

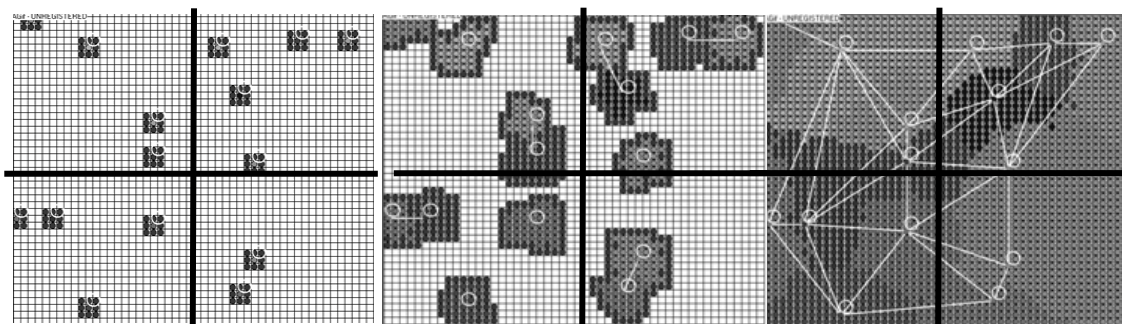
**ГЕНЕРАЦИЯ ГРАФОВ СОСЕДСТВА В СРЕДЕ РАСПРЕДЕЛЕННОГО  
АГЕНТНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ REPASTHPC****Е. Б. Юдин, Е. Р. Васильев (Омск)**

Архитектура массивно-параллельных систем (МРР), преобладающая в классе суперкомпьютеров, устанавливает, что каждому процессору обеспечивается доступ лишь к собственной локальной памяти, а если в программе, запущенной на одном из процессоров, нужно получить данные, расположенные в памяти другого процессора, то задействуется механизм передачи сообщений. Эта архитектура накладывает ряд ограничений. В частности, необходимо учитывать топологию системы и рационально распределять данные между процессорами, использовать специальные средства для межпроцессорной передачи сообщений, а в случае реализации системы поддержки имитационного моделирования, необходимо также специальным образом обеспечить синхронизацию моделируемых процессов. Для решения перечисленных задач существуют модели, методы и средства распределенного имитационного моделирования, в том числе SLX (Henriksen, Wolverine Corp., США), Мера (В. В. Окольников и др., Россия), Диана (В. В. Гусев и др., Украина) и другие. Причем различные средства распределенного моделирования ориентируются на различный класс задач. В представленной работе для реализации генератора случайного «графа соседства» на вычислительном кластере с МРР-архитектурой используется среда распределенного моделирования RepastHPC [1] (Collier, Аргоннская лаборатория, США). Система RepastHPC позволяет эффективно реализовать моделирование клеточных автоматов и процессы на сетях.

**Генерация графа соседства**

Генерация графа соседства начинается со случайного разбрасывания «центров» в ячейки грида (грид представляет собой ячеистую структуру, задаваемую на основе квадратной решетки). Центры имеют «силу», которая определяет для «центров» вероятность захвата центром соседних (еще не захваченных) ячеек. Захваченная центром ячейка в дальнейшем действует от имени центра, выполняя захват соседних ячеек. В ситуации, когда различные центры претендуют на захват одной ячейки, захвативший ячейку центр определяется путем стохастического голосования. Каждая из захваченных центром ячеек голосует от имени центра, которым захвачена. Процесс случайных захватов ячеек заканчивается формированием карты областей.

