

УДК: 004.272

Обзор по тематике клеточных автоматов на базе современных отечественных публикаций

И. В. Матюшкин^{1,a}, М. А. Заплетина^{2,b}

¹ Национальный исследовательский университет «МИЭТ»,
Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, площадь Шокина, д. 1

² Институт проблем проектирования в микроэлектронике,
Россия, 124681, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Советская, д. 3

E-mail: ^a imatyushkin@niime.ru, ^b zapletina_mariya@mail.ru

Получено 04.05.2018, после доработки — 10.01.2019.

Принято к публикации 11.01.2019.

Проведен анализ отечественных публикаций за 2013–2017 гг. включительно, посвященных клеточным автоматам (КА). Большая их часть связана с математическим моделированием. Наукометрическими графиками за 1990–2017 гг. доказана актуальность тематики. Обзор позволяет выделить персоналии и научные направления/школы в современной российской науке, выявить их оригинальность или вторичность по сравнению с мировым уровнем. За счет выбора национальной, а не мировой, базы публикаций обзор претендует на полноту (из 526 просмотренных ссылок научным значением обладают около 200).

В приложении к обзору даются первичные сведения о КА — игра «Жизнь», теорема о садах Эдема, элементарные КА (вместе с диаграммой де Брюина), блочные КА Марголуса, КА с альтернативой. При этом акцентируется внимание на трех важных для моделирования семантиках КА — традициях фон Неймана, Цузе и Цетлина, а также показывается родство с концепциями нейронных сетей и сетей Петри. Выделены условные 10 работ по КА, с которыми должен быть знаком любой специалист по КА. Некоторые важные работы 1990-х гг. и более поздние перечислены во введении.

Затем весь массив публикаций разбит на рубрики: «Модификации КА и другие сетевые модели» (29 %), «Математические свойства КА и связь с математикой» (5 %), «Аппаратные реализации» (3 %), «Программные реализации» (5 %), «Обработка данных, распознавание и криптография» (8 %), «Механика, физика и химия» (20 %), «Биология, экология и медицина» (15 %), «Экономика, урбанистика и социология» (15 %). В скобках указана доля тематики в массиве. Отмечается рост публикаций по КА в гуманитарной сфере, а также появление гибридных подходов, уводящих в сторону от классических КА.

Ключевые слова: клеточные автоматы, наукометрия, параллельные вычисления, распределенные системы, математическое моделирование

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, грант № 17-07-00570.

UDC: 004.272

Cellular automata review based on modern domestic publications

I. V. Matyushkin^{1,a}, M. A. Zapletina^{2,b}

¹ National Research University of Electronic Technology — MIET,
1 Shokin Square, Zelenograd, Moscow, Russia, 124498

² Institute for Design Problems in Microelectronics of Russian Academy of Sciences,
3 Sovetskaya st., Zelenograd, Moscow, Russia, 124365

E-mail: ^a imatyushkin@niime.ru, ^b zapletina_mariya@mail.ru

Received 04.05.2018, after completion — 10.01.2019.

Accepted for publication 11.01.2019.

The paper contains the analysis of the domestic publications issued in 2013–2017 years and devoted to cellular automata. The most of them concern on mathematical modeling. Scientometric schedules for 1990–2017 years have proved relevance of subject. The review allows to allocate the main personalities and the scientific directions/schools in modern Russian science, to reveal their originality or secondness in comparison with world science. Due to the authors choice of national publications basis instead of world, the paper claims the completeness and the fact is that about 200 items from the checked 526 references have an importance for science.

In the Annex to the review provides preliminary information about CA — the Game of Life, a theorem about gardens of Eden, elementary CAs (together with the diagram of de Bruijn), block Margolus's CAs, alternating CAs. Attention is paid to three important for modeling semantic traditions of von Neumann, Zuse and Zetlin, as well as to the relationship with the concepts of neural networks and Petri nets. It is allocated conditional 10 works, which should be familiar to any specialist in CA. Some important works of the 1990s and later are listed in the Introduction.

Then the crowd of publications is divided into categories: the modification of the CA and other network models (29 %), Mathematical properties of the CA and the connection with mathematics (5 %), Hardware implementation (3 %), Software implementation (5 %), Data Processing, recognition and Cryptography (8 %), Mechanics, physics and chemistry (20 %), Biology, ecology and medicine (15 %), Economics, urban studies and sociology (15 %). In parentheses the share of subjects in the array are indicated. There is an increase in publications on CA in the humanitarian sphere, as well as the emergence of hybrid approaches, leading away from the classic CA definition.

Keywords: cellular automata, scientometrics, parallel computing, distributed systems, mathematical modeling

Citation: *Computer Research and Modeling*, 2019, vol. 11, no. 1, pp. 9–57 (Russian).

The work was supported by Russian Foundation for Basic Research: the grant No. 17-07-00570.

Список сокращений

АКА — КА с альтернативой
 БКА — блочные КА
 ВКА — вероятностный КА
 ГФП — глобальная функция перехода
 ДКА — динамический КА
 КА — клеточный автомат
 ККА — классический КА
 ЛФП — локальная функция перехода
 МКА — подвижный КА
 НКА — нейронный клеточный автомат
 НС — искусственная нейронная сеть
 ОКА — обратимый КА
 ПЛИС — интегральная схема с программируемой логикой
 ЭКА — элементарный КА

Введение

Лет десять назад авторам приходилось объяснять в редакциях журналов, что такое клеточный автомат (КА) и где они применяются (см. приложение). Теперь уже и студенты знают про них, поскольку проблематика КА вышла на популярный уровень. В отличие от России за рубежом с 2006 г. издается специализированный журнал «Journal of Cellular Automata» (импакт-фактор журнала в 2011 г. доходил до 0.9, но потом упал до 0.65 в 2015 г.), каждые два года проводится специализированная конференция «International Conference on Cellular Automata for Research and Industry» (первая ACRI прошла в 1994 г., а 13-я — в 2018 г.), материалы которой традиционно публикуются в журнале «Lecture Notes in Computer Science».

Обзоры по тематике КА делаются от случая [Соколов, 2017] к случаю и не всегда полны. Библиография КА весьма и весьма обширна, поэтому мы ограничились только отечественными, а также украинскими, белорусскими и польскими публикациями, индексируемыми в РИНЦ (elibrary.ru), датированными последними пятью годами. За 2013–2017 гг. общее их число составило 526. В этой связи хочется отметить подготовленную проф. Шарыто А. А. (С.-Петербург, Университет ИТМО) библиографию [Шалыто, 2016] отечественных публикаций, заканчивающуюся 2014-м годом. Первая отечественная публикация датирована 1962 г., спустя шесть лет после первой зарубежной (1956); сами же клеточные автоматы впервые известны с калифорнийских лекций фон Неймана 1952 г.

Большую роль в популяризации КА в России сыграли книга М. Гарднера «Крестикинолики» (1988) по занимательной математике и перевод книги Т. Гоффоли и Н. Марголуса «Машины клеточных автоматов» (1991). Классической считается статья в УФН В. К. Ванага [Ванаг, 1999]; современные авторы также ссылаются на работы О. Л. Бандман, прежде всего об инвариантах КА-моделей [Бандман, 2012] (отметим методологическое значение ее статьи [Бандман, 2008]). Важность КА давно отмечена в работах синергетиков (Г. Г. Малинецкий, М. Е. Степанцов); так, авторы [Гусев, 2013] утверждают, что «...путь к математическому пониманию реальности в XXI веке все чаще будет проходить через модели, описываемые клеточными автоматами». Первые публикации по применению КА в проектировании интегральных схем (Стемпковский А. Л.) относятся к началу 1990-х гг. [Stempkovsky, 1990; Стемпковский, 2001]; их больше знали под названием «однородные структуры» (Варшавский А. С., 1973; Кудрявцев В. Б. и Подколзин А. С., 1985/1992; см. также монографию [Аладьев, 2009]). Самое старое название КА — итерированные массивы (iterative arrays) — активно использовалось только в 1960-е гг. Заметим, что в единственном числе «клеточный автомат» переводится как cellular automaton (во множественном будет automata).

Чтобы подтвердить тезис «в последние годы интерес к клеточным автоматам растет» (и прежде всего как к инструменту моделирования), мы провели небольшой наукометрический эксперимент: нашли динамику количества публикаций за 1990–2017 гг. (с шагом 1 год). Поиск релевантных статей проводился по трем базам индексации: Российский индекс научного цитирования (РИНЦ — elibrary.ru), Web of Science Core Collection и Scopus. Запрос к базе РИНЦ оформлялся двумя способами: поиск словосочетания «клеточный автомат» с учетом морфологии в аннотациях, названиях и ключевых словах публикаций и полнотекстовый поиск. Запрос к базе Web of Science Core Collection задавал поиск сочетания «cellular automata» в темах и заголовках публикаций, а результаты обращения к базе Scopus включали в себя все публикации, в которых оно встретилось в названии, теме, аннотации, оригинальных ключевых словах и сгенерированных автоматически путем выборки терминов, встречающихся в публикации с высокой частотой (рис. 1).

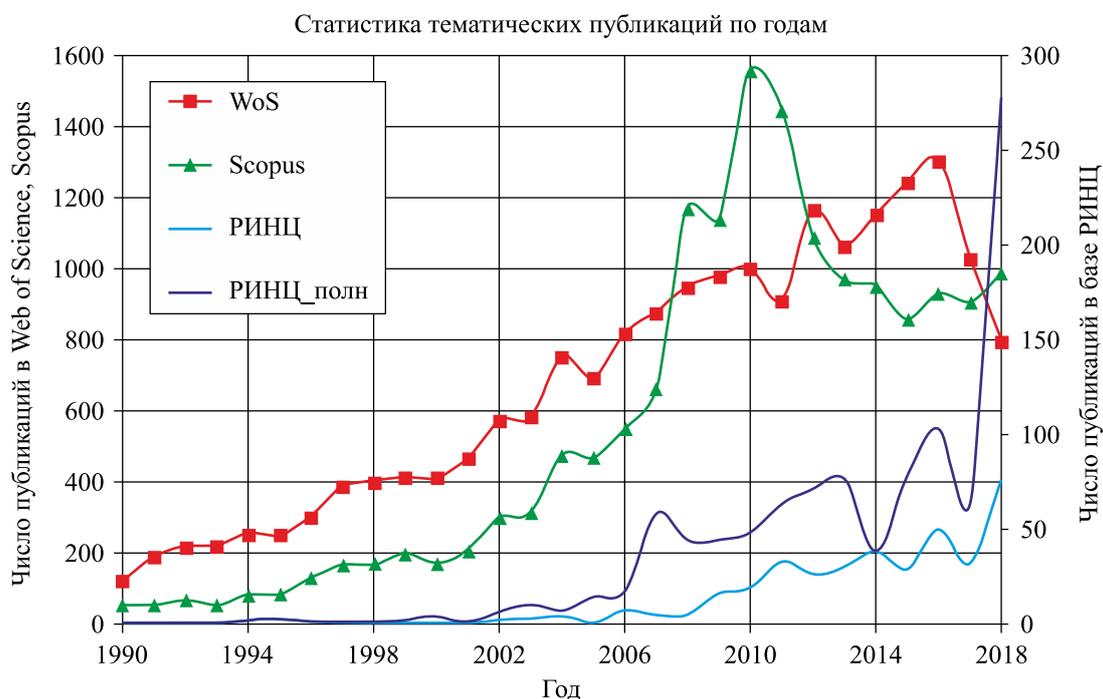


Рис. 1. Динамика публикаций по КА в период 1990–2018 гг. Цветная версия рисунка доступна на сайте журнала

Спад в последней точке объясняется тем, что на конец января 2019 г. не все журналы внесли информацию по последнему номеру 2018 г. Линия-тренд WoS показывает устойчивый рост примерно по линейному закону. Линия-тренд по Scopus или РИНЦ показывает резкое возрастание публикаций в 2007–2011 гг. с последующим возвратом к «спокойному» режиму. Хотя рост числа публикаций частично можно отнести на развитие самих наукометрических систем (или расширение списка журналов), тем не менее прогресс за 15 лет очевиден: публикаций 2015 г. примерно в 3 раза (WoS) больше, чем в 2000 г. Однако переход проблематики в разряд популярных означает и ее зрелость, и, возможно, дефицит новых идей.

Перейдем к содержательной части обзора, обращая в первую очередь внимание на оригинальность и новизну по сравнению с мировым уровнем прошлых десятилетий (до 2013 г.). Собственные работы мы не рассматриваем. Ряд публикаций из 526 оказался нам недоступен (или находится в платном доступе), а некоторые работы, обычно тезисы конференций, откровенно слабы. Тематический срез публикаций списка литературы представлен на рис. 2; отметим, что последние годы характеризуются экспансией КА-моделей на гуманитарную сферу при сохранении традиционного первенства области физико-химических процессов.

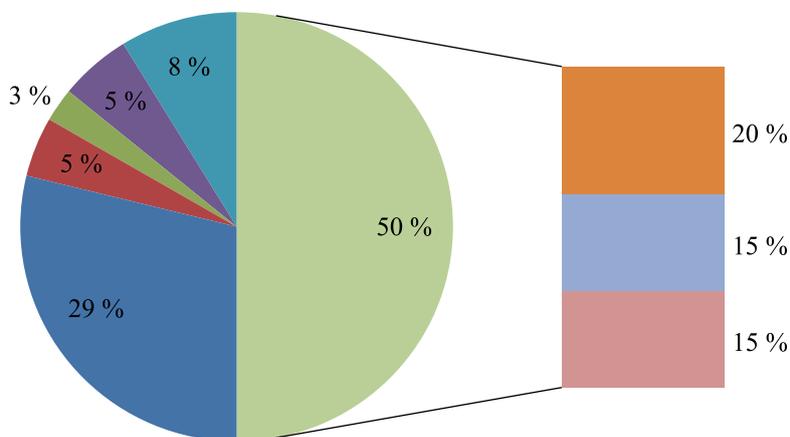
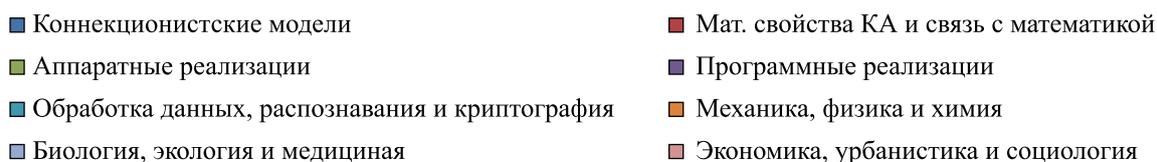


Рис. 2. Тематическое распределение публикаций по КА по списку литературы статьи. Цветная версия рисунка доступна на сайте журнала

1. Модификации КА и другие коннекционистские модели

Классические КА (ККА) обладают свойствами дискретности (пространства, времени и состояния), локальности (связей), однородности (ячеек) и синхронности (работы), а также служат для моделирования пространственно распределенных систем. Очевидно, что КА представляют собой вариант сетевой, т. е. коннекционистской, модели. На практике одно из четырех свойств часто нарушается ради эффективности, и мы получаем гибридные структуры. Очень часто вводят элемент случайности в локальную функцию переходов (ЛФП) КА.

Модификацией ККА является подвижный КА (movable CA, МКА), идея которого пришла из прикладной мезомеханики и исследований деформации и разрушения материалов (член-корр. РАН С. Г. Псахье) [Псахье, 1995]. В отличие от ККА, где ячейки закреплены в узлах решетки с заданным шаблоном окрестности и неподвижны, подвижные клеточные автоматы активно меняют своих соседей за счет разрыва существующих связей между автоматами и образования новых связей. Координаты и скорость автомата присутствуют явным образом как компоненты состояния ячейки, что роднит МКА с мультиагентными системами, введенными в 60-е гг. М. Цетлиным, изучавшим ансамбли конечных автоматов. Это направление получило развитие не только в работах авторов [Смолин, 2013; Смолин, 2014; Астафуров, 2014; Григорьев, Шилько, 2015; Димаки, 2016; Смолин, 2017], но и в работах последователей [Коноваленко, 2015; Бобков, 2015а; Бобков, 2016b; Заболотский, 2017; Дмитриев, 2015].

Другая модификация ККА вводится в работах П. Г. Ключарёва по криптографии [Ключарев, 2013а; Ключарев, 2013b; Ключарев, 2014c; Балк, 2016b; Ключарев, 2016d; Ключарев, 2017e; Балк, 2016a; Ключарев, 2016f], начиная с 2011 г. Обобщенный КА представляется мультиграфом, а не решеткой ККА; соответственно вместо шаблона окрестности вводится связность i -й вершины d_i , а вместо ЛФП — локальная функция связи f_i с числом аргументов d_i (сознательно или нет, авторы исключили зависимость функции перехода от значения самой центральной ячейки, т. е. окрестность «проколотая», если, конечно, не использовать циклические ребра $i \rightarrow i$). В однородном обобщенном КА $\forall i \ d = d_i$, $f = f_i$. В неориентированном обоб-

щенном КА $(i \rightarrow j) \Leftrightarrow (j \rightarrow i)$. Ориентированные КА представляются нам нестандартным расширением ККА. По аналогии с нейросетями автор выделяет выходные (определяемые априори среди всего множества вершин) и скрытые ячейки. Для построения криптографической хэш-функции, как обосновывает автор, хорошо подходят обобщенные КА на основе графов Рамануджана. Например, в [Балк, 2016а] исследуются КА малого размера для построения генераторов псевдослучайных последовательностей (см. раннюю работу [Сухинин, 2010]) и лавинный эффект в них.

Теоретико-графовый взгляд на обобщенный КА характерен и для [Носова, Сенникова, 2014b], где моделируется конкуренция двух/трех мемов в социальной сети. С точки зрения социологии интересны работы О. П. Кузнецова [Кузнецов, 2014; Кузнецов, 2015], где анализируются модели активности сетей.

Независимым развитием идеи обобщенного КА следует считать работу Витвицкого А. А. [Витвицкий, 2014а], где вводится динамический КА (ДКА): «ДКА отличаются от классических КА тем, что структура пространства клеток ДКА может изменяться во времени, а межклеточные связи описываются явно при помощи матрицы соседства. Для ДКА также введены оператор вставки и оператор разбиения клеточного массива, позволяющие динамически менять структуру пространства клеток». В идее оператора вставки [Витвицкий, 2014b] прослеживается аналогия с L-системами (см. также [Потапенко, 2016]). Витвицкий [Витвицкий, 2015] предлагает метод организации массива ячеек клеточного автомата в виде иерархии (поверхность \rightarrow \rightarrow кольца \rightarrow списки ячеек), который позволяет генерировать поверхности различных форм. Основная идея метода заключается в том, что вся поверхность разбивается на кольца, состоящие из ячеек. Массив, организованный таким образом, позволяет изменять структуру моделируемой поверхности во времени, не перестраивая при этом всю поверхность целиком.

