

УДК 550.341

## Локальное пространственно-временное измельчение сеток для конечно-разностного моделирования упругих волн в трёхмерно-неоднородных разномасштабных средах\*

В.И. Костин<sup>1</sup>, В.В. Лисица<sup>2</sup>, Г.В. Решетова<sup>3</sup>, В.А. Чеверда<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ЗАО "Intel A/O", просп. Акад. М.А. Лаврентьева, 6/1, Новосибирск, 630090

<sup>2</sup>Институт нефтегазовой геологии и геофизики Сибирского отделения Российской академии наук, просп. Акад. В.А. Коптюга, 3, Новосибирск, 630090

<sup>3</sup>Институт вычислительной математики и математической геофизики Сибирского отделения Российской академии наук, просп. Акад. М.А. Лаврентьева, 6, Новосибирск, 630090

E-mails: victor.i.kostin@intel.com (Костин В.И.), lisitsavv@ipgg.sbras.ru (Лисица В.В.), kgv@nmsf.sccc.ru (Решетова Г.В.), cheverdava@ipgg.sbras.ru (Чеверда В.А.)

**Костин В.И., Лисица В.В., Решетова Г.В., Чеверда В.А.** Локальное пространственно-временное измельчение сеток для конечно-разностного моделирования упругих волн в трёхмерно-неоднородных разномасштабных средах // Сиб. журн. вычисл. математики / РАН. Сиб. отд-ние. — Новосибирск, 2013. — Т. 16, № 1. — С. 45–55.

Для численного моделирования процессов распространения сейсмических волн в трёхмерно-неоднородных средах с разномасштабными неоднородностями разработан конечно-разностный метод, использующий сетки с локальным пространственно-временным измельчением. Для описания вмещающей среды используется сравнительно грубая сетка (20÷30 точек на длину волны), в то время как мелкомасштабные неоднородности описываются на гораздо более детальной сетке (от 200 точек на длину волны). Все вычисления производятся с использованием компьютеров с параллельной архитектурой и основаны на трёхмерной декомпозиции расчётной области, когда каждый элементарный объём приписывается своему процессорному элементу. Используемые процессорные элементы формируют две группы — для вмещающей среды (крупная сетка) и скоплений мелкомасштабных неоднородностей (мелкая сетка). Взаимодействие групп организовано специальным образом, опирается на использование специальным образом выделенных мастер-процессоров и предусматривает согласование сеток.

Приводятся результаты численных расчётов для реалистичных моделей карбонатных резервуаров, содержащих коридоры трещиноватости. Показано проявление ориентации этих коридоров в рассеянных волновых полях.

**Ключевые слова:** сейсмические волны, конечно-разностные методы, декомпозиция области, интерполяция, группы процессорных элементов.

**Kostin V.I., Lisitsa V.V., Reshetova G.V., Tcheverda V.A.** Finite difference simulation of elastic waves propagation through 3D heterogeneous multiscale media based on locally refined grids // Siberian J. Num. Math. / Sib. Branch of Russ. Acad. of Sci. — Novosibirsk, 2013. — Vol. 16, № 1. — P. 45–55.

In order to simulate the interaction of seismic waves with microheterogeneities (like cavernous/fractured reservoirs), a finite difference technique based on locally refined in time and in space grids is used. The need to use these grids is due to essentially different scales of heterogeneities in the reference medium and in

\* Работа выполнена при поддержке РФФИ (проекты № 10-05-00233, № 11-05-00947, № 11-05-12022-офи, № 12-05-31008 и № 12-05-33011), ООО "РН-КрасНИПИнефть" (Красноярск), TOTAL SA (Pau, France) и гранта президента РФ МК-47.2011.5.

the reservoir. Parallel computations are based on Domain Decomposition of the target area into elementary subdomains in both the reference medium (a coarse grid) and the reservoir (a fine grid). Each subdomain is assigned to its specific Processor Unit which forms two groups: for the reference medium and for the reservoir. The data exchange between PU within the group is performed by non-blocking iSend/iReceive MPI commands. The data exchange between the two groups is done simultaneously with coupling a coarse and a fine grids and is controlled by a specially designated PU. The results of numerical simulation for a realistic model of fracture corridors are presented and discussed.

**Key words:** *seismic waves, finite difference techniques, domain decomposition, interpolation, groups of processor elements.*

---

## 1. Актуальность

Одной из наиболее важных задач современных сейсмических методов поиска и разведки нефтегазовых месторождений является реконструкция микроструктуры пласта-коллектора. Связано это с тем, что во многих случаях карбонатный коллектор может быть насыщен углеводородами, но его проницаемость, а, следовательно, и извлекаемость запасов определяется пронизывающими его коридорами трещиноватости, образованными системами трещин, имеющих протяжённость до нескольких километров, высоту до первых десятков метров и ширину в первые десятки сантиметров. Более того, иногда в карбонатных коллекторах нефть может находиться в карстовых включениях размерами до метра. Таким образом, знание распределения системы трещин и каверн является необходимым для организации эффективной разработки месторождений в карбонатных коллекторах. Однако, в силу их субвертикальной ориентации и весьма небольшой толщины (первые метры), на них практически не образуются отражённые волны, что чрезвычайно затрудняет использование традиционных сейсмических методов. Этот факт послужил стимулом развития нового направления, связанного с использованием рассеянных волн. Именно такие волны возникают на системах трещин и каверн, формирующих кавернозно-трещиноватые резервуары в карбонатных породах. В настоящее время направление, связанное с выделением рассеянных волн и их использованием, развивается весьма активно и в ряде случаев уже даёт реальные результаты на практике [16, 13, 9, 14, 11].

