

УДК 004.023, 004.383.8

Е.В. Агеев, Е.Н. Бендерская

ОБЗОР ПРИРОДНЫХ ВЫЧИСЛЕНИЙ: ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ И ТЕНДЕНЦИИ

E.V. Ageev, E.N. Benderskaya

REVIEW OF NATURAL COMPUTING: IMPORTANT TRENDS

Проведена классификация природных вычислений, представлены основные элементы природных вычислений и области применения. Предложены дополнительные классификационные признаки природных вычислений, а также схема общности природных вычислений. Показаны варианты комбинирования видов природных вычислений. Определены тенденции развития природных вычислений.

ПРИРОДНЫЕ ВЫЧИСЛЕНИЯ; БИОИНСПИРИРОВАННЫЕ ВЫЧИСЛЕНИЯ; ХАОТИЧЕСКИЕ ВЫЧИСЛЕНИЯ; НОВЫЕ ПАРАДИГМЫ ВЫЧИСЛЕНИЙ; ОБРАЗОВАНИЕ СТРУКТУРЫ.

The classification of natural computing and the basic elements of natural computing and natural computing applications are considered. Additional classification features of natural computing and natural computing interconnection scheme are proposed. Variants of hybrid natural computations are discussed. Tendencies of the development of natural computing are revealed.

NATURAL COMPUTING; BIO-INSPIRED COMPUTING; CHAOTIC COMPUTING; NEW COMPUTING PARADIGM; STRUCTURE FORMATION.

На сегодняшний день существует большое многообразие моделей природных вычислений. *Природными (естественными или первоначально именуемыми биoinsпирированными)* вычислениями называются динамические модели, заимствованные так или иначе у природы и основанные на природных процессах, таких как информационные процессы, протекающие в клетках, эволюционные процессы естественного отбора, процессы взаимодействия простых живых организмов, процессы образования различных материалов и т. п. При этом формализованные в виде динамических моделей природные процессы используются для решения различных задач, и наиболее проработанными являются специализированные

модели вычислений, хотя и универсальные разрабатываются тоже. Возрастающая популярность природных вычислений связана с необходимостью параллельной обработки данных, с возможностью создания искусственных биологических систем, с созданием новых парадигм вычислений, с исследованиями многообразия природы.

Классическими разделами природных вычислений на текущий момент являются клеточные автоматы, искусственные нейронные сети, генетические алгоритмы [3, 8, 22]. Клеточные автоматы появились в первой половине XX в. Клеточные автоматы представляют собой дискретную систему, изменяющую свое состояние, по шагам используя правила перехода. Вычис-

Виды природных вычислений

Вид вычислений	Природный аналог	Базовые элементы	Базовые правила
1	2	3	4
Мембранные вычисления (P системы)	Мембраны, клетки, бактерии, молекулы	Набор мембран, набор содержимого в мембранах, правила эволюции, среда	Правила эволюции: растворение мембран, разделение мембраны на две, перемещение содержимого мембран из одной мембраны в другую или в среду. На каждом шаге применяется максимальное мультимножество правил параллельным способом
Искусственные иммунные системы	Иммунная система человека	Антиген, антитело, обучение	Распознавание своих и чужих
Искусственная жизнь [18]	Естественная жизнь	Агент, среда, поведение	Взаимодействие агента в среде
ДНК-вычисления	ДНК	Основания: аденин, тимин, гуанин, цитозин, правила изменения, пробирка	Комплементарность Уотсона-Крика, правила соединения, разъединения, удлинения, укорочения, модификации
Искусственные нейронные сети	Биологические нейроны	Нейрон, нейронная сеть, состоящая из нескольких слоев, функция активации, обучение	Нейроны преобразуют входные данные, настраивая весовые коэффициенты. Нейроны способны обучаться
Роевой интеллект	Муравьи, пчелы, стаи птиц, светлячки	Агент, фермент	Уровень феромона, испарение феромона
Brain-вычисления	Мозг человека	Моделирование целого мозга человека или любого другого животного направления: составление карт целого мозга, моделирование целого	
Physarum вычисления [12]	Слизевик physarum polycephalum	Используются особенности организма physarum polycephalum для	
Аморфные вычисления	Развитие многоклеточных организмов из одной клетки, организация субклеточных отделов и внутриклеточная сигнализация	Множество идентичных вычислительных элементов, коммуникационный радиус	Конкуренция за лидерство. Лидеры набирают другие процессоры. Набранные лидером процессоры перестают конкурировать и становятся членами группы лидеров



