, получим следующую краевую задачу

$$\operatorname{rot} \frac{1}{\mu_0} \operatorname{rot} \mathbf{E} + k^2 \mathbf{E} = -i\omega \mathbf{J}_0, \quad (15)$$

$$\mathbf{E} \times \mathbf{n}|_{\partial\Omega} = 0, \quad (16)$$

где $k^2 = i\omega\sigma - \omega^2\varepsilon_0$ — квадрат волнового числа.

Для решения результирующей задачи воспользуемся векторным методом конечных элементов [Bossavit, 1998; Monk, 2003]. Пусть Ω — трехмерная, возможно, неоднородная по физическим свойствам область с липщиц непрерывной границей $\partial\Omega$. Введем функциональные пространства [Nedelec, 1980, 1986]

$$\mathbf{H}(\operatorname{rot}; \Omega) = \left\{ \mathbf{v} \in [L^2(\Omega)]^3 : \operatorname{rot} \mathbf{v} \in [L^2(\Omega)]^3 \right\},$$

$$\mathbf{H}_0(\operatorname{rot}; \Omega) = \left\{ \mathbf{v} \in \mathbf{H}[\operatorname{rot}; \Omega] : \mathbf{v} \times \mathbf{n}|_{\partial\Omega} = 0 \right\},$$

с нормой

$$\|\mathbf{u}\|_{\operatorname{rot}, \Omega}^2 = \int_{\Omega} \mathbf{u} \cdot \mathbf{u}^* d\Omega + \int_{\Omega} \operatorname{rot} \mathbf{u} \cdot \operatorname{rot} \mathbf{u}^* d\Omega.$$

Определим скалярное произведение

$$(\mathbf{u}, \mathbf{v}) = \int_{\Omega} \mathbf{u} \cdot \mathbf{v}^* d\Omega.$$

Для задачи (15), (16) сформулируем следующую вариационную постановку [Hiptmair, 2002]. Для $\mathbf{J}_0 \in L^2(\Omega)$ найти $\mathbf{E} \in \mathbf{H}_0(\operatorname{rot}; \Omega)$ такое, что для $\forall \mathbf{v} \in \mathbf{H}_0(\operatorname{rot}; \Omega)$

$$\left(\frac{1}{\mu_0} \operatorname{rot} \mathbf{E}, \operatorname{rot} \mathbf{v} \right) + (k^2 \mathbf{E}, \mathbf{v}) = -i(\omega \mathbf{J}_0, \mathbf{v}). \quad (17)$$

Для построения дискретного аналога вариационной задачи будем аппроксимировать элементы пространства $\mathbf{H}(\operatorname{rot}; \Omega)$ элементами дискретного подпространства $\mathbf{H}^h(\operatorname{rot}; \Omega)$, в качестве базисных функций которого возьмем векторные элементы третьего порядка на тетраэдральной сетке [Webb, 1999].

Для улучшения спектральных свойств матриц, получаемых после дискретизации исходной задачи, можно ортогонализировать базисные функции. Полная ортогонализация привела бы к резкому увеличению количества ненулевых элементов матрицы. В работе [Webb, 1999] предлагается проводить частичную ортогонализацию, т. е. разбить базисные функции на множество групп, а затем выполнить ортогонализацию внутри каждой группы.

Векторные базисные функции высоких порядков могут быть ассоциированы с ребром, гранью или с самим тетраэдром. Это зависит от того, как определяется степень свободы конкретной базисной функции: интегралом вдоль ребра, интегралом по грани или интегралом по всему геометрическому элементу соответственно. Поскольку одно ребро, грань или элемент для базисов высоких порядков ассоциированы с несколькими функциями, будем использовать это свойство в качестве разделителя на группы. Определение групп ортогонализации подобным образом не приводит к увеличению количества ненулевых элементов матрицы, а также к изменению ее портрета.

В [Webb, 1999] для ортогонализации используется стандартное скалярное произведение, в данной работе базисные функции внутри одной группы ортогонализуются относительно билинейной формы, которая применяется для построения вариационной постановки.

Введем дискретный аналог вариационной задачи.

