



Кудряшов И.Ю., [Максимов Д.Ю.](#)

Моделирование задач  
многофазной  
многокомпонентной  
фильтрации на  
многопроцессорных  
вычислительных комплексах

**Рекомендуемая форма библиографической ссылки:** Кудряшов И.Ю., Максимов Д.Ю. Моделирование задач многофазной многокомпонентной фильтрации на многопроцессорных вычислительных комплексах // Препринты ИПМ им. М.В.Келдыша. 2009. № 68. 25 с. URL: <http://library.keldysh.ru/preprint.asp?id=2009-68>

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК  
ОРДЕНА ЛЕНИНА  
ИНСТИТУТ ПРИКЛАДНОЙ МАТЕМАТИКИ  
имени М. В. КЕЛДЫША

И. Ю. Кудряшов, Д. Ю. Максимов

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗАДАЧ  
МНОГОФАЗНОЙ  
МНОГОКОМПОНЕНТНОЙ  
ФИЛЬТРАЦИИ  
НА МНОГОПРОЦЕССОРНЫХ  
ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ  
КОМПЛЕКСАХ**

Москва 2009

*И. Ю. Кудряшов, Д. Ю. Максимов*, Моделирование задач многофазной многокомпонентной фильтрации на многопроцессорных вычислительных комплексах.

**Аннотация.** В работе затрагиваются вопросы, проблемы и решения, связанные с разработкой версии гидродинамического симулятора для вычислительных комплексов с параллельной архитектурой, предназначенного для расчёта гигантских моделей нефтегазовых месторождений, размеры которых выходят далеко за рамки возможностей обычных персональных компьютеров<sup>1</sup>.

*I. Yu. Kudryashov, D. Yu. Maksimov*, Simulation of multi-phase multi-component filtration problems using multiprocessor systems.

**Abstract.** Issues and solutions are considered regarding development of reservoir simulation program for parallel computer systems for calculating huge oil-gas field models of sizes which are far beyond capabilities of normal workstations.

## Содержание

Введение.....	3
Необходимость суперкомпьютерного моделирования в нефтегазовой отрасли.....	4
Эффективность, ускорение, масштабируемость.....	5
Обзор вычислительных систем.....	8
Особенности параллельных алгоритмов решения задач подземной фильтрации.....	9
Неравномерность загрузки.....	9
Решение систем линейных уравнений.....	11
Оптимальное разбиение.....	12
Тестирование алгоритма оптимального разбиения.....	14
Другие методы ускорения.....	21
Вопросы визуализации.....	22
Практическое применение.....	23
Заключение.....	24
Литература.....	25

<sup>1</sup> Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект 09-01-00823).  
При подготовке работы использовалась вычислительная система МВС-100К в МСЦ РАН.

## **Введение**

Исторический опыт человечества начиная с египетских пирамид свидетельствует о том, что за счет параллельно выполняемых действий можно достигнуть существенного выигрыша в производительности. Наиболее ярко это отразилось в современной вычислительной технике, где параллельные вычисления стали доминирующей парадигмой.

Уровень развития вычислительной техники сегодня во многом определяет темпы технического прогресса и успехи в решении фундаментальных научных задач, среди которых общепризнанным является класс проблем Grand challenges: это фундаментальные научные или инженерные задачи с широкой областью применения, эффективное решение которых возможно только с использованием мощных (суперкомпьютерных) вычислительных ресурсов, с производительностью сотен Gflops ( $\sim 10^{12}$  операций в секунду) и выше. Одна из таких задач — моделирование оптимальной стратегии разработки месторождений нефти и газа, создание и использование постоянно действующих геолого-технологических моделей для управления разработкой месторождений нефти и газа, требующих обработки огромных массивов информации.

Все мировые нефтегазовые компании в той или иной мере уже используют численное моделирование при разработке новых месторождений и определении оптимального метода извлечения ресурсов. Нефтегазовая отрасль сейчас становится одним из лидеров по потреблению высокопроизводительных ресурсов — рост вычислительных мощностей в этом сегменте составляет до 100% в год. В общей сложности 10% суперкомпьютеров из мирового рейтинга ТОП 500 используются для задач геофизики. Роль высокопроизводительных вычислений в нефтегазовом секторе растет с каждым годом, ведь средние показатели выработки месторождений снижаются, а требования к эффективности их использования становятся все более жесткими из-за вовлечения в разработку всё более трудноизвлекаемых запасов.

Успех поисково-разведочных работ повышается за счет высокопроизводительной обработки и интерпретации сейсмических данных, а эффективность недропользования увеличивается за счет высокоточного гидродинамического моделирования. В частности, на старых, истощенных месторождениях эти методы позволяют существенно повысить коэффициент нефтеизвлечения. По данным энергетического консалтингового агентства CERA (США), в ближайшие 3–5 лет использование суперкомпьютерных расчетов обеспечит:

- Рост количества добываемой из месторождения нефти на 2–7%;
- Сокращение расходов на нефтедобычу на 10–25%;
- Повышение нормы выработки на 2–4%.

В связи с этим доступ к суперкомпьютерным мощностям и эффективные математические методы являются залогом конкурентного преимущества компании-разработчика и может стать ключом к лидерству на рынке.

## **Необходимость суперкомпьютерного моделирования в нефтегазовой отрасли**

Геологические модели месторождений, получаемые на основе каротажных исследований, из сейсмических данных, путём геостатистического моделирования, на 1–2 порядка детальнее, чем осреднённые гидродинамические модели, на которых проводится расчёт. К примеру, типичные геологические модели имеют размер до десяти миллионов ячеек, тогда как размер стандартной гидродинамической модели составляет порядка нескольких сотен тысяч ячеек. Осреднение моделей, также называемое ремасштабированием, нельзя проводить в сколь угодно больших масштабах: на определённом этапе укрупнения картина течения перестаёт отражать реальную ситуацию и полностью искажается.

В последнее время начали создаваться гигантские гидродинамические модели, размеры которых выходят далеко за рамки возможностей обычных персональных компьютеров. Модель, описывающая месторождения со сложным геологическим строением, разломами, трещиноватостью, может быть задана на сложной нестыкованной сетке и содержать несколько тысяч скважин. История разработки месторождения может насчитывать 20, 50 лет и более. В качестве примера можно назвать модель Талинской площади Красноленинского месторождения, проведение качественного построения которой на обычном компьютере за приемлемое время не представляется возможным.

Немаловажным моментом также является необходимость расчёта усложнённых моделей, в которых требуется учесть ряд специфических физических эффектов: это моделирование газоконденсатных месторождений, композиционное моделирование со многими компонентами, моделирование разработки высоковязких нефтей термальными методами, моделирование режимов течения в скважинах и трубопроводах и др.

Общим в гидродинамическом моделировании всех месторождений независимо от масштаба является проведение многочисленных расчётов адаптации модели — настройке модели на историю разработки, проведение вариантных расчётов на прогноз для оптимизации добычи. Наиболее активно развивающимся подходом в этом направлении является использование автоматической и полуавтоматической адаптации с применением генетических и эволюционных алгоритмов.

Таким образом, для широкого класса задач различной сложности получение результата за разумное время требует применения высокоэффективных вычислительных систем и соответствующего программного обеспечения.

Необходимость проведения ресурсоёмких расчётов за короткое время приводит к необходимости распараллеливания — ускорения решения за счет разбиения на подзадачи с одновременным их выполнением в параллельном режиме в виде нескольких процессов. В задачах гидродинамического

моделирования большая сложная модель разбивается на множество небольших, рассматриваемых каждая в своей подобласти. При этом каждая подобласть рассчитывается одновременно независимо и связно — параллельно — в своём процессе (рис. 1).

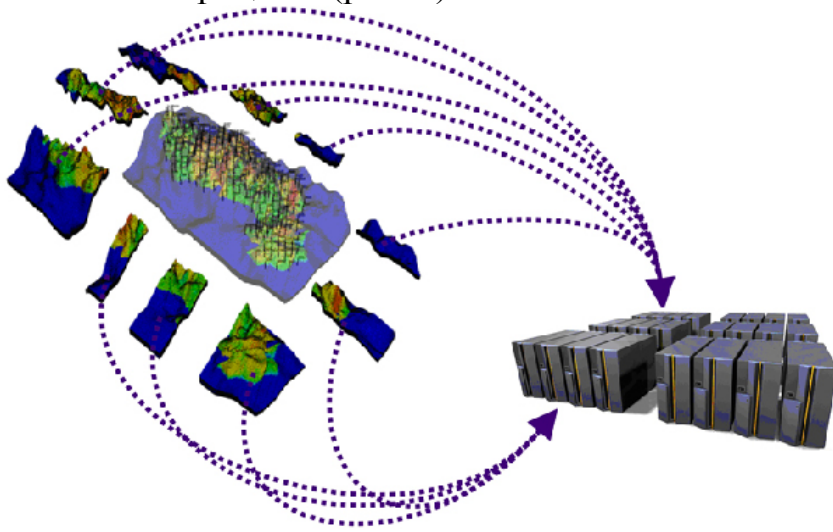


Рис. 1. Ускорение расчетов моделей месторождений нефти и газа достигается за счет распределения вычислений между узлами суперкомпьютерных вычислительных систем

### **Эффективность, ускорение, масштабируемость**

Основными параметрами, характеризующими параллельный алгоритм, являются ускорение и эффективность [1]. Параметр *ускорения* показывает, насколько параллельный алгоритм выполняется быстрее, чем последовательный:

$$S_p = \frac{T_1}{T_p}.$$

Здесь  $p$  — число процессов,  $T_1$  — время выполнения последовательного алгоритма,  $T_p$  — время выполнения параллельного алгоритма на  $p$  процессах.