Таблица 1

Результат	Подвиды вычислений, алгоритмы	Применение	Программные средства для моделирования
5	6	7	8
Содержимое мембраны выхода, последовательность выхода элементов в среду по шагам	С активными мембранами, импорт-антипорт, с правилами перезаписи, тканевые, нейронные	Решение NP полных задач, моделирование биологических систем, алгоритмизация	Плагин к среде eclipse, язык программирования P-lingua [15]
Получение всех чужих элементов	Алгоритм отрицательно-го отбора	Распознавание образов, когнитивные модели, методы вычислений, методы обнаружения аномалий и неисправностей, мультиагентные системы, модели самоорганизации, модели искусственной жизни, системы компьютерной безопасности, модели обучающих систем, методы извлечения информации, выявление подделок, методы обработки сигналов и изображений	Jisys
Результат взаимодействия	Миры решетки, виртуальные среды, синтетическая наука о поведении [5]	Моделирование биологических систем	Avida
Находится в конечной пробирке	Вставка-удаление, соединение	Создание ДНК-программ	Sequencher 5.1
Результат считывается с выходного слоя нейронов	Самоорганизующиеся карты Кохонена, сети прямого распространения, рекуррентные нейронные сети	Распознавание образов, аппроксимация, прогнозирование, управление, классификация, кластеризация, принятие решений, сжатие данных, ассоциативная память	Matlab
Условия останова	Муравьиный алгоритм, пчелиный алгоритм, метод роя частиц, кошачий алгоритм	Распознавание образов, поиск кратчайшего пути	Matlab
выполнения вычислений		Аппроксимация, поиск кратчайшего пути	—
Состояние, в котором все процессоры — лидеры или члены группы	Клубный алгоритм	Моделирование биологических систем	Симулятор Gray-Scott язык программирования gpl (growing point language)

существа. Так, полностью область «brain-вычислений» еще не сформировалась, отметим основные аспекты данного мозга, моделирование сознания, нейронные вычисления

1	2	3	4
Вычисления «реакция-диффузия»	Химические реакции	Входной концентрационный профиль, выходной концентрационный профиль	Взаимодействие волн
L-системы (системы Линденмайера)	Растения, деревья	Алфавит, аксиома, порождающие правила	Порождающие правила
Бактериальные вычисления	Кишечная палочка	Автономные, основанные	
Нечеткие вычисления (нечеткая логика)	Лингвистическая неопределенность	Мера принадлежности, лингвистическая переменная, терм	База правил
Клеточные автоматы	Клетки	Решетка клеток, клетка, соседние клетки, правила перехода	Правила перехода
Квантовые вычисления [7]	Фотон	Кубит	Математические операции
Эволюционные вычисления	Механизмы эволюции (выбор, скрещивание, отбор популяции)	Популяция, механизм скрещивания, фитнес-функция	Различные способы отбора
Мягкие вычисления	Комбинирование нечетких вычислений,		
Вычисления, основанные на столкновениях	Столкновения	Постоянные локализации, переменные локализации, вектор скорости, состояния	Наличие локализаций, отсутствие локализаций
Вычисления, основанные на динамических системах и хаосе [11, 17]	Время	Передаточная функция	Передаточная функция

ления на основе искусственных нейронных сетей появились также в первой половине XX в. после работы Мак-Каллока и Питца. Основой для них послужил биологический нейрон. Главной особенностью этого вида вычислений является обучение нейрона. Генетические алгоритмы были разработаны во второй половине XX в. Джоном Холландом и его студентами. Они основаны на принципах эволюции.

Последующее развитие работ в направлении заимствований у природных процессов привело к появлению новых разделов природных вычислений, например, таких как ДНК-вычисления, роевой интеллект, аморфные вычисления [6, 14, 20, 22]. В конце XX в. после опыта Эдмана были созданы ДНК-вычисления. Они основываются на молекулах ДНК и используют комплементарность Уотсона–Крика и операции



Окончание таблицы 1

5	6	7	8
Конечный кон- центрационный профиль	Модель Грея–Скотта	Моделирование химических реакций	ReaDDy
Вычисленная функция на тре- буемом шаге	Контекстно- независимые, контекстно-зависимые, детерминированные, стохастические, пара- метрические, непарапе- трические	Моделирование роста растений	Расширение к откры- той программе вектор- ной, графики inkscape
на клетке машины Тьюринга		Создание машин Тьюринга на клетке	–
Выходные пере- менные	Четкие вычисления, нечеткие вычисления	Распознавание образов, управление	Matlab
Конечная конфигурация, в которой все клетки постоян- ны, периодиче- ская конфигу- рация	Одномерные клеточные автоматы, многомерные клеточные автоматы	Распознавание языка, машина Тьюринга, моделирование физических систем	Matlab
Результат ма- тематических операций	Алгоритмы коррекции ошибок	Защита данных	Язык программирова- ния QCL
Конечная попу- ляция, которая получается на основании кри- терия останова	Генетические алго- ритмы, эволюционные алгоритмы, генетиче- ское программирование, эволюционное програм- мирование, эволюцион- ные стратегии	Решение NP полных задач, поиск экстремумов	Matlab
генетических алгоритмов и нейронных сетей			Matlab
Состояния ло- кализаций	Биллиардный компьютер	Моделирование столкновений	Matlab
Результат передаточной функции	Хаотические вычисления, линейные системы, нелинейные системы	Обработка информации, управление	Matlab

над молекулами ДНК. Роевой интеллект основан на поведении групп, например, стаи птиц, роя пчел, колонии муравьев. Одним из используемых элементов роевого интеллекта является фермент, по которому другие элементы роя узнают необходимую информацию. Также к новым видам природных вычислений относятся аморфные вычисления. Они также основаны на процессах в клетке. Ключевыми особен-

ностями аморфных вычислений являются идентичность, ограниченность ресурсов и наличие коммуникационного радиуса, в пределах которого могут происходить взаимодействия.