Для $\mathbf{J} \in L^2(\Omega)$ найти $\mathbf{E}^h \in H_0^h(\text{rot}; \Omega)$, такое что $\forall \mathbf{v}^h \in H_0^h(\text{rot}; \Omega)$ выполняется

$$\left(\frac{1}{\mu_0} \text{rot} \mathbf{E}^h, \text{rot} \mathbf{v}^h \right) + (k^2 \mathbf{E}^h, \mathbf{v}^h) = -i(\omega \mathbf{J}, \mathbf{v}^h).$$

Раскладывая векторы напряженности электрического поля $\mathbf{E}^h$ по базису дискретного подпространства $H_0^h(\text{rot}; \Omega)$ и выбирая в качестве функции $\mathbf{v}^h$ базисные функции $\mathbf{w}_m^h$, от дискретной вариационной задачи перейдем к эквивалентной СЛАУ:

$$[(\mathbf{D} + \mathbf{B}) + i\mathbf{C}]\mathbf{E} = \mathbf{f}, \quad (18)$$

где $\mathbf{E}$ — это вектор весов в разложении по базису $\mathbf{E}^h$, а элементы матриц $\mathbf{A}$, $\mathbf{B}$, $\mathbf{C}$ и вектора правой части $\mathbf{f}$ определяются соотношениями

$$[\mathbf{D}]_{i,j} = \left(\frac{1}{\mu_0} \text{rot} \mathbf{w}_i^h, \text{rot} \mathbf{w}_j^h \right),$$

$$[\mathbf{B}]_{i,j} = -(\varepsilon \omega^2 \mathbf{w}_i^h, \mathbf{w}_j^h),$$

$$[\mathbf{C}]_{i,j} = (\sigma \omega \mathbf{w}_i^h, \mathbf{w}_j^h),$$

$$[\mathbf{f}]_i = (\omega \mathbf{J}, \mathbf{w}_i^h),$$

где $\mathbf{w}_i^h$ — базисные функции пространства $H^h(\text{rot}; \Omega)$.

Для решения СЛАУ (18) используем многоуровневый алгоритм [Nechaev et al., 2008].

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ

Численное моделирование сигналов импульсных электромагнитных зондирований направлено на установление возможности картирования границ баженовской свиты и расчленения ее по вертикали с целью определения возможного местоположения пластов-коллекторов.

Рассматривается геоэлектрическая модель среды (рис. 1), в которой наклонно направленная скважина пересекает отложения баженовской свиты. Модель баженовской свиты представлена высокоомным (1000 Ом·м) пластом мощностью 30 м, расположенным в более проводящих (10 Ом·м) породах. Скважина имеет горизонтальное завершение в коллекторе (30 Ом·м), находящемся ниже баженовской свиты. Зенитный угол скважины меняется от 50 до 89°, а расстояние вдоль ствола скважины — от 0 до 300 м.

В рассматриваемой реалистичной модели рассчитываются сигналы импульсных зондирований с использованием разработанного алгоритма трехмерного численного моделирования для всех компонент электромагнитного поля. Длина двухкатушечного зонда (расстояние между генераторной и приемной катушками) варьируется от 1 до 25 м, а момент зонда равен 100 А·м⁴. На рисунке 2 приводятся рассчитанные ЭДС для диагональной схемы измерения (zz — оси генераторной и измерительной катушек соосны и направлены вдоль оси скважины) и перекрестной схемы измерения (xz — ось генератор-

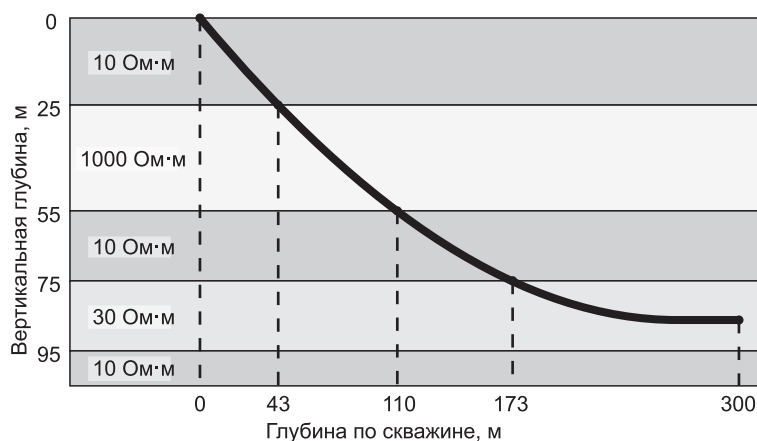


Рис. 1. Геоэлектрическая модель среды при пересечении наклонно-направленной скважины с горизонтальным завершением отложенной баженовской свиты.

