

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Национальный исследовательский университет  
«Высшая Школа Экономики»

На правах рукописи

Зиганурова Лилия Фаилевна

**Изучение моделей виртуальных времен в алгоритмах  
параллельного моделирования дискретных событий**

РЕЗЮМЕ ДИССЕРТАЦИИ

на соискание ученой степени кандидата наук  
по прикладной математике

Научный руководитель:  
доктор физико-математических наук,  
профессор Щур Л. Н.

Москва – 2020

## **Актуальность**

Потребность ведущих стран мира в высокопроизводительных вычислениях растет с каждым годом. Высокопроизводительные системы применяются в машинном обучении, материаловедении, космологии, вычислительной химии и физике, биоинформатике и т.д. Разработка и внедрение современных технологий параллельных вычислений влияют на способность государства или организации решать важнейшие научно-технические и экономические проблемы.

Производительность современных суперкомпьютеров достигает сотен терафлопс (1 TFp = 1 триллион операций в секунду). Для эффективного использования такой мощности требуется развитие и разработка новых параллельных алгоритмов, компиляторов, библиотек и других программных инструментов.

Изучаемый в диссертации метод параллельного моделирования дискретных событий (PDES, Parallel Discrete Event Simulation) представляет собой универсальный инструмент, позволяющий запускать одну задачу моделирования на неограниченном числе вычислительных узлов (процессоров/ядер/поток). Метод PDES широко применяется в суперкомпьютерном моделировании для решения большого числа задач как в фундаментальной науке, так и в прикладных исследованиях в сфере экономики, медицины, социологии и прочих областях. Кроме того, активно разрабатываются новые алгоритмы, повышающие эффективность метода PDES, а также специальные фреймворки для визуализации и анализа моделирования методом PDES.

## **Постановка проблемы**

Одна из проблем параллельного моделирования заключается в том, что поведение каждой конкретной модели на конкретной архитектуре может отличаться, поэтому прежде, чем проводить крупномасштабное моделирование, необходимо сначала исследовать модель и подобрать оптимальные параметры. Каждая конкретная модель должна исследоваться на масштабируемость и эффективность. Такое исследование само по себе является ресурсозатратным.

Диссертационная работа посвящена исследованию свойств параллельных моделей, вне зависимости от предметной области и архитектуры. В диссертации строятся и изучаются модели роста профиля локальных времен в различных алгоритмах параллельного дискретно-событийного моделирования. Изучаемые модели могут позволить предсказать эффективность и масштабируемость реальных моделей PDES на основе поведения профиля локальных виртуальных времен.

**Краткое описание метода PDES.** В методе PDES большая задача моделирования разбивается на подзадачи, выполняемые своими логическими процессами (подпрограммами). Система изменяет свое состояние в определенные (дискретные) моменты времени. Эти изменения называются *дискретными событиями*. Каждый логический процесс характеризуется своим *локальным виртуальным временем* и имеет локальную очередь событий. События из очереди обрабатываются логическим процессом в порядке возрастания их временных меток. Количество обрабатываемых событий при моделировании методом PDES на современных суперкомпьютерах достигает до пятисот миллиардов в секунду. Логические процессы могут генерировать события для других процессов. Взаимодействие между логическими процессами происходит с помощью сообщений, содержащих временные метки и информацию о событии. Для корректности моделирования необходимо, чтобы события обрабатывались строго в порядке возрастания их временных меток. Для обеспечения этого условия существуют специальные механизмы синхронизации, которые можно классифицировать по трем группам: консервативные, оптимистические и алгоритмы Freeze-and-Shift.

**Объектом исследования** диссертационной работы является набор локальных времен всех логических процессов (Рисунок 1) – так называемый профиль локальных виртуальных времен (ЛВВ). Профиль ЛВВ эволюционирует в ходе моделирования и в каждый фиксированный момент модельного времени может быть описан двумя характеристиками – средним значением ЛВВ и средней шириной (среднеквадратичным отклонением). Профиль ЛВВ растет по-разному, в зависимости от алгоритма синхронизации и топологии взаимодействия ЛП. Мы строим модели эволюции профиля ЛВВ