Кроме указанных выше природных вычислений к новым разделам относятся мембранные вычисления, искусственные иммунные системы, brain-вычисления [4, 13, 16, 19, 21]. Каждый из видов природных

вычислений использует некоторые особенности природных процессов, например ДНК-вычисления основаны на ДНК и ее свойствах, мембранные вычисления — на взаимодействии клеток и т. д., однако, что касается brain-вычислений, для них еще не сформировалась полная теоретическая база, тем не менее существуют достаточно проработанные отдельные модели.

Постоянно пополняющееся число различных неклассических моделей вычислений, разнообразие описаний и отсутствие систематизации в этой бурно развивающейся области знания обуславливает потребность в разработке классификаций природных вычислений, а также определении сходства и различий как по математическим моделям, так и по достоинствам и ограничениям, заложенным изначально в тот или иной вид природных вычислений.

Цель данной работы — проведение систематизации моделей природных вычислений и определение основных направлений развития и тенденций в новой и считающейся перспективной области науки решения сложных и ресурсоемких задач.

Основные виды природных вычислений

Природные (естественные) вычисления — область науки, занимающаяся решением задач методами, отличающимися от классических методов представления вычислительных процессов. Природные вычисления можно классифицировать по видам вычислений, например, нейронные сети, мембранные вычисления, L-системы, ДНК-вычисления. Виды природных вычислений, их природные аналоги, базовые элементы, правила, а также некоторые варианты применения и программные средства для моделирования приведены в табл. 1, где представлено 19 видов вычислений.

Из таблицы видно, что степень проработанности каждого из видов природных вычислений разная, и как один из показателей может использоваться показатель наличия разнообразных средств моделирования: для одних видов вычислений существуют универсальные библиотеки программ, а для других только разрозненные программы.

Кроме перечисленных выше видов к природным вычислениям также относятся: модели синтетической биологии, искусственные биологические системы, оптические вычисления, фрактальная геометрия, геновая сборка, искусственная химия, нановычисления, эволюционирующие аппаратные средства.

Начало природным вычислениям было положено разработкой нейросетевого аппарата и генетических алгоритмов, а также созданием теории нечеткой логики. Необходимость в решении все более сложных задач подтолкнула исследователей к разработке гибридных методов, в результате появилась новая область науки — мягкие вычисления, которая объединила в себе подходы всех трех указанных областей. Были предложены также дополняющие технологии решения трудноформализуемых задач.

Дальнейшее развитие аппарата нейронных сетей шло по пути большего усложнения и большей детализации процессов, протекающих в нервной клетке, — биоинспирированные нейронные сети с биоподобными нейронами. Большая детализация процессов эволюции и генетического отбора и более подробное изучение работы клеток различного типа (не только нервных) привели к разработке ДНК-вычислений, клеточных, мембранных и иммунных вычислений. Первоначально указанные типы вычислений разрабатывались разрозненно, как и подходы к решению задач с помощью мультиагентных технологий. При этом основой для концепции мультиагентных систем стал децентрализованный распределенный подход, реализуемый на основе большого числа относительно простых элементов — агентов. В дальнейшем задачи разработки и исследования коллективного поведения и взаимодействия (коллективный интеллект) рассматривались как на уровне особей — агентов (роевой интеллект, интеллект колонии муравьев, стаи рыб и т. д.), так и на уровне агентов — отдельных клеток, антигенов, мембран, генов. Способы математической формализации работы целой системы из агентов оказались во многом схожими. Таким образом, сформировалось направле-



ние биоинспирированных вычислений [10], которое оказалось практически близким к мягким вычислениям, а по сути, только расширяющим методы решения задач дополнительными биоинспирированными подходами, которые сами по себе являются «мягкими». С другой стороны, процессы, протекающие в динамической многомерной системе с нелинейностями, изучаются в теории хаоса и теории динамических систем. Физические и химические процессы, рассматриваемые в том или ином типе биологических систем, выраженные на языке математических моделей, оказываются схожими с процессами, наблюдаемыми в неживой природе (образование облаков, цунами, торнадо, кластеризация в физике при изучении различных свойств материалов). Многие природные явления неживой материи также послужили толчком к созданию новых неклассических способов обработки информации [1, 2].

Классификации природных вычислений

Природные вычисления, рассмотренные в табл. 1, основаны на различных принципах, поэтому естественно возникает необходимость систематизации иного типа. Были предложены дополнительные классификационные признаки и на их основе разработаны дополнительные варианты классификации, представленные в табл. 2.