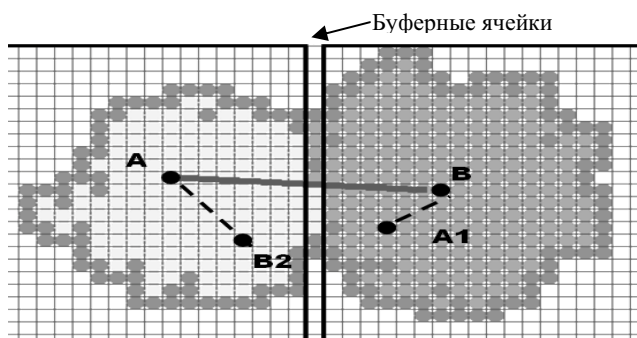
Процесс генерации графа соседства, реализованный в RepastHPC, представлен на рис. 1, 2. Грид разбивается на локальные подгриды, расположенные в памяти различных процессоров. Взаимодействие между подгридами осуществляется через буферные ячейки между подгридами (рис. 2).



**Рис. 1. Генерация графа соседства:**  
начальная конфигурация; промежуточная конфигурация и конечное состояние

Синхронизация содержимого ячеек осуществляется после каждого шага захвата центрами соседних ячеек.

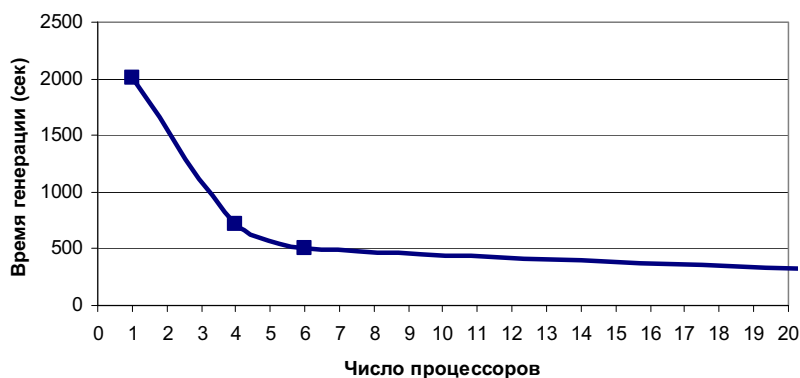
Информация о графе (вершины графа ассоциируются с центрами на гриде) хранится, как и любые данные в MPP-архитектуре, локально в каждом процессе. А поскольку в процессе генерации необходимо иметь информацию об общей структуре графа, при инициализации модели (после разброса центров графа соседства) для всех вершин, которые не являются локальными в текущем процессе, создаются копии. Таким образом, все процессы хранят образ единого графа, а добавляемые в одном из процессов ребра, добавляются в другие процессы в результате синхронизации.



**Рис. 2. Синхронизация ребер**

(При создании между вершинами процессоров P1 и P2 ребра (A-B) сначала ребро создается локально (A-B2) или (B-A1) и в дальнейшем должно синхронизироваться для всех процессоров)

Предложенная реализация с использованием среды для распределенного моделирования RepastHPC позволяет генерировать графы соседства необходимого размера для эффективного исследования статистическими методами. Как можно видеть на рис. 3, с увеличением задействованных процессоров достигается существенное уменьшение времени генерации (генерируется граф соседства с центрами одной силы, разбросанных по гриду 1 млн. с вероятностью 0,001 в ячейке).



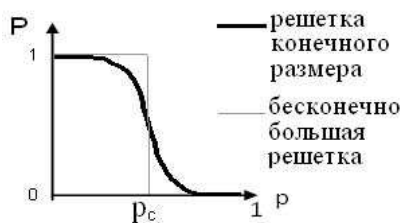
**Рис. 3. Зависимость времени генерации графа от числа процессоров вычислительного кластера Омского государственного технического университета**

### Свойства графа соседства

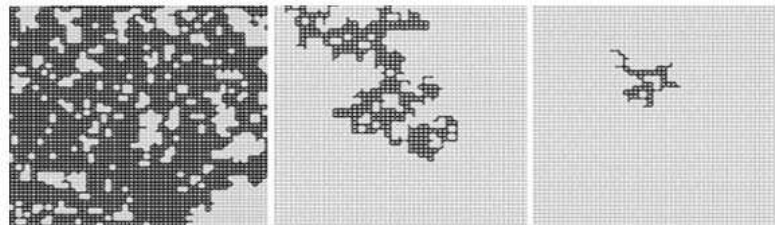
Рассмотрим устойчивость графов соседства при случайных удалениях узлов/ребер графа. Расчет устойчивости выполним по аналогии с расчетами устойчивости для решетчатых моделей. Так, при исследовании решеток в теории перколяции рассматривается так называемая задача связей и задача узлов. В задаче связей ищется ответ на вопрос, который на языке исследования устойчивости, следует сформулировать так: какую долю связей нужно удалить (моделируя «отказы» связей), чтобы решетка

