

Численное моделирование взаимодействия сейсмических волновых полей с кавернозно-трещиноватыми резервуарами и его практические приложения



15 Численное моделирование взаимодействия сейсмических волновых полей с кавернозно-трещиноватыми резервуарами и его практические приложения

Для численного моделирования процессов распространения сейсмических волн в трехмерно-неоднородных средах с кавернозно-трещиноватыми резервуарами разработан конечно-разностный метод, основанный на использовании сеток с локальным пространственно-временным измельчением. Его программная реализация основана на трехмерной декомпозиции области, причем для каждой подобласти вычисления производятся асинхронно с использованием неблокирующих процедур обмена. Приводятся результаты численных расчетов для реалистичных моделей карбонатных резервуаров, содержащих коридоры трещиноватости.

АВТОРЫ:

В.В. Лисица – канд. физ.-мат. наук., зав. лабораторией «Численное моделирование геофизических полей» Института нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН, г. Новосибирск, e-mail: lisitsavv@ipgg.nsc.ru

В.А. Чеверда – докт. физ.-мат. наук, зав. отделом «Численные методы геофизики» Института нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН, г. Новосибирск, e-mail: CheverdaVA@ipgg.nsc.ru

Г.В. Решетова – докт. физ.-мат. наук, старший научный сотрудник Института вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, г. Новосибирск, e-mail: kgv@nmsf.sssc.ru

В.А. Поздняков – докт. тех. наук, профессор, зав. кафедрой геофизики Института нефти и газа Сибирского федерального университета, заслуженной геолог РФ, г. Красноярск, e-mail: var@kgf.ru

В.В. Шиликов – зам. директора Департамента геофизики по новым технологиям ООО «РН-КрасноярскНИПИнефть», e-mail: ShilikovVV@kr-nipineft.ru

Актуальность

Одной из наиболее важных задач современных сейсмических методов поиска и разведки нефтегазовых месторождений в Восточной Сибири является детальная реконструкция микроструктуры пласта-коллектора, которая и определяет его продуктивность. Это связано с тем, что во многих случаях эти коллекторы могут быть насыщены углеводородами, но извлекаемость их запасов определяется геометрией пронизывающих его коридоров трещиноватости, представляющих собой системы трещин протяженностью до нескольких километров, высотой в несколько десятков метров и шириной в десятки сантиметров. Более того, нефть может находиться в карстовых включениях размерами до метра (рис. 1). Таким образом, знание распределения системы трещин является необходимым для организации эффективной разработки месторождений в карбонатных коллекторах. Однако, в силу их вертикальной ориентации и весьма небольшой толщины, на них не образуется сколько-нибудь существенных отраженных волн, что чрезвычайно затрудняет их картирование с помощью традиционных сейсмических методов. Именно поэтому внимание к себе привлекли рассеянные волны, как раз и образующиеся на системах трещин и каверн. Естественно, что первым шагом в направлении создания методов реконструкции рассеивающих объектов является разработка алгоритмов и программного обеспечения для численного моделирования рассеянных волновых полей. Именно на этой основе могут быть установлены основные особенности их формирования и распространения, без знания которых невозможно осмысленное развитие методов картирования рассеивающей микроструктуры. Однако прямолинейный перенос существующих в настоящее время методов численного (как правило, конечно-разностного) моделирования сейсмических волн на решение таких задач не всегда может быть реализован даже с использованием самых мощных на сегодняшний день вычислительных систем. Элементарные вычисления показывают, что при использовании даже шага в 0,1 м во всей целевой области, типичный размер которой составляет $10 \text{ км} \times 10 \text{ км} \times 10 \text{ км}$, необходимо $4 \cdot 10^{13}$ узлов, что потребует 1800 Тб оперативной памяти и, соответственно, примерно миллион процессорных элементов.

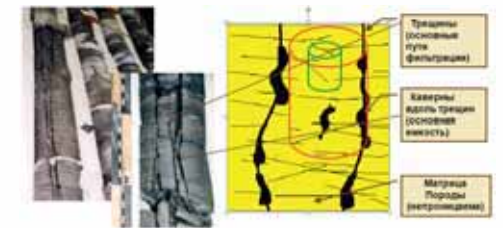


Рис. 1. Керн кавернозно-трещиноватого коллектора

Наш подход к решению данной проблемы заключается в использовании сеток с локальным пространственно-временным измельчением для корректного представления различных составляющих модели.