*Эффективность* определяется формулой

$$E_p = \frac{S_p}{p}.$$

Далеко не всякую задачу можно разбить на произвольное число совершенно независимых подзадач, что определяет отличие получаемого ускорения от идеального. Среди причин замедления отметим следующие:

1. Изменённый алгоритм требует дополнительных операций, связанных с накладными расходами на выполнение параллельного алгоритма. Сюда входит, в частности, дополнительное время, связанное с реализацией обменов между процессами. В системах с распределённой памятью оно включает задержки и сетевые ограничения системы передачи сообщений. В системах с общей памятью необходимо учесть подготовительные участки перед

распараллеленными циклами и задержки при одновременном доступе процессов к памяти. Часто встречаются фрагменты задач, принципиально не выполняемые параллельно. Почти всегда для решения отдельных подзадач необходимо организовать их взаимодействие друг с другом (в параллельных вычислениях такой процесс называется синхронизацией).

2. Важной проблемой при распараллеливании алгоритмов является доля кода, которая не поддается параллелизации. Это является критичным, поскольку время выполнения такой части программы не может быть снижено путём увеличения процессорных мощностей и определяет теоретический предел возможного ускорения программы, который носит название закона Густафсона [2]. Пусть имеется  $p$  процессов, а также известно, что доля от общего объема вычислений, получаемая исключительно последовательными расчетами, составляет  $\alpha$ , а  $1-\alpha$  может быть распараллелена идеально, тогда предел ускорения выражается формулой  $S_p = \frac{1}{\alpha + (1-\alpha)/p}$ .

Более общим соотношением является закон Амдала [3]:

$$S_p = \frac{1}{\sum_{k=1}^n \frac{\alpha_k}{S_k}}$$

Здесь  $\alpha_k$  — доля кода, которая может быть ускорена или замедлена,  $S_k$  — множитель ускорения или замедления,  $k$  — номер условно разделённого участка кода.

Степень близости получаемого при расчетах ускорения к теоретическому пределу (верхняя кривая, рис. 2) говорит об эффективности параллельного алгоритма. Можно видеть, что даже незначительная доля алгоритма, не поддающаяся распараллеливанию, существенно снижает максимально достижимое ускорение.

3. Замедление происходит также при неравномерной загрузке, когда производительность каждого из процессов в точности неодинакова (например, из-за использования в кластере узлов с различными процессорами), см. рис. 3. Важно, чтобы подзадачи обладали примерно одинаковой сложностью (т.е. требовали для своего решения примерно одинакового количества ресурсов). Соблюдение последнего правила называется балансировкой нагрузки.

Решение указанных проблем является основной задачей при разработке параллельного программного обеспечения.

В параллельных вычислениях также выделяют понятие *масштабируемости*, характеризующее способность системы увеличивать свою производительность при добавлении ресурсов. Система называется масштабируемой, если она способна увеличивать производительность пропорционально дополнительным ресурсам. Масштабируемость можно

оценить через отношение прироста производительности системы к приросту используемых ею ресурсов. Чем ближе это отношение к единице, тем лучше.

Следует отметить, что масштабируемость зависит как от алгоритма, так и от входных данных. В частности, масштабируемость при моделировании разработки месторождений обычно зависит от размеров и сложности модели и часто снижается при использовании стандартных подходов. Важным критерием, определяющим масштабируемость задачи расчёта модели, является баланс загрузки вычислительных мощностей, на который непосредственно влияет разбиение области моделирования на расчетные подобласти.

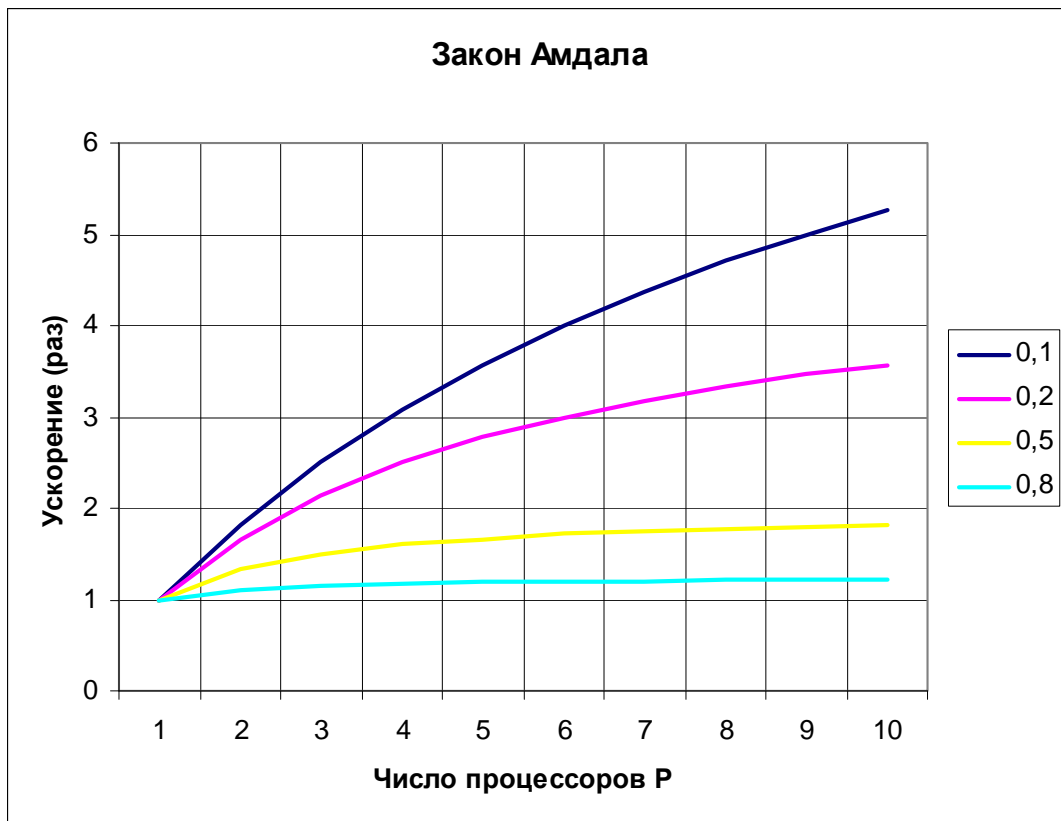


Рис. 2. Иллюстрация к закону Амдала

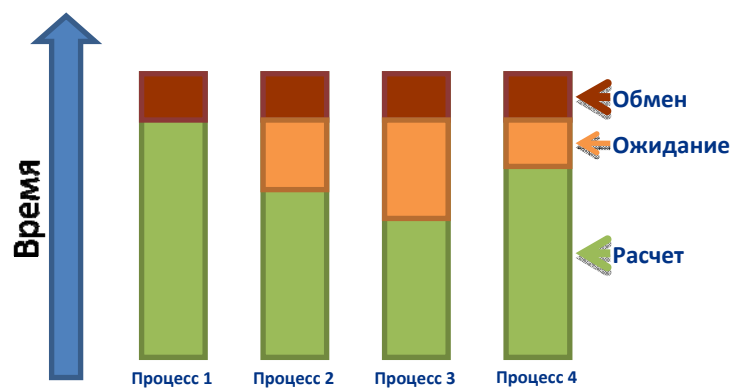


Рис. 3. Балансировка загрузки



## Обзор вычислительных систем

Параллельные вычислительные системы можно разделить на системы с общей памятью и системы с распределенной памятью (табл. 1). Системы с общей памятью хороши тем, что доступ к данным соседней подзадачи можно осуществить непосредственно. Это позволяет избежать дополнительных расходов, связанных с пересылкой информации по локальной сети. Примером систем с распределённой памятью являются кластеры — несколько компьютеров объединенных друг с другом через локальную сеть. Производительность такой системы сильно зависит от типа и качества используемой коммуникационной среды. Сегодня это могут быть Ethernet, Myrinet, или сравнительно новая и развивающаяся InfiniBand.

Общая память	Распределённая память
Сервер	Кластер
8 процессорных ядер, ОЗУ 16 Гб	128 процессорных ядер, ОЗУ 128 Гб и выше
Нет прямых обменов	Есть прямые обмены
OpenMP — директивы компилятора	MPI — функции обмена

Табл. 1. Характеристики стандартных параллельных вычислительных систем

Итак, кластер — набор связанных через сетевой интерфейс узлов, содержащих, как правило, два или больше многоядерных процессора и имеющих общую память. Взаимодействие между узлами кластера осуществляется путём организации обменов данными. Как правило, для узлов кластера организуется единый дисковый массив. При отсутствии серьёзных задержек при одновременном доступе к памяти наиболее оптимально распределять по одному параллельному процессу на ядро.