Общность, различия, ограничения и перспективы разных направлений в природных вычислениях представляется важным рассмотреть и оценить. Каждый классификационный признак раскрывает определенные возможности и области применения вычислений. Некоторые виды природных вычислений не могут быть отнесены только к одному значению классификационного признака. Например, вычисления, основанные на столкновениях, динамических системах и хаосе являются общими в классификации по уровню и имеющимся аналогам.

Родство видов природных вычислений

Из табл. 1 и 2 следует, что многие виды вычислений основаны на схожих принципах. Схема общности видов природных

вычислений представлена на рисунке. Это согласуется с логикой последовательного развития области знания «природные вычисления».

Схема общности позволяет сделать вывод, что природные вычисления основаны на вычислениях с признаками «общие» и «комбинирование». Другие вычисления можно рассматривать как частные случаи этих признаков. В данной работе исследуется признак «комбинирование».

Несмотря на некоторые сходства видов вычислений, каждый вид рассматривает тот или иной признак сходства по-своему. Признаки сходства и индивидуальные особенности природных вычислений представлены в табл. 3.

Развитие видов природных вычислений

Многие из природных вычислений могут быть формализованы в разной математической форме с привлечением разных математических моделей. Так, осцилляторные нейронные сети часто рассматриваются с позиций нелинейной динамики взаимодействия множества осцилляторных элементов и феномена кластеризации на их основе, а интерпретация результатов анализа может быть проведена как с привлечением аппарата нейронных сетей, так и без него. Поэтому можно говорить о наличии общности не только среди биоинспирированных подходов, но и среди природных в целом [9].

Многие физические, химические и биологические процессы стали объектом для изучения с последующей искусственной (технической) реализацией для решения задач обработки информации и управления. Для этого необходимо было найти связь между переменными, параметрами модели соответствующего процесса и обрабатываемой информацией. Так, например, абстрактный феномен кластеризации в природе и его простая модель связанных логистических решеток смогли послужить прототипом хаотической нейронной сети для решения задач кластеризации как только был предложен вариант обеспечения взаимосвязи между входными данными, подлежащими кластеризации и параметрами сети [2, 11].

Таблица 2

Дополнительные классификации природных вычислений

Классификационный признак	Уровень			
	нано	микро	макро	мета
По уровню	Нановычисления; ДНК-вычисления; квантовые вычисления; оптические вычисления; геновая сборка; вычисления «реакция-диффузия»	Бактериальные вычисления; мембранные вычисления; аморфные вычисления; physarum вычисления	Роевой интеллект; искусственная жизнь; клеточные автоматы; искусственные нейронные сети; искусственные иммунные сети; эволюционные вычисления; нечеткие вычисления; мягкие вычисления; L-системы; синтетическая биология	brain-вычисления; вычисления, основанные на столкновениях; вычисления, основанные на динамических системах и хаосе; фрактальная геометрия
По природным аналогам	Аналоги			
	математические дополнения	биологические	физические	химические
	Фрактальная геометрия; L-системы; мягкие вычисления; нечеткие вычисления	Нейронные вычисления; иммунные вычисления; ДНК-вычисления; мембранные вычисления; геновая сборка; клеточные автоматы; роевой интеллект; искусственная жизнь; бактериальные вычисления; аморфные вычисления; brain-вычисления; physarum вычисления; синтетическая биология; эволюционные вычисления	Оптические вычисления; квантовые вычисления; нановычисления; эволюционирующие аппаратные средства	Вычисления «реакция-диффузия»; искусственная химия
По видам природных аналогов	Виды природных аналогов			
	процесс	организм	свойство	
	Квантовые вычисления; оптические вычисления; эволюционные вычисления; геновая сборка; искусственная химия; вычисления «реакция-диффузия»; роевой интеллект; искусственная жизнь; четкие-нечеткие вычисления; вычисления, основанные на столкновениях; вычисления, основанные на динамических системах и хаосе; brain-вычисления	ДНК-вычисления; искусственные нейронные сети; искусственные иммунные сети; бактериальные вычисления; мембранные вычисления; аморфные вычисления; physarum вычисления; роевой интеллект; искусственная жизнь; четкие-нечеткие вычисления; L-системы; синтетическая биология; биологические системы; мягкие вычисления; brain-вычисления	Нановычисления; ДНК-вычисления; квантовые вычисления; оптические вычисления; эволюционные вычисления; геновая сборка; мембранные вычисления; аморфные вычисления; клеточные автоматы; искусственная химия; вычисления «реакция-диффузия»; эволюционирующие аппаратные средства; искусственная жизнь; четкие-нечеткие вычисления; L-системы; синтетическая биология; биологические системы; мягкие вычисления; фрактальная геометрия; brain-вычисления	