Организация параллельных вычислений

Разработанное программное обеспечение предназначено для анализа взаимодействия сейсмических волн с кавернозно-трещиноватыми резервуарами в реалистичных трехмерно-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

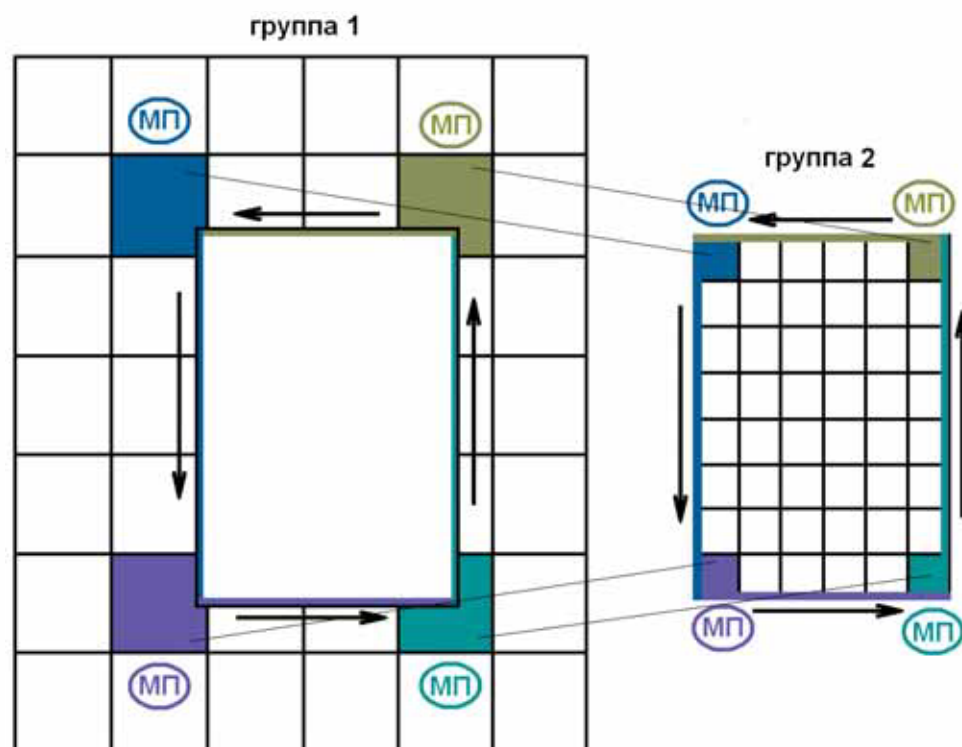


Рис. 2.
Взаимодействие двух групп процессоров

загрузки процессорных элементов при организации параллельных вычислений на основе декомпозиции области.

Для организации параллельных вычислений используется пространственная декомпозиция области на соприкасающиеся параллелепипеды, каждый из которых приписывается своему процессорному элементу.

Взаимодействие между группами процессорных элементов

Использование двух различных пространственно-временных сеток ведет к необходимости организации и двух групп процессорных элементов, производящих вычисления на этих сетках.

Рассмотрим организацию взаимодействия этих групп.

С крупной сетки на мелкую

Прежде всего, определяются процессорные элементы из первой группы (крупная сетка), охватывающие резервуар (рис. 2), и группируются по каждой из граней, соприкасающихся с параллелепипедом на мелкой сетке. Для каждой грани определяется специальный мастер-процессор (МП), рис. 2, который собирает рассчитанные на ней текущие значения решения и пересылает их соответствующему МП на мелкой сетке. Вся последующая обработка этих данных, обеспечивающая согласование сеток путем интерполяции на основе БПФ, выполняется уже МП для мелкой сетки, который затем и рассылает данные по соответствующим процессорам из второй группы (мелкая сетка). Выполняя интерполяцию на месте, удастся существенно уменьшить объем пересылаемых данных и, следовательно, время непроизводительного ожидания.

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 МП (рис. 2). Именно он собирает с каждой из граней данные для пересылки на группу процессоров, работающих на крупной сетке.

Организация ввода модели и вывода результатов

Организация ввода/вывода реализована на основе специализированной библиотеки MPI (Message Passing Interface, интерфейс передачи сообщений) 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).