Авторы работы [Замятин, 2013], посвященной геоинформатике, прослеживают связь вероятностных КА (ВКА) и марковских цепей; формулы ЛФП задаются, как и в марковском процессе, через умножение на матрицу вероятностей. Семантика определения вероятностей раскрыта акцентированно. Интересно, что вероятности перехода зависят не только от количества соседей k -го типа (ландшафта) в окрестности ячейки, но и, насколько мы поняли, доли переходов $k \rightarrow l$ в глобальной динамике КА (глобальной функции перехода, ГФП). Это вводит элемент обратной связи в функционирование КА, когда параметры ЛФП зависят от агрегированной динамики на предыдущих итерациях; ранее мы предлагали похожую идею — КА со сверхячейкой, состояние которой содержало бы агрегированную по другим ячейкам информацию. Таким способом ослабляется ограничение локальности ККА, так как ЛФП через параметр зависит от прошлых ГФП. ВКА является частным случаем КА с альтернативой (АКА), так как сработавшее правило перехода зависит от разыгрываемой случайной величины, которая приобретает значение селектора.

Довольно оригинальна концепция квазиклеточных сетей, содержащаяся в работах Аристова А. О. [Аристов, 2013с; Аристов, 2013b; Аристов, 2013d]. С одной стороны, утверждается, что КА — частный случай квазиклеточной сети (определяемой через некий базовый граф без сигнатуры), а с другой — описывается метод битого КА, позволяющий удалением ячеек из регулярной матрицы КА получить квазиклеточную сеть. Следует указать на неполную аналогию с так называемыми фронтальными КА, позволяющими снизить затраты на исчисление ГФП, а также с работой [Беланков, Столбов, 2005], где для описания кристаллизации вводились макроячейки, и с известным КА WireWorld, в котором пассивность ячейки изолятора вводилась добавлением особого состояния. Динамика сети рассматривается сквозь «призму» фишек в сетях Петри, которые циркулируют по ребрам сети. Свои рассуждения автор проводит для планарного графа и двумерного КА, существенно используя метрические свойства плоскости; визуально ребро графа заполняется ячейками (конечными автоматами) конечного размера. Это выглядит несколько наивно; тем не менее концепция представляется довольно свежей и перспективной, если учесть ее потенциальное обобщение на 3D. Тот же автор в [Аристов, 2013а] касается вопроса обучения сети (по аналогии с НС) и с этих позиций разделяет состояние ячей-

ки на три компоненты: базовую (не изменяется, параметризуя ЛФП), транспортную (меняющуюся при прохождении фишек) и фазовую (характеризующую сами фишки). Такое трехчленное деление мы поддерживаем, хотя и исходим из другой семантики КА (Неймана, а не Цузе, которой придерживается Аристов). Актуальность этого вопроса очевидна, если рассматривать КА как архитектуру вычислительной системы.

Гибрид КА и сетей Петри представлен в [Башкин, 2017] — клеточная Р-сеть, работающая в асинхронном режиме и близкая к семантике Цетлина (мультиагентность). Отличие от классических сетей Петри в том, что фишка наделяется собственным поведением, т. е. «автоматная» фишка потребляет и производит фишки, находящиеся в соседних вершинах-состояниях. Каждая такая фишка является конечным автоматом. Синтез КА и сетей Петри обсуждается в [Михаль, 2013а].

В ряде работ сделаны попытки посмотреть на КА с точки зрения других коннекционистских систем, и наоборот [Zaitsev, 2018] (например, в аспекте самоорганизации [Травкин, 2017]). Так, в [Дедегкаев, 2013] рассматривается реализация НС с помощью ПЛИС, причем для проектирования составлялся трехмерный КА, определяемый через граф. Состояние ячейки КА описывается 28 разрядами. Три старших определяют тип ячейки: 000 — входной сигнал (X), 001 — дендрит, 010 — сумматор, 011 — нелинейный преобразователь, 100 — аксон, 101 — порог, 110 — пустая клетка, 111 — выход (Y). Сама возможность такого проектирования/эмуляции естественным образом вытекает из коннекционизма, присущего КА и НС. В [Аникин, 2014] КА использовали для обучения нейросети Кохонена.

Авторам [Ершов, 2014] удалось синтезировать подходы L-систем, марковских процессов и блочного ВКА, функционирующего по механизму Марголуса. Иногда КА интерпретируют [Vandman, Markova, 1994] как систему параллельных подстановок. Следуя [Ершов, 2014], «если правая и левая части каждого правила заданной системы подстановок имеют равные длины, то такую марковскую систему можно трактовать как блочный стохастический КА, в котором состояния клеток меняются согласованно в рамках каждого блока, а сами блоки формируются случайным образом. Такой КА будем называть автоматом с марковской окрестностью».

Авторы [Копылов, 2014] вводят гибрид концепций КА и нейросетей: нейронный клеточный автомат (НКА) и, соответственно, автоматный нейрон (W-нейрон); они доказывают их асимптотическую эквивалентность импульсному (спайковому) нейрону (и НС). Они делают шаг к формальному введению в модель нейрона памяти, считая порог и мембранный потенциал нейрона переменными и, самое главное, фазовыми величинами. НКА смещены больше в сторону нейросетей, так как время считается непрерывным и не делается предположения о регулярности структуры сети, свойственного известной концепции клеточных нейронных сетей (CNN = cellular nonlinear net, предложены в 1988 г. Leon Chua). В [Шестаков, 2016] введение памяти в модель нейрона проводится более акцентированно; более того, каждому состоянию так называемого клеточного нейрона (авторы выделяют 4 группы состояний) ставится в соответствие функция активации. По нашему мнению, эта идея, которую мы находим независимо во многих работах (включая собственные), витает в воздухе и станет одной из прорывных в области НС в будущее десятилетие.

В работе [Тихомиров, 2014] предложен оператор направленной мутации для адаптивного генетического алгоритма для генерации клеточных автоматов. Общая проблема поиска «нужного» КА, например, путем подбора коэффициентов ЛФП (для сравнения: в НС это веса и пороги) тождественна задаче обучения и еще раз говорит о родстве коннекционистских систем, углубляя теорию КА. В редуцированном виде она появилась еще у Лэнгтона (Langton, 60-е гг.), а затем получила развитие у Кречфилда (Crutchfield, сер. 90-х гг.). Исследователями данной проблематики из Университета Санта-Фе предложено устойчивое сочетание — evolving CA, подразумевающее не какой-то вид КА, а способ оперирования массивом КА с параметризуемыми ЛФП. К этому же направлению примыкает [Гамова, 2016] исследование криптографических свойств (генерация псевдослучайных чисел) элементарного КА (в вольфрамовском смысле, см. приложение), с ЛФП, зависящей динамически от другого элементарного КА, — self-

programmable CA. Также авторы исследовали неоднородный КА, где одна часть ячеек работала по правилу 90, а другая — по правилу 150; такой КА с 19 ячейками имеет длинный период колебаний глобальной конфигурации 216, близкий к верхнему пределу 219. Те же идеи реализуются и в [Ефремова, 2017]. Оба типа КА могут считаться примером АКА (alternating CA).

Близкой к АКА является конструкция неоднородного КА, формальный вариант которой дан Богатовым Н. М. в [Авдеев, 2015]. В данной работе анонсирована «теория развития самоподдерживающихся автоволновых процессов, основанная на новом классе неоднородных КА, использующих специальные аккумулятивные функции для распределения неоднородности». Отметим, что идея КА с несколькими классами ячеек уже высказывалась ранее в зарубежных публикациях; авторы [Авдеев, 2015] лишь дополнительно формализовали ее и применили к случаю элементарных КА.

Многоплановой является работа [Алешкин, 2017], примыкающая к известной модификации ККА с памятью (CA with memory), т. е. в список аргументов ЛФП вводится состояние ячейки в предыдущий (или предыдущие) момент времени. Мотивацией авторов послужила социальная динамика на примере предпочтений избирателей в ходе выборов США 2016 года, демонстрирующая квазипериодический режим (более простые режимы нашли авторы [Носова, 2014a]). Использовался ВКА со случайными соседями на каждом ходу, что является усилением концепции обобщенного КА. Авторы дают россыпь идей (например, вводят глубину «забывания», т. е. число ходов, в течение которых ячейке запрещено изменять свое состояние), демонстрируя многовариантность и значение вычислительного эксперимента в КА-проблематике. Для его проведения ими был создан программный продукт на основе C# и XML, адаптированный под конкретику задачи. КА с памятью для решения интегро-дифференциального уравнения температуропроводности исследовались в [Селетков, 2015]. При этом использовались лингвистические переменные, аналогично [Темиров, 2016с] и [Матвиенко, 2014], что позволило авторам классифицировать КА как нечеткий. Теория нечетких КА дана ими в [Марценюк, 2015].

Формальная теория КА, работающего в асинхронном режиме, дана О. Л. Бандман в [Бандман, 2015a]. В общем случае результат работы КА зависит от порядка, обычно случайного, исполнения ЛФП; автор считает, что, несмотря на небольшие количественные отклонения, качественных расхождений при разном порядке нет. На наш взгляд, исследование эквивалентности синхронных и асинхронных, а также блочно-синхронных и парно-асинхронных КА достаточно важен как для теории КА, так и для практики моделирования. Там же дана формализация и асинхронного КА со стохастической альтернативой. Исследовались три нелинейные задачи: 1) распространения фронта двумерной волны; 2) агрегации, ограниченной диффузией (DLA); 3) пространственной самоорганизации в системе «хищник–жертва». Исследованию автоволновых колебаний посвящена работа [Бандман, 2015b].

В работе [Иванова, 2013] дискретная модель регулярной ячеистой структуры представлена в виде обобщенных регулярных полиномиальных форм многозначной логики; однако сделанная «привязка» к МКА показалась нам весьма неочевидной. В работе других авторов [Корнеев, 2014] обсуждается дискретная клеточно-иерархическая система как система многоуровневой структуры, представляющая собой композицию сложных автоматов (клеток), которые разбиваются на отдельные клетки (элементарные автоматы), формирующие внутренние итеративные цепи. Отметим, что вопросы иерархии КА сравнительно недавно актуализировались в мировой науке (самые ранние работы относятся к 1980-м гг.).

Коннекционистская система, реализованная «в железе», иногда выступает объектом КА-моделирования. Для облачных систем пример дан в [Волокита, 2016]. Диссертация [Нижниковский, 2013] посвящена беспроводной мобильной сети в аспекте приложения КА, а статьи независимых авторов [Клиньшов, 2013; Захарчук, 2013] — беспроводной сенсорной сети. Работа [Захарова, 2015] представляет собой незрелую попытку КА-моделирования работы сети сотовой связи.

КА, как инструмент генерации ветвящихся узоров, что важно в дизайне и эстетике, наряду с L-системами упомянут в [Соколова, 2016]. Широко известны треугольники Серпинского на диаграмме «пространство–время» для элементарных КА С. Вольфрама.

2. Математические свойства КА и связь с другими разделами математики

В [Кучеренко, 2011] продолжают, начиная с теоремы Мура–Майхилла (50-е гг.), исследования алгоритмической разрешимости задачи об обратимости КА. Основным результатом (школа В. Б. Кудрявцева и А. С. Подколзина) получается сведением проблемы обратимости КА к проблеме останова машины Тьюринга в специальной формулировке и зафиксирован в теореме о неразрешимости для некоторого класса двумерных КА с двумя состояниями. Теорема связывает арность ЛФП и число состояний головки машины Тьюринга.

Интерес представляет работа [Золотов, 2016], где одномерный КА с единичной окрестностью, для которого доказана гиперэкспоненциальная временная сложность работы, использовался в доказательстве одной проблемы разрешимости теории целых чисел. Здесь КА дается как способ параллельных подстановок, близкий к рассмотренному в [Ершов, 2014].

В [Титова, 2013] дается оценка сложности алгоритма формирования двумерного изображения на «экране» — двумерном массиве черно-белых пикселей; основная задача состоит в создании правильной последовательности «входов» КА (состояния границ), чтобы неопределенно долгое время удерживалось «изображение» (глобальная конфигурация КА). Задача носит прикладной характер и одновременно рассматривает КА в качестве открытой системы, что нетипично для традиционных математических работ.

Как ни странно, до сих пор не прекращаются исследования ККА Конвэя [Горовенко, 2017] (пик таких экспериментальных исследований пришелся на нач. 80-х гг.). Простой двумерный КА с небольшой модификацией ККА Конвэя (при ограниченном замкнутом поле) рассматривался в [Балукин, 2017] с привязкой к криптографии; рассчитывались коэффициенты корреляции между текущей и будущей глобальными конфигурациями КА (математический уровень ниже, чем в упомянутых выше работах Ключарёва и Сухинина, но поэтому работу легче понять).

Весьма оригинальной, хотя и близкой к исследованиям С. Вольфрама по генерации числовых последовательностей элементарными КА, является работа В. Г. Титова [Титов, 2015]. Пусть требуется вычислить приближенно некую функцию в некоторой области, соотношенную с полем КА. Для этого подбираются дифференциальное уравнение и краевые условия, решением которого является искомая функция. ЛФП КА при этом синхронно реализует конечно-разностную схему. В [Титов, 2015] этот алгоритм применялся для вычисления функций \ln , \sin вещественного переменного с помощью уравнения 2-го порядка.

В [Евсютин, 2015] аппарат КА приспособили к решению оптимизационных задач (при том что автор постулирует конструкцию «КА с целевой функцией»). В действительности же просто специфицируется модель ККА: в ЛФП инкорпорирована целевая функция, а состояние ячейки задано двойкой «фазовое состояние (континуальное), целочисленная метка». КА-оптимизатор протестирован на трех стандартных примерах.

Большой интерес вызывает работа [Лабунец, 2016], посвященная цветным метасредам Шрёдингера, для которых решается уравнение диффузии. Используются триплетные числа — обобщение комплексных чисел, где мнимых частей две. Так как триплетным числом можно закодировать RGB-пиксел, то прикладное значение статьи связано с машинным зрением. Ячейки клеточного автомата размещены в 2D-массиве, они могут выполнять базовые операции с триплетными числами и обмениваться сообщениями о своих состояниях со своими соседями. В статье отсутствует четкая формулировка ЛФП.

Другие авторы [Губарев, 2014] провели статистические исследования КА с механизмом Марголуса (см. также [Григорьев, Мантуров, 2015]); их результаты можно считать эмпирическим доказательством того, что уравнение диффузии, по крайней мере 2D и 3D, действительно описывается КА Марголуса, причем модифицированный авторами вариант (через введение вероятностей поворота) описывает лучше.

3. Аппаратные реализации

Известно не так много аппаратных реализаций КА; некоторые решения обсуждаются в [Аноприенко, 2015] (впрочем, это делается на слишком высоком уровне абстракции). Иногда фрагмент микросхемы может реализовывать логику своей работы, представляя собой КА; авторы [Храбров, 2015] продемонстрировали это на примере сигнатурного анализатора для самотестирования микросхем. Они же [Мурашко, 2013] предложили КА-решение для самотестирования с помощью генерации длинной числовой последовательности. В [Ланских, 2015] сходная задача решалась двумя КА с потенциальной реализацией на ПЛИС EP2C35F672C6 семейства Altera Cyclone II.

То же относится и к квантовым КА (тематика восходит к работам Крейга Лента нач. 2000-х), с помощью которых спроектировали умножитель в поле Галуа [Akbarzadeh, 2014]. Самоорганизация квантовых точек в таком КА моделировалась [Степанов, 2016] нейросетью.

4. Программные реализации

Вопрос реализации универсальной среды проектирования и имплементации КА стоит по-прежнему остро; спорадически предпринимаются такие попытки и в России, и в мире (CAM-8, MCell, Golly; DDLab Энди Вунша успешен до сих пор), но универсализм не достигается, а программный продукт перестает поддерживаться. Часто прибегают к использованию общематематических утилит и скриптовых языков — Wolfram Mathematica (только элементарные КА, [Киселев, 2014]), MathCAD [Михаль, 2013b] и даже макросы MS Excel [Азиков, 2016].

Более серьезные исследования используют программную среду MPI и другие параллельные программно-аппаратные платформы. Для сравнения эффективности двух платформ, LuNA и MPI, проводился [Markova, 2017] КА-расчет (двумерная модель класса HPP1gr) интерференции волн от двух периодических источников. Следует обратить внимание на разработку Новосибирского госуниверситета — систему моделирования мелкозернистых алгоритмов и структур WinALT, по-видимому имеющую более высокий ранг универсальности, чем КА (см. опыт реализации КА [Ачасова, 2013] с ее помощью).

Авторы [Башабшех, 2013a] использовали среду имитационного моделирования Anylogic. В [Гнатюк, 2014] описан программный модуль, расширяющий возможности инструментальной геоинформационной системы (ГИС) ArcView. Языком программирования выбран C++, среда разработки MS Visual C++. Авторы простой модели городской колористики (цвет фасадов домов) пользовались [Грибер, 2017] приложением NetLogo. Упомянута реализация КА на языке Rust [Шлагов, 2016b].

В [Голубчиков, 2013] моделировали растворение аскорбиновой кислоты, окруженной двухслойной оболочкой (всего три компонента в системе). Линейный размер клеточного автомата составил 500 клеток, всего клеток в системе — 375 миллионов. Время одного расчета — около 40 часов при конфигурации 2 IntelXeonE2650 (4 физических ядра, 8 виртуальных ядер на 1 процессор), 32 Гб RAM. В [Калгин, 2013] К. В. Калгиным исследуются возможности применения блочно-синхронных режимов КА для моделирования кинетическим методом Монте-Карло на графических ускорителях. Результаты тестирования модели окисления углекислого газа на поверхности платины (1989, модель ZGB) представлены при размерах клеточной области в 1000×1000, 2000×2000 и 8000×8000 клеток на графических ускорителях GTX 280 и GTX 680.

Идея среды проектирования КА частично реализована на связке среды Delphi/MATLAB5.2 [Князькова, 2014]. Этот подход в целом совпадает и с нашим подходом (SoftCAM). Следует признать даже скандальным факт отсутствия в России и мире универсальной САПР для КА.

5. Обработка данных, распознавание и криптография

В работе [Дмитриев, 2017] КА применялись в ГИС «Уралгеоинформ» для постобработки площадных объектов на топографических картах. Пиксел изображения сопоставлялся ячейке 2D КА с окрестностью Мура, имеющей одно из 7 состояний: «неопределенное» и принадлежащее 6 классам площадных объектов (гидрография, леса, жилая застройка и т. п.). Срабатывание правил перехода определяется по числу соседей одинакового класса (порог равен 4 или 6). КА с аналогичными правилами применялся для сглаживания при сегментации [Хашин, 2013] или сравнении [Короткин, 2014] изображений.