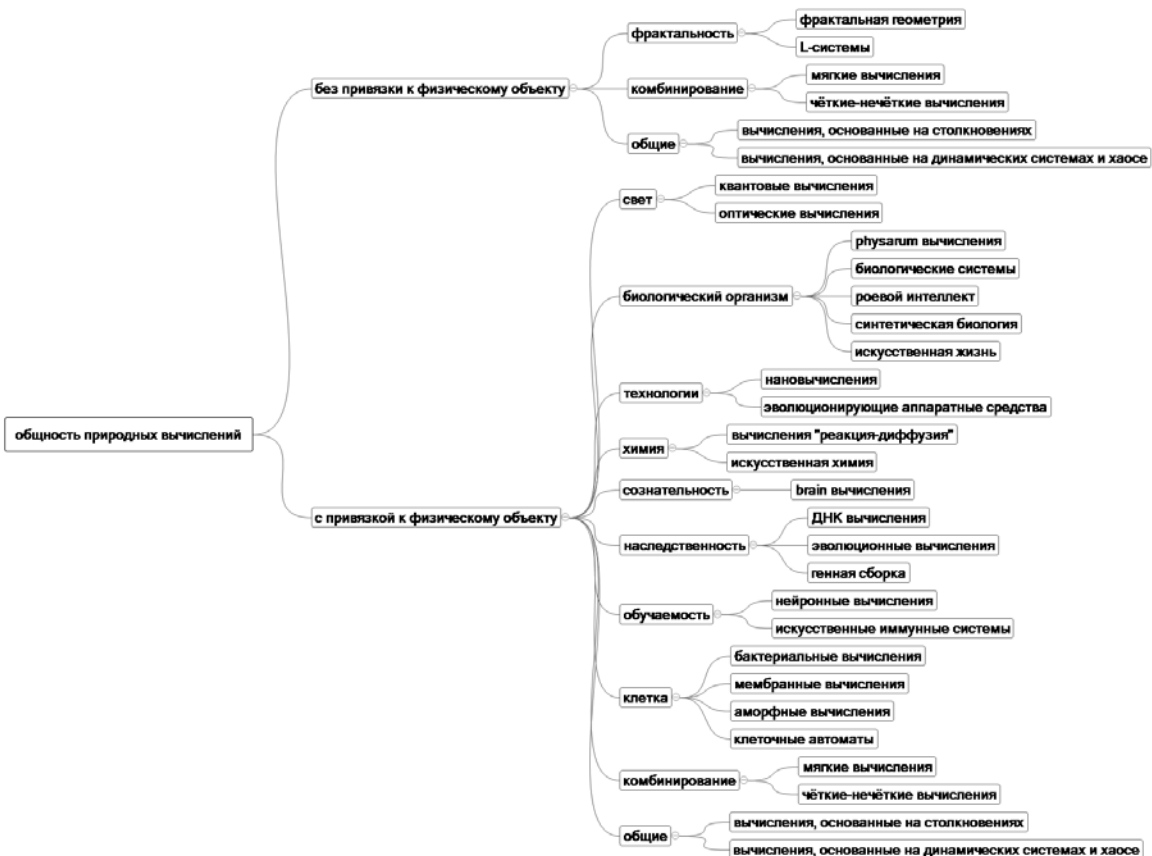


Схема общности природных вычислений

При все большей детализации процессов, протекающих в природе, наблюдается процесс поиска и разработки универсального инструмента решения разноплановых задач. Как следствие появился новый вид природных вычислений — brain-вычисления, — один из самых новых.

Комбинирование вычислений необходимо для достижения определенных целей, например, для составления комбинированных систем, для уменьшения времени вычислений.

Комбинирование по различным классификационным признакам может привести к улучшению того или иного результата. Например, если используется:

классификация по типу решаемых задач, то комбинирование позволит добиться лучших результатов по сравнению с использованием одного вида вычислений;

классификация по уровню, то комбинирование может развивать, микро, нано или любой другой уровень;

классификация по изменениям числа элементов, то комбинирование позволит использовать более динамичные системы; комбинирование по достоинствам или недостаткам, то это позволит улучшить соответствующие достоинства или недостатки.

В результате комбинирование сводится к следующим вариантам.

1. Один вид вычислений используется в качестве элемента другого вида вычислений.

2. Создается новый вид вычислений, содержащий свойства нескольких видов вычислений.

3. Используются виды природных вычислений как независимые. Например, определенные части задачи решают различные виды вычислений, а в итоге все части соединяются в единое целое.

4. Комбинирование первых трех вариантов.

Приведем несколько примеров комбинирования видов природных вычислений.