Представители систем с общей памятью — обычные рабочие станции с современными многоядерными процессорами. При проведении расчетов используют рабочие станции повышенной производительности с увеличенными ресурсами, их в дальнейшем будем называть серверами.

Каждый тип систем имеет свои преимущества при проведении расчётов. Модель, если она подойдёт для сервера по ресурсам памяти, пойдёт на счет с той скоростью, с которой позволят процессорные ресурсы.

Использование кластеров — систем с распределённой памятью — позволяет полностью преодолеть ограничения на размер памяти и производительность персонального компьютера и провести расчёт модели практически неограниченных размеров.

В настоящий момент стандартом де-факто среди инструментов обмена, предназначенных для вычислительных систем с распределенной памятью, является библиотека MPI, которая имеет реализации под платформы Windows и Linux. Она представляет собой набор процедур для пересылки данных и синхронизации. Использование в качестве функций обмена стандарта MPI позволяет скомпилировать и запустить программу как на кластере, так

и машинах, объединённых в обычную локальную сеть, или просто отдельных рабочих станциях. Таким образом, программы, написанные на MPI, являются универсальными, однако для класса систем с общей памятью более подходят специальные средства распараллеливания, такие как директивы компилятора OpenMP.

Как уже упоминалось ранее, геофизические задачи (в частности, обработка данных сейсморазведки) являются наиболее ресурсоемкими: для разработки одного месторождения нефти или газа нужно обработать информацию объемом не менее нескольких терабайт. Оптимальным решением в данном случае является использование для расчетов кластерных систем, на основе которых сейчас строится большинство суперкомпьютеров. Пример такой системы — суперкомпьютер «СКИФ» в НИВЦ МГУ с пиковой производительностью 60 TFlops, ставший на момент выхода в 2007 г. самым мощным в странах СНГ и Восточной Европы и занявший 22 место в мировом списке Топ-500, был построен именно на основе кластерных технологий.

Помимо «СКИФ» МГУ в России сейчас доступны другие современные мощные кластеры научных институтов или кластеры сервисных компаний. Помимо кластерных комплексов весьма эффективно могут быть использованы и многоядерные системы с общей памятью для расчетов средних и небольших серий моделей.

### ***Особенности параллельных алгоритмов решения задач подземной фильтрации***

#### **Неравномерность загрузки**

Как известно, гидродинамическая модель задаётся на трёхмерной регулярной, вообще говоря, нестыкованной сетке (рис. 4). Часть ячеек может соответствовать непроницаемой породе, в этом случае они объявляются неактивными и исключаются из рассмотрения, в результате чего число содержательных ячеек сокращается на 10%–80 %. Вместе с тем, современные модели, получаемые путём всё более точных измерений, содержат всё более подробные расчётные сетки.

Важной задачей при разработке параллельного программного обеспечения является выполнение основных критериев правильности реализации распараллеливания вычислительного алгоритма — балансировки нагрузки, а также масштабируемости, влияющих на максимально возможное ускорение расчётов.

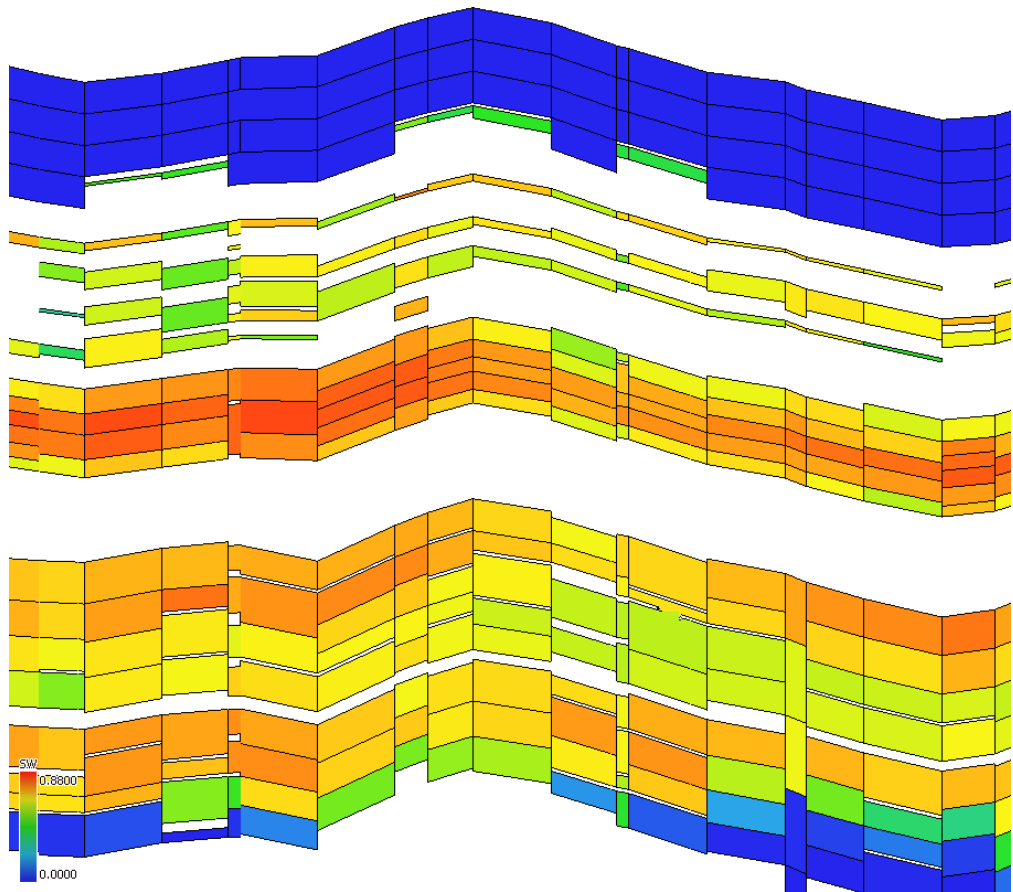


Рис. 4. Пример модели. Вертикальный разрез нестыкованной сетки

В отличие от ряда инженерно-физических задач, задачи расчёта фильтрации в нефтегазоносных месторождениях характеризуются распределением активных ячеек, в которых и содержится подвижный флюид — вода, нефть, газ. Данный факт, не играющий роли на однопроцессорной машине, приводит к весьма нетривиальным проблемам при переходе на многопроцессорные системы.

Параллельные вычисления предполагают разбиение заданной области на расчётные подобласти. В силу того, что, как правило, скважины (рис. 5) преимущественно располагаются вертикально или почти вертикально, расчётная сетка разбивается на прямоугольные в плане участки. На границах между процессами устраивается обмен расчётными данными. Очевидно, необходимо разделить область так, чтобы как можно более равномерно распределить активные ячейки и тем самым оптимально распределить загрузку ядра процессора. Очень важно также равномерно распределить обмены между процессами, также учитывая распределение активных ячеек. Сразу отметим, что возможность сразу и автоматически оптимально разбить область и использовать разбиение на произвольном числе подобластей создаёт предпосылки для масштабируемости программы. Как показывают практические расчёты, при правильном разбиении области можно достичь приемлемого баланса загрузки задачи для произвольного числа вычислительных ядер.

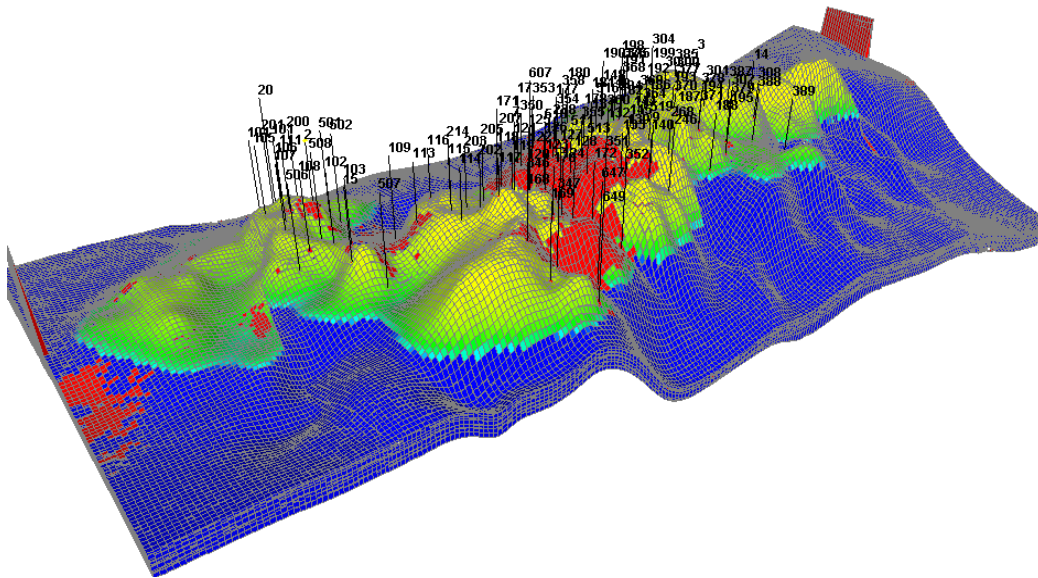


Рис. 5. Пример модели. Скважины отмечены вертикальными линиями  
В качестве показателя равномерности загрузки можно ввести параметр

$$B = \frac{N_A}{P \max N_{Ai}} 100\%,$$

где  $N_A$  — общее число активных ячеек,  $N_{Ai}$  — число активных ячеек в подобласти,  $P$  — число процессов. Число  $B$  представляет собой максимальное ускорение за счёт параллельности, которое можно достичь при данном разбиении. Например, если баланс загрузки 80% для задачи на пять процессов, то максимальное ускорение за счёт параллельности составит не больше 4, если не учитывать ускорение, даваемое кэш-памятью процессора. На самом деле реальное ускорение будет существенно меньше. Поэтому необходимо следить за этим параметром, особенно при вычислениях на кластерах с «неоднородными» узлами.