Традиционная тематика распознавания символов на основе КА представлена в [Туркменова, 2016] для узбекского языка; алгоритм дан на вербальном уровне. КА применялись и для действительно актуальной задачи поиска фона, где находятся объекты [Королев, 2013]; алгоритм представлен вербально и со ссылкой на алгоритм GrowCut. В [Myroniv, 2017] для распознавания символов использовались подвижные КА и введенные автором «конкурирующие КА». Приводится блок-схема программы и алгоритма (в нотации IDEF0) и показывается превосходство над алгоритмами АБВУ FineReader. Особенности распознавания арабских цифр рассмотрены в [Малкин, 2017], где специфицирован КА с метками. В [Максимов, 2016] предлагается новый подход к оценке изменений (яркостных, конфигурационных и их композиций) для двух последовательных полутоновых изображениях одной и той же сцены, полученных в разные моменты времени. Применялись КА с непрерывными значениями, обладающие диффузионной динамикой (т. е. КА решает уравнение диффузии). В [Грозов, 2013] КА использовались для сжатия данных при массовой обработке ионограмм при зондировании ионосферы над районами Сибири; детали КА не освещаются.

Ряд работ по криптографии упоминался нами ранее. Попытка обзора по КА и криптографии сделана Жуковым А. Е. [Жуков, 2017, часть 1; Жуков, 2017, часть 2]. КА применялись для декодирования помехоустойчивых ходов независимыми группами [Гладких, 2013; Евсютин, 2013]. В области стеганографии (Евсютин О. О. [Евсютин, 2013; Евсютин, 2014b; Евсютин, 2014a]) при сжатии информации об изображении использовался блочный КА; в работе сделаны оценки отношения «сигнал/шум» и потери информации при восстановлении на базе изображений 512×512 . Восстановлению зашумленных изображений посвящена работа того же автора [Евсютин, 2016], причем активно использовались evolving CA. В [Романов, 2014] для защиты данных предложена система с ядром на основе двумерного КА (границы замкнуты), повторяющего свое начальное состояние; автор неправильно называет его циклическим. Пример действительно циклического КА — автомат Гриффитса, где возможные состояния ячейки: а) можно упорядочить индексом k ; б) k -е состояние всегда переходит (или не переходит) в $(k + 1)$ -е; в) последнее переходит в первое.

6. Механика, физика и химия

В области физической мезомеханики, независимо от работ Псахье, развивается направление стохастических возбудимых КА (В. Е. Панин и др. [Панин, 2014]) с целью учета перемещения материала и механических напряжений по межзеренным границам [Моисеенко, 2013]. По мнению авторов, «существенным отличием... от подвижных КА является то, что активный элемент описывает не дискретный мезообъем материала, а фиксированную область пространства, через которую протекает материал, т. е. в терминах гидродинамики SEGA-элемент моделирует контрольный объем». С другой стороны, авторы пишут: «...Реализуется явный учет поликристаллической структуры материала, т. е. наличия в нем внутренних границ раздела. Сеть активных элементов, составляющих образец, разделена на кластеры, каждый из которых моделирует зерно поликристалла, обладающее собственной ориентацией, заданной углами Эйлера. Исходя из эйлеровых углов ориентаций смежных зерен, определяется угол разориентации на интерфейсе». Строгой формулировки КА-модели не приводится (можно только понять, что ра-

диус КА равен трем координационным сферам), а ссылка на мезомеханику Дж. Си, где отвергается третий закон Ньютона, заставляет усомниться во всей работе. Однако в мезомеханике существуют КА-модели и стандартного типа (Чередниченко А. В. и др.); так, в [Алексеев, 2014; Алексеев, 2015a; Чередниченко, 2015; Алексеев, 2015b] анализируется фрактальная структура кластеров элементарных повреждений при разрушении тел. В [Алексеев, 2015a] используются сразу два КА, действующие попеременно. Другие авторы [Попов, 2015] исследовали эффект Партевена – ле Шателье с помощью обычного КА с гексагональной решеткой, радиусом окрестности 2 и семью состояниями. Заметим, что символ дислокации, использованный авторами, встречался нами в какой-то ранней работе по КА. В сейсмологии известна [Черепанцев, 2015] сравнительно простая КА-модель Олами–Федера–Кристенсена с нелинейным поведением.

Несмотря на высокую степень разработанности (см. небольшой обзор [Шлагов, 2016a]) тематики КА в гидродинамике (ННР/ГНР модели), в [Чернявская, 2013; Чернявская, 2014] решается задача обтекания жидкостью препятствий, включая области турбулентности, с помощью КА «решеточный газ Больцмана». Один из авторов в [Бобков, 2015c; Бобков, 2015d] указал, напротив, на преимущества НРР-модели для поведения газов при пониженном давлении. Оседание твердых частиц в потоке жидкости анализировалось в [Рубцов, 2017]. Автор [Ивашов, 2014], продолжая линию МКА при моделировании тепловых трубок в нанотехнологиях, анализирует сходство с методом молекулярной динамики и методом конечных объемов и перспективы синтеза. С выводами автора мы не вполне согласны и настроены скептически по поводу такого синтеза, тем не менее возможна дискуссия.

Моделирование пористого материала, просачивание жидкости через него (наподобие перколяции) и др. процессы представляют благодатную почву для применения КА. Так, в [Бандман, 2013] дается простая версия ВКА, имитирующая конвекцию под действием внешней силы, диффузию и взаимодействие со стенками. Утверждается, что модификацией ЛФП можно учесть высыхание материала, набухание стенок в гидрофильных пористых материалах. КА трехмерный, представлен композицией «медленного» одномерного КА и «быстрого» двухмерного. В [Киреева, 2015] описывается двухслойный тоталистический КА, позволяющий генерировать компьютерное представление пористых сред со сложной неоднородной морфологией. Двухслойный КА представляет собой композицию двух КА: тоталистического (первого слоя) и асинхронного (второго слоя). Технология создания пористой среды анализировалась ВКА в [Белоус, 2016]. Пористый материал является частным случаем нанокompозита (матрица плюс наполнитель); его поведению под нагрузкой посвящена работа [Иванов, 2014], где имплементация 3D КА с непрерывными значениями происходила с применением MPI (см. также [Меньшутина, 2017]).

Применение КА для самоорганизации неоднородных систем типа стекол, ситаллов и др., характеризующихся возникновением ближнего порядка, выглядит многообещающим (а возможно, и единственным с точки зрения инструментальных средств), что демонстрируется [Шевченко, 2013] на примере неорганического селената уранила. Здесь также интересна технология моделирования: вначале строится граф соединений химических групп, затем он планаризируется и переводится в одномерную решетку с тремя состояниями (0, 1, 2). Зародышем авторы считают начальное условие, преимущественно периодическое и неограниченное слева и справа. В остальном КА элементарный и формализован диаграммой де Брюна (de Bruijn), причем авторы усматривают ее аналогию с проекцией Шлегеля выпуклого семивершинника, образующегося при комбинации тетраэдра с тетрагональной пирамидой. Для моделирования применялась компонента CellularAutomaton пакета Mathematica 6.0. Одномерность КА позволяет упростить запись правил перехода, анализ динамики на диаграмме «пространство–время», но, с другой стороны, двумерная или трехмерная модель больше бы отвечала физико-геометрическому смыслу задачи.

В [Доний, 2013] предложили формулу «критического радиуса зародыша твердой фазы при гомогенной кристаллизации, которая получена на основании синергетического представления о клеточных автоматах». Последняя часть утверждения представляется нам крайне сомнитель-

ной, так как не следует превышать точность КА-моделирования, ограниченную квантами пространства (и времени). Образование островков в многокомпонентных системах АЗВ5 моделировалось в [Благин, 2016].

В [Кучинский, 2013] разработана математическая модель для процессов формирования многослойных однородных покрытий инертных гранул с предварительно нанесенной на них пористой подложкой. Модель позволяет рассчитывать основные параметры покрытия — его толщину, массовую и объемную доли влаги в покрытии, концентрации компонентов, определить фазовые переходы при формировании покрытия. Для расчетов используется двумерный клеточный автомат с квадратной решеткой и окрестностью Мура. Каждая клетка может находиться в одном из четырех состояний: газ, жидкость, кристалл, инертный материал подложки. К этой дискретной переменной присоединены еще две вещественные переменные. Статья является типичной для КА-моделирования фазовых переходов; пример кристаллизации описан в [Доний, 2014], а дендритной кристаллизации в металлах — в [Анисимов, 2013]. Атомарный взгляд на кристаллизацию представлен в [Мясниченко, 2016] с естественным соответствием: узел кристаллической решетки есть ячейка КА, а химическая связь отражает соседство. Показано, что с помощью наборов простых правил на гексагональной сетке можно моделировать различные физические особенности данного самоорганизующегося процесса, включая атомную сегрегацию на межзеренных границах.

Что касается КА-описания адсорбции, то авторы [Варфоломеева, 2013] акцентируют внимание на методике выбора кванта пространства КА и выбора размера молекулярной площадки в случае отличающихся по размеру адсорбатов (бензол и кислород). Несмотря на методическое значение и некоторую конкретику цифр, КА-расчета приведено не было. Взаимодействия между активными частицами и матрицей силиконового аэрогеля при хроматографии моделировались в [Супана, 2013; Голубчиков, 2015], где авторы использовали классический блочно-поворотный механизм Марголуза, причем вероятности поворота на $\pm 90^\circ$ определялись через комбинацию аррениусовских экспонент и статсумму. Те же авторы (Н. В. Меншутина) применили КА Марголуза для задачи адсорбции [Голубчиков, 2014], а упрощенную версию МКА — для задачи набухания/растворения [Иванов, 2015]. В [Коньгин, 2016] рассмотрен процесс осаждения на неметаллическую подложку с предварительным напылением металлической пленки. При моделировании использован 1D КА, учитывающий процессы растворения, осаждения и диффузии в электролите; простота модели подкупает. На вероятность реализации элементарных процессов оказывает влияние электрическое поле. Для изучения кинетики сборки одноцепочечного фрагмента ДНК была построена [Григорьев, Мантуров, 2015] простая численная модель процесса полимеризации на основе блочных КА.

Продолжается приложение КА с непрерывными значениями к уравнениям математической физики. В частности, в [Жихаревич, 2013] рассмотрена задача Стефана — распространения температурного поля в системе «твердое тело – жидкость» с четкой и подвижной границей раздела. Примерами могут служить промерзание грунта, метод зонной плавки [Жихаревич, 2017] или Чохральского при производстве кремния, где, очевидно, имеет место фазовый переход 1-го рода. Авторы рассмотрели тестовые задачи размерностей 1, 2 и 3.

По-видимому, первым применением (в мире?) КА для низкоуровневого моделирования полупроводниковых приборов можно считать [Сабельфельд, 2016], где рассматривалась диффузия и рекомбинация электронов и дырок. КА асинхронный и со стохастической альтернативой (5 вариантов правил), размерности 2 или 3. Интересно, что каждому варианту отвечает собственный квант времени. «Выходом» модели была интенсивность фотolumинесценции, а среди элементарных процессов принималось во внимание туннелирование. Использовались ресурсы Сибирского суперкомпьютерного центра СО РАН. Как указано авторами в [Сабельфельд, 2017], эффективность распараллеливания составила 85 % при 12 потоках. Отметим похожую работу [Сарсенова, 2017] по фотolumинесценции, но детали КА здесь прописаны частично. В [Рябуша, 2015] находятся общие черты КА и метода «частиц в ячейке» при расчете заряженных частиц в магнитном поле.

КА нашли применение и в промышленной экологии при совместном учете эмиссии загрязнений, массопереносе частиц (3D) и выпадении на поверхность [Шинкаренко, 2013]. Авторы, однако, не привели деталей КА и декларируемых ими фрактальных размерностей. В [Надеждин, 2017] электроэрозионный метод водоочистки моделируется 3D КА с гексагональной сеткой (и квадратной по вертикальной оси). Основной вопрос модели — как проходят случайные токовые дорожки. Детали КА почти не описаны.

7. Биология, экология и медицина

Системы с положительной обратной связью, как показала общая теория систем, описываются идентичным образом. Поэтому рассмотрим процессы «с размножением», даже из далеких к биологии областей, именно здесь.

Распространение компьютерного вируса в сети моделировалось вероятностным КА с шестью битовыми компонентами состояния [Грайворонский, 2015]. Несмотря на проработанность вопроса распространения пожаров в зарубежной литературе, отечественные исследования [Солодовниченко, 2013] продолжаются. Так, в монографии [Мельников, 2017] дана модель пожара; КА трехмерный [Рудницкий, 2014], вероятностный и, как подчеркнуто авторами, масштабируемый. Низовой пожар моделируется в [Кухта, 2014]: ячейки КА содержат агенты, и поэтому КА формально весьма далек от ККА даже в семантике Цузе. Попытка провести КА-моделирование горения для синтеза ферритов сделана в [Жандаров, 2017]; ЛФП КА записываются на основании уравнений диффузии и теплопереноса (см. также [Марковский, 2014]) и предполагают альтернативу. Эпидемия холеры моделировалась в [Башабшех, 2013b] путем дискретизации на гексагональной решетке системы из 5 дифференциальных уравнений, содержащих случайные параметры. Компоненты состояния ячейки КА (восприимчивые, инфицированные, выздоровевшие, высокоактивные вибрионы, низкоактивные вибрионы) квазинепрерывны, т. е. выражаются натуральным числом в большом диапазоне (от 0 до 12 000). Модель далее развита в [Башабшех, 2013a].

Авторы [Захаров, 2013] исследовали термотаксис одноклеточных организмов на примере инфузорий *P. caudatum* в кювете. КА одномерный детерминированный и квазинепрерывный, однако коэффициенты переноса подбирались случайным образом. Корреляция между результатами натурального эксперимента и КА-расчетом (при правильно подобранных коэффициентах) составила 0.91. Постановка задачи КА-моделирования для взаимодействия микроорганизмов в условиях Quorum Sensing дана в [Нагорнов, 2014]. Предлагается использовать линейную ЛФП со свободным членом в виде гармоник (по времени); однако дальнейшей семантической спецификации не предлагается.

Анализ электрохимических сигналов в тканях сердца проводится в [Авдеев, 2014]; см. работу тех же авторов [Авдеев, 2015] с акцентом на неоднородность процессов. Другие авторы [Федотов, 2013] разработали модель фибрилляции предсердий в виде КА на триангулированной сфере (40962 узлов), представляющей собой неориентированный взвешенный граф. Существенно использованы мотивы КА варианта модели Винера–Розенблюта, известной в теории НС с 1940-х гг. и описывающей автоколебания в возбудимой среде [Гулай, 2013]. Модель желудочков сердца [Баум, 2014] представляет собой КА с матрицей порядка 105 элементов типа «Миокард», «Гис», «Пуркинье» и с заданными правилами их взаимодействия. Решетка КА задана воксельной репрезентацией; детали КА не раскрыты. В [Белошицкая, 2014] моделировалась сеть капилляров.

В [Витвицкий, 2014a] на основе параллельной композиции двух динамических КА моделировался рост апикальной меристемы побега растения *Arabidopsis Thaliana*. Исследование морфогенеза и клеточного роста (на уровне трансформации поверхности изолированной клетки и на уровне энзимов [Витвицкий, 2014b] при сборке т. н. Z-кольца) продолжено автором в [Витвицкий, 2015]; отметим, что для определения соседства ячеек применялся оригинальный алгоритм.

Большой интерес вызывают работы С. М. Ачасовой [Ачасова, 2013; Achasova, 2016] по искусственной биологической клетке в виде самовоспроизводящейся структуры (КА выступает

как алгоритм параллельных подстановок символов и назван ZVEZDA), развивая линию классических работ по петлям Лэнгтона.

В [Афанасьев, 2014b; Афанасьев, 2014a] моделировалось влияние загрязнений на динамику популяций голомянок и макрогектопуса в озере Байкал. Использовались попеременно два КА: синхронный отвечал за трофические процессы (хищник–жертва), а асинхронный — за перемещение. Модель квазинепрерывная и двумерная, учитывает особенности возрастной структуры популяций, карту загрязнений, промерзание водоема и т. д. 3D КА для похожей цели на примере Ладожского озера использовали авторы [Меншуткин, 2017; Меншуткин, 2016]; детали КА не приводятся. Авторы [Калмыков, 2015] рассматривают динамику экосистемы с рекреацией с помощью детерминированных КА-моделей с разными типами шаблонов окрестностей радиуса от 1 до 4. Отметим методологическое значение статьи. Аналогичная по типу КА, но различная по типу объекта (здесь — разрастание гриба) модель дана в [Шумилов, 2016].

Авторы [Зубкова, 2016] напоминают нам о работах А. С. Комарова (например, [Комаров, 2015]), первого из отечественных ученых, обратившегося к аппарату КА применительно к ботанике. Статья содержит ссылки на фундаментальные обзоры и историю вопроса (КА и популяции растений). Упоминается решетчатая имитационная модель/среда CAMPUS.

Обобщая состояние вопроса, процитируем [Белотелов, 2016a]: «В каком-то смысле альтернативным подходом непрерывному описанию динамики популяции является агентное, индивидуально ориентированное моделирование, использующее дискретное описание — клеточные автоматы. Агентные модели действительно представляются чрезвычайно интересным объектом исследования. Они могут порождать разнообразные динамические режимы. С помощью такого подхода достаточно легко формализуются наблюдаемые биологами эмпирические закономерности, связанные с описанием жизненного цикла особей, их взаимодействия между собой и с окружающей средой. Они легко алгоритмируются, поскольку сам процесс создания таких моделей заключается, по сути, в создании алгоритма изменений состояния моделируемых объектов. Самый серьезный их недостаток связан с практически полным отсутствием аналитических методов исследования моделей, что вызывает трудности при анализе результатов вычислительных экспериментов».

На примере КА «игра WaTOR» приводится [Бродский, 2017] сравнительный анализ этих двух подходов. В [Белотелов, 2016a; Белотелов, 2016b] также получены интересные результаты: бифуркация перехода в «пятнистость» и стадный режим, когда на двумерной сетке нашли аналог глайдера игры «Жизнь» из 30–40 ячеек-особей. КА-вариант системы «хищник–жертва» программировался в [Дмитриев, 2014], однако деталей КА не приводится.

8. Экономика, урбанистика и социология

Мультиагентный подход, как продолжение семантики Цетлина, типичен для КА-моделирования в гуманитарной сфере. По нашему мнению, требуется дополнительная работа по приведению мультиагентных моделей к шаблону формализма КА (см. выше цитату Белотелова). Обсуждение мультиагентного подхода (например, при описании боевых действий [Кузнецов, 2017b]) с выделением трех уровней иерархии ведется А. В. Кузнецовым [Кузнецов, 2017a].