Необходимым этапом при создании процедур построения изображений рассеивающих объектов является разработка и программная реализация алгоритмов для численного моделирования рассеянных волновых полей. Именно на этой основе открывается возможность детального анализа основных особенностей процессов формирования и распространения таких волн, без знания которых невозможно развитие методов локализации рассеивающих объектов и описания их микроструктуры. Однако прямолинейный перенос существующих в настоящее время методов численного моделирования сейсмических волн на решение таких задач не всегда может быть реализован даже с использованием самых мощных на сегодняшний день вычислительных систем. Действительно, применяемые в настоящее время методы численного моделирования сейсмических волн для реалистичных трёхмерных моделей основаны преимущественно на явных конечно-разностных схемах, использующих сетки с размером шага по пространству равным 0.1–0.2 доминирующей длины волны, что, как правило, составляет 5–10 м, в то время как характерные размеры неоднородностей составляют 0.01–0.1 м. Стандартным способом учёта влияния микромасштабных неоднородностей является их осреднение, т. е. гомогенизация среды, подмена её некоторой “эффективной” однородной средой [7]. Такая эффективная среда

будет правильно описывать времена вступлений и осреднённое поведение коэффициентов отражения, особенно на больших выносах, но никоим образом не позволит учесть наличие рассеянных волн [12]. Для их корректного моделирования необходимо использовать гораздо меньший шаг по пространству, сравнимый с размером неоднородностей. Однако, как показывают элементарные вычисления, использование шага в 0.5 м во всей целевой области, типичный размер которой составляет  $10 \text{ км} \times 10 \text{ км} \times 10 \text{ км}$ , даёт  $8 \times 10^{12}$  узлов, что потребует  $\approx 350$  Тбайт оперативной памяти и, соответственно, примерно двести тысяч процессорных элементов.

Предлагаемый нами подход к решению данной проблемы заключается в использовании сеток с различными шагами по пространству для корректного представления различных составляющих модели: сравнительно крупный шаг для описания трёхмерно-неоднородной вмещающей среды и гораздо более мелкий внутри пласта-коллектора.

## 2. Постановка задачи

Распространение сейсмических волн описывается системой уравнений первого порядка:

$$\left. \begin{aligned} \rho \frac{\partial \vec{u}}{\partial t} - A \frac{\partial \vec{\sigma}}{\partial x} - B \frac{\partial \vec{\sigma}}{\partial y} - C \frac{\partial \vec{\sigma}}{\partial z} &= 0; \\ D \frac{\partial \vec{\sigma}}{\partial t} - A^\top \frac{\partial \vec{u}}{\partial x} - B^\top \frac{\partial \vec{u}}{\partial y} - C^\top \frac{\partial \vec{u}}{\partial z} &= \vec{f} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

для векторов скорости  $\vec{u} = (u_x, u_y, u_z)^\top$  и напряжений  $\vec{\sigma} = (\sigma_{xx}, \sigma_{yy}, \sigma_{zz}, \sigma_{yz}, \sigma_{xz}, \sigma_{xy})$ . Здесь  $A$ ,  $B$  и  $C$  — прямоугольные  $3 \times 6$  матрицы, ненулевые элементы которых

$$a_{11} = a_{26} = a_{35} = 1; \quad b_{16} = b_{22} = b_{34} = 1; \quad c_{15} = c_{24} = c_{33} = 1;$$

а матрица  $D$  — квадратная симметричная  $6 \times 6$  с ненулевыми элементами

$$d_{11} = d_{22} = d_{33} = \frac{\lambda + \mu}{\mu(3\lambda + 2\mu)}; \quad d_{12} = d_{13} = d_{23} = \frac{\lambda}{2\mu(3\lambda + 2\mu)}; \quad d_{44} = d_{55} = d_{66} = \frac{1}{\mu}.$$