ной катушки направлена вдоль оси скважины, ось измерительной катушки ортогональна оси генераторной катушки) в зависимости от времени и от положения зонда в скважине (координатой зонда является его центр).

Анализ результатов трехмерного численного моделирования показывает,

что в зависимости от времени t сигналы сначала возрастают до максимального значения, а затем убывают с возможными переходами через ноль, причем на поздних временах существует степенная зависимость $t^{-5/2}$ [Кауфман, Морозова, 1970]. По сигналам диагональных компонент (см. рис. 2, а) видно, что в непроницающей баженовской свите максимум сигнала смещен в область более ранних времен по сравнению с проводящими вмещающими породами, в связи с чем ее границы хорошо выделяются на ранних и средних временах (0.1—10 мкс). Это определяет хорошую чувствительность сигналов к границам. Для перекрестных компонент (см. рис. 2, б) границы баженовской свиты отчетливо проявляются по характерным максимумам ЭДС на ранних и средних временах. При удалении от границ сигналы перекрестных компонент уменьшаются в однородной среде, где отсутствует чувствительность к удаленным границам и равны нулю.

Анализ результатов выполненных расчетов показал, что в целом наблюдается хорошая дифференциация сигналов в зависимости от расположения зонда относительно границ пластов, что означает наличие значительной чувствительности электромагнитных сигналов к изучаемым границам баженовской свиты.

ПАРАЛЛЕЛЬНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ И ВЫСОКОПРОИЗВОДИТЕЛЬНЫЕ ВЫЧИСЛЕНИЯ

Для трехмерного моделирования процесса зондирования при помощи импульсных источников тока используется преобразование Фурье по времени. Изначально необходимо решить множество независимых и трудоемких трехмерных задач, решения которых учитываются вместе только при осуществлении обратного преобразования Фурье. Такой подход предоставляет возможность выполнить параллелизацию естественным образом, решая каждую частотную задачу в отдельном вычислительном потоке.

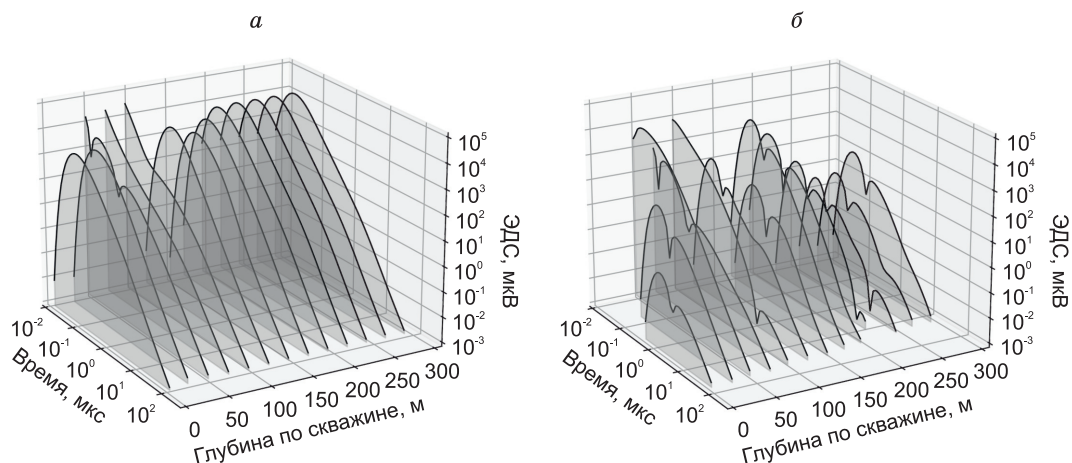


Рис. 2. ЭДС импульсных зондирований в модели баженовской свиты в зависимости от времени и от положения зонда:

а — схема измерения zz , б — схема измерения xz .