Поведение нарушителя на режимном объекте дано в [Забулонов, 2013]; используется муравьиный алгоритм, параметризованный вероятностями (как известно, такие алгоритмы допускают КА-формализацию). Аналогичным образом моделировалось поведение человека при эвакуации в [Велев, 2016; Baranski, 2016] и автомашины в дорожной сети [Казанцев, 2016a]. Сюда же примыкают работы [Куляница, 2013b; Куляница, 2013a], где вводится «приводной КА» для создания двумерного целочисленного скалярного поля в произвольной матрице, при помощи которого агенты движутся к тому или иному приемнику наикратчайшим путем (наличие препятствий «окрашивает» ячейку в белый цвет). Рассматривая эвакуацию, авторы [Иванова, 2017] вводят нехарактерные для КА силы «дальнодействия», обусловленные представлением человека-агента о нахождении ближайшего выхода.

Много работ посвящено КА-моделированию транспортных потоков. Краткий обзор дан в [Шинкарев, 2015], где авторы предлагают трехступенчатое представление моделей; основными КА-моделями являются: правило 184, Нагеля–Шрекенберга [Казанцев, 2016b] (ее модификация, в которой автомашина занимала 5 ячеек КА, дана в [Мазурин, 2013]), медленного старта (апробирована для ситуации г. Омска [Герасимов, 2016]), Кернера–Клёнова–Вольфа. В [Агурев, 2014] приводится КА-модель дорожного перекрестка со светофором.

В [Повитухин, 2015] сделана попытка перенести на рыночные отношения экологическую модель «хищник–жертва»; КА описан лишь вербально. Отметим отдаленное сходство с известной КА-моделью сегрегации населения Т. Шеллинга и учет «памяти». Авторы [Килячков, 2013] рассматривают двумерную КА-модель с семью состояниями конкурентного взаимодействия при использовании ограниченных ресурсов (на плоскости). Моделирование пространственно-временной динамики пенсионного социума Украины проведено в [Якимова, 2013].

Авторы [Ломакин, 2014], рассматривая локальные модели «диффузии инноваций» и «Naming Game», использовали их делокализованный вариант в системе агентов, закрепленных в решетке КА. Ими наблюдался феномен фазового перехода и «пятнистости» (кластеризации), свойственный многим конструируемым КА. Подкупает попытка сравнения результатов с аналитикой, полученной методами теории вероятностей. В [Махалова, 2014] предложена вероятностная КА-модель народонаселения (на базе модели S. C. Mangubia и D. H. Zanette, 1997), учитывающая миграционные потоки; проведены расчеты для Чердынского района Пензенской области. Пространственная диффузия инноваций также исследовалась в [Гнатюк, 2014], а с привлечением вероятностей — в [Шмидт, 2015].

В [Темиров, 2016c; Темиров, 2015b; Темиров, 2015a] предлагается двухуровневый подход к прогнозированию фрактальных временных рядов на базе КА, однако детали КА описаны в нестандартной терминологии; использовалась база данных по динамике урожая зерновых в России, причем исходные числа переведены в трит «низкий, высокий, средний» (лингвистические переменные). Заметим, что при реализации алгоритмов КА-средствами часто приходится вводить переменную не с двумя состояниями (флаг или бит), а с тремя, т. е. трит. Анализ временных рядов, например цен на мазут [Недогонова, 2016] или котировок валют Сбербанка [Кумратова, 2016], с помощью КА с лингвистическими переменными и применением нечеткой логики систематизирован в монографии Кумратовой А. М. [Кумратова, 2015]. Аналогичный аппарат использован для описания роста городов [Селетков, 2016]. Проблема землепользования в условиях конкуренции (на примере о. Гаити) исследовалась в [Килячков, 2017]; детали модели не приводятся (см. также того же автора [Килячков, 2013]).

Система «власть–общество–экономика» моделировалась на основе КА М. Е. Степанцовым [Степанцов, 2016; Петров, 2014; Степанцов, 2017]. В [Клименко, 2014] содержится идея применения КА к описанию распространения общественного мнения, но какая-то конкретика отсутствует.

9. Заключение

Обзор ориентирован на исследователей, в первую очередь молодых, использующих аппарат клеточных автоматов. Задача обзора всей мировой периодики выглядит невыполнимой, но проанализировать отечественные публикации за 5 последних лет вполне возможно. Отечественная наука до некоторой степени представляет собой «слепок» с мировой. Несмотря на сильные работы 1990-х гг. (и ранее) по однородным структурам, мы не проводили поиск по ключевым словам «однородные структуры». Отметим также, что некоторые отечественные исследователи предпочитают публиковаться за рубежом, т. е. выпадают из нашей выборки (например, Zaitsev D. A. [Zaitsev, 2018], работающий на стыке КА и сетей Петри). Мы констатируем, что:

- КА-проблематика «жива» в России и имеет представительство по главным мировым трендам;

- во многих прикладных направлениях отечественные работы имеют вторичный, запоздалый (вплоть до 20–30 лет) характер по сравнению с мировым уровнем; это касается прежде всего предметных областей урбанистики, распространения лесных пожаров; количество работ по обработке изображений и криптографии весьма мало (условно 5 %) по сравнению с мировой периодикой, причем этот вывод для всей КА-проблематики косвенно подтверждается рис. 1;
- работы ряда авторов (А. О. Аристов, Н. М. Богатов, А. А. Витвицкий, П. Г. Ключарёв, С. Г. Псахье, В. Г. Титов и др.) обладают неоспоримой оригинальностью и принципиальной новизной;
- почти не представлены аппаратные реализации КА и теоретические исследования КА как математического объекта;
- квантовые КА и фрактальные топологии, генерируемые КА, «исследуются» только на уровне упоминания.

С другой стороны, обзор выявил некоторое количество активных исследователей, с нашей точки зрения достаточное для заключения о целесообразности проведения каждые два года Всероссийской конференции, посвященной клеточным автоматам и однородным структурам. Пока же мы «размыты» по секциям «больших» конференций типа Нейроинформатики, ПАВТа или конференциям в разных предметных областях.

Список литературы (References)

- Авдеев С. А., Богатов Н. М.* Анализ электрохимических сигналов в тканях сердца на основе клеточного автомата // Биотехносфера. — 2014. — № 3 (33). — С. 62–63.
Avdeyev S. A., Bogatov N. M. Analiz elektrokhimicheskikh signalov v tkanyakh serdtsa na osnove kletochnogo avtomata [Analysis of electrochemical signals in the tissues of the heart on the basis of a cellular automaton] // Biotechnosphere. — 2014. — No. 3 (33). — P. 62–63 (in Russian).
- Авдеев С. А., Богатов Н. М.* Новый подход к прогнозированию критических ситуаций с помощью адаптивного неоднородного клеточного автомата // Информационные ресурсы России. — 2015. — № 1. — С. 37–41.
Avdeyev S. A., Bogatov N. M. Novyy podkhod k prognozirovaniyu kriticheskikh situatsiy s pomoshch'yu adaptivnogo neodnorodnogo kletochnogo avtomata [A new approach to predicting critical situations using adaptive non-uniform cellular automaton] // Russian Energy Agency. — 2015. — No. 1. — P. 37–41 (in Russian).
- Агуреев И. Е., Кретов А. Ю., Мацура И. Ю.* Сравнительный анализ алгоритмов светофорного регулирования перекрестка с применением клеточных автоматов // IV Международная научно-практическая конференция «ГЛОНАСС-регионам, 2014». — Орел, май 2014. — С. 3–9.
Agureyev I. E., Kretov A. Yu., Matsur I. Yu. Sravnitel'nyy analiz algoritmov svetofornogo regulirovaniya perekrestka s primeneniym kletochnykh avtomatov [Comparative Analysis of Algorithms for Traffic Light Regulation at Crossroads Using Cellular Automata] // IV Mezhdunarodnaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya «GLONASS-regionam, 2014» [IV International scientific and practical conference “The Use of GLONASS for the Needs of Regions”, 2014]. — Orel, May 2014. — P. 3–9 (in Russian).
- Азиков Д. О.* Имитационное табличное моделирование клеточных автоматов // Новые задачи технических наук и пути их решения: сборник статей Международной научно-практической конференции. — Пермь, 10 ноября 2016. — С. 5–8.
Azikov D. O. Imitatsionnoye tablichnoye modelirovaniye kletochnykh avtomatov [Simulation table simulation of cellular automata] // Sbornik statey Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii “Novyye zadachi tekhnicheskikh nauk i puti ikh resheniya” [Proc. of International Scientific and Practical Conference “New problems of technical sciences and ways to solve them”]. — Perm, 2016. — P. 5–8 (in Russian).
- Аладьев В. З.* Классические однородные структуры. Клеточные автоматы // Fultus Books. CA: Palo Alto, 2009. — 535 с.
Aladyev V. Z. Klassicheskie odnorodnye struktury. Kletochnye avtomaty [Classical homogeneous structures. Cellular automata] // Fultus Books. CA: Palo Alto, 2009. — 535 p.

- Алексеев Д. В., Казунина Г. А., Чередниченко А. В.* Клеточно-автоматное моделирование процесса разрушения хрупких материалов // Прикладная дискретная математика. Дискретные модели реальных процессов. — 2015(a). — № 2 (28). — С. 103–117.
Alekseyev D. V., Kazunina G. A., Cherednichenko A. V. Kletochno-avtomatnoye modelirovaniye protsessa razrushe-niya khrupkikh materialov [Cellular automaton simulation of the fracture process for brittle materials] // Applied Dis-crete Mathematics. — 2015. — No. 2 (28). — P. 103–117 (in Russian).
- Алексеев Д. В., Казунина Г. А., Чередниченко А. В.* Моделирование перехода к разрушению на-груженных горных пород 3D-вероятностным клеточным автоматом // Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук. — 2015(b). — № 2. — С. 7–13.
Alekseyev D. V., Kazunina G. A., Cherednichenko A. V. Modelirovaniye perekhoda k razrusheniyu nagruzhen-nykh gornyykh porod 3D-veroyatnostnym kletochnym avtomatom [3D stochastic cellular automata approach to modeling transition to failure in loaded rocks] // Fundamental and applied questions of mining sciences. — 2015. — No. 2. — P. 7–13 (in Russian).
- Алексеев Д. В., Казунина Г. А., Чередниченко А. В.* Моделирование эволюции ансамбля клас-теров элементарных повреждений в нагруженных материалах 3D-вероятностным клеточ-ным автоматом // Химическая физика и мезоскопия. — 2014. — Т. 16, № 3. — С. 340–347.
Alekseyev D. V., Kazunina G. A., Cherednichenko A. V. Modelirovaniye evolyutsii ansamblya klasterov elementarnykh povrezhdeniy v nagruzhennykh materialakh 3D-veroyatnostnym kletochnym avtomatom [Simulation of evolution damage clusters structure in loaded materials with 3D-probabilistic cellular automaton] // Chemical physics and mesoscopy. — 2014. — Vol. 16, No. 3. — P. 340–347 (in Russian).
- Алёшкин А. С., Обухова А. Г., Жуков Д. О.* Математическое и программное обеспечение стохас-тических клеточных автоматов с памятью // Современные информационные технологии и ИТ-образование. — 2017. — Т. 13, № 2. — С. 25–39.
Aloshkin A. S., Obukhova A. G., Zhukov D. O. Matematicheskoye i programmnoye obespecheniye stokhasticheskikh kletochnykh avtomatov s pamyat'yu [Mathematical and software solutions of stochastic cellular automata with memory] // Modern Information Technologies and IT-Education. — 2017. — Vol. 13, No. 2. — P. 25–39 (in Russian).
- Аникин В. И., Карманова А. А.* Обучение искусственной нейронной сети Кохонена клеточным автоматом // Информационные технологии. — 2014. — № 11. — С. 73–80.
Anikin V. I., Karmanova A. A. Obucheniye iskusstvennoy neyronnoy seti Kokhonena kletochnym avtomatom [Learn- ing of Kohonen artificial neural network by help of cellular automaton] // Information Technologies. — 2014. — No. 11. — P. 73–80 (in Russian).
- Анисимов А. А., Кабаков З. К.* Моделирование роста дендритов в углу отливки методом клеточ-ных автоматов // Научно-технический прогресс в металлургии. — Череповец, 2013. — С. 4–9.
Anisimov A. A., Kabakov Z. K. Modelirovaniye rosta dendritov v uglu otlivki metodom kletochnykh avtomatov [Simu- lation of the Growth of Dendrites in the Corner of Casting Using a Cellular Automaton Approach] // Scientific and Technological Progress in Metallurgy. — Cherepovets, 2013. — P. 4–9 (in Russian).
- Аноприенко А. Я., Федоров Е. Е., Иванница С. В., Альрабаба Х.* Особенности аппаратной реали-зации обобщенного клеточного тетраавтомата // Технологический аудит и резервы произ-водства. — 2015. — Т. 1, № 3 (21). — С. 68–74.
Anopriyenko A. Ya., Fedorov E. E., Ivanitsa S. V., Al'rababa Kh. Osobennosti apparatnoy realizatsii obobshchennogo kletochno- go tetraavtomata [Peculiarities of hardware implementation of generalized cellular tetra automaton] // Tech- nology Audit and Production Reserves. — 2015. — Vol. 1, No. 3 (21). — P. 68–74 (in Russian).
- Аристов А. О.* Квазиклеточные сети как обучаемые структуры // Научный вестник Московского государственного университета. — 2013(a). — № 10. — С. 8–13.
Aristov A. O. Kvazikletochnyye seti kak obuchayemyye struktury [Quasi cellular nets educable structures] // Scientific Bulletin of Moscow State University. — 2013. — No. 10. — P. 8–13 (in Russian).
- Аристов А. О.* Квазиклеточные сети. Синтез и циркуляция // Горный информационно-аналити-ческий бюллетень. — 2013(b). — № 2. — С. 125–130.
Aristov A. O. Kvazikletochnyye seti. Sintez i tsirkulyatsiya [Quasi cellular nets. Synthesis and circulation] // Mining informational and analytical bulletin. — 2013. — No. 2. — P. 125–130 (in Russian).
- Аристов А. О.* Методы синтеза квазиклеточных сетей // Научный вестник Московского госу- дарственного горного университета. — 2013(c). — № 9. — С. 16–21.
Aristov A. O. Metody sinteza kvazikletochnykh setey [Synthesis methods of quasi cellular networks] // Scientific Bul- letin of the Moscow State Mining University. — 2013. — No. 9. — P. 16–21 (in Russian).

- Аристов А. О.* Об элементах квазиклеточных сетей // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2013(d). — № 11. — С. 322–331.
Aristov A. O. Ob elementakh kvazikletochnykh setey [About structural elements of quasi cellular nets] // Mining informational and analytical bulletin. — 2013. — No. 11. — P. 322–331 (in Russian).
- Астафуров С. В., Шилько Е. В., Псахье С. Г.* Исследование влияния параметров напряженного состояния фрагментов разломных зон на особенности их механического отклика при сдвиговом деформировании // Вестник ПНИПУ. Механика. — 2014. — № 2. — С. 76–101.
Astafurov S. V., Shilko E. V., Psakhye S. G. Issledovaniye vliyaniya parametrov napryazhennogo sostoyaniya fragmentov razlomnykh zon na osobennosti ikh mekhanicheskogo otklika pri sdvigovom deformirovaniy [Investigation of influence of stress state parameters of fault zones on peculiarities of their mechanical response under shear loading] // PNRPU Mechanics Bulletin. — No. 2. — P. 76–101 (in Russian).
- Афанасьев И. В.* Клеточно-автоматная модель динамики популяций трех видов организмов озера Байкал // Сибирский журнал вычислительной математики. — 2014(a). — Т. 17, № 3. — С. 217–227.
Afanasyev I. V. A Cellular-Automata Model of Population Dynamics of Three Species of Organisms in Lake Baikal // Numerical Analysis and Applications. — 2014. — Vol. 7, Issue 3. — P. 181–190. (Original Russian paper: *Afanasyev I. V.* Kletochno-avtomatnaya model' dinamiki populyatsiy trokh vidov organizmov ozera Baykal // Sibirskiy zhurnal vychislitel'noy matematiki. — 2014. — Vol. 17, No. 3. — P. 217–227.)
- Афанасьев И. В.* Применение КА-модели для исследования влияния загрязнений на динамику популяций голомянок и макрогектопуса в озере Байкал // Прикладная дискретная математика. Дискретные модели реальных процессов. — 2014(b). — № 1 (23). — С. 114–123.
Afanasyev I. V. Primeneniye KA-modeli dlya issledovaniya vliyaniya zagryazneniy na dinamiku populyatsiy golomyanok i makrogektopusa v ozere Baykal [Cellular automata model application for investigation of pollution influence on population dynamics of comephorus and macrohectopus in Lake Baikal] // Applied Discrete Mathematics. — 2014. — No. 1 (23). — P. 114–123 (in Russian).
- Ачасова С. М.* Клеточно-автоматная модель искусственной биологической клетки в виде самовоспроизводящейся структуры // Автотметрия. — 2013. — Т. 49, № 6. — С. 115–121.
Achasova S. M. Cellular automata model of an artificial biological cell in the form of a self-replicating structure // Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing. — 2013. — Vol. 49, Issue 6. — P. 622–627. (Original Russian paper: *Achasova S. M.* Kletochno-avtomatnaya model' iskusstvennoj biologicheskoy kletki v vide samovosproizvodiyashejsya struktury // Avtometriya. — 2013. — Vol. 49, No. 6. — P. 115–121.)
- Балк Е. А., Ключарёв П. Г.* Исследование характеристик лавинного эффекта неориентированных обобщенных клеточных автоматов на основе графов малого размера // XI Международная научно-практическая конференция «Перспективы развития информационных технологий»: сб. матер. — Новосибирск, 2013. — С. 7–13.
Balk E. A., Klyucharov P. G. Issledovaniye kharakteristik lavinnogo effekta neoriyentirovannykh obobshchennykh kletochnykh avtomatov na osnove grafov malogo razmera [Investigation of the characteristics of the avalanche effect of undirected generalized cellular automata on the basis of small graphs] // Sbornik materialov XI Mezhdunarodnaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya "Perspektivy razvitiya informatsionnykh tekhnologiy" [Proc. XI International Scientific and Practical Conference "Prospects of Information Technologies Development"]. — Novosibirsk, 2013. — P. 7–13 (in Russian).
- Балк Е. А., Ключарёв П. Г.* Исследование характеристик лавинного эффекта обобщенных клеточных автоматов на основе графов малого диаметра // Наука и образование: научное издание МГТУ им. Н. Э. Баумана. — 2016. — № 4. — С. 92–105. — URL: <http://engineering-science.ru/doc/837506.html> (дата обращения: 09.03.2016).
Balk E. A., Klyucharev P. G. Issledovaniye kharakteristik lavinnogo effekta obobshchennykh kletochnykh avtomatov na osnove grafov malogo diametra [Small Diameter Graph-based Investigation of Avalanche Effect Characteristics of Generalized Cellular Automata] // Science and Education of Bauman MSTU. — 2016. — No. 4. — P. 92–105 (in Russian). — Available at: <http://engineering-science.ru/doc/837506.html> (accessed: 09. 03. 2016).
- Балукин Д. В., Титов П. Л.* Нелинейная динамика клеточного автомата, основанного на простых правилах // Образование и наука в современных реалиях: материалы Междунар. науч.-практ. конф. — Чебоксары, 4 июня 2017. — В 2 т. Т. 1 / редкол.: О. Н. Широков [и др.]. — Чебоксары: ЦНС «Интерактив плюс», 2017. — С. 270–276.
Balukin D. V., Titov P. L. Nelineynaya dinamika kletochnogo avtomata, osnovannogo na prostykh pravilakh [Non-linear Dynamics of a Cellular Automaton Based on Simple Rules] // Materialy Mezhdunarodnoy nauchno-

prakticheskoy konferentsii “Obrazovaniye i nauka v sovremennykh realiyakh” [Education and Science in Modern Realities: Proceedings of an International Scientific and Practical Conference]. — Cheboksary, 2017. — P. 270–276 (in Russian).

