

УДК: 004.94, 378.1

## Естественные модели параллельных вычислений

Н. М. Ершов<sup>а</sup>, Н. Н. Попова<sup>б</sup>

Факультет вычислительной математики и кибернетики,  
Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова,  
Россия, 119991, г. Москва, ГСП-1, Ленинские горы, 1-52

E-mail: <sup>а</sup>ershovnm@gmail.com, <sup>б</sup>popova@cs.msu.su

*Получено 30 сентября 2014 г.*

Курс «Естественные модели параллельных вычислений», читаемый студентам старших курсов факультета ВМК МГУ, посвящен рассмотрению вопросов суперкомпьютерной реализации естественных вычислительных моделей и является, по сути, введением в теорию естественных вычислений (natural computing) относительно нового раздела науки, образовавшегося на стыке математики, информатики и естественных наук (прежде всего биологии). Тематика естественных вычислений включает в себя как классические разделы, например клеточные автоматы, так и относительно новые, появившиеся в последние 10–20 лет, например методы роевого интеллекта. Несмотря на свое биологическое «происхождение», все эти модели находят широчайшее применение в областях, связанных с компьютерной обработкой данных. Исследования в области естественных вычислений также тесно связаны с вопросами и технологиями параллельных вычислений. Изложение теоретического материала курса сопровождается рассмотрением возможных схем распараллеливания вычислений, а в практической части курса предполагается выполнение студентами программной реализации рассматриваемых моделей с использованием технологии MPI и проведение численных экспериментов по исследованию эффективности выбранных схем распараллеливания вычислений.

Ключевые слова: естественные вычисления, эволюционные алгоритмы, искусственные биологические системы

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант №14-07-00628 А).

## Natural models of parallel computations

N. M. Ershov, N. N. Popova

*Faculty of Computational Mathematics and Cybernetics, Lomonosov Moscow State University,  
GSP-1, 1-2 Leninskiye Gory, Moscow, 119991, Russia*

Course “Natural models of parallel computing”, given for senior students of the Faculty of Computational Mathematics and Cybernetics, Moscow State University, is devoted to the issues of supercomputer implementation of natural computational models and is, in fact, an introduction to the theory of natural computing, a relatively new branch of science, formed at the intersection of mathematics, computer science and natural sciences (especially biology). Topics of the natural computing include both already classic subjects such as cellular automata, and relatively new, introduced in the last 10–20 years, such as swarm intelligence. Despite its biological origin, all these models are widely applied in the fields related to computer data processing. Research in the field of natural computing is closely related to issues and technology of parallel computing. Presentation of theoretical material of the course is accompanied by a consideration of the possible schemes for parallel computing, in the practical part of the course it is supposed to perform by the students a software implementation using MPI technology and numerical experiments to investigate the effectiveness of the chosen schemes of parallel computing.

Keywords: natural computing, evolutionary algorithms, artificial life

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант №14-07-00628 А).

Citation: *Computer Research and Modeling*, 2015, vol. 7, no. 3, pp. 781–785 (Russian).

## 1. Введение

Исследования в области естественных вычислительных моделей связаны с построением, анализом и применением методов и моделей, инспирированных разнообразными природными, прежде всего биологическими, системами. Эта тематика, включающая в себя такие понятия, как клеточные автоматы, искусственные нейронные сети, генетические алгоритмы, тесно переплетается с теорией искусственных биологических систем (artificial life).

Несмотря на биологическое «происхождение» большинства таких моделей, они находят широкое применение практически во всех областях, связанных с компьютерной обработкой данных: при моделировании в физике, химии, биологии, экономике и т. п.; в интеллектуальном анализе данных (data mining); при распознавании образов; для управления различными сложными системами и т. д.

История естественных вычислительных моделей началась практически одновременно с появлением первых электронных компьютеров. Одной из первых таких моделей стали клеточные автоматы [фон Нейман, 1971], придуманные Джоном фон Нейманом и Станиславом Уламом в 1940-х годах с целью моделирования процессов самовоспроизведения в живой природе. В середине 1950-х годов появляются модели искусственных нейронных сетей — перцептронов [Розенблатт, 1965], разработанные Фрэнком Розенблаттом. Карл Петри в 1964 году в своей диссертации вводит понятие «сети Петри» [Котов, 1984], одним из предназначений которых было моделирование химических процессов. В конце 1960-х Аристид Линдемайер в рамках своих исследований по математическому моделированию процессов роста и формирования растений строит формальную модель L-систем [Prusinkiewicz, Lindenmayer, 1996]. В 1970-х годах в работах Джона Холланда и его учеников формируется понятие генетических алгоритмов [Holland, 1975], являющихся в настоящее время одним из наиболее мощных методов решения сложных оптимизационных задач.