### Решение систем линейных уравнений

Одним из наиболее трудоемких этапов при расчете является решение систем линейных алгебраических уравнений (СЛАУ), возникающих при аппроксимации уравнений фильтрации. Ряд приемов, таких как методы типа прогонки, каскадные методы, весьма плохо распараллеливаются. В целом эффективность параллельного алгоритма решения СЛАУ ухудшается из-за того, что адаптированный алгоритм решения может потребовать больше итераций, чем последовательный, при заданной точности.

Получаемая после аппроксимации уравнений матрица является разреженной и состоит из 7-, 15- или 27 диагоналей для каждой фазы. На рис. 6 приведен вид матрицы для задачи при наличии скважин. Имеются семь диагоналей, состоящих в трёхфазном случае из блоков  $3 \times 3$ . Диагональную структуру нарушают блоки, соответствующие ячейкам со скважинами — связным наборам ячеек, как правило, вертикальным. Условие постоянного дебита скважины означает введение дополнительной связи между ячейками данной скважины, что приводит к увеличению заполненности матрицы.

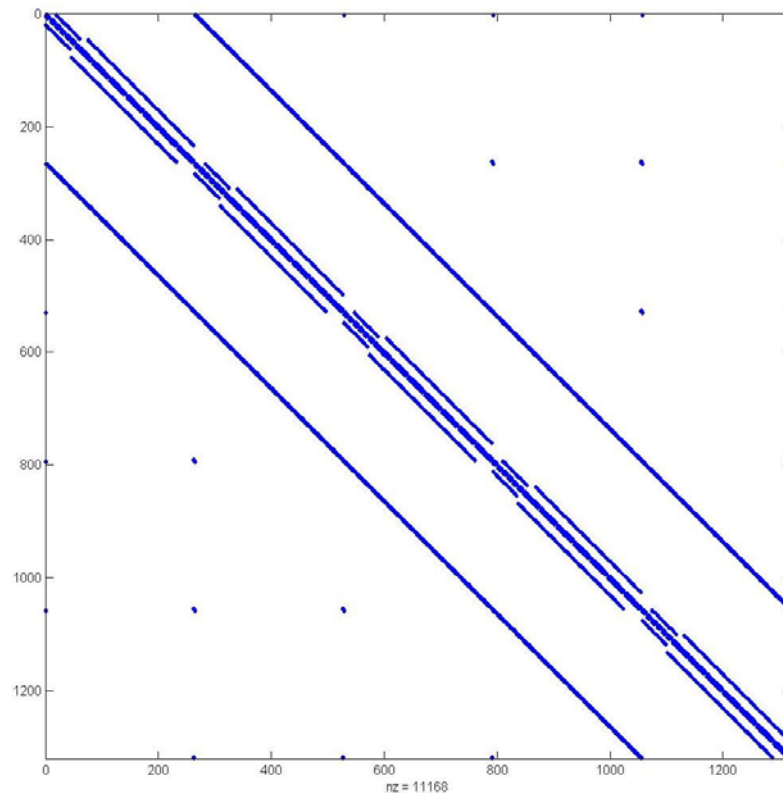


Рис. 6. Характерный вид матрицы

Также существенно искажает структуру матрицы наличие неактивных ячеек, дополнительно могут быть наложены нелокальные связи за счёт ограничений на дебит группы скважин в наземных сетях, наличия аквифера — водоносного пласта на границе резервуара.

Вместе с тем ряд итерационных методов допускает вполне приемлемое по эффективности распараллеливания например, алгоритм бисопряжённых градиентов со стабилизацией в паре с предобуславливателем типа неполных (incomplete) LU-разложений, рассматриваемых для своей подматрицы процесса (domain decomposition). Среди ILU-разложений, в свою очередь, наиболее пригодны ILUT, ILUTP, описанные Й. Саадом [4].

Как показывают проведенные расчеты, дополнительная нагрузка на алгоритм в распараллеленном варианте может варьироваться в зависимости от сложности модели, но в целом замедление счёта оказывается приемлемым.

### **Оптимальное разбиение**

Исследовательские расчеты показали, что основным параметром, влияющим на максимально возможное ускорение расчетов, является равномерность и эффективность загрузки вычислительных мощностей узлов [5]. Правильной балансировке нагрузки препятствует сильная неравномерность распределения активных ячеек.

На рис. 7. показан пример разбиения некоторой модели, которое можно использовать при расчёте на симуляторе Eclipse 300. Очевидно, что даже если оптимальное разбиение будет подобрано, его нужно будет перестраивать для любых других моделей, при изменении числа расчётных подобластей или

в связи с серьезным изменением параметров модели. Также очевидно, что в силу выбранного способа разбиения число получаемых подобластей не может быть произвольным. Симулятор Eclipse 100 (Schlumberger) поддерживает только простое разбиение на одинаковые части по одному из направлений.

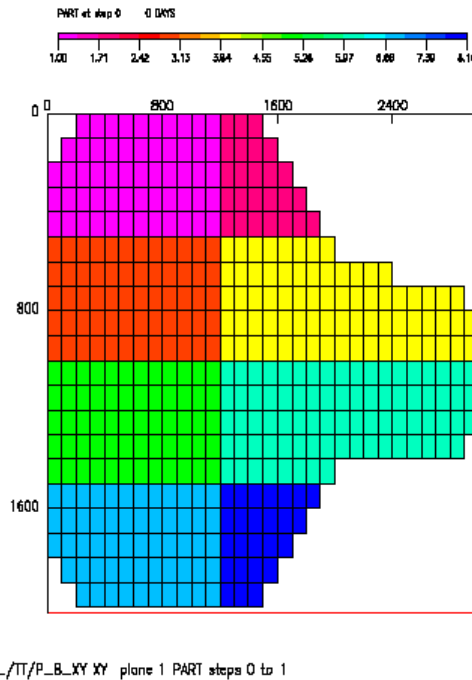


Рис. 7. Простое разбиение по осям в Eclipse

Для преодоления таких особенностей авторами реализован и апробирован алгоритм оптимального, или рационального, разбиения расчетной области на произвольное число подобластей указанных выше типов.

Алгоритм создания разбиения с оптимальным заполнением выполняется рекурсивно, учитывая следующие требования:

- равномерное распределение активных ячеек по процессам, поскольку каждая область обрабатывается индивидуальным ядром процессора;
- максимальное число внешних граничных элементов по каждому блоку должно быть минимальным;
- ячейки каждой скважины должны по возможности попасть в одну подобласть.

Рациональное разбиение автоматически позволяет достичь оптимальной загрузки вычислительных мощностей за счет равномерного распределения активных ячеек по процессам, при котором подзадачи будут обладать примерно одинаковой сложностью и требуют для своего решения примерно одинакового количества ресурсов, что говорит о балансировке нагрузки.

На рис. 8 и 9 приведены примеры получаемого разбиения на подобласти для реальных моделей, вид сверху. Показана плотность активных ячеек.