Бандман О. Л. Инварианты клеточно-автоматных моделей реакционно-диффузионных процессов // Прикладная дискретная математика. — 2012. — № 3. — С. 108–118.

Bandman O. L. Invarianty kletочно-avtomatnykh modelej reakcionno-diffuzionnykh processov [Invariants of cellular automata models for reaction-diffusion processes] // Applied Discrete Mathematics. — 2012. — No. 3. — P. 108–118.

Бандман О. Л. Клеточно-автоматное моделирование процесса просачивания жидкости через пористый материал // Параллельные вычислительные технологии – 2013: сборник трудов международной научной конференции. — Челябинск, 1–5 апреля 2013. — С. 278–287.

Bandman O. L. Kletочно-avtomatnoye modelirovaniye prottsessa prosachivaniia zhidkosti cherez poristy material [Cellular automaton simulation of the process of fluid infiltration through porous material] // Sbornik trudov mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii “Parallel'nyye vychislitel'nyye tekhnologii – 2013” [Proceedings of an International Scientific Conference “Parallel computational technologies (PCT) 2013”]. — Chelyabinsk, 2013. — P. 278–287 (in Russian).

Бандман О. Л. Отображение физических процессов на их клеточно-автоматные модели // Вестник Томского государственного университета. Управление, вычислительная техника и информатика. — 2008. — № 2 (3). — С. 5–17.

Bandman O. L. Otobrazhenie fizicheskikh processov na ih kletочно-avtomatnye modeli [Mapping of physical processes to their cellular automaton models] // Tomsk State University Journal of Control and Computer Science. — 2008. — No. 2 (3). — P. 5–17.

Бандман О. Л. Режимы функционирования асинхронных клеточных автоматов, моделирующих нелинейную пространственную динамику // Прикладная дискретная математика. Дискретные модели реальных процессов. — 2015(a). — № 1 (27). — С. 105–119.

Bandman O. L. Rezhimy funktsionirovaniya asinkhronnykh kletochnykh avtomatov, modeliruyushchikh nelineynuyu prostranstvennuyu dinamiku [Functioning modes of asynchronous cellular automata simulating nonlinear spatial dynamics] // Applied Discrete Mathematics. — 2015. — No. 1 (27). — P. 105–119 (in Russian).

Бандман О. Л., Киреева А. Е. Стохастическое клеточно-автоматное моделирование колебаний и автоволн в реакционно-диффузионных системах // Сибирский журнал вычислительной математики. — 2015(b). — Т. 18, № 3. — С. 255–274.

Bandman O. L., Kireeva A. E. Stochastic cellular automata simulation of oscillations and autowaves in reaction-diffusion systems // Numerical Analysis and Applications — 2015. — Vol. 8, Issue 3. — P. 208–222. (Original Russian paper: *Bandman O. L., Kireeva A. E.* Stokhasticheskoye kletочно-avtomatnoye modelirovaniye kolebaniy i avtovoln v reaktsionno-diffuzionnykh sistemakh // Sibirskiy zhurnal vychislitel'noy matematiki. — 2015. — Vol. 18, No. 3. — P. 255–274.)

Баум О. В., Волошин В. И., Попов Л. А. Компьютерное моделирование локализации и обширности ишемии миокарда // Биофизика. — 2014. — Т. 59, № 5. — С. 999–1005.

Baum O. V., Voloshin V. I., Popov L. A. Computer simulation for localization and extensiveness of myocardial ischemia // Biophysics. — 2014. — Vol. 59, Issue 5. — P. 814–819. (Original Russian paper: *Baum O. V., Voloshin V. I., Popov L. A.* Komp'yuternoye modelirovaniye lokalizatsii i obshirnosti ishemii miokarda // Biofizika. — 2014. — Vol. 59, No. 5. — P. 999–1005.)

Башабшех М. М., Масленников Б. И. Имитационное моделирование пространственного распространения эпидемий (на примере холеры) с применением метода клеточных автоматов с помощью программы Anylogic // Интернет-журнал «Науковедение». — 2013(a). — № 6. — 135TVN613. — URL: <https://naukovedenie.ru/PDF/135TVN613.pdf> (дата обращения: 05.02.2019).

Bashabshekh M. M., Maslennikov B. I. Imitatsionnoye modelirovaniye prostranstvennogo rasprostraneniya epidemiy (na primere kholery) s primeneniye metoda kletochnykh avtomatov s pomoshch'yu programmy Anylogic [Simulation modeling of the spatial spread of epidemics (cholera for example) using the method of cellular automata using the Anylogic] // Internet-zhurnal «Naukovedeniye». — 2013. — No. 6. — 135TVN613 (in Russian). Available at: <https://naukovedenie.ru/PDF/135TVN613.pdf> (accessed: 05.02.2019).

Башабшех М. М., Масленников Б. И., Скворцов А. В. Комбинированная имитационная модель пространственного распространения эпидемических заболеваний по холере на основе вероятностного клеточного автомата // Интернет-журнал «Науковедение». — 2013(b). — № 3. — 42TVN313. — URL: <https://naukovedenie.ru/PDF/42tvn313.pdf> (дата обращения: 05.02.2019).

- Bashabshekh M. M., Maslennikov B. I., Skvortsov A. V.* Kombinirovannaya imitatsionnaya model' prostranstvennogo rasprostraneniya epidemicheskikh zabolevaniy po kholere na osnove veroyatnostnogo kletochnogo avtomata [Combined simulation model spatial distribution of epidemic diseases cholera based on probabilistic cellular automata] // Internet-zhurnal «Naukovedeniye». — 2013. — No. 3. — 42ТВН313 (in Russian). Available at: <https://naukovedenie.ru/PDF/42tvn313.pdf> (accessed: 05.02.2019).
- Башкин В. А.* О пространственной ограниченности клеточных R-сетей // Моделирование и анализ информационных систем. — 2017. — Т. 24, № 4. — С. 391–409.
Bashkin V. A. On the Spatial Boundedness of Cellular RDA-nets // Automatic Control and Computer Sciences. — 2017. — Vol. 51, Issue 7. — P. 666–677. (Original Russian paper: *Bashkin V. A.* О пространственной ограниченности клеточных R-сетей // Моделирование и анализ информационных систем [Modeling and Analysis of Information Systems]. — 2017. — Vol. 24, No. 4. — P. 391–409.)
- Беланков А. Б., Столбов В. Ю.* Применение клеточных автоматов для моделирования микро-структуры материала при кристаллизации // Сиб. журн. индустр. матем. — 2005. — № 8:2. — С. 12–19.
Belankov A. B., Stolbov D. Yu. Primenenie kletochnykh avtomatov dlya modelirovaniya mikrostrukturnykh materiala pri kristallizatsii // Journal of Applied and Industrial Mathematics. — 2005. — No. 8:2. — P. 12–19.
- Белотелов Н. В., Коноваленко И. А.* Моделирование влияния подвижности особей на пространственно-временную динамику популяции на основе компьютерной модели // Компьютерные исследования и моделирование. — 2016(a). — Т. 8, № 2. — С. 297–305.
Belotelov N. V., Konovalenko I. A. Modelirovaniye vliyaniya podvizhnosti osobey na prostranstvenno-vremennuyu dinamiku populyatsii na osnove komp'yuternoy modeli [Modeling the impact of mobility of individuals on space-time dynamics of a population by means of a computer model] // Computer Research and Modeling. — 2016. — Vol. 8, No. 2. — P. 297–305 (in Russian).
- Белотелов Н. В., Коноваленко И. А.* Компьютерная модель системы «ресурс–потребитель» // Моделирование, декомпозиция и оптимизация сложных динамических процессов. — 2016(b). — Т. 31, № 1. — С. 125–137.
Belotelov N. V., Konovalenko I. A. Komp'yuternaya model' sistemy “resurs–potrebitel” [Computer model of the resource-consumer system] // Modeling, decomposition and optimization of complex dynamic processes. — 2016. — Vol. 31, No. 1. — P. 125–137 (in Russian).
- Белоус Д. Д., Тыртыщников А. Ю., Гордиенко М. Г.* Клеточно-автоматный подход для прогнозирования изменения распределения пор по размерам в процессе пиролиза // Успехи в химии и химической технологии. — 2016. — Т. XXX, № 4. — С. 108–110.
Belous D. D., Tyrtshchnikov A. Yu., Gordiyenko M. G. Kletochno-avtomatnyy podkhod dlya prognozirovaniya izmeneniya raspredeleniya por po razmeram v protsesse piroliza. [Cellular-automaton approach to predict the changes of the pore size distribution during the pyrolysis process] // Journal Advances in Chemistry and Chemical Technology. — 2016. — Vol. XXX, No. 4. — P. 108–110 (in Russian).
- Белошцкая О. К., Настенко Е. А.* Исследование динамических особенностей капиллярной сети с помощью клеточно-автоматной модели // Биомедицинская инженерия и электроника. — 2014. — № 1 (5). — С. 1–9. — URL: biofpe.esrae.ru/198-938 (дата обращения: 05.02.2019).
Beloshitskaya O. K., Nastenko E. A. Issledovaniye dinamicheskikh osobennostey kapillyarnoy seti s pomoshch'yu kletochno-avtomatnoy modeli [Research of dynamic features of the capillary network using cellular automata model] // Biomedical Engineering and Electronics. — 2014. — No. 1. — P. 1–9 (in Russian). — Available at: biofpe.esrae.ru/198-938 (accessed: 05.02.2019).
- Благин А. В., Неведов В. В., Пухлова А. А.* Моделирование начальных стадий роста квазиодномерных структур в многокомпонентных системах АЗВ5 // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Сер. Технические науки. — 2016. — № 2 (190). — С. 10–14.
Blagin A. V., Nefedov V. V., Pukhlova A. A. Modelirovaniye nachal'nykh stadiy rosta kvaziodnomernykh struktur v mnogokomponentnykh sistemakh AZB5 [Modeling initial growth stage quasi one-dimensional structures in a multi-component system AZB5] // University News. North-Caucasian Region. Technical Sciences Series. — 2016. — No. 2 (190). — P. 10–14 (in Russian).
- Бобков С. П., Полищук И. В.* Моделирование процесса деформирования тел с использованием клеточных автоматов // Известия высших учебных заведений. Сер. Химия и химическая технология. — 2015(a). — Т. 58, № 4. — С. 72–74.
Bobkov S. P., Polishchuk I. V. Modelirovaniye protsessa deformirovaniya tel s ispol'zovaniyem kletochnykh avtomatov [Modeling process of body deformation applying cell automata] // Russian Journal of Chemistry and Chemical Technology. — 2015. — Vol. 58, No. 4. — P. 72–74 (in Russian).

- Бобков С. П., Полищук И. В.* Применение клеточных автоматов для моделирования процесса деформации твердых тел // Международная научно-техническая конференция, посвященная 105-летию со дня рождения А. Н. Плановского «Повышение эффективности процессов и аппаратов химической и смежных отраслей промышленности» (МНТК Плановский – 2016). — М., 2016(b). — Т. 1. — С. 148–150.
- Bobkov S. P., Polishchuk I. V.* Primeneniye kletochnykh avtomatov dlya modelirovaniya protsessov deformatsii tverdykh tel [Application of Cellular Automata for Simulating the Process of Deformation of Rigid Bodies]. Mezhdunarodnaya nauchno-tehnicheskaya konferentsiya, posvyashchonnaya 105-letiyu so dnya rozhdeniya A. N. Planovskogo “Povysheniye effektivnosti protsessov i apparatov khimicheskoy i smezhnykh otrasley promyshlennosti” (MNTK Planovskiy – 2016) [International scientific and technical conference dedicated to the 105th birthday of A. N. Planovskii “Enhancement of the Efficiency of Processes and Devices in Chemical and Allied Industries” (ISTC Planovskii – 2016)]. — Moscow, 2016. — P. 148–150 (in Russian).
- Бобков С. П., Соколов В. Л.* Анализ возможностей применения решеточных моделей для исследования процессов в газах при пониженном давлении // Вестник ИГЭУ. — 2015(с). — № 4. — С. 1–6.
- Bobkov S. P., Sokolov V. L.* Analiz vozmozhnostey primeneniya reshetochnykh modeley dlya issledovaniya protsessov v gazakh pri ponizhennom davlenii. [Analysis of lattice gas models applicability to the investigation of processes in gases under reduced pressure] // Vestnik IGEU. — 2015. — No. 4. — P. 1–6 (in Russian).
- Бобков С. П., Соколов В. Л.* Моделирование поведения газа с использованием решеточных методов // Современные наукоемкие технологии. Региональное приложение. — 2015(d). — № 4 (44). — С. 157–163.
- Bobkov S. P., Sokolov V. L.* Modelirovaniye povedeniya gaza s ispol'zovaniyem reshetochnykh metodov [The gas behavior simulation by means of lattice models] // Modern High Technologies. Regional Application. — 2015. — No. 4 (44). — P. 157–163 (in Russian).
- Бродский Ю. И.* Переход от агентного описания к системно-динамическому на примере вывода уравнений хищник–жертва для игры WATOR // Моделирование, декомпозиция и оптимизация сложных динамических процессов. — 2017. — Т. 32, № 1. — С. 67–77.
- Brodskiy Yu. I.* Perekhod ot agentnogo opisaniya k sistemno-dinamicheskomu na primere vyvoda uravneniy khishchnik–zhertva dlya igry WATOR [Transition from the agent description to the system-dynamic one by the example of the derivation of the predator–prey equations for the game WATOR] // Modeling, decomposition and optimization of complex dynamic processes. — 2017. — Vol. 32, No. 1. — P. 67–77 (in Russian).
- Ванаг В. К.* Исследование пространственно распределенных динамических систем методами вероятностного клеточного автомата // УФН. — 1999. — Т. 169. — С. 481–505.
- Vanag V. K.* Issledovanie prostranstvenno raspredelyonnykh dinamicheskikh system metodami veroyatnostnogo kletochnogo avtomata [The study of spatially distributed dynamic systems using probabilistic cellular automata methods] // UFN. — 1999. — Vol. 169. — P. 481–505.
- Варфоломеева В. В., Терентьев А. В.* Моделирование процесса физической адсорбции методом вероятностного клеточного автомата // Сорбционные и хроматографические процессы. — 2013. — Т. 13, № 2. — С. 238–244.
- Varfolomeyeva V. V., Terent'yev A. V.* Modelirovaniye protsessov fizicheskoy adsorbtsii metodom veroyatnostnogo kletochnogo avtomata [Physical adsorption processes modelling by the probabilistic cellular automaton method] // Sorption and chromatographic processes. — 2013. — Vol. 13, No. 2. — P. 238–244 (in Russian).
- Велев Н. А.* Моделирование движения людей в помещении на основе клеточных автоматов // Материалы 54-й Международной научной студенческой конференции «МНСК-2016». — Новосибирск, 16–20 апреля 2016. — С. 108.
- Velev N. A.* Modelirovaniye dvizheniya lyudey v pomeshchenii na osnove kletochnykh avtomatov [Simulation of the motion of people in a room using a cellular automaton approach] // Materialy 54 Mezhdunarodnoy nauchnoy studencheskoy konferentsii “MNSK-2016” [Proceedings of the 54th International Students Scientific Conference “ISSC-2016”]. — Novosibirsk, April 16–20, 2016. — P. 108 (in Russian).
- Витвицкий А. А.* Клеточные автоматы с динамической структурой для моделирования роста биологических тканей // Сибирский журнал вычислительной математики. — 2014(a). — Т. 17, № 4. — С. 315–327.
- Vitvitskiy A. A.* Cellular automata with dynamic structure to simulate the growth of biological tissues // Numerical Analysis and Applications. — 2014. — Vol. 7, Issue 4. — P. 263–273. (Original Russian paper: *Vitvitskiy A. A.*

Kletochnyye avtomaty s dinamicheskoy strukturoy dlya modelirovaniya rosta biologicheskikh tkaney // Sibirskiy zhurnal vychislitel'noy matematiki. — 2014. — Vol. 17, No. 4. — P. 315–327.)

Витвицкий А. А. Клеточные автоматы с динамической структурой на примере роста и деления клеток цианобактерий // Труды конференции молодых ученых. — Новосибирск, 2014(b). — С. 46–57.

Vitvitskiy A. A. Kletochnyye avtomaty s dinamicheskoy strukturoy na primere rosta i deleniya kletok tsianobakteriy. [Cellular automata with dynamical structure exemplified by the growth and division of the cells of cyanobacteriae] // Trudy konferentsii molodykh uchonykh [Proceedings of Young Scientist Conference]. — Novosibirsk, 2014. — P. 46–57 (in Russian).

Витвицкий А. А. Компьютерное моделирование процесса самоорганизации бактериальной системы белков MinCDE // Математическая биология и биоинформатика. — 2014(c). — Т. 9, № 2. — С. 453–463.

Vitvitskiy A. A. Komp'yuternoye modelirovaniye protsessu samoorganizatsii bakterial'noy sistemy belkov MinCDE [Computer Simulation of Self-Organization in the Bacterial MinCDE System] // Mathematical Biology and Bioinformatics. — 2014. — Vol. 9, No. 2. — P. 453–463 (in Russian).