Предложенный подход показывает существенное преимущество по сравнению с распараллеливанием матрично-векторного умножения (данная операция является самой трудоемкой в процессе решения), поскольку в этом случае связь между различными вычислительными потоками необходимо осуществлять как минимум один раз за итерацию алгоритма решения СЛАУ. Кроме того, в этом случае становится существенным время передачи больших объемов данных между различными вычислительными блоками. Однако в случае, когда решение одной частотной задачи требует достаточно большого объема оперативной памяти, в зависимости от характеристик используемой вычислительной техники, может возникнуть ситуация, когда вся доступная память уже задействована, но существуют незадействованные вычислительные ядра. В таком случае для более полного использования имеющихся вычислительных ресурсов становится актуальным применять параллельные алгоритмы уже к процедуре матрично-векторного умножения. Классическим способом распараллеливания процедуры умножения большой разреженной матрицы на вектор является выделение в матрице блочной структуры и выполнение множества умножений матричных блоков на векторные блоки параллельно, а затем производить сборку окончательного результата умножения из векторных блоков последовательно.

В данной работе разбивка исходной матрицы на блоки основана на структуре векторных базисных функций высоких порядков, используемых для построения дискретного аналога решаемого дифференциального уравнения. Вначале выделяются те же группы базисных функций, что используются для частичной ортогонализации базиса дискретного пространства, а именно группы, основанные на определении степеней свободы базисных функций.

Каждую из этих групп можно разбить еще на две подгруппы: подгруппу базисных функций, являющихся градиентами скалярных функций, и подгруппу базисных функций, которые нельзя выразить через градиент скалярной функции. Таким образом, имеется 6 групп базисных функций, позволяющих разбить матрицу на 36 матричных блоков. Такая разбивка существует всегда и не зависит от используемой расчетной сетки, что делает эффект от распараллеливания более стабильным и предсказуемым по сравнению с формированием матричных блоков при помощи алгоритмов декомпозиции расчетной сетки на подобласти. Процедура распараллеливания матричного умножения является вспомогательной относительно распараллеливания по частотам, при этом общее число задействованных вычислительных потоков равно произведению количества частотных задач, решаемых одновременно, на количество потоков, используемых для матрично-векторного умножения.

Тестирование параллельного алгоритма моделирования процесса зондирования при помощи импульсных источников тока проводится на суперкомпьютерном кластере НКС-1П. Кластер запущен в эксплуатацию в 2017 г. в Центре коллективного пользования Сибирский суперкомпьютерный центр СО РАН (ЦКП ССКЦ СО РАН) и характеризуется производительностью 71.9 Тфлоп/с. Кластер состоит из набора вычислительных узлов двух типов, разделенных по очередям задач: Broadwell и KNL (таблица).

Анализ производительности алгоритма проводится для двух типов узлов кластера, при этом варьируется как число частот, на которых параллельно проводится моделирование сигналов зондирующей установки, а также число вычислительных потоков, где решается задача для конкретной частоты (рис. 3).

В силу ограниченного объема оперативной памяти и большого количества вычислительных потоков на узлах KNL невозможно задействовать все потоки при распараллеливании алгоритма по частотным задачам. Целесообразным становится как распараллеливание по частотным задачам, так и в распараллеливание операций матричного умножения в рамках отдельных задач. Наилучшей производительности при использовании узлов KNL удастся достичь, когда задействованы все 288 аппаратных потоков, при этом решение задачи происходит параллельно для 48 частот, а операции матричного умножения выполняются на 8 потоках. В таком случае полное время решения задачи составляет около 2 ч.