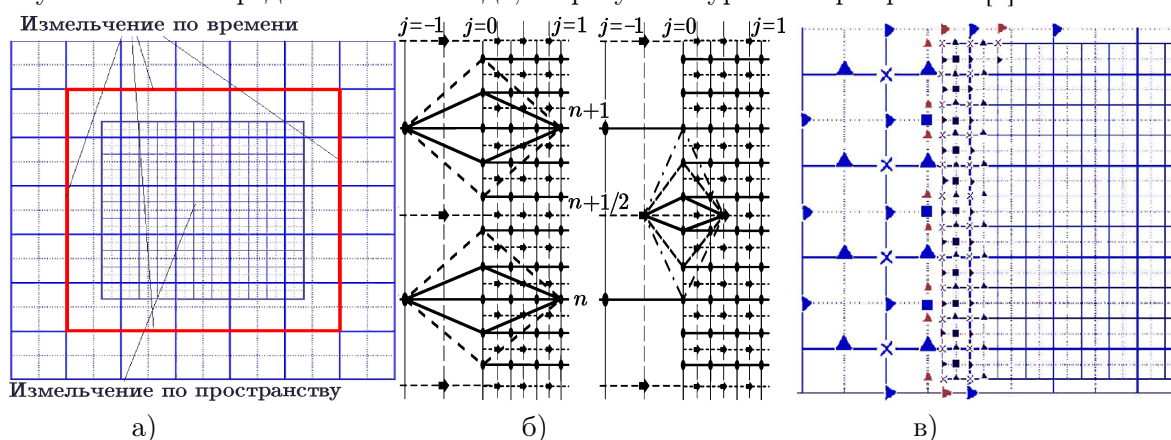
Входящий в правую часть системы (1) вектор  $\vec{f}$  описывает действие источника сейсмических волн.

Для численного моделирования сейсмических волн нами используется стандартная явная конечно-разностная схема второго порядка на сдвинутых сетках [15]. Модификация её коэффициентов на основе метода баланса, известного так же, как интегро-интерполяционный метод [2, гл. III], обеспечивает второй порядок сходимости численного решения для неоднородных сред. Это позволяет избежать явного описания неоднородностей и организовать “сквозной” счёт во всей целевой области.

### 2.1. Согласование сеток

Применяя классическую теорию однократного рассеяния [1], можно показать, что рассеянные волны, возникающие на микроструктуре пласта-коллектора, имеют амплитуду порядка 1% от интенсивности падающей волны. Поэтому, используемый для их моделирования конечно-разностный метод должен обладать искусственными отражениями от границы смены шагов на уровне  $0.01\% \div 0.1\%$ . Построению таких методов посвящено значительное количество публикаций [3–6]. Отличительной особенностью всех этих

подходов является одновременное измельчение сетки и по пространству, и по времени. В то же время, как показано в [4], единственный путь для обеспечения устойчивости такой реализации конечно-разностного метода состоит в согласовании крупной и мелкой сеток на основании закона сохранения энергии. Как показали проведённые нами численные эксперименты [8], этот подход ведёт к возникновению артефактов с интенсивностью более 1% относительно падающей волны, что неприемлемо для корректного моделирования рассеянных волн. Поэтому нами изначально было решено использовать измельчение по времени и по пространству на разных поверхностях, охватывающих заполненную микронеоднородностями область, как это представлено на рис. 1а. Именно такое последовательное измельчение шагов по времени и по пространству обеспечивает и устойчивость предлагаемого метода, и требуемый уровень артефактов [8].



**Рис. 1.** Согласование сеток: а) расположение поверхностей измельчения сеток по времени (красный прямоугольник) и по пространству (чёрный прямоугольник), б) измельчение по времени (слева — скорости смещения, справа — напряжения), в) измельчение по пространству

### 2.1.1. Измельчение шага по времени

Для одномерного случая измельчение шага по времени при фиксированном шаге по пространству представлено на рис. 1б и достаточно очевидно. Его модификации в двумерной и трёхмерной постановках отличаются только использованием соответствующего пространственного шаблона, оставляя неизменной структуру вычислений (более подробно см. [8]).

### 2.1.2. Измельчение шага по пространству

Для согласования сеток с различными шагами по пространству используется интерполяция на основе быстрого преобразования Фурье (БПФ). Для упрощения рассмотрим двумерную реализацию этого подхода. На рис. 1в изображено взаимное расположение крупной и мелкой сеток. Треугольниками обозначены узлы, в которых задаются компоненты векторов скорости смещения (ориентация треугольника совпадает с направлением компоненты вектора), а прямоугольниками и косыми крестиками — узлы, в которых задаются соответственно диагональные ( $\sigma_{xx}, \sigma_{zz}$ ) и внедиагональные ( $\sigma_{xz}$ ) компоненты тензора напряжений. При этом величины, вычисляемые на мелкой и крупной сетках, обозначены соответствующими мелкими и крупными символами. Рассмотрим шаг, на котором по заданным компонентам вектора скоростей смещения вычисляются компоненты тензора напряжений. Как видно, для того чтобы вычислить компоненту  $\sigma_{xz}$  на границах мелкой сетки необходимо знать векторы скоростей смещения в узлах, отмеченных мелкими треугольниками, которые не принадлежат крупной сетке. Следовательно,

искомые значения в них должны быть получены с помощью интерполяции, причём именно её точность и определяет уровень артефактов, связанных со сменой шага. Исходя из этого, нами была выбрана интерполяция на основе БПФ, обладающая экспоненциальной точностью и чрезвычайно высоким быстродействием. Последнее особенно важно в трёхмерном случае, когда приходится выполнять двумерную интерполяцию.