Витвицкий А. А. Построение неоднородного массива ячеек для задач клеточно-автоматного моделирования роста и деления клеток бактерий // Прикладная дискретная математика. Дискретные модели реальных процессов. — 2015. — № 3 (29). — С. 110–120.

Vitvitskiy A. A. Postroyeniye neodnorodnogo massiva yacheyek dlya zadach kletochno-avtomatnogo modelirovaniya rosta i deleniya kletok bakteriy [Construction of inhomogeneous 3D mesh for simulation of bacterial cell growth and division by cellular automata] // Applied Discrete Mathematics. — 2015. — No. 3 (29). — P. 110–120 (in Russian).

Волокита А., Кондратюк В. Исследование возможности моделирования облачных систем с использованием клеточного автомата // Технічні науки та технології. — 2016. — № 1 (3). — С. 115–122.

Volokita A., Kondratyuk V. Issledovaniye vozmozhnosti modelirovaniya oblachnykh sistem s ispol'zovaniyem kletochnogo avtomata [Research of the possibility of simulation of the cloud systems with the cellular automaton] // Technical sciences and technologies. — 2016. — No. 1 (3). — P. 115–122 (in Ukrainian).

Гамова А. Н., Ефремова А. А. Генератор псевдослучайных чисел на основе клеточных автоматов // Материалы Междунар. науч. конф. «Компьютерные науки и информационные технологии». — СГУ, Саратов, 2016. — С. 131–134.

Gamova A. N., Yefremova A. A. Generator psevdosluchaynykh chisel na osnove kletochnykh avtomatov [Pseudo-random number generator based on cellular automata] // Materialy Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii "Komp'yuternyye nauki i informatsionnyye tekhnologii" [Proc. of the International Scientific Conference "Computer Science and Information Technology"]. — Saratov, 2016. — P. 131–134 (in Russian).

Герасимов А. Д., Кирющенко В. А., Долгушин Д. Ю., Бутенко К. С. Построение моделей дорожного движения на основе клеточного автомата // Архитектурно-строительный и дорожно-транспортный комплексы: проблемы, перспективы, новации: материалы международной научно-практической конференции. — Омск, 2016. — С. 821–825 [Электронный ресурс]. — URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=28180396> (дата обращения: 04.06.2018).

Gerasimov A. D., Kiryushchenko V. A., Dolgushin D. Yu., Butenko K. S. Postroyeniye modeley dorozhnogo dvizheniya na osnove kletochnogo avtomata [Construction of Road Traffic Models Using a Cellular Automaton Approach]. Arkhitekturno-stroitel'nyy i dorozhno-transportnyy komplekсы: problemy, perspektivy, novatsii: materialy mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii [Architecture, Construction and Road Traffic Complexes: Problems, Prospects and Novations: Proceedings of the International Scientific and Practical Conference]. — Omsk, 2016. — P. 821–825 (in Russian). — Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=28180396> (accessed: 04.06.2018).

Гладких А. А., Чилихин Н. Ю., Линьков И. С. Мягкое декодирование произведений кодов произвольной размерности на базе кодов с единственной проверкой четности // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. — 2013. — Т. 15, № 4 (3). — С. 668–674.

Gladkikh A. A., Chilikhin N. Yu., Lin'kov I. S. Myagkoye dekodirovaniye proizvedeniy kodov proizvol'noy razmernosti na baze kodov s yedinstvennoy proverkoй chetnosti [Soft decoding of products of arbitrary dimension codes based on codes with single parity checking] // Izvestia of Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences. — 2013. — Vol. 15, No. 4 (3). — P. 668–674 (in Russian).

Гнатюк А. Б. Моделирование диффузионных процессов при решении задач пространственной экономики с помощью клеточных автоматов // Информационно-экономические аспекты

- стандартизации и технического регулирования: научный интернет-журнал. — 2014. — № 6 (22). — URL: http://iea.gostinfo.ru/files/2014_06/2014_06_04.pdf (дата обращения: 04.05.2018).
- Gnatyuk A. B.* Modelirovaniye diffuzionnykh protsessov pri reshenii zadach prostranstvennoy ekonomiki s pomoshch'yu kletochnykh avtomatov [Modeling of diffusion processes in solving the tasks of spatial economy by means of cellular automata] // Information and economic aspects of standardization and technical regulation. — 2014. — No. 6 (22) (in Russian). — Available at: http://iea.gostinfo.ru/files/2014_06/2014_06_04.pdf (accessed: 04.05.2018).
- Голубчиков М. А., Колнооченко А. В., Лебедев И. В., Меньшутина Н. В.* Моделирование процесса мономолекулярной адсорбции активных веществ в пористых телах клеточным автоматом Марголуса // Успехи в химии и химической технологии. — 2014. — Т. XXVIII, № 1. — С. 38–42.
- Golubchikov M. A., Kolnoochenko A. V., Lebedev I. V., Men'shutina N. V.* Modelirovaniye protsessa monomolekulyarnoy adsorbtsii aktivnykh veshchestv v poristykh telakh kletochnym avtomatom Margolusa [Modeling of monomolecular adsorption of active substances in porous solids with margolus cellular automata] // Advances in Chemistry and Chemical Technology. — 2014. — Vol. XXVIII, No. 1. — P. 38–42 (in Russian).
- Голубчиков М. А., Колнооченко А. В., Меньшутина Н. В.* Моделирование процесса сверхкритической флюидной хроматографии в среде диоксида углерода с соразтворителем с помощью клеточного автомата Марголуса // Успехи в химии и химической технологии. — 2015. — Т. XXIX, № 4. — С. 51–53.
- Golubchikov M. A., Kolnoochenko A. V., Men'shutina N. V.* Modelirovaniye protsessa sverkhkriticheskoy flyuidnoy khromatografii v srede dioksida ugleroda s sorastvoritelem s pomoshch'yu kletochnogo avtomata Margolusa [Modeling of supercritical fluid chromatography in carbon dioxide environment with cosolvent using Margolus cellular automata] // Advances in Chemistry and Chemical Technology. — 2015. — Vol. XXIX, No. 4. — P. 51–53 (in Russian).
- Голубчиков М. А., Юсупова Ю. С., Кальянова К. В., Иванов С. И.* Моделирование процесса растворения многокомпонентных твердых тел с использованием параллельных вычислений // Успехи в химии и химической технологии. — 2013. — Т. XXVII, № 1. — С. 43–50.
- Golubchikov M. A., Yusupova Yu. S., Kal'yanova K. V., Ivanov S. I.* Modelirovaniye protsessa rastvoreniya mnogokomponentnykh tverdykh tel s ispol'zovaniyem paralel'nykh vychisleniy. [Modelling of process dissolution of multicomponent solids using parallel computing] // Advances in Chemistry and Chemical Technology. — 2013. — Vol. XXVII, No. 1. — P. 43–50 (in Russian).
- Горовенко Л. А.* Исследование начальных состояний монохромного клеточного автомата Конвея, приводящих к появлению N-циклов // Актуальные вопросы современной науки и образования: материалы IV Международной научно-практической конференции (30 июня 2016 г.): сборник научных трудов. — М.: Перо, 2017. — С. 149–155.
- Gorovenko L. A.* Issledovaniye nachal'nykh sostoyaniy monokhromnogo kletochnogo avtomata Konveya, privodyashchikh k poavleniyu N-tsiklov [A Study of the Initial States of the Monochrome Cellular Conway Automaton which Lead to the Appearance of N-Cycles] // Sbornik nauchnykh trudov "Aktual'nyye voprosy sovremennoy nauki i obrazovaniya: materialy IV Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii (30 iyunya 2016 g.)" [Problems of Modern Science and Education: Proceedings of the IVth International Scientific and Practical Conference (June 30, 2016): Collection of scientific works]. — Moscow: Pero, 2017. — P. 149–155 (in Russian).
- Грайворонський М., Стъопочкіна І.* Моделювання розповсюдження комп'ютерних вірусів на основі імовірнісного клітинкового автомату // Захист Інформації. — 2015. — Т. 17, № 4. — С. 266–273.
- Grajvorons'kij M., St'opochkina I.* Modeljvannja rozpovsjudzhennja komp'juternih virusiv na osnovi imovirnisnogo klitinkovogo avtomatu [Modeling the distribution of computer viruses on the basis of the probabilistic cellular automaton] // Zahist Informacii. — 2015. — Vol. 17, No. 4. — P. 266–273 (in Ukrainian).
- Грибер Ю. А.* Клеточное моделирование динамики монохромной городской колористики // Бюллетень науки и практики: научный журнал. — 2017. — № 9. — С. 150–158. — URL: <http://www.bulletennauki.com/griber> (дата обращения: 05.02.2019).
- Griber Yu. A.* Kletochnoye modelirovaniye dinamiki monokhromnoy gorodskoy koloristiki [Cellular modelling of the monochromatic urban colouristic dynamics] // Bulletin of Science and Practice. — 2017. — No. 9. — P. 150–158 (in Russian). — Available at: <http://www.bulletennauki.com/griber> (accessed: 05.02.2019).
- Григорьев А. В., Мантуров А. О.* Синхронизация кинетики полимеризации ДНК // Материалы II Всероссийского семинара памяти профессора Ю. П. Волкова «Современные проблемы

- биофизики, генетики, электроники и приборостроения». — Саратов, 16–18 декабря 2015. — С. 31–32.
- Grigoryev A. V., Manturov A. O.* Sinkhronizatsiya kinetiki polimerizatsii DNK [Synchronization of the Kinetics of DNA Polymerization] // Materialy II Vserossiyskogo seminaru pamyati professora Yu. P. Volkova "Sovremennyye problemy biofiziki, genetiki, elektroniki i priborostroyeniya" [Proceedings of the 2nd All-Russian Seminar in Memory of Prof. Yu. P. Volkov "Modern Problems in Biophysics, Genetics, Electronics, and Instrument-Making Industry"]. — Saratov, 2015. — P. 31–32 (in Russian).
- Григорьев А. С., Шилько Е. В., Астафуров С. В. и др.* О влиянии динамических возмущений напряженного состояния на процесс накопления необратимых деформаций на границах раздела в блочных средах // Физическая мезомеханика. — 2015. — Т. 18, № 4. — С. 24–37.
- Grigoriev A. S., Shilko E. V., Astafurov S. V., Dimaki A. V., Vysotsky E. V., Psakhie S. G.* Effect of dynamic stress state perturbation on irreversible strain accumulation at interfaces in block-structured media // Physical Mesomechanics. — 2016. — Vol. 19, Issue 2. — P. 136–148. (Original Russian paper: *Grigor'yev A. S., Shil'ko E. V., Astafurov S. V. et al.* O vliyaniy dinamicheskikh vozmushcheniy napryazhennogo sostoyaniya na protsess nakopleniya neobratimyykh deformatsiy na granitsakh razdela v blochnykh sredakh // Fizicheskaya mezomekhanika. — 2015. — Vol. 18, No. 4. — P. 24–37.)
- Грозов В. П., Киселёв А. М., Котович Г. В., Михайлов С. Я., Пономарчук С. Н.* Программное обеспечение обработки и интерпретации ионограмм зондирования на базе цифрового ЛЧМ-ионозонда // Гелиогеофизические исследования. — 2013. — № 4. — С. 75–85.
- Grozov V. P., Kiselev A. M., Kotovich G. V., Mikhaylov S. Ya., Ponomarchuk S. N.* Programmnoye obespecheniye obrabotki i interpretatsii ionogramm zondirovaniya na baze tsifrovogo LCHM-ionozonda [The software for processing and interpretation of sounding ionogram on base of digital chirp sounder] // Heliogeophysical research. — 2013. — No. 4. — P. 75–85 (in Russian).
- Губарев С. В., Берг Д. Б., Добряк П. В.* Математическая модель и численный метод для решения задач диффузии и теплопроводности // Научное обозрение. Технические науки. — 2014. — № 1. — С. 129–129.
- Gubarev S. V., Berg D. B., Dobryak P. V.* Matematicheskaya model' i chislennyy metod dlya resheniya zadach diffuzii i teploprovodnosti [Mathematic model and numerical technique for investigation diffusion and heat conduction phenomena] // Scientific Review. Technical Sciences. — 2014. — No. 1. — P. 129–129 (in Russian).
- Гулай А. В., Гулай В. А., Колтун А. А.* Моделирование автоволновых процессов в сенсорных средах методом клеточных автоматов // Новый университет. Сер. Технические науки. — 2013. — № 8–9 (18–19). — С. 76–81.
- Gulay A. V., Gulay V. A., Koltun A. A.* Modelirovaniye avtovolnovnykh protsessov v sensorynykh sredakh metodom kletochnykh avtomatov [Simulation of autowave processes in sensor media by the cellular automaton method] // New University. Technical Sciences. — 2013. — No. 8–9 (18–19). — P. 76–81 (in Russian).
- Гусев А. В., Малинецкий Г. Г., Торопыгина С. А.* Прикладная математика – проблемы и перспективы // Препринты ИПМ им. М. В. Келдыша. — 2013. — № 44. — 23 с. — URL: <http://library.keldysh.ru/preprint.asp?id=2013-44> (дата обращения: 04.05.2018).
- Gusev A. V., Malinetskiy G. G., Toropygina S. A.* Prikladnaya matematika — problemy i perspektivy [Applied mathematics — problems and prospects] // Keldysh Institute PREPRINTS. — 2013. — No. 44 (in Russian). — Available at: <http://library.keldysh.ru/preprint.asp?id=2013-44> (accessed: 04.05.2018).
- Дедегкаев А. Г., Рыжков А. А.* Метод проектирования структуры нейронных сетей на основе клеточных автоматов // Universum: технические науки: электрон. научн. журн. — 2013. — № 1 (1). — URL: <http://7universum.com/ru/tech/archive/item/792> (дата обращения: 04.05.2018).
- Dedegkayev A. G., Ryzhkov A. A.* Metod proyektirovaniya struktury neyronnykh setey na osnove kletochnykh avtomatov [The method of designing the structure of neural networks based on cellular automata] // Universum: Technical sciences. — 2013. — No. 1 (1) (in Russian). — Available at: <http://7universum.com/ru/tech/archive/item/792> (accessed: 04.05.2018).
- Димаки А. В., Шилько Е. В., Астафуров С. В., Псахье С. Г.* Влияние фильтрации флюида на прочность пористых флюидонасыщенных хрупких материалов // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. — 2016. — № 4. — С. 220–247.
- Dimaki A. V., Shil'ko E. V., Astafurov S. V., Psakh'ye S. G.* Vliyaniye fil'tratsii flyuida na prochnost' poristykh flyuidonasyshchennykh khрупkikh materialov [The influence of fluid filtration on the strength of porous fluidsaturated brittle materials] // PNRPU Mechanics Bulletin. — 2016. — No. 4. — P. 220–247 (in Russian).

- Дмитриев А. И., Бужкова С. П., Кульков С. Н.* Исследование влияния размера и концентрации частиц мягких включений на прочностные свойства керамического образца // *Физическая мезомеханика*. — 2015. — Т. 18, № 4. — С. 61–67.
Dmitriyev A. I., Buyakova S. P., Kulkov S. N. Influence of the size and concentration of soft-phase inclusion agglomerates on ceramic specimen strength // *Physical Mesomechanics*. — 2016. — Vol. 19, Issue 2. — P. 182–188. (Original Russian paper: *Dmitriyev A. I., Buyakova S. P., Kulkov S. N.* Issledovaniye vliyaniya razmera i kontsentratsii chastits myagkikh vklucheniye na prochnostnyye svoystva keramicheskogo obraztsa // *Fizicheskaya mezomekhanika*. — 2015. — Vol. 18, No. 4. — P. 61–67.)
- Дмитриев В. Л.* Мультиагентный подход к моделированию биологических систем на примере популяций мелких рыб и акул // *Современные научные исследования и инновации*. — 2014. — № 6, ч. 1. — URL: <http://web.snauka.ru/issues/2014/06/34852> (дата обращения: 04.05.2018).
Dmitriyev V. L. Mult'agentnyy podkhod k modelirovaniyu biologicheskikh sistem na primere populyatsiy melkikh ryb i akul [Multiagent approach to modeling of biological systems by the example of populations of small fish and sharks] // *Modern scientific researches and innovations*. — 2014. — No. 6, Part 1 (in Russian). — Available at: <http://web.snauka.ru/issues/2014/06/34852> (accessed: 04.05.2018).
- Дмитриев Н. В., Тарасян В. С.* Распознавание площадных элементов на топографических картах // *Научно-методический электронный журнал «Концепт»*. — 2017. — Т. 39. — С. 3476–3480. — URL: <http://e-koncept.ru/2017/971022.htm> (дата обращения: 05.02.2019).
Dmitriyev N. V., Tarasyan V. S. Raspoznavaniye ploshchadnykh elementov na topograficheskikh kartakh [Identification of area elements on topographic maps] // *Periodic scientific and methodological e-journal "Koncept"*. — 2017. — Vol. 39. — P. 3476–3480 (in Russian). — Available at: <http://e-koncept.ru/2017/971022.htm> (accessed: 05.02.2019).
- Доний А. Н.* Критический радиус зародыша твердой фазы при гомогенной кристаллизации металлов // *Вісник СевНГУ: зб. наук. пр. Сер. Механіка, енергетика, екологія*. — Вип. 137. — 2013. — С. 230–234.
Donij A. N. Kriticheskij radius zarodysha tverdoj fazy pri gomogennoj kristallizacii metallov [Critical radius of the solid phase nucleus during homogeneous crystallization of metals] // *Visnik SevNGU: zb. nauk. pr. Ser. Mehanika, energetika, ekologija*. — Is. 137. — 2013. — P. 230–234 (in Russian).
- Доний А. Н.* Физические принципы построения имитационной модели кристаллизации // *Вісник СевНГУ: зб. наук. пр. Сер. Механіка, енергетика, екологія*. — Вип. 148. — 2014. — С. 112–116.
Donij A. N. Fizicheskie principy postroenija imitacionnoj modeli kristallizacii [Physical principles of constructing a simulation model of crystallization] // *Visnik SevNGU: zb. nauk. pr. Ser. Mehanika, energetika, ekologija*. — Is. 148. — 2014. — P. 112–116 (in Russian).
- Евсютин О. О.* Исследование дискретных ортогональных преобразований, получаемых с помощью динамики клеточных автоматов // *Компьютерная оптика*. — 2014(a). — Т. 38, № 2. — С. 314–321.
Evsutin O. O. Issledovaniye diskretnykh ortogonal'nykh preobrazovaniy, poluchayemykh s pomoshch'yu dinamiki kletochnykh avtomatov [Research of the discrete orthogonal transformation received with use dynamics of cellular automata] // *Computer Optics*. — 2014. — Vol. 38, No. 2. — P. 314–321 (in Russian).
- Евсютин О. О.* Клеточный автомат с целевой функцией // *Материалы конференции «Актуальные проблемы вычислительной и прикладной математики – 2015»*. — Новосибирск, Академгородок, 19–23 октября 2015. — С. 230–235.
Evsutin O. O. Kletochnyy avtomat s tselevoy funktsiyey [Cellular automaton with objective function] // *Materialy konferentsii «Aktual'nyye problemy vychislitel'noy i prikladnoy matematiki – 2015»* [Proc. International Conference “Advanced Mathematics, Computations and Applications – 2015”]. — Novosibirsk, Akademgorodok, 19–23 October 2015. — P. 230–235 (in Russian).
- Евсютин О. О.* Модификация стеганографического метода LSB, основанная на использовании блочных клеточных автоматов // *Информатика и системы управления*. — 2014(b). — № 1 (39). — С. 15–22.
Evsutin O. O. Modifikatsiya steganograficheskogo metoda LSB, osnovannaya na ispol'zovanii blochnykh kletochnykh avtomatov [Modification of steganographic LSB method based on the usage of modular cellular automata] // *Information Science and Control Systems*. — 2014. — No. 1 (39). — P. 15–22 (in Russian).