При использовании узлов Broadwell доступно меньшее количество вычислительных потоков, которые характеризуются более высокой производительностью. Большой объем оперативной памяти позволяет провести решение каждой частотной задачи в отдельном вычислительном потоке, тем самым достигнув максимальной производительности. В таком случае минимальное время решения задачи со-

Параметры вычислительных узлов KNL и Broadwell суперкомпьютерного кластера НКС-1П

Параметр	Broadwell	KNL
Центральный процессор	2 x Intel Xeon E5-2697v4 (2.6 ГГц, 16 ядер x 2 потока)	1 x Intel Xeon Phi 7290 (1.5 ГГц, 72 ядра x 4 потока)
Число аппаратных потоков	32	288
Оперативная память	128 Гб	96 Гб
Пиковая производительность	1331.2 Гфлоп/с	3456.0 Гфлоп/с

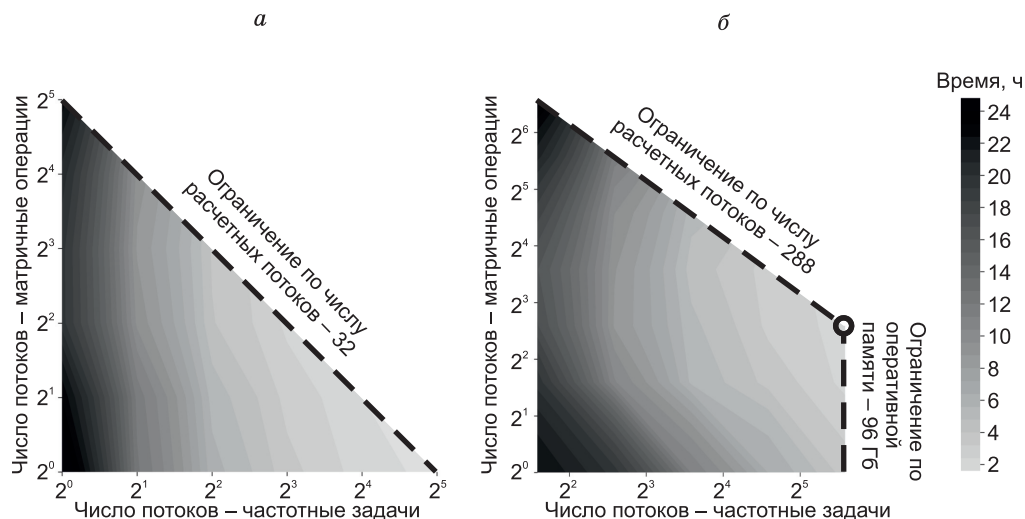


Рис. 3. Результаты анализа производительности алгоритма моделирования процесса электромагнитного зондирования при помощи импульсных источников тока:

a — на узлах Broadwell, *б* — на узлах KNL.

ставляет около 1.5 ч, при этом задействуются все 32 аппаратных потока для распараллеливания по частотам, а матрично-векторное умножение выполняется на одном вычислительном потоке.

Кроме того, результаты анализа быстродействия алгоритма показывают, что для обоих типов узлов оптимально, если есть такая возможность использовать 8 потоков при распараллеливании операций матрично-векторного умножения. По-видимому, с увеличением количества потоков возрастает время, необходимое для синхронизации данных между потоками, при этом для решения одной задачи подобную синхронизацию необходимо проводить множество раз. Кроме того, нужно учитывать, что блоки, на которые разбивается матрица имеют различный размер, что также замедляет синхронизацию. В случае распараллеливания по частотам такую ресурсоемкую синхронизацию проводить не нужно, поэтому время решения задачи монотонно убывает с увеличением количества используемых потоков.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

С помощью компьютерного моделирования выполнено теоретическое обоснование новой геофизической технологии для изучения уникального геологического объекта — баженовской свиты, являющейся нефтепроизводящей толщей в Западной Сибири и содержащей нетрадиционные залежи углеводородов с трудноизвлекаемыми запасами. Предложенная технология основана на электромагнитном зондировании методом переходных процессов с использованием пространственно-распределенной системы наклонно-горизонтальных скважин, пробуренных в целевых объектах вблизи баженовской свиты. Результаты выполненного исследования определяют новое направление геологоразведки нетрадиционных залежей углеводородов и демонстрируют уникальную возможность дистанционного выявления и пространственной локализации нефтеперспективных зон баженовской свиты.