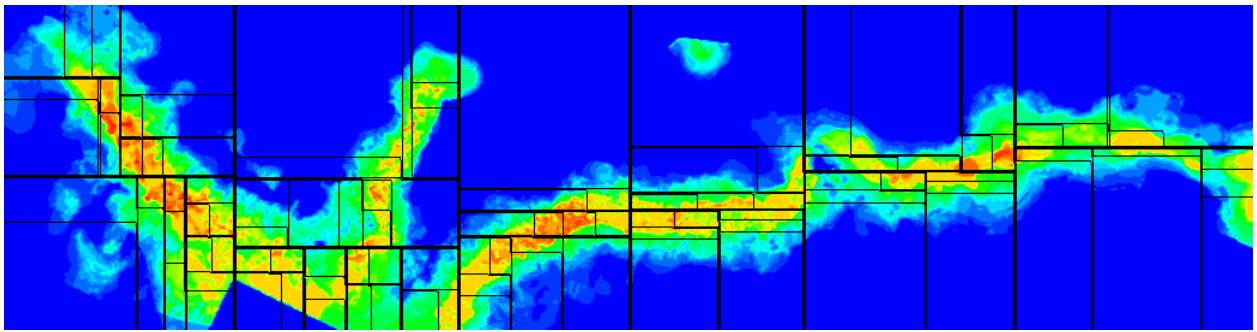


Рис. 8. Пример разбиения на 108 процессов

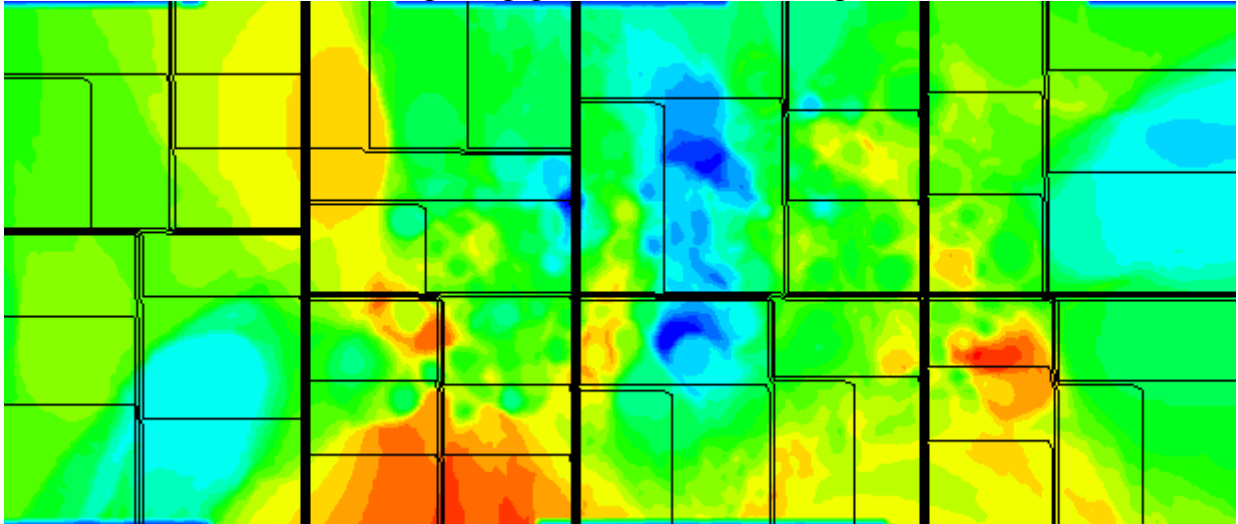


Рис. 9. Пример разбиения на 48 процессов

В зависимости от задачи итоговое время расчёта существенно сокращается по сравнению с простым равномерным разбиением.

Во многом за счёт алгоритмов рационального разбиения на произвольное число расчётных подобластей в параллельной версии симулятора эффективно сокращается время счёта задачи при увеличении числа используемых узлов, что говорит о хорошей масштабируемости программы. Стоит отметить, что таким свойством обладают не все параллельные симуляторы.

Ниже на примере симулятора МКТ будет показано преимущество, получаемое при использовании оптимального разбиения модели.

### ***Тестирование алгоритма оптимального разбиения***

Исследования работоспособности и эффективности алгоритма проводились на многоядерных серверах, кластерах научных организаций, системах, предоставленных для совместной оптимизации параллельной версии симулятора МКТ производителями оборудования, как российскими, так и зарубежными, в том числе Intel и HP.

Это 1-2-4-ядерные 64-битные процессоры. В большинстве систем используются процессоры Intel Xeon, реже AMD Opteron, Intel Itanium 2. На ядро отводится один-два Гб памяти. Практически на всех кластерах используется интерконнект (сетевой интерфейс) InfiniBand, хотя в целом сетевой интерфейс Myrinet обеспечивает удовлетворительные результаты.

Расчёты проводились на кластерах ИПМ им. М. В. Келдыша РАН (ИПМ), кластере компании Hewlett-Packard (HP), на кластерах (Endeavor и Atlantis), предоставленных корпорацией Intel, на кластере в г. Томске, кластере компании Т-Платформы. Основные характеристики этих систем на момент тестирования представлены в табл. 2.

<i>Кластер</i>	<i>Всего узлов</i>	<i>Тип процессора</i>	<i>Число процессоров в узле/ ядер в процессоре</i>	<i>Частота, ГГц</i>	<i>Оперативная память (на узел), Гб</i>	<i>Сеть</i>	<i>Всего ядер</i>
<b>ИПМ</b>	64	AMD Opteron 248	2 (1)	2,2	2	Myrinet	128
<b>ТПУ (Томск)</b>	24	Intel Xeon 5150 Woodcrest	2 (2)	2,66	8	InfiniBand	96
<b>HP</b>	19 (15/4)	Intel Xeon 5160 Irwindale/ Woodcrest	2 (1)/2 (2)	3,6/3,0	4/8	Myrinet / InfiniBand	46
<b>Intel Atlantis</b>	70	Intel Xeon X5355 Clovertown	2 (4)	2,67	16	InfiniBand	560
<b>Intel Endeavor</b>	256	Intel Xeon 5160 Woodcrest	2 (2)	3,0	8	InfiniBand	1024
<b>Т-Платформы</b>	9	Intel Xeon 5472 Harpertown	2 (4)	3,0	8	InfiniBand	72

Табл. 2. Характеристики кластеров

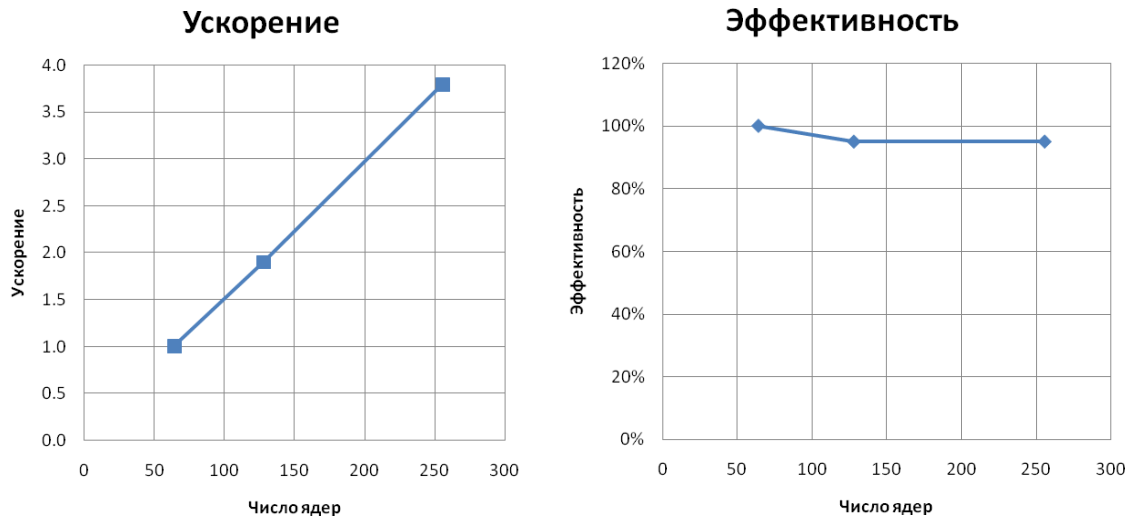
Наряду с прототипами моделей реальных месторождений при тестировании использовалась «искусственная» модель Q5, для которой имелась возможность произвольно варьировать ее размеры. Эта модель была использована для оценки максимальной и оптимальной загрузки узла. Ориентировочно для расчета модели с одним миллионом ячеек симулятору МКТ требуется порядка 1 Гб оперативной памяти, однако для сложных моделей это число может возрасти. При распределении модели можно рассчитывать на нормальную работу примерно с 3 млн. ячеек на 2 ядрах, при использовании 2 Гб памяти на ядро. При большей загрузке счет идет крайне медленно.

На графиках представлены результаты расчёта модели Q5 с числом ячеек 64 млн. на кластере Intel Endeavor. На каждом ядре запускается по одному процессу. Графики показывают очень высокую эффективность, что в первую очередь связано с небольшим количеством скважин в модели. За счёт простой геометрии, стыкованной сетки, эффективность счёта на такой модели составляет более 95 %.

Число ядер	64	128	256
Время, мин	19	10	5



Графики ускорения и эффективности на основе полученных данных следующие:



При запуске этой модели на 32 ядрах задача считается за 56 минут, а не 40 минут, как можно было ожидать из таблицы, поскольку количества памяти на один процесс оказывается недостаточно.