С 1990-х годов в данной области происходит мощный всплеск исследований, посвященных прежде всего разработке новых методов и основанных на моделировании тех или иных биологических систем, предназначенных для решения сложных (многомерных, многокритериальных, дискретных) задач оптимизации. Создаются муравьиные алгоритмы [Dorigo, Birattari, Stutzle, 2006], выполняются первые опыты в области ДНК-вычислений [Adleman, 1994], разрабатываются метод роя частиц [Kennedy, Eberhart, 1995], метод бактериального поиска [Passino, 2002], алгоритм пчелиного поиска [Pham et al., 2006]. Появляются и новые методы моделирования: искусственные иммунные системы, мембранные системы, программируемая материя и т. д. Этот всплеск был обусловлен во многом успехами в биологических исследованиях. Еще одной причиной появления большого количества новых методов и моделей явилась необходимость в решении все более сложных и более масштабных задач, прежде всего оптимизации, к которым оказались практически неприменимы существующие на то время классические алгоритмы и методы.

## 2. Параллельная структура естественных вычислительных моделей

Особенностью тематики естественных вычислительных моделей является то, что проведение исследований в этой области практически невозможно без использования компьютерной техники — основным методом исследований здесь является вычислительный эксперимент. Это связано во многом с дискретным характером используемых моделей и методов, что существенно затрудняет (или даже делает невозможным) какое-либо их аналитическое исследование. Поэтому, с учетом широчайшего применения таких методов, оказывается весьма актуальной задача построения их эффективных компьютерных и программных реализаций.

Общей чертой практически всех моделей в рассматриваемой области является то, что любая из них представляет собой систему взаимодействующих простых объектов. В клеточных автоматах такими объектами являются клетки, в нейронных сетях — нейроны, в генетических

алгоритмах — хромосомы и т. д. Эти объекты функционируют (развиваются, эволюционируют) параллельно друг с другом. Это значит, что любая искусственная биологическая модель обладает внутренним параллелизмом высокой степени, причем этот параллелизм является масштабируемым — увеличение размера системы приводит к пропорциональному увеличению степени ее параллелизма. Из вышеперечисленных фактов (широкое применение моделей рассматриваемого типа, необходимость в их эффективной компьютерной реализации, встроенный масштабируемый параллелизм) с очевидностью следует, что все такие модели являются весьма перспективными с точки зрения их реализации на современных массивно-параллельных вычислительных системах.

Вопросы, связанные с параллельной реализацией естественных вычислительных моделей, помимо их практической важности имеют и существенное методологическое и образовательное значение. Это связано с тем, что такие модели устроены, как правило, просто и поэтому достаточно легко могут быть реализованы на обычных последовательных компьютерах. В силу того, что различные модели отличаются друг от друга прежде всего способами взаимодействия (очень разнообразными) входящих в них объектов, проблема эффективной параллельной реализации фактически сводится к задаче оптимального отображения структуры коммуникации внутри модели на систему коммуникации параллельной вычислительной системы. Все это позволяет рассматривать данные модели в качестве весьма удобного средства для обучения технологиям параллельного программирования на всех типах современных параллельных вычислительных систем (с общей памятью, многопроцессорных кластеров, GPGPU).

Еще один немаловажный аспект, связанный с изучением естественных вычислительных моделей, заключается в том, что для большинства из них доказана алгоритмическая универсальность, что позволяет рассматривать такие модели в качестве теоретических моделей параллельных вычислений. С одной стороны, это способствует более глубокому пониманию параллельных вычислительных процессов, с другой — в будущем может привести к созданию новых вычислительных технологий, как это, например, происходит в настоящее время с ДНК-вычислениями.

### 3. Содержание курса

Программа учебного курса содержит два раздела. Первый раздел посвящен классическим моделям искусственных биологических систем. Второй раздел посвящен описанию современных моделей и методов в области естественных вычислительных моделей. Примерный список тем, освещаемых в данном курсе, выглядит следующим образом.