## 2.2. Организация параллельных вычислений

Предлагаемый метод ориентирован на численное моделирование взаимодействия сейсмических волн с кавернозно-трещиноватыми резервуарами в реалистичных трёхмерно-неоднородных средах. Поэтому параллельные вычисления должны быть организованы как во вмещающей среде, описываемой крупной сеткой, так и в самом резервуаре на мелкой сетке. Одновременное использование крупной и мелкой сеток и необходимость организации взаимодействия между ними делает нетривиальной задачу обеспечения равномерной загрузки процессорных элементов, участвующих в параллельных вычислениях на основе декомпозиции области.

Ещё одним важным моментом является удобство формирования сейсмогеологической модели, включая задание вмещающей среды, расположение в ней резервуара и описание его свойств на мелкой сетке. Мы предполагаем, что резервуар полностью погружён в параллелепипед с мелким шагом, положение которого во вмещающей среде определяется двумя крайними точками его главной диагонали. Строение вмещающей среды на крупной сетке и резервуара на мелкой задаётся отдельными файлами и формально никак не связаны между собой. Трёхмерная декомпозиция выполняется независимо для вмещающей среды и резервуара и задаётся количеством их разбиений в каждом из трёх направлений. Всё это максимально упрощает пользователю формирование задания. Ему нужно загрузить файлы, задающие распределение упругих параметров во вмещающей среде и внутри резервуара, задать разбиение расчётной области на крупной и мелкой сетках и разместить во вмещающей среде параллелепипед, охватывающий резервуар.

Опишем теперь организацию взаимодействия между отдельными процессорными элементами внутри каждой группы и между группами.

### 2.2.1. Взаимодействие между соседними процессорными элементами в группе

Для организации параллельных вычислений используется пространственная декомпозиция области на непересекающиеся параллелепипеды, каждый из которых приписывается своему процессорному элементу. Пространственный шаблон, используемый в этой схеме, требует для расчёта скоростей и напряжений в точке  $M$  в последующий момент времени их знания в некоторой окрестности этой точки в предыдущий момент. Таким образом, такая параллельная реализация ведёт к необходимости организации пошаговых обменов между соприкасающимися процессорами (рис. 2а). Время, затрачиваемое на такие обмены, относится к непроизводительным потерям, причём чем больше объём пересылаемых данных, тем значительнее эти потери и, следовательно, ниже эффективность разработанного программного обеспечения. В свою очередь, объём пересылаемых данных, а значит и эффективность программного обеспечения, зависит от геометрии декомпозиции области. Как видно из рис. 2б, наилучшей эффективностью обладает трёхмерная декомпозиция, что является следствием хорошо известного факта — среди всех параллелепипедов фиксированного объёма куб имеет наименьшую площадь поверхности. Именно такая декомпозиция использовалась нами для организации параллельных вы-

числений, что и позволило добиться максимальной эффективности программного обеспечения. Кроме того, для сокращения непроизводительного ожидания здесь используется асинхронная организация вычислений, при которой обмен данными между соприкасающимися процессорными элементами осуществляется с помощью неблокирующих MPI-процедур *iSend/iRecv*. Внутри каждого процессорного элемента вычисления для каждого текущего временного слоя конечно-разностной схемы начинаются из самой внутренней точки, приписанной к нему элементарной области, и расширяются по направлению к её границам. Таким образом, при формировании граничных значений уже поступают необходимые данные от соседних процессоров и одновременно готовится к пересылке следующий пакет данных, обеспечивающий переход на новый слой по времени.

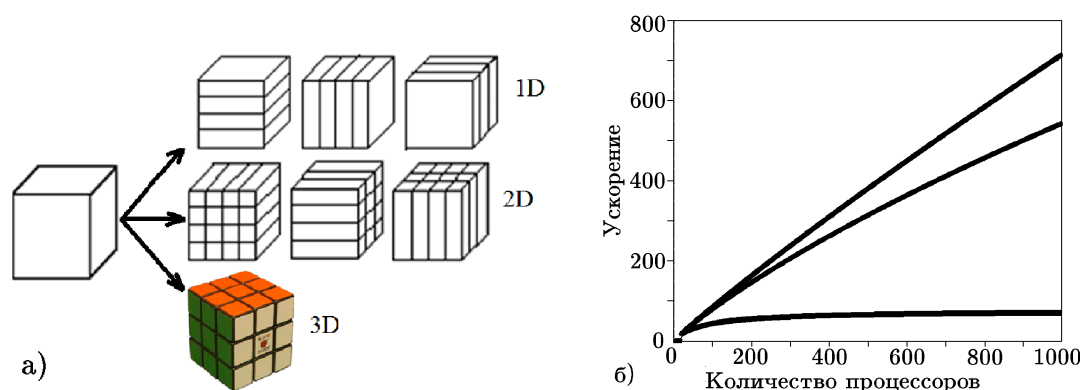


Рис. 2. Декомпозиция области: сверху вниз 1D, 2D, 3D (а), теоретические оценки ускорения для различных видов декомпозиции трёхмерной области: снизу вверх 1D, 2D, 3D (б)