Получено численное решение трехмерной прямой задачи импульсного электромагнитного зондирования, на его основе разработана вычислительная схема и реализована компьютерная программа. Предложен оригинальный подход к разработке математической модели, описывающей процесс зондирования с применением импульсного источника возбуждения электромагнитного поля, основанный на векторном методе конечных элементов в сочетании с преобразованием Фурье. С использованием прямого преобразования Фурье по времени осуществляется переход исходной задачи из временной области в частотную, последующее решение которой выполняется с помощью векторного метода конечных элементов. Такой подход позволяет получать множество независимых друг от друга трехмерных задач и эффективно их решать параллельно с помощью современной многопроцессорной техники. С использованием ресурсов Сибирского суперкомпьютерного центра СО РАН на вычислительных узлах KNL и Broadwell проведены расчеты электромагнитных сигналов, которые показали высокую эффективность разработанной вычислительной схемы и производительность реализованного алгоритма.

Несмотря на то, что общая пиковая производительность узлов KNL в 2.5 раза превышает производительность узлов Broadwell, опыт их практического использования для выполнения масштабного трехмерного моделирования на кластере показал высокую эффективность последних. При выборе наиболее подходящей вычислительной архитектуры для реализации массовых расчетов нельзя опираться только на их формальные характеристики, включая объем памяти и пр., значительное быстроедействие достигается с учетом особенностей вычислительных методов решения конкретной задачи. Реализованные более эффективные способы выполнения параллельных матрично-векторных операций не позволили существенно повысить быстроедействие для данной вычислительной схемы, что обусловлено используемым алгоритмом решения системы линейных алгебраических уравнений, в которых необходимо проводить синхронизацию вычислительных потоков и др.

Таким образом, разработанный алгоритм и его программная реализация являются одним из основных вычислительных инструментов для изучения возможностей новой геофизической технологии. Полученные результаты составляют основу для проектирования оптимальной конфигурации импульсной электромагнитной зондирующей установки с использованием пространственно-распределенной системы наклонно-горизонтальных скважин.

Исследование выполнено в рамках проекта РНФ 19-77-20130 «Фундаментальные основы импульсного электромагнитного зондирования с управляемым спектром: теоретическое обоснование инновационного геофизического метода геологоразведки с использованием высокопроизводительных вычислений на базе Сибирского суперкомпьютерного центра СО РАН».

ЛИТЕРАТУРА

Глинский Б.М., Костин В.И., Кучин Н.В., Соловьев С.А., Чеверда В.А. Организация параллельных вычислений для решения уравнения Гельмгольца прямым методом с использованием мало-ранговой аппроксимации и HSS-формата // *Вычислительные методы и программирование*, 2015, т. 16, вып. 4, с. 607—616.

Глинских В.Н., Федосеев А.А. Новый подход к литолого-электрофизической интерпретации данных электромагнитных зондирований в интервалах баженовской свиты // *Геология и минерально-сырьевые ресурсы Сибири*, 2019, № 4 (40), с. 80—88.

Гурари Ф.Г. О поисках нефти и газа в мезозое Западно-Сибирской низменности // *Труды СНИИГГМС*, 1961, вып. 17, с. 81—92.

Кауфман А.А., Морозова Г.М. Теоретические основы метода зондирования становлением поля в ближней зоне. Новосибирск, Наука, 1970, 123 с.

Каюров К.Н., Еремин В.Н., Эпов М.И., Глинских В.Н., Сухорукова К.В., Никитенко М.Н. Аппаратура и интерпретационная база электромагнитного каротажа в процессе бурения // *Нефтяное хозяйство*, 2014, № 12, с. 112—115.

Костин В.И., Решетова Г.В., Чеверда В.А. Численное моделирование трехмерного акустического каротажа с использованием многопроцессорных вычислительных систем // *Математическое моделирование*, 2008, т. 20, № 9, с. 51—67.

Мариненко А.В., Эпов М.И., Оленченко В.В. Решение прямых задач электротомографии для сред с высокопроводящими неоднородностями сложной формы на примере кустовой площадки месторождения // *Сибирский журнал индустриальной математики*, 2019, т. 22, № 1, с. 63—73.