- Клеточные автоматы: понятие клеточного автомата, клеточные автоматы фон Неймана; клеточные автоматы Конвея, игра «Жизнь», алгоритмическая полнота автоматов Конвея, саморепликация в игре «Жизнь»; одномерные клеточные автоматы, типы поведения, способы определения, вопросы реализации; моделирование физических, химических и биологических процессов с помощью клеточных автоматов.
- Системы Линденмайера: понятие L-системы, классификация L-системы; система подстановок, эволюция, примеры построения фрактальных структур; моделирование процессов роста и формообразования с помощью L-систем; вариации L-систем — стохастические системы, контекстно зависимые системы, параметрические системы.
- Марковские автоматы: понятие марковского автомата, система подстановок, алгоритм применения; одномерные марковские автоматы; алгоритмическая универсальность; моделирование физических, химических и биологических систем с помощью марковских автоматов; двумерные марковские автоматы; алгоритмы параллельных подстановок.
- Сети Петри; понятие «сети Петри», места, переходы, метки; функционирование сетей Петри; классификация традиционных сетей Петри; моделирование с помощью сетей Петри; временные сети Петри, сети Петри с ингибиторными дугами, алгоритмическая универсальность; цветные сети Петри.

- Нейронные сети: понятие естественной нейронной сети, нейроны, синапсы, обработка информации в нервной системе; искусственный нейрон, искусственные нейронные сети; перцептрон Розенблатта; многослойные перцептроны, алгоритм обучения Error Back Propagation; рекуррентные нейронные сети, сети Хопфилда; применение искусственных нейронных сетей.
- ДНК-вычисления: понятие ДНК, операции над ДНК, синтез, анализ, секвенирование; применение ДНК для решения вычислительных задач; опыт Адлемана, кодирование графа, алгоритм отбора; применение ДНК для решения задачи SAT3, схема кодирования Липтона, алгоритм решения; стикерная модель.
- Мембранные системы: понятие Р-систем; мультимножества и операции над мультимножествами; мембраны, способы их взаимодействия; алгоритмическая универсальность мембранных систем; решение с помощью мембранных систем сложных задач комбинаторной оптимизации.
- Генетические алгоритмы: основные понятия генетического кодирования; обобщенная схема генетического алгоритма, функция приспособленности, операторы отбора, мутации и скрещивания; функционирование генетического алгоритма; области применения, решение сложных комбинаторных задач с помощью генетических алгоритмов.
- Муравьиные алгоритмы: понятие муравьиного алгоритма; теоретические результаты; мета-эвристика муравьиной колонии; вариации муравьиных алгоритмов; параллельная реализация; применение муравьиных алгоритмов для решения сложных оптимизационных задач, роевая робототехника.
- Алгоритмы роевой оптимизации: модель Рейнолдса коллективного поведения стаи птиц; метод роя частиц, вариации метода, параллельная реализация; метод бактериального поиска; пчелиные алгоритмы.

Изложение теоретического материала курса сопровождается рассмотрением возможных схем распараллеливания вычислений, а в практической части курса предполагается выполнение студентами программной реализации рассматриваемых моделей с использованием технологии MPI и проведение численных экспериментов по исследованию эффективности выбранных схем распараллеливания вычислений.

## Список литературы

- Котов В.* Сети Петри. — М.: Наука, 1984.
- фон. Нейман Дж.* Теория самовоспроизводящихся автоматов. — М.: Мир, 1971.
- Розенблатт Ф.* Принципы нейродинамики: перцептроны и теория механизмов мозга. — М.: Мир, 1965.
- Adleman L. M.* Molecular computation of solutions to combinatorial problems // *Science*. — 1994. — 266, 11. — P. 1021–1024.
- Dorigo M., Birattari M., Stutzle T.* Ant colony optimization, technical report No. TR/IRIDIA/2006-023, September 2006.
- Holland J. H.* *Adaptation in Natural and Artificial Systems*, University of Michigan Press, Ann Arbor, MI, 1975.
- Kennedy J., Eberhart R. C.* Particle swarm optimization, Proceedings of IEEE International Conference on Neural Networks, Piscataway, NJ, P. 1942–1948, 1995.
- Passino K. M.* Biomimicry of bacterial foraging for distributed optimization and control // *IEEE Control Systems Magazine*. — 2002. — 22. — P. 52–67.
- Pham D. T., Ghanbarzadeh A., Koc E., Otr S. I., Rahim S., Zaidi M.* The Bees Algorithm. — A Novel Tool for Complex Optimisation Problems // *Proceedings of IPROMS 2006 Conference*. — 2006. — P. 454–461.
- Prusinkiewicz P., Lindenmayer A.* *The Algorithmic Beauty of Plants*. — Springer-Verlag, 1996.