### 2.2.2. Взаимодействие между группами процессорных элементов

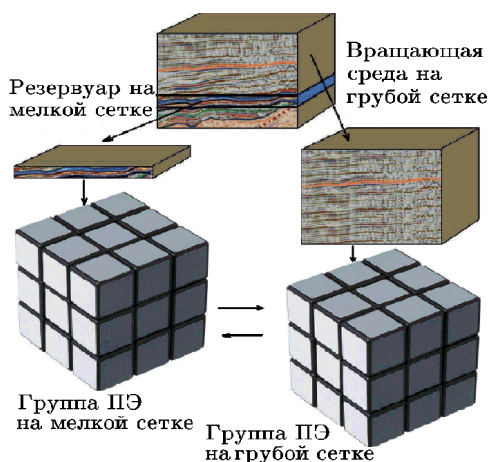
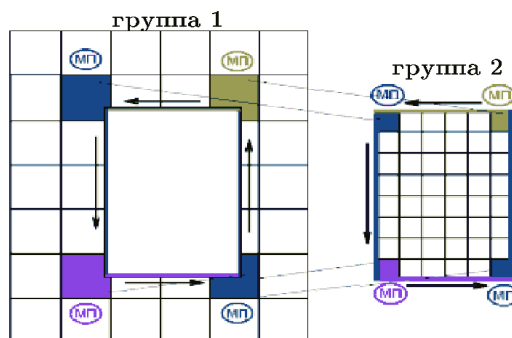


Рис. 3. Две группы процессорных элементов. Слева — для описания резервуара, справа — вмещающей среды

Как уже было отмечено ранее, вся изучаемая среда представляется в виде суперпозиции вмещающей среды (крупная сетка) и содержащегося в ней резервуара (мелкая сетка). Все процессорные элементы разбиваются на две группы, производящие вычисления на крупной и мелкой сетках соответственно (рис. 3). Рассмотрим организацию обменов между этими группами, имея в виду, что при этом также выполняется и согласование сеток, как это описано в п. 2.1.

**С крупной сетки на мелкую.** Прежде всего определяются процессорные элементы из первой группы (крупная сетка), охватывающие резервуар (рис. 2.2.2), и группируются по каждой из граней, соприкасающихся с параллелепипедом на мелкой сетке. Для каждой грани определяется специальный мастер-процессор (аббревиатура МП на рис. 2.2.2), который собирает рассчитанные на ней текущие значения решения и пересылает их соответствующему МП на мелкой сетке. Вся последующая обработка этих данных, бес-

печивающая согласование сеток путём интерполяции на основе БПФ, выполняется уже МП для мелкой сетки, который затем и рассылает данные по соответствующим процессорам из второй группы (мелкая сетка). Выполнение интерполяции на месте позволяет существенно уменьшить объём пересылаемых данных и, следовательно, время непроизводительного ожидания.



**Рис. 4.** Взаимодействие между группами процессорных элементов на крупной (слева) и мелкой (справа) сетках

**С мелкой сетки на крупную.** Как и в предыдущем случае, прежде всего определяются процессоры, выполняющие вычисления на гранях параллелепипеда с мелкой сеткой, охватывающего резервуар, и для каждой грани определяется мастер-процессор (МП) (рис. 2.2.2). Именно он собирает с каждой из граней данные для пересылки соответствующему мастер-процессору, работающему на крупной сетке. В этом случае для вычисления значений решения для следующего момента времени нужны не все данные, полученные с мелким шагом, а лишь те из них, которые соответствуют узлам крупной сетки (рис. 1в). Формально эти данные можно просто проредить, но, как показал наш опыт, при этом возникают заметные артефакты, связанные с потерей гладкости решения. Поэтому и здесь используется интерполяция на основе БПФ, позволяющая восстанавливать значения в узлах с высокой степенью точности. Выполнение такой процедуры прореживания на месте мастер-процессором, работающим на мелкой сетке, существенно уменьшает объём пересылаемых данных и, следовательно, сокращает время непроизводительного ожидания.

При организации межгрупповых обменов, как и обменов внутри групп, обеспечивается максимально возможная степень асинхронности вычислений за счёт использования неблокирующих процедур MPI iSend/iRecv и специальной организации вычислений — из самой внутренней точки области, приписанной каждому из процессорных элементов. Самым узким местом здесь является обмен данными между группами процессоров. Однако описанный выше подход, когда пересылаются только данные, соответствующие крупной сетке, а для интерполяции используются чрезвычайно эффективные процедуры БПФ (Intel MKL), существенно снижает непроизводительное время ожидания.