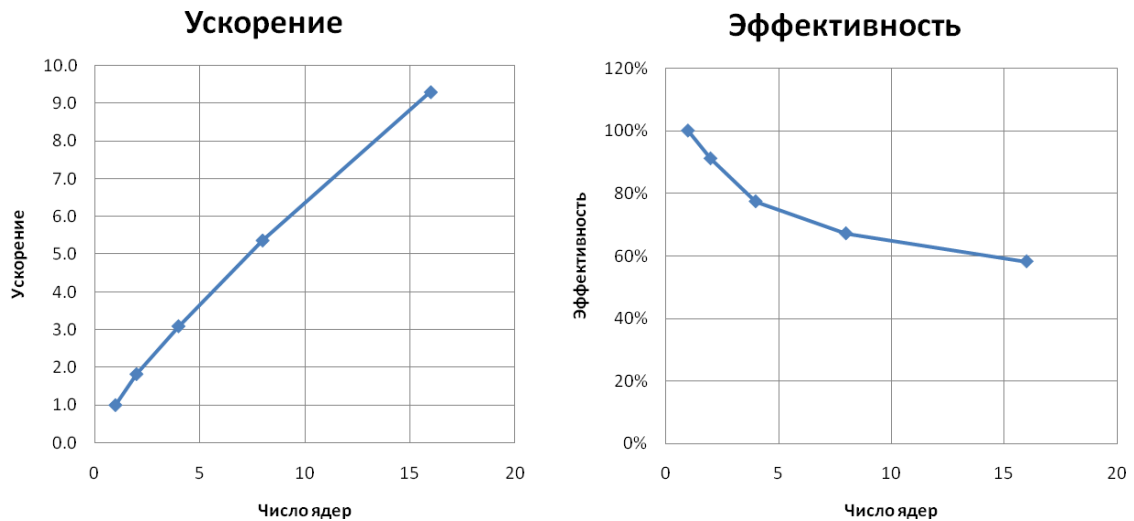
На кластере ТПУ была успешно рассчитана модель Q5 на 192 млн. активных ячеек при числе ядер — 96, таким образом, на ядро было отведено по 2 млн. ячеек.

Был также проведён тест, в котором число ячеек увеличивалось пропорционально числу используемых ядер. Были запущены модели на 32, 64, 128 и 256 млн. ячеек на 32, 64, 128 и 256 ядрах соответственно, так что загрузка процессора остаётся неизменной в смысле числа ячеек. С изменением числа ядер с 32 до 256 время счёта увеличивается не более чем на 40%.

Перейдём к рассмотрению моделей реальных месторождений, в которых начинает играть роль наравномерность распределения активных ячеек. Условно модели обозначим буквами S, T и V.

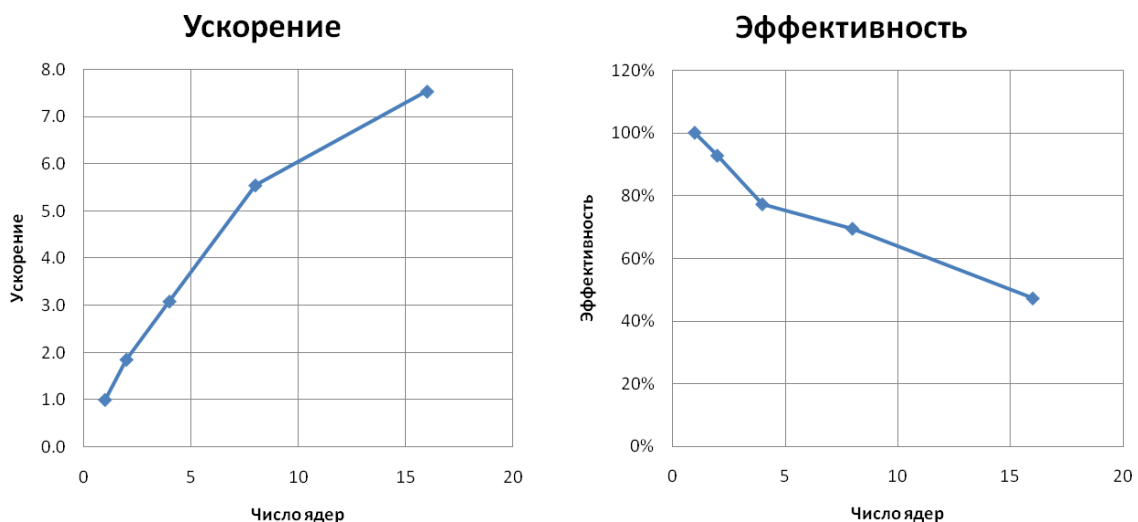
Ниже представлены времена расчёта модели S на кластере ИПМ им. М. В. Келдыша РАН. История разработки — 25 лет, 6 скважин, 21489 активных ячеек.

Число ядер	1	2	4	8	16
Время, с	1219	669	394	227	131



Времена расчетов модели S на кластере компании HP представлены ниже.

Число ядер	1	2	4	8	16
Время, с	988	533	365	178	131



На более мощном кластере HP времена счета заметно меньше. Однако предел масштабируемости достигается гораздо быстрее, при этом основные временные задержки связаны с сетевыми пересылками.

В общем случае существует ограничение, определяемое скоростью современных сетевых интерфейсов: при числе ячеек порядка 10 тыс. на процесс и менее время счета моделей при увеличении количества используемых ядер перестает уменьшаться и, наоборот, начинает увеличиваться. С другой стороны, для сложных месторождений можно получить большое ускорение при увеличении числа используемых ядер, особенно с использованием оптимального разбиения.

Например, для модели S время расчета на 16 ядрах с использованием стандартного разбиения, при котором область делится равномерно вдоль

одной из осей  $x$  или  $y$ , составило 208 секунд, при использовании оптимального разбиения — 129 секунд.

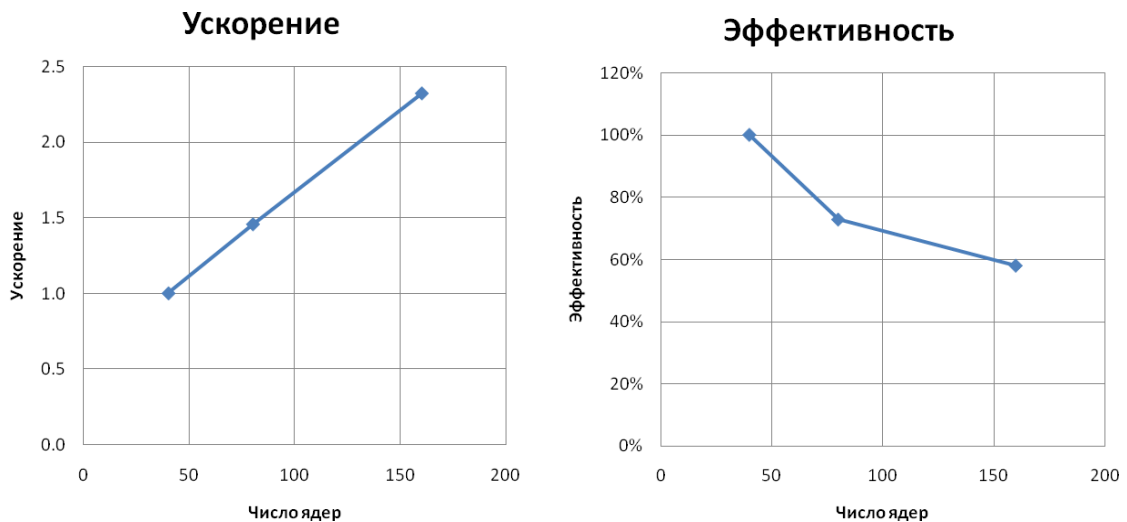
Практика показывает, что модели с небольшим числом ячеек, которые зачастую применяются при испытаниях, весьма непоказательны в плане демонстрации эффективности счёта симулятора: несмотря на высокую скорость процессоров, время на обмены нивелирует любое распределение вычислительной нагрузки. Для реального крупного месторождения симулятор МКТ — модель Т — продемонстрировал высокие скоростные показатели.

Ниже приведены результаты расчетов Модели Т. В отличие предыдущей модели, в данной модели работают около пяти тысяч скважин, модель сложная как по числу скважин, так и сложности геометрии. История разработки — 25 лет, 5215 скважин, 824858 активных ячеек. Число активных ячеек в этой модели составляет примерно одну восьмую от общего числа ячеек. Тем не менее, процессорное время существенно больше времени пересылок за счёт сложности задачи, что обеспечивает масштабируемость при увеличении числа узлов.

Также на примере этой модели можно сравнить влияние быстродействия памяти в расчёте на одно ядро.