Таблица 3

Различия видов природных вычислений

Признак сходства	Вид природных вычислений	Индивидуальные особенности
Клетка	Бактериальные вычисления	Клетка рассматривается как автономная машина Тьюринга
	Мембранные вычисления	Рассматривается только одна клетка («скин мембрана») и все взаимодействие в ней, а также ее взаимодействие со средой, но среда без других клеток
	Аморфные вычисления	Ограниченность ресурсов клетки
	Клеточные автоматы	Не рассматривается внутренняя структура клетки. Рассматривается взаимодействие клетки с соседями
Фрактальность	Фрактальная геометрия	Рассматриваются все фракталы
	L-системы	Рассматриваются только определенные правила
Свет	Квантовые вычисления	Параллельная обработка данных. Рассматривается состояние суперпозиции
	Оптические вычисления	Рассматривается высокая производительность
Обучаемость	Нейронные вычисления	Положение нейронной сети фиксировано
	Искусственные иммунные системы	Положение иммунной системы не фиксировано
Наследственность	ДНК-вычисления	Программы, комплементарность Уотсона–Крика
	Эволюционные вычисления	Рассматриваются механизмы скрещивания
	Генная сборка	Рассматриваются только механизмы сборки генов
Биологический организм	Physarum вычисления	Рассматривается поведение только организма <i>Physarum polycephalum</i>
	Биологические системы	Исследование биологических систем
	Роевой интеллект	Рассматривается только поведение роя пчел, колонии муравьев, стаи птиц и т. д.
	Синтетическая биология	Моделирование биологических систем
	Искусственная жизнь	Рассматривается агент, среда и поведение агента в среде
Сознательность	Brain-вычисления	Предположительно, мозг рассматривается как сознательная единица
Комбинирование	Мягкие вычисления	Используются эволюционные, нечеткие и нейронные вычисления
	Четкие-нечеткие вычисления	Используются четкие и нечеткие вычисления
Химия	Вычисления «реакция-диффузия»	Моделирование химических реакций
	Искусственная химия	Моделирование химических реакций
Общие	Вычисления, основанные на столкновениях	Столкновения
	Вычисления, основанные на динамических системах и хаосе	Динамика
Технологии	Нановычисления	Используется взаимодействие материи на наноуровне
	Эволюционирующие аппаратные средства	Восстановление

Таблица 4

Основные свойства природных вычислений

Вид вычислений	Основные свойства вычислений
Вычисления, основанные на динамических системах и хаосе	Динамика
Клеточные автоматы	Дискретность
Искусственные нейронные сети	Параллельная обработка данных, обучаемость, самоорганизация
Эволюционные вычисления	Выделение определенных свойств
Нановычисления	Выполнение алгоритмов на наномасштабе
Четкие-нечеткие вычисления	Объединение свойств четких и нечетких вычислений
L-системы (системы Линденмайера)	Моделирование роста растений и деревьев
Фрактальная геометрия	Моделирование самоподобных структур
Квантовые вычисления	Состояние суперпозиции
Оптические вычисления	Высокая производительность
Вычисления, основанные на столкновениях	Столкновения
Искусственная жизнь	Программируемая среда, программируемые агенты
Искусственная химия	Моделирование химических реакций
Роевой интеллект	Параллельная обработка данных
ДНК-вычисления	ДНК-программа, комплементарность Уотсона–Крика
Мягкие вычисления	Объединение свойств эволюционных вычислений, нечетких вычислений и нейронных вычислений
Аморфные вычисления	Параллельная обработка данных, ограниченность
Мембранные вычисления (P системы)	Параллельная обработка данных
Вычисления «реакция-диффузия»	Моделирование химических реакций
Бактериальные вычисления	Автономность, машина Тьюринга
Искусственные иммунные системы	Обучаемость, распознавание «своих» и «чужих»
Physagum вычисления	Параллельная обработка данных
Генная сборка	Моделирование сборки генов
Эволюционирующие аппаратные средства	Самовосстановление
Синтетическая биология	Моделирование биологических систем
Биологические системы	_*
Brain-вычисления	Сознательность

* Является областью исследований

Комбинирование ДНК-вычислений и эволюционных вычислений позволяет рассматривать элементы, реализующие ДНК-алгоритмы как популяции и выявлять те ДНК-алгоритмы, которые справляются с

поставленной задачей лучше остальных.

Комбинирование роевого интеллекта и нейронных вычислений позволяет рассматривать элемент роя как обучающийся элемент.

Комбинирование нейронных вычислений и клеточных автоматов позволяет рассматривать обучающие клеточные автоматы, т. е. каждая клетка в клеточных автоматах является выходом нейрона.

Комбинирование квантовых вычислений и клеточных автоматов позволяет получать клеточные автоматы с квантовыми свойствами.

В табл. 4 представлены свойства, которые добавляются в систему, если она использует виды природных вычислений и один из них является элементом другого. В качестве основного свойства brain-вычислений используем наличие сознания.

В качестве перспектив развития природных вычислений можно отметить направление, связанное с объединением различных видов природных вычислений в одной системе. Комбинирование природных вычислений позволит более гибко настраивать систему. Исходя из родства природных вычислений следует, что комбинируя вычисления, например, с признаком «клетка», можно получить более реалистичные системы, т. к. в них будут учитываться признаки всех комбинируемых видов вычислений.

Одним из направлений в области природных вычислений по-прежнему остается

поиск аналогов в природе для последующей реализации в виде алгоритмов. Однако самоорганизация условных алгоритмов принятия решений возможна только при наличии большого числа степеней свободы у системы и, как правило, при наличии первоначальной хаотической динамики, из которой под действием внешних воздействий образуется структура.