Михайлов И.В., Глинских В.Н., Никитенко М.Н., Суродин И.В. Совместная численная инверсия данных индукционных и гальванических каротажных зондирований в моделях геологических сред с осевой симметрией // *Геология и геофизика*, 2017, т. 58 (6), с. 935—947.

Эпов М.И., Шурина Э.П., Нечаев О.В. Прямое трехмерное моделирование векторного поля для задач электромагнитного каротажа // *Геология и геофизика*, 2007, т. 48(9), с. 989—995.

Эпов М.И., Кабанихин С.И., Миронов В.Л., Музалевский К.В., Шишленин М.А. Сравнительный анализ двух методов расчета электромагнитных полей в прискважинном пространстве нефтегазовых коллекторов // *Сибирский журнал индустриальной математики*, 2011, т. 14, № 2, с. 132—138.

Эпов М.И., Шурина Э.П., Архипов Д.А. Параллельные конечно-элементные вычислительные схемы в задачах геоэлектрики // *Вычислительные технологии*, 2013, т. 18, № 2, с. 95—112.

Эпов М.И., Глинских В.Н., Сухорукова К.В., Никитенко М.Н., Еремин В.Н. Численное моделирование и инверсия данных электромагнитного каротажа в процессе бурения и шаблонирования нефтегазовых скважин // *Геология и геофизика*, 2015, т. 56 (8), с. 1520—1529.

Эпов М.И., Глинских В.Н., Еремин В.Н., Михайлов И.В., Никитенко М.Н., Осипов С.В., Петров А.Н., Суродин И.В., Яценко В.М. Новый электромагнитный зонд для высокоразрешающего ка-

ротажа: от теоретического обоснования до скважинных испытаний // Нефтяное хозяйство, 2018, № 11, с. 23—27.

Эпов М.И., Глинских В.Н., Петров А.М., Сухорукова К.В., Федосеев А.А., Нечаев О.В., Никитенко М.Н. Частотная дисперсия электрофизических характеристик и электрическая анизотропия пород баженовской свиты по данным электрокаротажа // Нефтяное хозяйство, 2019, № 9, с. 62—64.

Aghabarati A., Webb J.P. Multilevel methods for adaptive finite element analysis of electromagnetic scattering // IEEE Trans. Antennas Propag., 2013, v. 61 (11), p. 5597—5606.

Bossavit A. Computational electromagnetism. Variational formulations, complementarity, edge elements // San Diego, CA: Electromagnetism, Academic Press Inc., 1998, 324 p.

Glinskikh V., Dudaev A., Nechaev O. High-performance simulation of electrical logging data in petroleum reservoirs using graphics processors // Commun. Comput. Inf. Sci., 2017, v. 753, p. 186—200.

Hiptmair R. Finite elements in computational electromagnetism // Acta Numer., 2002, v. 11, p. 237—339.

Monk P. Finite element methods for Maxwell's equations. Oxford, Oxford University Press, 2003, 450 p.

Mulder W.A., Wirianto M., Slob E.C. Time-domain modeling of electromagnetic diffusion with a frequency-domain code // Geophysics, 2008, v. 73 (1), p. 1—8.

Nechaev O.V., Shurina E.P., Botchev M.A. Multilevel iterative solvers for the edge finite element solution of the 3D Maxwell equation // Comput. Math. Appl., 2008, v. 55, p. 2346—2362.

Nedelec J.C. Mixed finite elements in R_3 // Numer. Math., 1980, v. 35, p. 315—341.

Nedelec J.C. A new family of mixed finite elements in R_3 // Numer. Math., 1986, v. 50, p. 57—81.

Puzyrev V., Koric S., Wilkin S. Evaluation of parallel direct sparse linear solvers in electromagnetic geophysical problems // Comput. Geosci., 2016, v. 89, p. 79—87.

Webb J.P. Hierarchical vector basis functions of arbitrary order for triangular and tetrahedral finite elements // IEEE Trans. Antennas Propag., 1999, v. 47 (8), p. 1244—1253.