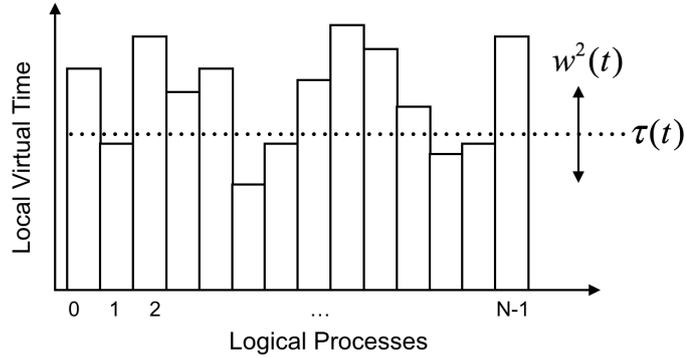


Рисунок 1: Профиль локальных времен в фиксированный момент модельного времени  $t$ . Каждый ЛП имеет свое значение локального времени.  $\tau(t)$  – это среднее значение локального времени по всем логическим процессам, а  $w^2(t)$  – среднеквадратичная ширина профиля.

в консервативном и оптимистическом алгоритмах PDES с различным типом коммуникаций между логическими процессами и изучаем поведение среднего значения ЛВВ и средней ширины в зависимости от интересующих параметров. Изучая поведение профиля ЛВВ можно сделать выводы об эффективности и масштабируемости алгоритмов. Скорость роста профиля ЛВВ соответствует утилизации процессорного времени, а ширина профиля ЛВВ отражает степень рассинхронизации между параллельными процессами.

**Целью** диссертационного исследования является изучение моделей эволюции локальных времен процессов в различных алгоритмах синхронизации при параллельном дискретно-событийном моделировании и на различных топологиях взаимодействия логических процессов.

**Задачами** исследования являются:

1. Разработка модели эволюции локальных времен процессов в консервативном алгоритме PDES в размерности 1+1 (пространство+время) на регулярной топологии и топологии малого мира.
2. Разработка модели эволюции локальных времен процессов в оптимистическом алгоритме PDES в размерности 1+1 на регулярной топологии и топологии малого мира.

3. Исследование поведения средней скорости роста и средней ширины профиля локальных времен в моделях в зависимости от топологии и количества логических процессов.
4. Исследование моделей на предмет принадлежности их к классам универсальности в физике.
5. Проверка адекватности моделей. Установление соответствия между результатами моделирования и результатами экспериментальных данных, полученными с использованием симулятора ROSS.

## **Степень разработанности проблемы**

Подход к изучению эффективности и масштабируемости алгоритмов PDES на основе исследования эволюции локальных времен в этих алгоритмах, был предложен в научной группой Корнисса [Korniss G. et al., Phys. Rev. Lett. 84(6), 1351, 2000]. В этой работе была предложена модель эволюции профиля локальных времен процессов для консервативного алгоритма на одномерной топологии с периодическими граничными условиями. В такой топологии взаимодействуют только ближайшие логические процессы. Каждому ЛП соответствует один процессорный элемент (узел/процессор/ядро/нить). Авторами было показано, что профиль локальных времен имеет аналогию с неравновесным ростом поверхности в физике. Локальное случайное увеличение времени в модели консервативного алгоритма PDES соответствует отложению случайного количества материала в локальных минимумах растущей поверхности (как, например, при молекулярной эпитаксии).

Авторы показали, что на регулярной одномерной топологии рост профиля ЛВВ в консервативном алгоритме можно описать уравнением Кардара-Паризи-Жанга (KPZ). Эффективность алгоритма в таком случае соответствует плотности локальных минимумов профиля ЛВВ. Моделирование эволюции профиля ЛВВ в консервативном алгоритме и грубое приближение показало, что алгоритм является асимптотически масштабируемым, т.е. при увеличении числа ЛП скорость роста профиля остается ненулевой, а ширина профиля расходится. Ненулевая скорость роста профиля ЛВВ озна-

чает, что консервативный алгоритм не имеет мертвых состояний, при этом растущая ширина профиля говорит о рассинхронизации локального времени параллельных процессов. Аналогия между профилем локальных времен в PDES и ростом поверхности позволила отнести модель роста профиля ЛВВ в консервативном алгоритме с локальными взаимодействиями к классу универсальности KPZ и сделать выводы о свойствах алгоритма в пределе бесконечного количества логических процессов.

Еще одним важным следствием установленной аналогии модели эволюции времен в консервативном алгоритме PDES и ростом поверхности в физике стало то, что все алгоритмы синхронизации PDES были классифицированы на три класса – консервативные, оптимистические и алгоритмы FaS, соответствующие периодическим, открытым и фиксированным граничным условиями уравнения KPZ [Shchur L. N., Novotny M. A. Phys.Rev.E., 70(2), 026703, 2004].