Проведенная разноплановая классификация природных вычислений с учетом разных признаков общности подходов и уровней детализации позволяет провести сравнение различных природных вычислений, так и их систематизацию. По результатам анализа существующих на сегодняшний день природных вычислений можно сделать вывод о перспективности хаотических вычислений и вычислений, базирующихся на фундаментальном заделе в области нелинейных динамических систем, как ввиду возможности описания наиболее сложных явлений, так и по универсальности применения. В этом же ряду стоят brain-вычисления, в значительной мере использующие хаотические вычисления и придающие им иерархическую организацию.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке правительства Санкт-Петербурга.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бендерская Е.Н. Перспективные концепции разработки интеллектуальных систем // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Информатика. Телекоммуникации. Управление. СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2011. № 6.1 (138). С. 173–181.
2. Бендерская Е.Н., Жукова С.В. Анализ процессов самоорганизации в хаотических физико-технических системах и их использование для обработки информации // Научно-технические ведомости СПбГПУ. СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2008. № 4(63). С. 131–138.
3. Беркович С.Я. Клеточные автоматы как модели реальности: поиски новых представлений физических и информационных процессов. Пер. с англ. М.: Изд-во МГУ, 1993. 112 с.
4. Дасгупта Д. Искусственные иммунные системы и их применение. М.: Физматлит, 2006. 341 с.
5. Джонс М.Т. Программирование искусственного интеллекта в приложениях. Пер. с англ. М.: ДМК Пресс, 2004. 312 с.
6. Паун Г., Розенберг Г., Саломаа А. ДНК-компьютер. Новая парадигма вычислений. Пер. с англ. М.: Мир, 2003. 528 с.
7. Прескилл Дж. Квантовая информация и квантовые вычисления. 2008. Т. 1. 464 с.
8. Хайкин С. Нейронные сети: полный курс. 2-е изд. Пер. с англ. М.: ИД «Вильямс», 2006. 1104 с.
9. Benderskaya E.N., Zhukova S.V. Multidisciplinary trends in modern artificial intelligence: Turing's way // Studies in Computational Intelligence. Springer, 2013. Vol. 427. Pp. 319–343.
10. Benderskaya E.N., Zhukova S.V. Dynamic data mining: synergy of bio-inspired clustering methods // Knowledge-Oriented Applications in Data Mining. InTech, 2011. Pp. 398–410.
11. Benderskaya E.N., Zhukova S.V. Nonlinear approaches to automatic elicitation of distributed oscillatory clusters in adaptive self-organized sys-



tem // *Advances in Intelligent and Soft Computing*. Springer, 2012. Vol. 151. Pp. 733–741.

12. Calude C.S., Costa J.F. (eds.) *Pre-proceedings of the Workshop Physics and Computation*. 2008. 353 p.

13. Ciobanu G., Paun G., Perez-Jimenez M.J. *Applications of Membrane Computing: Natural Computing Series*. Springer, 2006. 439 p.

14. D'Hondt E. *Exploring the amorphous computing paradigm*. 2000. 101 p.

15. Diaz-Pernil D., Perez-Hurtado I., Perez-Jimenez M.J., Riscos-Nunez A. *P-Lingua: A programming language for membrane computing // 6th Brainstorming Week on Membrane Computing*. Sevilla: University of Sevilla, 2008. Pp. 135–155.

16. Grossberg S. *Foundations and New Paradigms of Brain Computing: Past, Present, and Future Artificial Intelligence Around Man and Beyond // Lecture Notes in Computer Science*. 2011.

Vol. 6934. Pp. 1–7.

17. Kia B., Murali K., Jahed Motlagh M.R., Sinha S., Ditto W.L. *Synthetic Computation: Chaos Computing, Logical Stochastic Resonance, and Adaptive Computing // Internat. Conf. on Theory and Application in Nonlinear Dynamics Understanding Complex Systems*. Springer, 2014. Pp. 51–65.

18. Komosinski M., Adamatzky A. *Artificial Life Models in Software*. Springer, 2009. 464 p.

19. Matsumoto G. *Brain computing Artificial Life and Robotics*. 1999. Vol. 3. Iss. 1. Pp. 24–26.

20. Panigrahi B.K., Shi Y., Lim M.H. *Handbook of swarm intelligence*. Springer, 2011. 556 p.

21. Popovici-Vlad O., Curaj A. *Robot Control System Structure from Classical to «Evolutionary Brainway» Approach Acta // Electrotehnica*. 2001. Vol. 42. No. 1. Pp. 87–94.