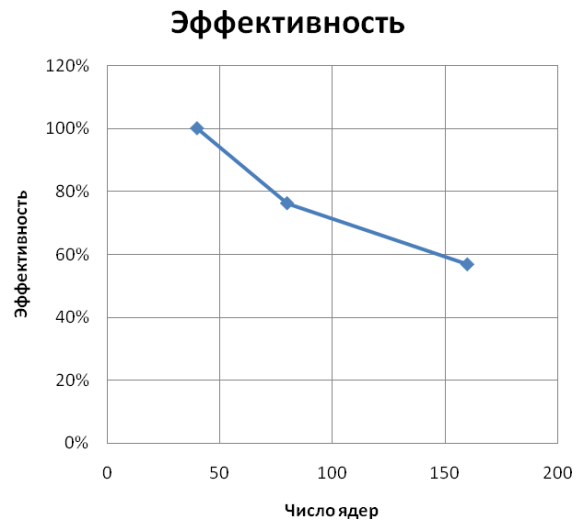
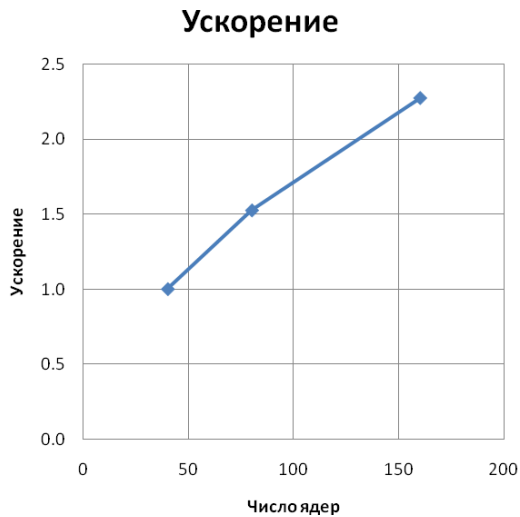
Приведем графики эффективности и ускорения для кластера Atlantis (при этом использовалась только половина ядер в каждом процессоре):

Число ядер	40	80	160
Время, мин	86	59	37



Тот же расчет, но с использованием всех ядер в процессорах, показал следующие результаты:

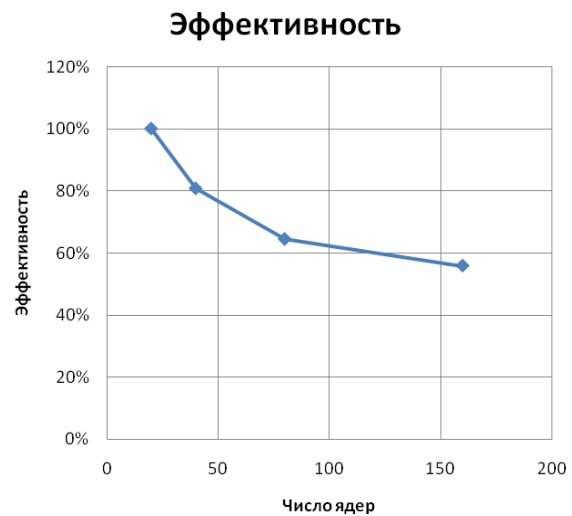
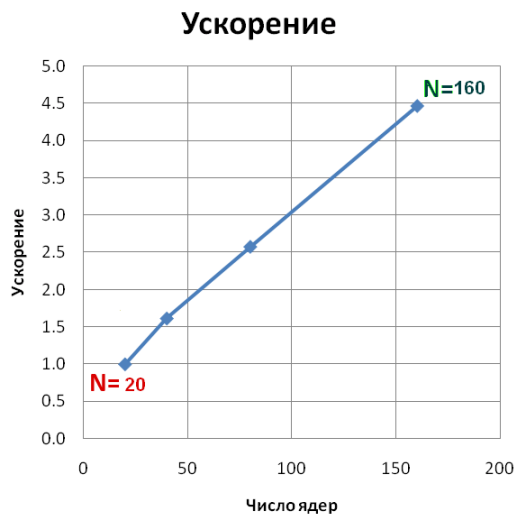
Число ядер	40	80	160
Время, мин	125	82	55



При сравнении графиков видно, что использование только части ядер четырёхядерных процессоров рассматриваемого кластера ускоряет расчеты. Это связано в первую очередь с тем, что в этом случае лучше осуществляется обмен данными по шине памяти процессоров.

Наконец приведём времена счёта этой же модели на кластере Endeavor:

Число ядер	20	40	80	160
Время, мин	134	83	52	30



Времена счёта, в сравнении с кластером Atlantis, соответствуют разнице в частоте ядер процессоров. Кроме того, при увеличении числа задействованных ядер время, требуемое на расчёт, на Endeavor'е уменьшается быстрее.

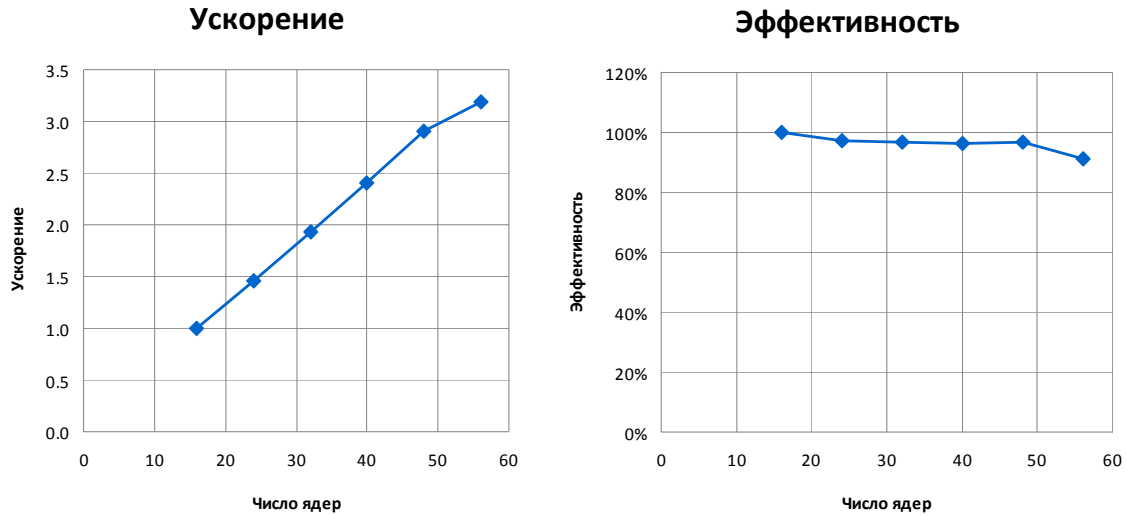
Значительно более высокая скорость доступа к памяти достигнута на новых процессорах Intel архитектуры Nehalem, при этом графики ускорения по одной модели слабо зависят от конфигурации современных кластеров.

В целом можно отметить, что для реальных моделей коэффициент ускорения составляет порядка 1.6. Например, при увеличении числа ядер процессоров в восемь раз мы получаем уменьшение времени счёта в четыре раза и так далее.

На кластере Т-Платформ, была рассчитана модель V. История разработки — 15 лет, 117 скважин, 1.6 млн. активных ячеек. Данная модель геологическая, то есть не проходила процедуру ремасштабирования. Возможность эффективного расчёта неосреднённых моделей является важной в моделировании, поскольку она позволяет минимизировать потери точности, возникающие при загрузлении слоёв модели.

Ниже приведены результаты, полученные при расчете модели V.

Число ядер	1	8	16	24	32	40	48	56
Время, с	1030	291	150	103	77.5	62.4	51.6	47.1



Для данной модели эффективность составила 80%.

Обеспечение равномерности загрузки вычислительных мощностей процессоров необходимо сочетать с обеспечением эффективности загрузки процессоров для данной конфигурации аппаратного обеспечения. Это связано с тем фактом, что при определенном малом количестве ячеек общитываемой подобласти скорость обмена данными между узлами становится естественным препятствием для увеличения скорости расчетов. Существование данного предела необходимо иметь в виду при расчётах критичных по времени задач.

С другой стороны, для месторождения можно определить максимальное эффективное число узлов, что позволит распределить кластер между разными месторождениями при актуализации и мониторинге, расчете геолого-технических мероприятий на единых постоянно действующих геолого-технологических моделях.

Отметим, что для достижения оптимальной производительности соотношения 1 Гб на ядро вполне достаточно, поскольку крупные модели, требующие, соответственно, большого количества памяти, на одном ядре процессора будут рассчитываться значительное время. В целом для узлов имеет смысл оставлять одно ядро под системные процессы для обработки непосредственной передачи данных, что обеспечит значительно более низкую латентность при обменах через интерконнект.

Большие вычислительные мощности позволили проверить возможность расчета очень крупных реальных моделей, в том числе содержащих порядка 1 млрд. ячеек и более 8000 скважин.

Запуски параллельной версии МКТ показали хорошую масштабируемость (с эффективностью от 60 до 80%) больших задач на любое число ядер процессоров, тем самым подтвердив возможность расчета более точных моделей, позволяющих максимально увеличить адекватность моделирования разработки месторождений.

### ***Другие методы ускорения***

Помимо рассмотренных особенностей распараллеливания, существуют другие приёмы ускорения параллельных приложений. Перечислим здесь некоторые из них. Наиболее общим является анализ профиля исполнения задачи, полученного программой-профилировщиком. Это позволяет выявить типичные узкие места в процедурах или медленные операторы (например, оператор типа `trim` языка фортран) и сделать вывод о необходимых изменениях алгоритма для получения ускорения.

Применительно к задачам подземной гидродинамики нужно отдельно рассматривать этапы инициализации и непосредственно расчёта. На этапе инициализации, где большую роль играет последовательный код, в котором значительная часть времени уходит на загрузку данных с диска, эффективно использовать загрузку одним процессом данных в бинарном формате и последующую передачу остальным процессам. Загрузка данных бинарного формата ускоряет чтение в десятки раз.

Расчёт можно также ускорить, зафиксировав процессы на ядре путём указания соответствующих параметров системы запуска задачи.