Численное моделирование для реалистичных моделей резервуара

Представим теперь результаты численного моделирования для реали-

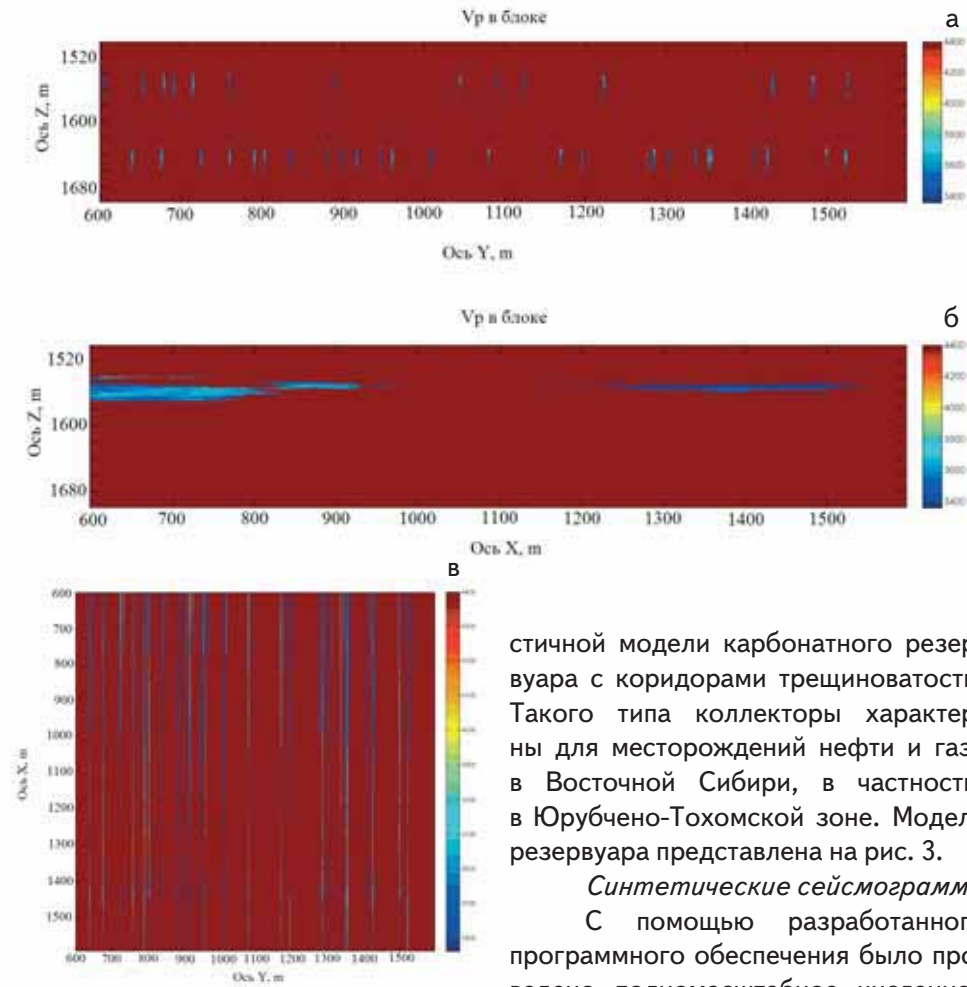


Рис. 3. Коридоры трещиноватости внутри резервуара: вид сбоку в направлении (а) ортогональном и (б) параллельном (внизу) распространению коридоров трещиноватости, (в) – вид сверху

стичной модели карбонатного резервуара с коридорами трещиноватости. Такого типа коллекторы характерны для месторождений нефти и газа в Восточной Сибири, в частности, в Юрубчено-Тохомской зоне. Модель резервуара представлена на рис. 3.

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

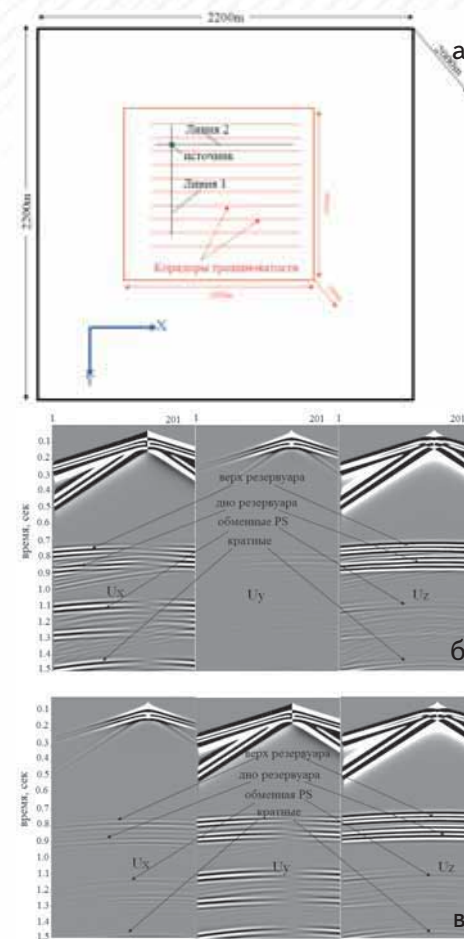


Рис. 4. а) Система наблюдения. Источник находится в пересечении Line1 и Line2. Трехкомпонентные сейсмограммы вдоль линий (б) Line 2 и (в) Line1. Слева направо: X, Y и Z компоненты смещений