- Евсютин О. О. и др.* Улучшение цифровых изображений с помощью клеточных автоматов с управляемой динамикой // Вестник современных исследований. — 2016. — № 3-1 (3). — С. 141–146.
Evsutin O. O. i dr. Uluchsheniye tsifrovyykh izobrazheniy s pomoshch'yu kletochnykh avtomatov s upravlyayemoy dinamikoю [Digital images improvement using cellular automata with controlled dynamics] // Herald of Modern Research. — 2016. — No. 3-1 (3). — P. 141–146 (in Russian).
- Евсютин О. О., Негачева Е. В.* Стеганографическое встраивание информации в цифровые изображения, сжатые с помощью блочных клеточных автоматов // Доклады ТУСУРа. — 2013. — № 4 (30). — С. 130–135.
Evsutin O. O., Negacheva E. V. Steganograficheskoye vstraivaniye informatsii v tsifrovyye izobrazheniya, szhatyye s pomoshch'yu blochnykh kletochnykh avtomatov [Steganographic embedding of information into digital images compressed with the use of block cellular automata] // Proceedings of TUSUR. — 2013. — No. 4 (30). — P. 130–135 (in Russian).
- Ершов Н. М., Кравчук А. В.* Дискретное моделирование с помощью стохастических клеточных автоматов // Вестник Российского университета дружбы народов. Сер. Математика, информатика, физика. — 2014. — № 2. — С. 359–362.
Ershov N. M., Kravchuk A. V. Diskretnoye modelirovaniye s pomoshch'yu stokhasticheskikh kletochnykh avtomatov [Discrete Modeling Using Stochastic Cellular Automata] // RUDN Journal of Mathematics, Information Sciences and Physics. — 2014. — No. 2. — P. 359–362 (in Russian).
- Ефремова А. А., Гамова А. Н.* Самопрограммируемые клеточные автоматы в криптографии // Прикладная дискретная математика. Приложение. — 2017. — № 10. — С. 76–81.
Efremova A. A., Gamova A. N. Samoprogrammiruyemyye kletochnyye avtomaty v kriptografii [Self-programmable cellular automata for cryptography] // Applied Discrete Mathematics. Supplement. — 2017. — No. 10. — P. 76–81 (in Russian).
- Жандаров Е. О.* Математическое моделирование процесса синтеза ферритов // Современные исследования в области технических и естественных наук: сборник научных трудов по материалам Международной научно-практической конференции. — Белгород, 30 мая 2017. — С. 15–17.
Zhandarov E. O. Matematicheskoye modelirovaniye protsesssa sinteza ferritov [Mathematical Simulation of the Process of Synthesis of Ferrites] // Sbornik nauchnykh trudov po materialam Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii “Sovremennyye issledovaniya v oblasti tekhnicheskikh i yestestvennykh nauk” [Modern Research in Engineering and Natural Sciences: Collected Scientific Works Proceedings of the International Scientific and Practical Conference]. — Belgorod, 2017. — P. 15–17 (in Russian).
- Жихаревич В. В., Шумиляк Л. М., Остапов С. Э.* Автоматизация управления процессом выращивания кристаллов при вертикальной зонной плавке // Автоматизированные технологии и производства. — 2017. — № 1. — С. 36–42.
Zhikharevich V. V., Shumilyak L. M., Ostapov S. E. Avtomatizatsiya upravleniya protsessom vyrashchivaniya kristallov pri vertikal'noy zonnoy plavke [Automation of control of the vertical zone melting crystal growth process] // Automation of Technologies and Production. — 2017. — No. 1. — P. 36–42 (in Russian).
- Жихаревич В. В., Шумиляк Л. М., Струтинская Л. Т., Остапов С. Э.* Построение и исследование непрерывной клеточно-автоматной модели процессов теплопроводности с фазовыми переходами первого рода // Компьютерные исследования и моделирование. — 2013. — Т. 5, № 2. — С. 141–152.
Zhikharevich V. V., Shumilyak L. M., Strutinskaya L. T., Ostapov S. E. Postroyeniye i issledovaniye nepreryvnoy kletочно-avtomatnoy modeli protsessov teploprovodnosti s fazovymi perekhodami pervogo roda [Construction and investigation of continuous cellular automata model of heat conductivity processes with first order phase transitions] // Computer Research and Modeling. — 2013. — Vol. 5, No. 2. — P. 141–152 (in Russian).
- Жуков А. Е.* Клеточные автоматы в криптографии. Часть 1 // Вопросы кибербезопасности. — 2017. — № 3 (21). — С. 70–76.
Zhukov A. E. Kletochnyye avtomaty v kriptografii. Chast' 1 [Cellular automata in cryptography. Part 1] // Cybersecurity issues. — 2017. — No. 3 (21). — P. 70–76 (in Russian).
- Жуков А. Е.* Клеточные автоматы в криптографии. Часть 2 // Вопросы кибербезопасности. — 2017. — № 4 (22). — С. 47–66.
Zhukov A. E. Kletochnyye avtomaty v kriptografii. Chast' 2 [Cellular automata in cryptography. Part 2] // Cybersecurity issues. — 2017. — No. 4 (22). — P. 47–66 (in Russian).

- Заболотский А. В.* Построение и исследование модели пороговой структуры керамического материала // Международный научный журнал «Инновационная наука». — 2017. — № 03-1. — С. 27–34.
Zabolotskiy A. V. Postroyeniye i issledovaniye modeli porogovoy struktury keramicheskogo materiala [Construction and investigation of the model of the threshold structure of ceramic material] // International Scientific Journal “Innovation Science”. — 2017. — No. 03-1. — P. 27–34 (in Russian).
- Забулонов Б. Л., Медведев Ю. О.* Використання біосинтетичного алгоритму для моделювання оптимального шляху порушника на гіпотетичному об’єкті // Збірник наукових праць «Техногенно-екологічна безпека та цивільний захист». — 2013. — № 6. — С. 13–19.
Zabulonov B. L., Medvedev Yu. O. Viktoristannja biosintetichnogo algoritmu dlja modeljuvannja optimal'nogo shljahu porushnika na gipotetichnomu ob'ekti [Using a biosynthetic algorithm to simulate the optimal path of the offender on a hypothetical object] // Zbirnik naukovih prac' “Tehnogenno-ekologichna bezpeka ta civil'nij zahist”. — 2013. — No. 6. — P. 13–19 (in Ukrainian).
- Замятин А. В., Афанасьев А. А.* Параллельные вычисления в задаче пространственного моделирования изменений ландшафтного покрова // Известия Томского политехнического университета. — 2013. — Т. 322, № 5. — С. 60–67.
Zamyatin A. V., Afanas'yev A. A. Parallelnyye vychisleniya v zadache prostranstvennogo modelirovaniya izmeneniy landshaftnogo pokrova [Parallel computing in the problem of land cover changes 3D modeling] // Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. — 2013. — Vol. 322, No. 5. — P. 60–67 (in Russian).
- Захаров И. С., Величко А. Н.* Математическое моделирование температурных популяционных реакций одноклеточных // Естественные и математические науки в современном мире: сб. ст. по материалам XIII Междунар. науч.-практ. конф. — № 12 (12). — Новосибирск: СибАК, 2013. — С. 162–169.
Zakharov I. S., Velichko A. N. Matematicheskoye modelirovaniye temperaturnykh populyatsionnykh reaktsiy odnokletochnykh [Mathematical modeling of population temperature reaction of simples] // Sbornik statey po materialam XIII mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii. — No. 12 (12). — “Yestestvennyye i matematicheskiye nauki v sovremennom mire” [Natural and mathematical sciences in the modern world: Proceedings of the 13th International Scientific and Practical Conference]. — Novosibirsk, 2013. — P. 162–169 (in Russian).
- Захарова О. И., Попов А. В.* Проектирование сотовой сети на базе модифицированного КА // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. — 2015. — Т. 3, № 7-4 (18-4). — С. 205–208.
Zakharova O. I., Popov A. V. Proyektirovaniye sotovoy seti na baze modifitsirovannogo KA [Designing of cellular networks based on a modified cellular automaton] // Current directions of 21st century scientific research: theory and practice. — 2015. — Vol. 3, No. 7-4 (18-4). — P. 205–208.
- Захарчук И. И., Захарчук И. И., Веселов Ю. Г., Островский А. С.* Обеспечение информационной защиты беспроводных сенсорных сетей на основе клеточных автоматов // Инженерный журнал: наука и инновации — электронное науч.-техн. издание. — 2013. — № 11 (23). — URL: <http://engjournal.ru/catalog/it/security/1003.html> (дата обращения: 17.04.2018).
Zakharchuk I. I., Zakharchuk I. I., Veselov Yu. G., Ostrovskiy A. S. Obespecheniye informatsionnoy zashchity besprovodnykh sensorynykh setey na osnove kletochnykh avtomatov [Cellular automata-based approach to wireless sensor network information security] // Engineering Journal: Science and Innovations. — 2013. — No. 11 (23) (in Russian). — Available at: <http://engjournal.ru/catalog/it/security/1003.html> (accessed: 17.04.2018).
- Золотов А. С.* О нижней границе временной сложности проблемы разрешимости теории целых чисел с функцией следования и оператором наименьшей фиксированной точки // Вестник ТвГУ. Сер. Прикладная математика. — 2016. — № 3. — С. 97–109.
Zolotov A. S. O nizhney granitse vremennoy slozhnosti problemy razreshimosti teorii tselnykh chisel s funktsiyey sledovaniya i operatorom naimen'shey fiksirovannoy tochki [On the lower boundary for time complexity of a decidability problem of a theory of integers with a successor function and the least fixed point operator] // Herald of Tver State University. Ser. Applied Mathematics. — 2016. — No. 3. — P. 97–109 (in Russian).
- Зубкова Е. В., Жукова Л. А., Фролов П. Ф., Шанин В. Н.* Работы А. С. Комарова по клеточно-автоматному моделированию популяционно-онтогенетических процессов у растений // Компьютерные исследования и моделирование. — 2016. — Т. 8, № 2. — С. 285–295.
Zubkova E. V., Zhukova L. A., Frolov P. F., Shanin V. N. Raboty A. S. Komarova po kletочно-avtomatnomu modelirovaniyu populyatsionno-ontogeneticheskikh protsessov u rasteniy [A. S. Komarov's publications about cellular

automata modelling of the population-ontogenetic development in plants: a review] // Computer Research and Modeling. — 2016. — Vol. 8, No. 2. — P. 285–295 (in Russian).

Иванов С. И., Матасов А. В., Меньшутина Н. В. Модель деформации полимерных нанокomпозитов на основе клеточных автоматов // Компьютерные исследования и моделирование. — 2014. — Т. 6, № 1. — С. 131–136.

Ivanov S. I., Matasov A. V., Men'shutina N. V. Model' deformatsii polimernykh nanokompozitov na osnove kletochnykh avtomatov [Deformation model of polymer nanocomposites based on cellular automata] // Computer Research and Modeling. — 2014. — Vol. 6, No. 1. — P. 131–136 (in Russian).

Иванов С. И., Тупцова И. А., Меньшутина Н. В. Использование клеточных автоматов с изменяющимися размерами клеток для моделирования процесса растворения // Успехи в химии и химической технологии. — 2015. — Т. XXIX, № 4. — С. 45–47.

Ivanov S. I., Tiptsova I. A., Men'shutina N. V. Ispol'zovaniye kletochnykh avtomatov s izmenyayushchimisya razmerami kletok dlya modelirovaniya protsessa rastvoreniya [The use of on cellular automata witch changing sizes of cells for the modeling of dissolution] // Advances in Chemistry and Chemical Technology. — 2015. — Vol. XXIX, No. 4. — P. 45–47 (in Russian).

Иванова А. Д. Эвакуационное моделирование на основе клеточных автоматов // Интернет-журнал «Науковедение». — 2017. — Т. 9, № 3. — URL: <http://naukovedenie.ru/PDF/17TVN317.pdf> (дата обращения: 17.04. 2018).

Ivanova A. D. Evakuatsionnoye modelirovaniye na osnove kletochnykh avtomatov [An evacuation modeling based on cellular automata] // Internet-zhurnal "Naukovedeniye". — 2017. — Vol. 9, No. 3 (in Russian). — Avialable at: <http://naukovedenie.ru/PDF/17TVN317.pdf> (accessed: 17.04.2018).

Иванова И. В. Дискретная модель регулярной ячеистой структуры вещества // Известия СПбГТИ. — 2013. — № 18 (44). — С. 86–88.

Ivanova I. V. Diskretnaya model' regul'yarnoy yacheistoy struktury veshchestva [Discrete model of a regular cellular compound structure] // Bulletin of the Saint Petersburg State Institute of Technology (Technical University). — 2013. — No. 18 (44). — P. 86–88 (in Russian).

Ивашов Е. Н., Федотов К. Д. Применение тепловых трубок в нанотехнологиях // Успехи современного естествознания. — 2014. — № 1. — С. 48–51.

Ivashov E. N., Fedotov K. D. Primeneniye teplovykh trubok v nanotekhnologiyakh [Heat pipes application in nanotechnology] // Advances in current natural sciences. — 2014. — No. 1. — P. 48–51 (in Russian).

Казанцев Г. Ю. Применение клеточных автоматов для моделирования транспортных потоков // Материалы 54-й Международной научной студенческой конференции «МНСК-2016» Информационные технологии. — Новосибирск, 16–20 апреля 2016(a). — С. 160.

Kazantsev G. Yu. Primeneniye kletochnykh avtomatov dlya modelirovaniya transportnykh potokov [Application of cellular automata for simulation of traffic streams] // Materialy 54-y Mezhdunarodnoy nauchnoy studencheskoy konferentsii «MNSK-2016» Informatsionnyye tekhnologii [Proc. of the 54th International Students Scientific Conference "ISSC 2016". Information Technologies]. — Novosibirsk, 2016. — P. 160 (in Russian).

Казанцев Г. Ю., Омарова Г. А. Моделирование транспортных потоков с применением клеточных автоматов // Проблемы информатики. — 2016(b). — № 3. — С. 59–69.

Kazantsev G. Yu., Omarova G. A. Modelirovaniye transportnykh potokov s primeneniyyem kletochnykh avtomatov [Simulation of traffic flows using cellular automata] // Problems of Informatics. — 2016. — No. 3. — P. 59–69 (in Russian).

Калгин К. В. Клеточно-автоматное моделирование физико-химических процессов нануровня на графических ускорителях // Вестник Нижегородского университета им. Н. И. Лобачевского. — 2013. — № 6 (1). — С. 227–234.

Kalgin K. V. Kletochno-avtomatnoye modelirovaniye fiziko-khimicheskikh protsessov nanourovnya na graficheskikh uskoritelyakh [Cellular automata simulation of nanoscale physico-chemical processes on graphics processing units] // Vestnik of Lobachevsky University of Nizhni Novgorod. — 2013. — No. 6 (1). — P. 227–234 (in Russian).

Калмыков Л. В., Калмыков В. Л. Исследование индивидуально-ориентированных механизмов динамики одновидовой популяции с помощью логических детерминированных клеточных автоматов // Компьютерные исследования и моделирование. — 2015. — Т. 7, № 6. — С. 1279–1293.

Kalmykov L. V., Kalmykov V. L. Issledovaniye individual'no-oriyentirovannykh mekhanizmov dinamiki odnovidovoy populyatsii s pomoshch'yu logicheskikh determinirovannykh kletochnykh avtomatov [Investigation of individual-based mechanisms of single-species population dynamics by logical deterministic cellular automata] // Computer Research and Modeling. — 2015. — Vol. 7, No. 6. — P. 1279–1293 (in Russian).