Важно также располагать процессы на узлах с учётом разбиения, так что процессы, которые часто обмениваются информацией, оказались на одном узле. Тем самым, обмены будут осуществляться в первую очередь через память, а не через сетевой интерфейс.

Отдельные особенности задач нефтегазового моделирования, такие как

- сильнонаклонные и горизонтальные скважины,
- протяжённые трещины гидроразрыва пласта,
- групповые ограничения на скважины,

имеет смысл учитывать применением MPI-функций типа `MPI_Group` либо использовать удалённый прямой доступ к памяти, поддерживаемый технологией InfiniBand, для ускорения исполнения на машинах с разделённой памятью.

## **Вопросы визуализации**

Помимо проблем, связанных с расчетом задач класса Grand challenges, имеются также проблемы, связанные с визуализацией результатов этих расчетов.

Для обработки сеток, размер которых превышает некоторый порог, недостаточно ресурсов однопроцессорной вычислительной системы рабочего места пользователя. Связано это как с недостатком оперативной памяти и вычислительной мощности, так и с ограниченностью пропускной способности каналов связи между терминалом пользователя и суперкомпьютерным центром.

Целесообразно использовать многопроцессорную вычислительную систему для выполнения основных действий из функций постпроцессора по подготовке набора данных, на основе которого может быть сформирован визуальный образ отображаемого распределения параметров. В этом случае ресурсы кластера будут использоваться для обработки огромных наборов данных вместо одной графической карты, результатом будет обработанное изображение, которое в виде «сцены» отсылается на клиентскую рабочую станцию. Размер данных должен быть ограниченным, допускающим его передачу по используемому каналу связи за заданное время.

Данные должны быть прочитаны на многопроцессорной системе и там же должна быть выполнена предварительная обработка, направленная на сокращение их объема. Но отображение данных должно быть выполнено на рабочей станции пользователя, поэтому естественным является разделение системы визуализации на два компонента (рис. 10):

- серверный, выполняемый на многопроцессорной системе;
- клиентский, выполняемый на рабочей станции пользователя.

Существуют три принципиальных подхода к решению вопроса о разграничении полномочий по обработке данных:

- предобработка, отображение и экранизация на стороне сервера, передача изображения на сторону клиента, вывод на стороне клиента;
- предобработка и отображение на стороне сервера, передача данных, описывающих трёхмерную сцену на сторону клиента, экранизация и вывод на стороне клиента;
- предобработка, заключающаяся в сокращении объёма исходных трёхмерных данных (за счет фильтрации, сжатия или огрубления) на стороне сервера, передача подготовленных данных на сторону клиента, отображение, экранизация и вывод на стороне клиента.

В гидродинамическом моделировании при параллельной визуализации наиболее сбалансированным является второй подход [6].



Рис. 10. Система параллельной визуализации

### **Практическое применение**

Сейчас в России наиболее функциональной программой для моделирования процессов нефтегазодобычи является гидродинамический симулятор МКТ [7], моделирующий фильтрационные течения в рамках расширенной модели чёрной нефти.

В число разностных схем, используемых в МКТ при расчетах, входит схема «предиктор–корректор», позволяющая достигать высокого разрешения фронтов вытеснения и снизить затраты по памяти, что особенно важно при моделировании гигантских месторождений с большим числом скважин. Реализация расширенных шаблонов пространственной аппроксимации уравнений позволила минимизировать ориентационную ошибку при расчетах на неортогональных сетках [8]. При помощи МКТ возможно моделирование фильтрации в анизотропных средах с использованием полного тензора проницаемости, учет нелинейного притока при совместной добыче из несвязанных пропластков, прямое моделирование геолого-технических мероприятий, таких как гидроразрыв пласта, обработка призабойной зоны. Конкурентным преимуществом МКТ также является скорость расчетов в условиях техногенного воздействия на нефтяной пласт.

Современные требования к гидродинамическому моделированию, включающие необходимость проведения весьма ресурсоёмких адаптационных и прогнозных расчётов гигантских моделей месторождений нефти и газа, потребовали создания варианта симулятора МКТ для машин с параллельной архитектурой.

Одной из особенностей решения стало встроенное автоматическое разбиение на расчётные подобласти, которое также может корректироваться или задаваться вручную, так что загрузка вычислительных узлов происходит наиболее оптимально [9, 10]. Во многом за счёт поддержки рационального



разбиения на расчётные подобласти параллельная версия симулятора обеспечила хорошую масштабируемость и позволила эффективно сокращать время счёта задачи при увеличении числа процессов.

При помощи гидродинамического симулятора МКТ выполняется широкий спектр научно-исследовательских и проектных работ в нефтегазодобывающем комплексе применительно к реальным задачам. В частности, симулятор использовался для обоснования сложного объекта Талинской площади Красноленинского месторождения в рамках проекта с компанией ТНК-ВР. Это модель со сложной нестыкованной сеткой, содержащей более пяти миллионов ячеек, около 5000 скважин. Применённые математические методы позволили значительно сократить время на адаптацию гидродинамической модели и прогноз показателей разработки сложного Арланского месторождения компании «Башнефть»: единая модель терригенной толщи нижнего карбона содержит порядка 1 млрд. ячеек и более 8000 скважин.

### **Заключение**

Высокая актуальность параллельных гидродинамических расчётов обусловлена развернутым в России в последнее десятилетие по инициативе ЦКР Роснедра массовым переходом на четырехмерные геолого-технологические модели, что привело к принципиальному росту качества проектов разработки. Для таких целей применительно к месторождениям со сложным строением совершенно недостаточно мощности даже высокопроизводительной рабочей станции. Суперкомпьютерные вычисления позволяют детализировать модели месторождений, упростить и ускорить их создание и актуализацию, сделать модели постоянно действующими и эффективно используемыми в интегрированных системах управления разработкой месторождений нефти и газа.

Коммерческая эффективность использования кластера для гидродинамических расчётов обеспечивается использованием концентрированных вычислительных ресурсов, включающих этапы визуализации, плюс эффективных алгоритмов, означающих сокращение времени моделирования.

Применение суперкомпьютерных вычислений позволяет:

- обработать гигантские объёмы информации за приемлемое время без потери информации, неизбежно возникающей при осреднении;
- получить новое качество моделирования сложных и уникальных объектов недропользования за счет возможности уточнения физической постановки задачи;
- использовать единую модель месторождения при расчёте геолого-технических мероприятий.

Приемлемое время счёта моделей любой сложности возможно получить за счёт применения обоснованных вычислительных алгоритмов,

оптимального разбиения, что в свою очередь обеспечивает эффективное сокращение времени счёта на большом числе процессоров.

Перспективным является как увеличение производительности отдельных компьютеров, так и объединение их в мощные высокопроизводительные вычислительные кластеры на основе высокоскоростных сетевых архитектур. Актуальность использования многопроцессорных вычислительных систем для моделирования разработки в ближайшие годы будет только увеличиваться.

Авторы выражают благодарность П. Ю. Томину, И. Ю. Ермолаеву и А. С. Тихонову за неоценимую помощь в подготовке данной публикации.

### **Литература**

1. *J. M. Gratien et al.* Scalability and load balancing problems in parallel reservoir simulation // Proceedings of 10<sup>th</sup> ECMOR, September 2006, B028.
2. *J. L. Gustafson* Reevaluating Amdahl's law // Communications of the ACM 31(5), 1988, P. 532–533.
3. *G. Amdahl* Validity of the single processor approach to achieving large-scale computing capabilities // AFIPS Conf. Proc. (30), 1967, P. 483–485.
4. *Y. Saad* Iterative methods for sparse linear systems. SIAM, Second Edition, January 2000.
5. *P. Redfern* The power of scalable cluster computing // Dell Power Solutions, Issue 1, 2000.
6. *Д. Ю. Максимов, И. Ю. Кудряшов* Применение суперкомпьютеров при моделировании разработки нефтегазовых месторождений // Вестник ЦКР Роснедра, № 4, 2008, С. 56–58.
7. *А. Х. Пергамент, А. А. Некрасов* Об оценке качества гидродинамических симуляторов, Вестник ЦКР Роснедра, №1, 2007, С. 40–45.
8. *А. Kh. Pergament, S. B. Popov* The Godunov predictor–corrector method and non-isothermal MKT reservoir simulator, Proceedings of 10<sup>th</sup> ECMOR, September 2006, B021.
9. *И. Ю. Кудряшов, Д. Ю. Максимов, П. Ю. Томин* Применение параллельных вычислений при моделировании и мониторинге разработки нефтегазовых месторождений. V Всероссийская межвузовская конференция молодых ученых, Санкт-Петербург, апрель 2008.
10. *И. Ю. Кудряшов, Д. Ю. Максимов* Особенности параллельных алгоритмов при моделировании разработки месторождений нефти и газа. XVII Всероссийская конференция «Теоретические основы и конструирование численных алгоритмов и решение задач математической физики с приложением к многопроцессорным системам», посвященная памяти К. И. Бабенко, Абрау-Дюрсо, Новороссийск, сентябрь 2008.