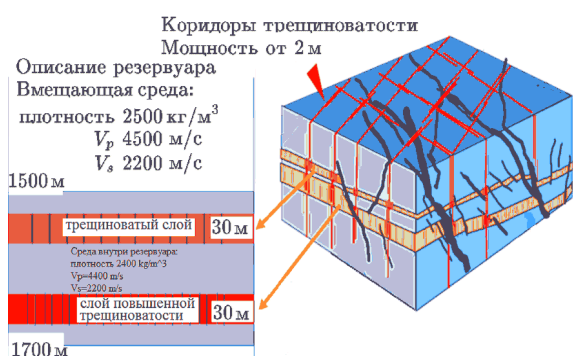
### 2.2.3. Организация ввода модели и вывода результатов

Организация ввода/вывода реализована на основе специализированной библиотеки MPI I/O (Input/Output), входящей в MPI-2. Все процедуры ввода/вывода выполняются в параллельном режиме, при котором обеспечивается одновременный доступ к одному и тому же файлу как при чтении (ввод модели), так и при записи (вывод рассчитанных волновых полей). Необходимым условием успешной работы программного обеспечения для реалистичных моделей является наличие ILP 64 на кластере. Это связано с огромными размерами вовлечённых в вычисления массивов. Как правило, для описания тонкой структуры резервуара требуются массивы, содержащие более  $2^{32}$  элементов. Их чтение с использованием стандартных процедур ввода/вывода занимает неприемлемо длительное время и, более того, как правило, приводит к возникновению проблем с корректной адресацией элементов таких массивов. Достаточно отметить, что приводимый ниже пример карбонатного резервуара с коридорами трещиноватости использует сетку с полуметровым шагом, покрывающую параллелепипед  $2000\text{ м} \times 2000\text{ м} \times 200\text{ м}$ , что составляет  $\approx 2^{33}$

элементов. Запись трёхкомпонентных синтетических сейсмограмм, рассчитанных для реалистичных систем наблюдения, также требует использования специальных процедур, обеспечивающих доступ к одному и тому же файлу разных процессоров, участвующих в вычислениях.

### 3. Численное моделирование для реалистичной модели резервуара

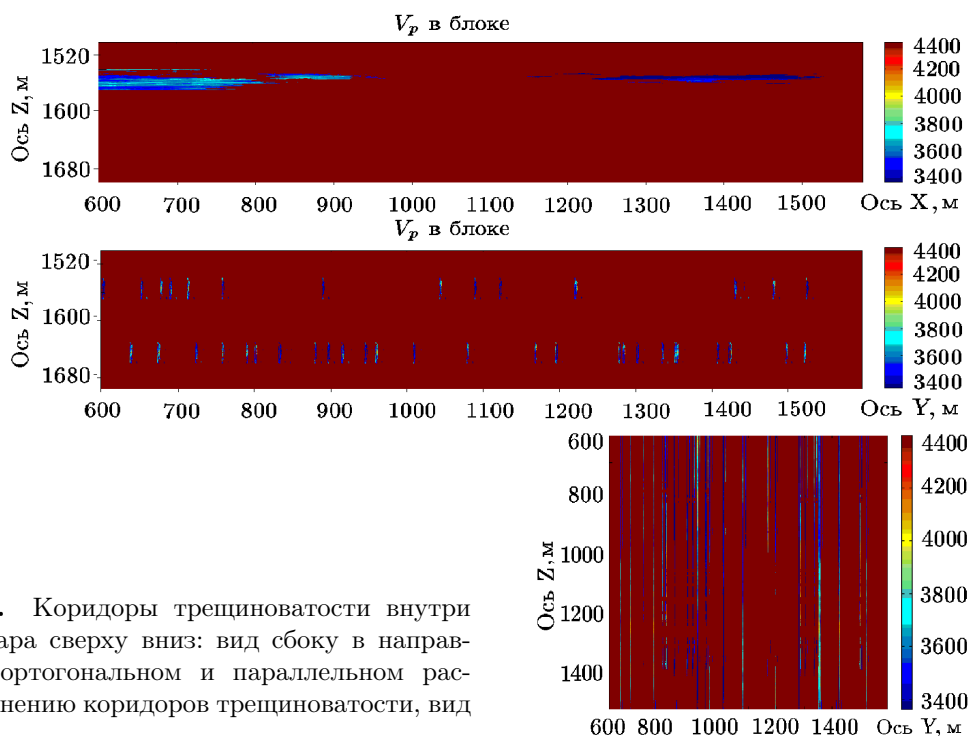
В заключение представим результаты численного моделирования для реалистичной модели карбонатного резервуара с коридорами трещиноватости. Такого типа коллекторы характерны для месторождений нефти и газа в Восточной Сибири, в частности в



**Рис. 5.** Резервуар с коридорами трещиноватости

Юрубчено-Тохомской зоне. В основу построения численной модели резервуара положена схематическая двухслойная модель, представленная на рис. 5. Для простоты предполагается, что этот резервуар погружён в однородное упругое полупространство, свойства которого соответствуют типичной модели карбонатных пород:  $V_p = 4500$  м/с,  $V_s = 2500$  м/с,  $\rho = 2500$  кг/м<sup>3</sup>. Резервуар содержит трещиноватость коридорного типа, представляющую из себя набор случайно распределённых протяжённых

протяжённых трещин. Концентрация трещин при этом колеблется от 0 в цельных фациях до максимального значения 0.3. Окончательное распределение коридоров трещиноватости представлено на рис. 6.