потеряла устойчивость? В задаче узлов случайно удаляют узлы (соответственно удаляются все инцидентные узлу связи). Устойчивость решетки интерпретируется через сохранение так называемого стягивающего кластера (в таком случае остаются широкие возможности переноса выполняемых функций с одного узла на другой). Кластером в теории перколяции называется цепочка связанных между собой узлов. При значениях вероятности  $p$  удалений узлов/связей больше порогового значения  $p_c$  в бесконечной решетке можно найти кластеры только конечного размера. При значениях меньше  $p_c$  образуется стягивающий кластер, в случае бесконечной решетки, связывающий бесконечное количество узлов. Устойчивость характеризуется, таким образом, вероятностью  $P$  принадлежности к «стягивающему кластеру» случайно выбранного узла при заданной вероятности удалений узлов/связей. В теории перколяции устанавливается, что зависимость  $P(p)$  носит критический, переключательный характер для бесконечных решеток. Для конечных решеток зависимость  $P(p)$  изменяется плавно, не в критической точке  $p_c$ , а в критической области значений  $p$  (рис. 4).

Типичные формы и размеры контактных кластеров при различных значениях вероятности удаления  $p$  связей в решетке изображены на рис. 5.

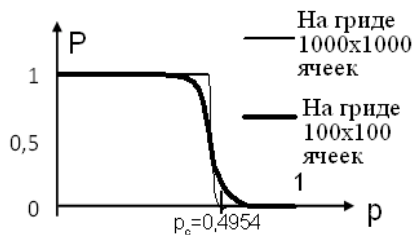


**Рис. 4.** Вероятность гигантского (стягивающего) кластера

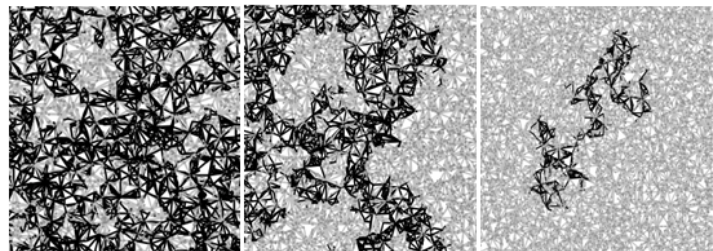


**Рис. 5.** Максимальные контактные кластеры в решетке при разных вероятностях удаления ребер  $p$  (остальные кластеры не показаны)

Устойчивость графов соседства при случайных удалениях вершин/ребер может быть также исследована с позиций теории перколяции (рис. 6). На рис. 7 изображены типичные размеры максимальных кластеров при разных вероятностях удаления  $p$  ребер графа соседства.

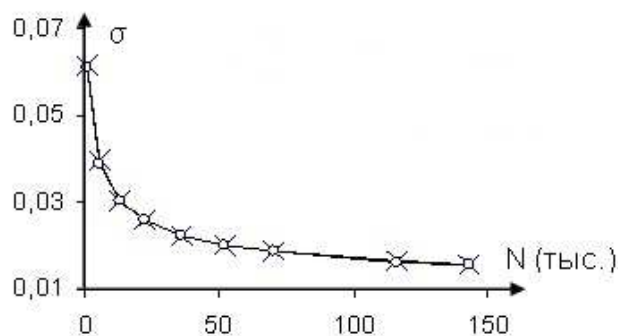


**Рис. 6.** Оценка порога перколяции в задаче ребер для графов соседства



**Рис. 7.** Максимальные контактные кластеры в при разных вероятностях удаления ребер  $p$  (остальные кластеры не показаны)