При анализе производительности моделей PDES важную роль играет топология логических процессов. Первая модель роста локальных времен в консервативном алгоритме PDES учитывала только локальные взаимодействия. В реальных моделях между ЛП могут возникать не только локальные, но и дальние связи. В последующих работах группы Корнисса, например, в [Guclu H. et l., Phys. Rev. E. 73(6), 066115, 2006], изучено влияние малого количества случайных дальних взаимодействий на синхронизацию процессов в консервативном алгоритме PDES. Моделирование роста профиля ЛВВ проводилось на топологии, близкой по свойствам к топологии малого мира, но не являющейся ею по определению. Добавление малого числа случайных дальних взаимодействий между ЛП существенно снижает ширину профиля ЛВВ, при этом сохраняя скорость роста положительной. Консервативный алгоритм на такой топологии становится полностью масштабируемым, поскольку при увеличении количества логических процессов ширина остается постоянной (а не растет, как на регулярной топологии), а скорость снижается незначительно.

Эффективность параллельного дискретно-событийного моделирования также изучается на примере реальных систем, которые моделируются методом PDES на специальных симуляторах (ROSS, PDEV,  $\mu$ sik и др.). Анализ производительности конкретных моделей обычно проводится в терми-

нах количества обработанных событий в единицу времени. Недостатком этого подхода является то, что такие исследования являются аппаратно и модельно-зависимыми и их результаты не носят универсальный характер.

## **Научная новизна**

Научная новизна исследования заключается в применении такого известного способа изучения метода PDES, как моделирование эволюции профиля ЛВВ, к новым алгоритмам синхронизации с новой топологией взаимодействия логических процессов. Помимо этого, в диссертационном исследовании впервые проводится сравнение полученных в ходе моделирования данных с результатами запуска реальной модели на симуляторе ROSS.

Более подробно научная новизна исследования раскрывается в следующих пунктах.

Во-первых, в ходе диссертационного исследования была построена и изучена модель роста профиля ЛВВ консервативного алгоритма PDES на топологии малого мира. В работах Корнисса с соавторами проведен анализ влияния небольшого количества дальних связей на синхронизацию в консервативном алгоритме PDES. В их моделях каждый ЛП связан ровно с тремя ЛП, два из которых – ближайшие соседи, а один выбран случайным образом из оставшихся. Дальние связи “включаются” с вероятностью  $p$ . Такая модель по свойствам напоминает топологию малого мира, но не является ею по определению [Watts, Strogatz, Nature, 393(6684), 440, 1998]. В нашей работе мы объединяем ЛП в регулярную топологию, а затем с вероятностью  $p$  добавляем дальние взаимодействия (либо переписываем ближние связи случайным образом). Такой способ построения сети со свойствами малого мира является классическим и лучше отражает свойства реальных моделируемых систем. Таким образом, научная новизна этой части работы заключается в выборе более естественной топологии взаимодействия ЛП для исследования.

Во-вторых, в диссертации впервые предложена модель эволюции ЛВВ для оптимистического алгоритма PDES. Модель изучена на регулярной топологии и топологии малого мира. В результате исследования показано, что

модель оптимистического алгоритма PDES может быть отнесена к классу направленного протекания (Directed Percolation).

В-третьих, ранее никто не изучал поведение локальных времен в реальных моделях PDES. Обычно измерение производительности параллельного дискретно-событийного моделирования происходило в количестве обработанных событий за единицу времени. По нашей просьбе разработчики фреймворка ROSS добавили в программу функцию вывода локальных времен процессов, что позволило проверить предложенную в диссертации модель на соответствие реальному моделированию.

## **Основные результаты, выносимые на защиту**

1. Построена и изучена модель роста профиля ЛВВ для консервативного алгоритма PDES на различных топологиях малого мира.
2. Выявлена зависимость скорости роста и ширины профиля ЛВВ от концентрации дальних связей  $p$  между логическими процессами.
3. Предложена и изучена модель роста профиля ЛВВ для оптимистического алгоритма PDES на различных топологиях малого мира.
4. Показано, что модель роста профиля ЛВВ для оптимистического алгоритма на регулярной топологии может быть отнесена к классу направленного протекания.
5. Проведено сравнение с результатами экспериментальных данных на симуляторе ROSS.