**Рис. 6.** Коридоры трещиноватости внутри резервуара сверху вниз: вид сбоку в направлении, ортогональном и параллельном распространению коридоров трещиноватости, вид сверху



Для дискретизации резервуара использовался пространственный шаг 0.5 м, что позволяет корректно задать на сетке его сейсмогеологическую модель. В итоге получается трёхмерный массив из  $4000 \times 4000 \times 400$  элементов. Декомпозиция области была выполнена таким образом, чтобы на каждый из процессорных элементов приходился куб  $200 \times 200 \times 200$  точек ( $\approx 1$  Гбайт RAM), что потребовало 800 процессорных элементов. Вмещающая среда заполняла куб  $2000 \text{ м} \times 2000 \text{ м} \times 2000 \text{ м}$  и дискретизировалась с шагом 2.5 м, что соответствует массиву  $800 \times 800 \times 800$  точек. Выбирая такую же загруженность процессорных элементов, как для резервуара, получаем необходимость использования 64 процессорных элементов для описания вмещающей среды. Таким образом, для моделирования взаимодействия сейсмических волн с тонкой структурой данного резервуара необходимо 864 процессорных элемента.

### 3.1. Синтетические сейсмограммы

С помощью разработанного программного обеспечения было проведено полномасштабное численное моделирование для изучения рассеянных волн, возникающих на построенных выше коридорах трещиноватости.

Система наблюдения представлена на рис. 7. Соответствующие трёхкомпонентные сейсмограммы приведены на рис. 8. Отчётливо прослеживается увеличение интенсивности рассеянных волн при ориентации профиля вдоль направления трещиноватости по сравнению с его расположением ортогонально ориентации системы трещин. Этот факт может быть использован для оценки преимущественной ориентации коридоров трещиноватости и выработки на этой основе рекомендаций по разработке и эксплуатации месторождения.

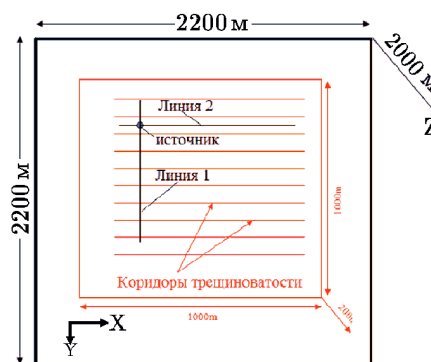


Рис. 7. Система наблюдения. Источник находится в пересечении Линия 1 и Линия 2

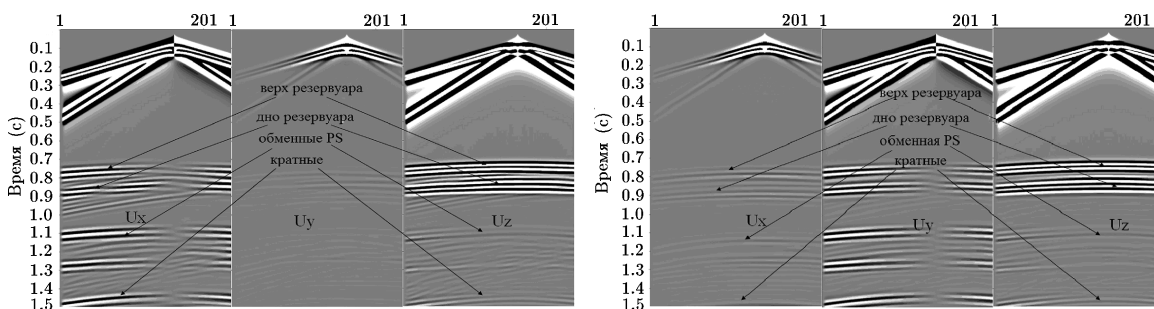


Рис. 8. Трёхкомпонентные сейсмограммы вдоль линий: Линия 2 (слева) и Линия 1 (справа). Слева направо: X, Y и Z компоненты смещений

## 4. Заключение

Предложен, обоснован и реализован конечно-разностный метод численного моделирования сейсмических волн в разномасштабных средах на основе применения сеток с локальным пространственно-временным измельчением. Созданное на его основе параллельное программное обеспечение даёт уникальную возможность детального анализа

процессов взаимодействия сейсмических волн с тонкой структурой пласта-коллектора, перекрытого трёхмерно неоднородными толщами и повышения на этой основе информативности и разрешающей способности сейсмических методов поиска и разведки месторождений нефти и газа. Уже самые первые численные эксперименты, выполненные с использованием этого программного обеспечения, позволили получить описание весьма тонких особенностей рассеянных волновых полей для карбонатных коллекторов и сформулировать на этой основе признак для определения ориентации коридоров трещиноватости, контролирующей фильтрационные свойства месторождений.