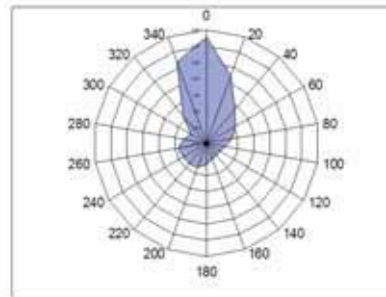
Система наблюдения представлена на рис. 4а. Соответствующие трехкомпонентные сейсмограммы приведены на рис. 4б (профиль вдоль коридоров трещиноватости) и рис. 4в (профиль поперек коридоров трещиноватости). Отчетливо прослеживается повышенная интенсивность рассеянных волн вдоль профиля, совпадающего с направлением распространения коридоров трещиноватости.

Опробование на реальных данных

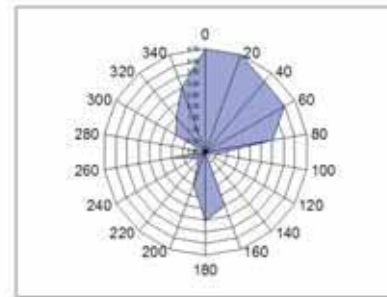
Как видно из представленных выше результатов, азимутальная изменчивость амплитуды рассеянных волн отражает ориентацию коридоров трещиноватости. Для верификации этого признака была проведена специальная повторная обработка данных площадных сейсмических наблюдений в окрестности двух скважин, в которых был выполнен мониторинг трещиноватости с помощью специального опускаемого оборудования (пластовый микросканер FMS). На рис. 5 приведено сравнение азимутального распределения интенсивности рассеянных волн и показаний микросканера. Как видно, наблюдается удовлетворительное совпадение получаемых результатов, что

свидетельствует о перспективности применения данной методики для определения структуры коридоров трещиноватости по данным поверхностных сейсмических наблюдений.

Таким образом, благодаря использованию высокопроизводительных



Азимутальное распределение количества трещин (FMS)



Азимутальное распределение энергии рассеянных волн

Рис. 5.

Сравнение азимутальной изменчивости количества трещин (микросканер) и амплитуды рассеянных волн

вычислительных систем с параллельной архитектурой 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, включая возникновение рассеянных волн. Уже на самом первом этапе изучения этих процессов была обнаружена весьма тонкая особенность рассеянных волновых полей, на основе которой был предложен и верифицирован на реальных данных критерий оценки ориентации коридоров трещиноватости, контролирующей фильтрационные свойства месторождений.

Данное исследование выполнено при поддержке РФФИ (проекты 08-05-00265, 10-05-00233, 11-05-00947 и 11-05-12022-офи), гранта МК-47.2011.5 Президента РФ для поддержки молодых ученых-кандидатов наук (Лисица В.В.), ООО «РН-КрасноярскНИПИнефть» (Красноярск, Россия) и TOTAL SA (По, Франция). Мы искренне благодарны специалистам Новосибирского отделения ЗАО А/О Intel за консультации по вопросам, связанным с использованием процедур MPI I/O и преодолению проблем адресации в рамках версии MPI, использующих ILP-64.

Отладка программ и численные эксперименты проводились на вычислительных мощностях Сибирского суперкомпьютерного центра СО РАН (Новосибирск), Межведомственного суперкомпьютерного центра РАН и суперкомпьютерного комплекса МГУ — «Чебышев» и «Ломоносов».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Самарский А.А. Теория разностных схем. – М.: Наука, 1977.
2. Lisitsa V., Reshetova G., Tcheverda V. Finite-difference algorithm with local time-space grid refinement for simulation of waves // Computational geosciences. – 2012. – v. 16, 39. – 54. – Doi 10.1007/s10596-011-9247-1, 2012.
3. Kostin V.I., Lisitsa V.V., Reshetova G.V., Tcheverda V.A. Simulation of Seismic Waves Propagation in Multiscale Media: Impact of Cavernous/Fractured Reservoirs // Kristján Jónasson (ed.): Applied Parallel and Scientific Computing, 10th International Conference, PARA 2010, Reykjavík, Iceland, June 6–9, 2010, Proceedings, Part I, LNCS vol. 7133, Springer, Heidelberg, 2012. – Pp. 54–64.