**Личный вклад автора в разработку проблемы** Идеи, предложенные в диссертации, выдвинуты соискателем совместно с научным руководителем. Автор лично написал весь программный код, провел численные эксперименты и обработал результаты. Автор внес основной вклад в написание научных статей по теме исследования.

**Степень достоверности результатов** проведенных соискателем ученой степени исследований подтверждается множеством численных экспериментов и обсуждений в научных коллективах. Результаты исследований были

представлены на множестве конференций и опубликованы в ведущих научных журналах.

**Теоретическая значимость.** В диссертационном исследовании предложены математические модели роста профиля локальных виртуальных времен параллельных процессов, и показано, что эти модели могут использоваться для предсказания свойств масштабируемости и эффективности параллельных дискретно-событийных моделей. Подробно изучены свойства этих моделей на регулярной топологии и топологии малого мира. Проведена аналогия моделей с моделями роста поверхности в физике и приведены основания для отнесения предложенных моделей к физическим классам универсальности.

**Практическая значимость.** Предложенные в диссертации модели могут использоваться для предсказания свойств масштабируемости и эффективности реальных параллельных дискретно-событийных моделей. Тот факт, что эти модели отнесены к классам универсальности, позволит использовать хорошо разработанный аппарат статистической физики для дальнейшего их изучения и предсказания поведения.

## **Общие выводы исследования**

Основные выводы диссертационного исследования раскрываются в следующих пунктах.

1. Впервые изучена модель роста виртуальных времен в консервативном алгоритме на топологии малого мира. Была выявлена функциональная зависимость средней скорости роста и средней ширины профиля ЛВВ от концентрации дальних взаимодействий  $p$ . Было показано, что на скорость профиля влияет по большей части количество взаимодействий между локальными процессами, в то время, как такое свойство сети, как степень кластеризации, не вносит качественных изменений в поведение модели. Кроме того, в работе проведено сравнение полученных результатов с результатами похожих исследований, а также проанализирована зависимость изучаемых показателей от локальной связности сети.

2. Разработана и изучена модель эволюции локальных виртуальных времен процессов для оптимистического алгоритма PDES. Модель исследовалась на регулярной топологии и топологии малого мира. Был исследован фазовый переход между активной и абсорбирующей фазами роста профиля ЛВВ. В активной фазе профиль локальных времен растет с ненулевой скоростью, а при уменьшении параметра  $q$  (интенсивности роста) скорость профиля снижается до нуля. Была посчитана критическая точка  $q_c$  и критический показатель  $\nu$ . В результате исследования показано, что модель оптимистического алгоритма PDES может быть отнесена к классу направленного протекания.

3. Проверена адекватность модели роста локальных времен в оптимистическом алгоритме. В диссертационной работе впервые проведено исследование поведения локальных времен в реальных моделях PDES на симуляторе ROSS. Сравнение модели оптимистического алгоритма с результатами экспериментальных данных на примере модели коммуникационной сети PCS (Personal Communication Service) показало, что скорость роста профиля ЛВВ в модели для оптимистического алгоритма в действительно отражает эффективность моделирования. Скорость роста профиля локальных времен в обоих случаях снижается с параметрами  $p$  и  $q$  и имеет фазовый переход в точке  $q_c$ . Критическая точка  $q_c$  для моделей OSW и PCS совпадает, также как и критический показатель  $\nu$ .

Результаты диссертационного исследования имеют высокую теоретическую и практическую значимость. Модели, предложенные и изученные в диссертации, могут использоваться для предсказания свойств масштабируемости и эффективности параллельных дискретно-событийных моделей. Проведенная аналогия моделей с моделями роста поверхности в физике позволит использовать хорошо разработанный аппарат статистической физики для дальнейшего их изучения и предсказания поведения.

## **Апробация результатов исследования.**

Основные результаты диссертации докладывались автором диссертации и обсуждались на конференциях:

1. The 5th International Conference on Matrix Methods in Mathematics and applications, «О свойствах параллельного дискретно-событийного моделирования», Moscow, August 19-23, 2019;
2. International Conference on Computer Simulation in Physics and beyond, «Анализ оптимистического алгоритма параллельного дискретно-событийного моделирования на сети малого мира», Moscow, September 24-27, 2018;
3. The 8th International Conference «Distributed Computing and Grid-technologies in Science and Education», «Аспекты синхронизации в оптимистическом параллельном дискретно-событийном моделировании», Dubna, Russia, September 10-14, 2018;
4. International Conference on Computer Simulation in Physics and beyond, «Анализ консервативного и оптимистического алгоритмов синхронизации при параллельном дискретно-событийном моделировании на сетях малого мира», Moscow, October 9-12, 2017;
5. The 14th International Conference on Parallel Computing Technologies, «Свойства консервативного алгоритма при параллельном моделировании дискретных событий», Nizhniy Novgorod, Russia, September 4-8, 2017;
6. The Sixth China-Russia Conference on Numerical Algebra with Applications, «Анализ профиля локальных виртуальных времен в параллельном дискретно-событийном моделировании», Moscow, August 28–30, 2017;
7. XXIX IUPAP Conference in Computational Physics, «Консервативная синхронизация параллельного дискретно-событийного моделирования на сетях малого мира», Paris, July 9-13, 2017;
8. Landau Days, «Синхронизация при параллельном дискретно-событийном моделировании на сетях малого мира», Chernogolovka, Russia, June 26-29, 2017;

9. International Conference «Supercomputer Simulations in Science and Engineering», «Моделирование профиля локальных времен в консервативных алгоритмах параллельного моделирования дискретных событий на сетях малого мира», Moscow, September 6-10, 2016;
10. International Conference on Computer Simulation in Physics and beyond, «Моделирование профиля локальных виртуальных времен в алгоритмах параллельного моделирования дискретных событий», Moscow, September 6-10, 2015.

### **Список опубликованных статей, где отражены основные научные результаты диссертации**

**Статьи по теме диссертации, опубликованные в рецензируемых научных изданиях, входящих в международную систему цитирования WoS или Scopus:**

1. Ziganurova L., Novotny M. A., Shchur L. N. Model for the evolution of the time profile in optimistic parallel discrete event simulations //Journal of Physics: Conference Series, 681(1), 012047 (2016) (WoS, Scopus Q3).
2. Shchur L., Ziganurova L. Simulation of virtual time profile in conservative parallel discrete event simulation algorithm for small-world network // Lobachevskii Journal of Mathematics, 38(5), 967-970 (2017) (WoS, Scopus Q3)
3. Ziganurova L., Shchur L. Properties of the Conservative Parallel Discrete Event Simulation Algorithm. In: Malyshkin V. (eds) Parallel Computing Technologies. PaCT 2017. Lecture Notes in Computer Science, vol 10421. Springer, Cham (2017) (WoS Q4, Scopus Q2)
4. Ziganurova, L., Shchur, L. N. Synchronization of conservative parallel discrete event simulations on a small-world network // Physical Review E, 98(2), 022218 (2018) (WoS Q1, Scopus Q1)
5. Ziganurova, L., Shchur, L. N. Properties of The Parallel Discrete Event Simulation Algorithms on Small-World Communication Networks in

Proceedings of the VIII International Conference “Distributed Computing and Grid-technologies in Science and Education”, 2267, 70-75 (2018) (Scopus)

6. Щур Л.Н., Зиганурова Л.Ф. Синхронизация процессов при параллельном моделировании дискретных событий // Журнал экспериментальной и теоретической физики, 156 (4), 775-787 (2019) (WoS, Scopus Q2)
7. Ziganurova L., Shchur L. Synchronization Aspects of The Optimistic Parallel Discrete Event Simulation Algorithms, in Data Analytics and Management in Data Intensive Domains eds. A. Elizarov, B.Novikov, S. Stupnikov, p.182 (paper 18) (Scopus)

**Статьи по теме диссертации, опубликованные в рецензируемых научных изданиях, входящих в систему цитирования РИНЦ:**

1. Зиганурова Л.Ф., Щур Л.Н. Исследование свойств консервативного алгоритма параллельного моделирования дискретных событий в сетях Small World // Вычислительные технологии в естественных науках: методы суперкомпьютерного моделирования, часть 4., С. 28-34 (2017)
2. Хомутов Е. В., Зиганурова Л. Ф. Анализ виртуального времени в оптимистическом алгоритме параллельного моделирования дискретных событий // В кн.: Новые информационные технологии в автоматизированных системах: материалы двадцать первого научно-практического семинара. М.: Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН, 2018. С. 294-299. (2018)

**Свидетельства о государственной регистрации ПО**

1. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2016663469 “Моделирование консервативного алгоритма синхронизации при параллельном моделировании дискретных событий на топологии Small-World”
2. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2017662914 “Моделирование топологии Small-World”