Таким образом, благодаря использованию параллельных вычислительных систем и современного программного обеспечения (MPI-2 с ILP-64 и процедурами ввода/вывода MPI I/O) впервые появилась возможность полномасштабного моделирования процессов взаимодействия сейсмических волн с тонкой структурой коллекторов и, в частности, возникновения при этом рассеянных волн. На этой основе могут быть выработаны качественно новые методы локализации зон повышенной трещиноватости и прогнозирования их флюидонасыщенности.

*Благодарности.* Мы искренне благодарны специалистам Новосибирского отделения А/О Intel ЗАО за консультации по вопросам, связанным с использованием процедур MPI I/O и преодоления проблем адресации в рамках версии MPI, использующей ILP-64.

Отладка программ и численные эксперименты проводились на вычислительных мощностях Сибирского суперкомпьютерного центра СО РАН (г. Новосибирск), Московского межведомственного вычислительного центра РАН и Вычислительного центра Московского государственного университета (“Чебышев”).

## Литература

1. **Рытов С.М., Кравцов Ю.А., Татарский В.И.** Введение в статистическую радиофизику. Часть II (стохастические поля). — М.: Наука, 1978.
2. **Самарский А.А.** Теория разностных схем. — М.: Наука, 1977.
3. **Castro С.Е., Kaser M., and Toro E.F.** Space-time numerical methods for geophysical applications // Philosophical Transactions of the Royal Society: series A. — 2009. — № 367. — P. 4613–4631.
4. **Collino F., Fouquet T., and Joly P.** A conservative space-time mesh refinement method for 1-D wave equation. Part I: Construction // Numerische Mathematik. — 2003. — Vol. 95, № 2. — P. 197–221.
5. **Collino F., Fouquet T., and Joly P.** A conservative space-time mesh refinement method for 1-D wave equation. Part II: Analysis // Numerische Mathematik. — 2003. — Vol. 95, № 2. — P. 223–251.
6. **Diaz J., Grote M.J.** Energy conserving explicit local time stepping for second-order wave equations // SIAM J. Scientific Comput. — 2009. — Vol. 31, iss. 3. — P. 1985–2014.
7. **Grechka V.** Multiple cracks in VTI rocks: Effective properties and fracture characterization // Geophysics. — 2007. — Vol. 72, № 5. — P. D81–D91.
8. **Lisitsa V., Reshetova G., and Tcheverda V.** Finite-difference algorithm with local time-space grid refinement for simulation of waves // Computational geosciences. — 2011. — (В печати.)
9. **Reshef M., Landa E.** Post-stack velocity analysis in the dip-angle domain using diffractions // Geophysical Prospecting. — 2009. — Vol. 57, iss. 5. — P. 811–821.
10. **Reshetova G., Lisitsa V., Tcheverda V., and Thore P.** Simulation of seismic waves propagation in Multiscale media on the base of locally refined grids // 71st EAGE Conference and Exhibition, 8–11 June. — Amsterdam, The Netherlands. — P. 312.

11. **Reshetova G.V., Lisitsa V.V., Tcheverda V.A., and Pozdnyakov V.A.** Impact of cavernous/fractured reservoirs to scattered seismic waves in 3D heterogeneous media: Accurate numerical simulation and field study // SEG Expanded Abstracts, Annual Meeting. — SEG San Antonio, 2011. — Vol. 30. — P. 2875–2878.
12. **Saenger E.H., Kruger O.K., and Shapiro S.A.** Effective elastic properties of randomly fractured soils: 3D numerical experiments // Geophysical prospecting. — 2004. — Vol. 52, iss. 3. — P. 183–195.
13. **Sneider Roel.** The theory of coda wave interferometry // Pure and Applied Geophysics. — 2006. — № 163. — P. 455–473.
14. **Tsingas C., El Marhfoul B., and Dajani A.** Fracture detection by diffraction imaging // 72nd EAGE Conference and Exhibition incorporating SPE EUROPEC, 14–17 June, 2010. — Barcelona, Spain, 2010. — P. G044.
15. **Virieux J.** P-SV wave propagation in heterogeneous media: Velocity-stress finite difference method // Geophysics. — 1986. — Vol. 51, № 4. — P. 889–901.
16. **Willis M., Burns D., Rao R., Minsley B., Toksoz N., and Vetri L.** Spatial orientation and distribution of reservoir fractures from scattered seismic energy // Geophysics. — 2006. — Vol. 71, № 5. — P. O43–O51.

*Поступила в редакцию 6 октября 2011,  
в окончательном варианте 23 марта 2012*