Законы перколяции, установленные для решеток, также непосредственно применимы и к графам соседства. В частности, среднее квадратичное отклонение  $\sigma$ , характеризующее ширину критической области вероятности удаления ребер, уменьшается (рис. 8) с ростом числа вершин  $N$  по степенному закону:  $\sigma(N) = C \cdot N^{-1/(v \cdot d)}$ , где  $d = 2$  — размерность пространства,  $C$  — коэффициент, зависящий от семейства графов,  $v$  — одна из констант теории решеточной перколяции. Подбор  $v$  и  $C$  по зависимостям  $\sigma(N)$ , полученных на основе статистического моделирования удаления ребер в графах соседства (метод Монте-Карло), подтверждает применимость константы  $v = 4/3$ , установленной [2] для плоских решеток.



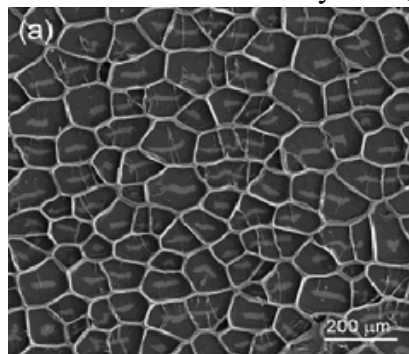
**Рис. 8.** Теоретическая и эмпирическая зависимости  $\sigma$  от  $N$  в графе соседства:

—×— теоретическая  $\sigma(N)$ ; —○— эмпирическая  $\sigma(N)$

В работе [3] обсуждается принадлежность графа соседства к классу статистически однородных графов, а также дополнительно рассматриваются свойства на пороге перколяции. Таким образом, графы соседства расширяют теорию перколяции новыми структурами. В работе [4] графы соседства применяются в качестве среды взаимодействия популяций «хищников–жертв», а также среды распространения вируса.

### Заключение

Широкое применение клеточных автоматов нашли при моделировании транспортных потоков, лесных пожаров, процессов диффузии, в целом клеточные используются для моделирования пространственно-распределенных систем, включая квантовые [5, 6]. В рассмотренной имитационной программе, разработанной для выполнения в многопроцессорной среде, клеточные автоматы используются для генерации пространственно-распределенного случайного графа – графа соседства. Граф соседства моделирует структуру, изоморфную некоторой плоской или пространственной нерегулярной упаковке, такая структура может быть моделью некоторых физико-химических микроструктур (рис. 9). В статье отмечается существенный выигрыш в производительности при генерации графа соседства на MPP архитектуре с использованием средств моделирования RepastHPC.



**Рис. 9.** Структура, образуемая при высыхании массива углеродных нанотрубок

### Литература

1. **Collier N. T. and North M. J.** Repast HPC: A Platform for Large-scale Agent-based Modeling // Dubitzky K. Kurowski and B. Schott, eds., Large-Scale Computing Techniques for Complex System Simulations, Wiley (In Press), 2011.
2. **Тарасевич Ю. Ю.** Перколяция: теория, приложения, алгоритмы. М.: УРСС, 2002. 112 с.
3. **Задорожный В. Н., Юдин Е. Б.** Статистически однородные случайные графы: определение, генерация, применение // Омский научный вестник. 2009. №3. С. 7–13.
4. **Юдин Е. Б.** Исследование распространения инфекции на графах соседства // Информационные технологии и автоматизация управления. Матер. межвуз. науч.-практ. конф., 2010. С. 107–109.
5. **Porad W.** Quantum-Dot Cellular Automata: Emerging Nanoelectronic Device Technologies // Proc. of Nano Engineering World Forum. Boston, 2003.
6. **Bandman O.** Simulation Spatial Dynamics by Probabilistic Cellular Automata // 5th International Conference, Geneva, 2002. V. 2493 (Ed. B.Chopard). P. 10–19.