22. Rozenberg G. *Handbook of natural computing*. Springer, 2012. 2097 p.

REFERENCES

1. Benderskaya E.N. *Perspektivnyye kontseptsii razrabotki intellektualnykh system, Nauchno-tekhnicheskiye vedomosti SPbGPU. Informatika. Telekommunikatsii. Upravleniye*, St. Petersburg: SPbGPU Publ., 2011, No. 6.1 (138), Pp. 173–181. (rus)

2. Benderskaya E.N., Zhukova S.V. *Analiz protsessov samoorganizatsii v khaoticheskikh fiziko-tekhnicheskikh sistemakh i ikh ispolzovaniye dlya obrabotki informatsii, Nauchno-tekhnicheskiye vedomosti SPbGPU*, St. Petersburg: SPbGPU Publ., 2008, No. 4(63), Pp. 131–138. (rus)

3. Berkovich S. Ya. *Kletochnyye avtomaty kak modeli realnosti: poiski novykh predstavleniy fizicheskikh i informatsionnykh protsessov*, Per. s angl., Moscow: MGU Publ., 1993, 112 p. (rus)

4. Dasgupta D. *Iskusstvennyye immunnyye sistemy i ikh primeneniye*, Moscow: Fizmatlit Publ., 2006, 341 p. (rus)

5. Dzhons M.T. *Programmirovaniye iskusstvennogo intellekta v prilozheniyakh*, Per. s angl., Moscow: DMK Press Publ., 2004, 312 p. (rus)

6. Paun G., Rozenberg G., Salomaa A. *DNK-kompyuter. Novaya paradigma vychisleniy*, Per. s angl., Moscow: Mir Publ., 2003, 528 p. (rus)

7. Preskill Dzh. *Kvantovaya informatsiya i kvantovyye vychisleniya*, 2008, Vol. 1, 464 p. (rus)

8. Khaykin S. *Neyronnyye seti: polnyy kurs*, 2-ye izd., Per. s angl., Moscow: ID «Vilyams» Publ., 2006, 1104 p. (rus)

9. Benderskaya E.N., Zhukova S.V. *Multidisciplinary trends in modern artificial intelligence: Turing's way, Studies in Computational Intelligence*, Springer, 2013, Vol. 427, Pp. 319–343.

10. Benderskaya E.N., Zhukova S.V. *Dynamic Data Mining: Synergy of Bio-inspired Clustering Methods, Knowledge-Oriented Applications in Data Mining*, InTech Publ., 2011, Pp. 398–410.

11. Benderskaya E.N., Zhukova S.V. *Nonlinear approaches to automatic elicitation of distributed oscillatory clusters in adaptive self-organized system, Advances in Intelligent and Soft Computing*, Springer, 2012, Vol. 151, Pp. 733–741.

12. Calude C.S., Costa J.F. (eds.) *Pre-proceedings of the Workshop Physics and Computation*, 2008, 353 p.

13. Ciobanu G., Paun G., Perez-Jimenez M.J. *Applications of Membrane Computing: Natural Computing Series*, Springer, 2006, 439 p.

14. D'Hondt E. *Exploring the amorphous computing paradigm*, 2000, 101 p.

15. Diaz-Pernil D., Perez-Hurtado I., Perez-Jimenez M.J., Riscos-Nunez A. *P-Lingua: A programming language for membrane computing, 6th Brainstorming Week on Membrane Computing*, Sevilla, University of Sevilla, 2008, Pp. 135–155.

16. Grossberg S. *Foundations and New Paradigms of Brain Computing: Past, Present, and Future Artificial Intelligence Around Man and Beyond, Lecture Notes in Computer Science*, 2011, Vol. 6934, Pp. 1–7.

17. Kia B., Murali K., Jahed Motlagh M.R., Sinha S., Ditto W.L. *Synthetic Computation: Chaos Computing, Logical Stochastic Resonance and Adaptive Computing, International Conference on Theory and Application in Nonlinear Dynamics Understanding Complex Systems*, Springer, 2014, Pp. 51–65.

18. **Komosinski M., Adamatzky A.** *Artificial Life Models in Software*, Springer, 2009, 464 p.

19. **Matsumoto G.** *Brain computing Artificial Life and Robotics*, 1999, Vol. 3, Iss. 1, Pp. 24–26.

20. **Panigrahi B.K., Shi Y., Lim M.H.** *Handbook of swarm intelligence*, Springer, 2011, 556 p.

21. **Popovici-Vlad O., Curaj A.** Robot Control System Structure from Classical to «Evolutionary Brainway» Approach Acta, *Electrotehnika*, 2001, Vol. 42, No. 1, Pp. 87–94.

22. **Rozenberg G.** *Handbook of natural computing*, Springer, 2012, 2097 p.

АГЕЕВ Евгений Владимирович – студент 6-го курса кафедры компьютерных систем и программных технологий Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, Россия, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29.

E-mail: agevg@yandex.ru

AGEEV, Evgeniy V. *St. Petersburg State Polytechnical University.*

195251, Politekhnikeskaya Str. 29, St. Petersburg, Russia.

E-mail: agevg@yandex.ru

БЕНДЕРСКАЯ Елена Николаевна – доцент кафедры компьютерных систем и программных технологий Санкт-Петербургского государственного политехнического университета, кандидат технических наук.

195251, Россия, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29.

E-mail: helen.bend@gmail.com

BENDERSKAYA, Elena N. *St. Petersburg State Polytechnical University.*

195251, Politekhnikeskaya Str. 29, St. Petersburg, Russia.

E-mail: helen.bend@gmail.com