- Килячков Н. А.* Модель конкурентного взаимодействия двух контрагентов и проблема землепользования на Гаити // Экономические системы. — 2017. — Т. 10, № 1 (36). — С. 114–118.
Kilyachkov N. A. Model' konkurentnogo vzaimodeystviya dvukh kontragentov i problema zemlepol'zovaniya na Gaiti [Model of competitive interaction of two counter-agents and land use problem on Haiti] // Economic Systems. — 2017. — Vol. 10, No. 1 (36). — P. 114–118 (in Russian).
- Килячков Н. А.* Модель конкурентного взаимодействия при использовании ограниченных ресурсов // Финансы и кредит. — 2013. — № 47 (575). — С. 51–57.
Kilyachkov N. A. Model' konkurentnogo vzaimodeystviya pri ispol'zovanii ogranichennykh resursov [Model of competitive interaction in utilizing limited resources] // Finance and Credit. — 2013. — No. 47 (575). — P. 51–57 (in Russian).
- Киреева А. Е.* Генерация компьютерного представления пористой структуры с помощью тоталистического клеточного автомата // Прикладная дискретная математика. Дискретные модели реальных процессов. — 2015. — № 1 (27). — С. 120–128.
Kireyeva A. E. Generatsiya komp'yuternogo predstavleniya poristoy struktury s pomoshch'yu totalisticheskogo kletochnogo avtomata [Generation of porous media computer representation by two-layer totalistic cellular automaton] // Applied Discrete Mathematics. — 2015. — No. 1 (27). — P. 120–128 (in Russian).
- Киселев А. М.* Проведение вычислительных экспериментов для исследования поведения элементарных клеточных автоматов в системе WolframMathematica // Вестник Тамбовского университета. Сер. Естественные и технические науки. — 2014. — Т. 19, № 2. — С. 592–594.
Kiselev A. M. Provedeniye vychislitel'nykh eksperimentov dlya issledovaniya povedeniya elementarnykh kletochnykh avtomatov v sisteme WolframMathematica [Conducting of computational experiments to study the behavior of elementary cellular automata in the system WolframMathematica] // Tambov University Reports. Ser. Natural and Technical Sciences. — 2014. — Vol. 19, No. 2. — P. 592–594 (in Russian).
- Клименко О. А., Патухин А. А.* Исследование процесса формирования общественного мнения с использованием клеточных автоматов // Молодой ученый. — 2014. — № 16 (75). — С. 161–164.
Klimenko O. A., Patukhin A. A. Issledovaniye protsessa formirovaniya obshchestvennogo mneniya s ispol'zovaniyem kletochnykh avtomatov [A study of the process of public opinion formation using cellular automata] // Young scientist. — 2014. — No. 16 (75). — P. 161–164 (in Russian).
- Клиньшов В. В., Дмитриев А. С., Некоркин В. И.* Моделирование беспроводных сенсорных сетей с помощью клеточных автоматов // Успехи современной радиоэлектроники. — 2013. — № 3. — С. 30–42.
Klin'shov V. V., Dmitriyev A. S., Nekorkin V. I. Modelirovaniye besprovodnykh sensorykh setey s pomoshch'yu kletochnykh avtomatov [Simulation of wireless sensor networks using cellular automata] // Achievements of Modern Radioelectronics. — 2013. — No. 3. — P. 30–42 (in Russian).
- Ключарёв П. Г.* Исследование стойкости блочных шифров, основанных на обобщенных клеточных автоматах, к линейному криптоанализу // Наука и образование: научное издание МГТУ им. Н. Э. Баумана. — 2013(а). — № 5. — С. 235–246. — URL: <http://engineering-science.ru/doc/574231.html> (дата обращения: 04.06.2018).
Klyucharev P. G. Issledovaniye stoykosti blochnykh shifrov, osnovannykh na obobshchennykh kletochnykh avtomatakh, k lineynomu kriptool'zovaniyu [Investigation of strength of block ciphers based on generalized cellular automata against linear cryptanalysis] // Science and Education of Bauman MSTU. — 2013. — No. 5. — P. 235–246 (in Russian). — Available at: <http://engineering-science.ru/doc/574231.html> (accessed: 04.06.2018).
- Ключарёв П. Г.* Криптографические хэш-функции, основанные на обобщенных клеточных автоматах // Наука и образование: научное издание МГТУ им. Н. Э. Баумана. — 2013(б). — № 1. — С. 161–172. — URL: <http://engineering-science.ru/doc/534640.html> (дата обращения: 04.06.2018).
Klyucharev P. G. Kriptograficheskiye khash-funktsii, osnovannyye na obobshchennykh kletochnykh avtomatakh [Cryptographic hash functions based on generalized cellular automata] // Science and Education of Bauman MSTU. — 2013. — No. 1. — P. 161–172 (in Russian). — Available at: <http://engineering-science.ru/doc/534640.html> (accessed: 04.06.2018).
- Ключарёв П. Г.* Об устойчивости обобщенных клеточных автоматов к некоторым типам коллизий // Наука и образование: научное издание МГТУ им. Н. Э. Баумана. — 2014(с). — № 9. — С. 194–202. — URL: <http://engineering-science.ru/doc/727086.html> (дата обращения: 04.06.2018).

Klyucharev P. G. Ob ustoychivosti obobshchennykh kletochnykh avtomatov k nekotorym tipam kolliziy [On Collision Resistance of Generalized Cellular Automata] // Science and Education of Bauman MSTU. — 2014. — No. 9. — P. 194–202 (in Russian). — Available at: <http://engineering-science.ru/doc/727086.html> (accessed: 04.06.2018).

Ключарёв П. Г. Построение алгоритмов выработки имитовставок на основе обобщенных клеточных автоматов // Наука и образование: научное издание МГТУ им. Н. Э. Баумана. — 2016(d). — № 11. — С. 142–152. — URL: <http://engineering-science.ru/doc/849590.html> (дата обращения: 04.06.2018).

Klyucharev P. G. Postroyeniye algoritmov vyrobotki imitovstavok na osnove obobshchennykh kletochnykh avtomatov [Algorithms for Message Authentication Codes Based on Generalized Cellular Automata] // Science and Education of Bauman MSTU. — 2016. — No. 11. — P. 142–152 (in Russian). — Available at: <http://engineering-science.ru/doc/849590.html> (accessed: 04.06.2018).

Ключарёв П. Г. Построение случайных графов, предназначенных для применения в криптографических алгоритмах, основанных на обобщенных клеточных автоматах // Математика и математическое моделирование. — 2017(e). — № 3. — С. 77–90. — URL: <http://www.mathmelpub.ru/jour/article/view/76> (дата обращения: 04.06.2018).

Klyucharev P. G. Postroyeniye sluchaynykh grafov, prednaznachennykh dlya primeneniya v kriptograficheskikh algoritmakh, osnovannykh na obobshchennykh kletochnykh avtomatakh [Random Graph Construction for Cryptographic Applications] // Mathematics and Mathematical Modeling. — 2017. — No. 3. — P. 77–90 (in Russian). — Available at: <http://www.mathmelpub.ru/jour/article/view/76> (accessed: 04.06.2018).

Ключарёв П. Г. Производительность древовидных криптографических хеш-функций, основанных на клеточных автоматах, при их реализации на графических процессорах // Наука и образование: научное издание МГТУ им. Н. Э. Баумана. — 2016(f). — № 10. — С. 132–142. — URL: <http://engineering-science.ru/doc/847891.html> (дата обращения: 04.06.2018).

Klyucharev P. G. Proizvoditel'nost' drevovidnykh kriptograficheskikh klesh-funktsiy, osnovannykh na kletochnykh avtomatakh, pri ikh realizatsii na graficheskikh protsessoraх [The Cryptographic Tree-Like Hash Function Performance Based on the Generalized Cellular Automata in GPU Implementation] // Science and Education of Bauman MSTU. — 2016. — No. 10. — P. 132–142 (in Russian). — Available at: <http://engineering-science.ru/doc/847891.html> (accessed: 04.06.2018).

Князькова А. В., Волченская Т. В. Моделирование физических процессов на основе клеточных автоматов // Всероссийская ежегодная научно-практическая конференция «Общество, наука, инновации» (НПК-2014): сборник материалов. — Киров, 15–26 апреля 2014. — С. 1190–1193.

Knyaz'kova A. V., Volchenskaya T. V. Modelirovaniye fizicheskikh protsessov na osnove kletochnykh avtomatov [Modeling of physical processes based on cellular automata] // Sbornik materialov: Vserossiyskaya yezhegodnaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya “Obshchestvo, nauka, innovatsii” (NPK-2014) [Collected materials of All-Russian annual scientific and practical conference “Society, science and innovation” (SPC-2014)]. — Kirov, 2014. — P. 1190–1193 (in Russian).

Коноваленко И. С., Коноваленко И. С. Численное исследование механических свойств пористых керамических композитов с разным объемом пластичного наполнителя на основе метода подвижных клеточных автоматов // XI Всероссийский съезд по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики: сборник докладов. — Казань, 20–24 августа 2015. — С. 1927–1929.

Konovalenko I. S., Konovalenko I. S. Chislennoye issledovaniye mekhanicheskikh svoystv poristykh keramicheskikh kompozitov s raznym ob'yemom plastichnogo napolnitelya na osnove metoda podvizhnykh kletochnykh avtomatov [Numerical investigation of mechanical properties of porous ceramic composites with different volumes of plastic filler based on the method of mobile cellular automata] // Sbornik dokladov: XI Vserossiyskiy s'yезд po fundamental'nykh problemam teoreticheskoy i prikladnoy mekhaniki [Proceedings of the 11th All-Russian Congress on Fundamental Problems in Theoretical and Applied Mechanics]. — Kazan, 2015. — P. 1927–1929 (in Russian).

Коныгин С. Б., Агафонов А. Н., Афанасьева А. С. Использование вероятностного клеточного автомата для моделирования процесса электроосаждения // Вестник Самарского ГТУ. Сер. Технические науки. — 2016. — № 4 (52). — С. 170–173.

Konygin S. B., Agafonov A. N., Afanas'yeva A. S. Ispol'zovaniye veroyatnostnogo kletochnogo avtomata dlya modelirovaniya protsessa elektroosazhdeniya [The use of a probabilistic cellular automaton for simulation of the process of electrodeposition] // Vestnik of Samara State Technical University. Ser. Technical sciences. — 2016. — No. 4 (52). — P. 170–173 (in Russian).

- Комаров А. С., Зубкова Е. В., Фролов П. В.* Клеточно-автоматная модель динамики популяций и сообществ кустарничков // Сибирский лесной журнал. — 2015. — № 3. — С. 57–69.
Komarov A. S., Zubkova E. V., Frolov P. V. Kletochno-avtomatnaya model' dinamiki populyatsiy i soobshchestv kustarnichkov [Cellular-automata model of the dwarf shrubs populations and communities dynamics] // Siberian Journal of Forest Science. — 2015. — No. 3. — P. 57–69 (in Russian).
- Копылов В. Д., Дунаева О. А., Мячин М. Л.* Импульсный нейрон и нейронный клеточный автомат асимптотически эквивалентны // Моделирование и анализ информационных систем. — 2014. — Т. 21, № 3. — С. 62–80.
Kopylov V. D., Dunayeva O. A., Myachin M. L. Impul'snyy neyron i neyronnyy kletochnyy avtomat asimptoticheski ekvivalentny [Impulse Neuron and Cellular Neural Automaton are Asymptotically Equivalent] // Modeling and Analysis of Information Systems. — 2014. — Vol. 21, No. 3. — P. 62–80 (in Russian).
- Корнеев А. М., Абдуллах Л. С., Аль-Санди Ф. А.* Структурное моделирование дискретных клеточно-иерархических систем // Фундаментальные исследования. — 2014. — № 6. — С. 467–471.
Korneyev A. M., Abdullakh L. S., Al'-Sandi F. A. Strukturnoye modelirovaniye diskretnykh kletochno-iyerarkhi-cheskikh sistem [Structural modeling of discrete cellular-hierarchical system] // Fundamental research. — 2014. — No. 6. — P. 467–471 (in Russian).
- Королев Д. С.* Распознавание объектов на неоднородном фоне // Синхроинфо. — 2013. — Т. 4, № 2. — С. 107–109.
Korolev D. S. Raspoznaniye ob'yektov na neodnorodnom fone [Identification of objects against an inhomogeneous background] // Sinkhroinfo. — 2013. — Vol. 4, No. 2. — P. 107–109 (in Russian).
- Короткин А. А., Максимов А. А.* Клеточно-локальный алгоритм выделения и оценки изменений на бинарных изображениях // Моделирование и анализ информационных систем. — 2014. — Т. 21, № 4. — С. 64–74.
Korotkin A. A., Maksimov A. A. Kletochno-lokal'nyy algoritm vydeleniya i otsenki izmeneniy na binarnykh izobrazheniyakh [Cellular-local Algorithm for Localizing and Estimating Changes in Binary Images] // Modeling and Analysis of Information Systems. — 2014. — Vol. 21, No. 4. — P. 64–74 (in Russian).
- Кузнецов А. В.* Модель совместного движения агентов с трехуровневой иерархией на основе клеточного автомата // Журнал вычислительной математики и математической физики. — 2017(a). — Т. 57, № 2. — С. 339–349.
Kuznetsov A. V. A Model of the joint motion of agents with a three-level hierarchy based on a cellular automaton // Computational Mathematics and Mathematical Physics. — 2017. — Vol. 57, Issue 2. — P. 340–349. (Original Russian paper: *Kuznetsov A. V.* Model' sovmestnogo dvizheniya agentov s trekhurovnevoy iyerarkhiyey na osnove kletochnogo avtomata // Zhurnal vychislitel'noy matematiki i matematicheskoy fiziki. — 2017. — Vol. 57, No. 2. — P. 339–349.)
- Кузнецов А. В.* Упрощенная модель боевых действий на основе клеточного автомата // Известия РАН. Теория и системы управления. — 2017(b). — № 3. — С. 59–71.
Kuznetsov A. V. A Simplified Combat Model Based on a Cellular Automaton // Journal of Computer and Systems Sciences International. — 2017. — Vol. 56, No. 3. — P. 343–351. (Original Russian paper: *Kuznetsov A. V.* Uproshchennaya model' boyevykh deystviy na osnove kletochnogo avtomata // Izvestiya RAN. Teoriya i sistemy upravleniya. — 2017. — No. 3. — P. 59–71.)
- Кузнецов О. П.* Модели процессов распространения активности в сетевых структурах // XII Всероссийское совещание по проблемам управления ВСПУ – 2014. — Москва, 16–19 июня 2014. — С. 3897–3907.
Kuznetsov O. P. Modeli protsessov rasprostraneniya aktivnosti v setevykh strukturakh [Models of processes of activity spread in cellular networks] // XII Vserossiyskoye soveshchaniye po problemam upravleniya VSPU – 2014 [12th All-Russian Meeting on Control Problems AMCP-2014]. — Moscow, 2014. — P. 3897–3907 (in Russian).
- Кузнецов О. П.* Сложные сети и распространение активности // Автоматика и телемеханика. — 2015. — № 12. — С. 3–26.
Kuznetsov O. P. Complex networks and activity spreading // Automation and Remote Control. — 2015. — Vol. 76, Issue 12. — P. 2091–2109. (Original Russian paper: *Kuznetsov O. P.* Slozhnyye seti i rasprostraneniye aktivnosti // Avtomatika i telemekhanika. — 2015. — No. 12. — P. 3–26.)
- Куляница А. Л., Барзиков К. В., Фомичева О. Е.* Метод прямой имитации направленного потока людей на основе клеточного автомата // Информатика и космос. — 2013. — № 3. — С. 88–91.

- Kulyanitsa A. L., Barzikov K. V., Fomicheva O. E.* Metod pryamoy imitatsii napravlenogo potoka lyudey na osnove kletochnogo avtomata [A method of direct simulation of directed flow of people on the basis of a cellular automaton] // Information and Space. — 2013. — No. 3. — P. 88–91 (in Russian).
- Куляница А. Л., Барзиков К. В., Фомичева О. Е.* Приводной клеточный автомат и алгоритм его работы // Информация и космос. — 2013. — № 3. — С. 85–87.
- Kulyanitsa A. L., Barzikov K. V., Fomicheva O. E.* Privodnoy kletochnyy avtomat i algoritm yego raboty [Driving cellular automaton and algorithm of its operation] // Information and Space. — 2013. — No. 3. — P. 85–87 (in Russian).
- Кумратова А. М.* Прогноз динамики экономических систем: клеточный автомат: монография. — Краснодар: КубГАУ, 2015.
- Kumratova A. M.* Prognoz dinamiki ekonomicheskikh sistem: kletochnyy avtomat: monografiya [Forecast of the dynamics of economic systems: cellular automaton: monograph] // Krasnodar: KubGAU, 2015 (in Russian).
- Кумратова А. М., Попова Е. В., Романович В. В., Оглы И. Д.* Прогнозирование эволюционного развития финансового рынка на базе программного инструментария линейного клеточного автомата // Научный журнал КубГАУ. — 2016. — № 121(07). — URL: <http://ej.kubagro.ru/2016/07/pdf/27.pdf> (дата обращения: 04.06.2018).
- Kumratova A. M., Popova Ye. V., Romanovich V. V., Ogly I. D.* Prognozirovaniye evolyutsionnogo razvitiya finansovogo rynka na baze programmnogo instrumentariya lineynogo kletochnogo avtomata [Prediction of a financial market evolution on the base of software tools for linear cellular automata] // Scientific Journal of KubSAU. — 2016. — No. 121 (07) (in Russian). — Available at: <http://ej.kubagro.ru/2016/07/pdf/27.pdf> (accessed: 04.06.2018).
- Кучеренко И. В.* О минимизации монофункциональных классов бинарных клеточных автоматов с неразрешимым свойством обратимости // Сборник трудов X международной конференции «Интеллектуальные системы и компьютерные науки». — Москва, 2011. — С. 176–178.
- Kucherenko I. V.* O minimizatsii monofunktsional'nykh klassov binarnykh kletochnykh avtomatov s nerazreshimym svoystvom obratimosti [On the minimization of monofunctional classes of binary cellular automata with the unsolvable reversibility property] // Sbornik trudov X mezhdunarodnoy konferentsii "Intellektual'nyye sistemy i kompyuternyye nauki" [Proc. 10th International Conference "Intelligent Systems And Computer Sciences"]. — Moscow, 2011. — P. 176–178 (in Russian).
- Кучинский Н. А., Васецкий А. М., Кениг Е. Я., Кольцова Э. М.* Моделирование процесса формирования покрытия гранул на основе теории клеточных автоматов // Фундаментальные исследования. — 2013. — № 4 (5). — С. 1069–1073.
- Kuchinskiy N. A., Vasetskiy A. M., Kenig E. Ya., Kol'tsova E. M.* Modelirovaniye protsessa formirovaniya pokrytiya granul na osnove teorii kletochnykh avtomatov [Cellular automata for mathematical modeling of coating formation on the granules] // Fundamental research. — 2013. — No. 4 (5). — P. 1069–1073 (in Russian).
- Кухта В. Б.* Метод моделирования распространения низового пожара в лесных насаждениях с использованием агентного подхода // Лесной вестник. — 2014. — № 5. — С. 92–97.
- Kukhta V. B.* Metod modelirovaniya rasprostraneniya nizovogo pozhara v lesnykh nasazhdeniyakh s ispol'zovaniyem agentnogo podkhoda [Modeling method of ground fire spread in forest stands with implementation of agent-based approach] // Forestry Bulletin. — 2014. — No. 5. — P. 92–97 (in Russian).
- Лабунец В., Артемов И., Остхаймер Е.* Цветные метасреды Шрёдингера // Эко-потенциал. — 2016. — № 3 (15). — С. 29–41.
- Labunets V., Artemov I., Ostkhaymer Ye.* Tsvetnyye metasredy Shredingera [Colored Schrödinger metamedia] // Eco-potential. — 2016. — No. 3 (15). — P. 29–41 (in Russian).
- Ланских В. Г., Ланских А. М.* Увеличение криптографической стойкости генератора псевдослучайных двоичных последовательностей на основе клеточных автоматов // Всероссийская ежегодная научно-практическая конференция «Общество, наука, инновации» (НПК-2015): сборник материалов. — Киров, 13–24 апреля 2015. — С. 1227–1231.
- Lanskikh V. G., Lanskikh A. M.* Uvelicheniye kriptograficheskoy stoykosti generatora psevdosluchaynykh dvoichnykh posledovatel'nostey na osnove kletochnykh avtomatov [Increasing the cryptographic stability of a pseudo-random binary sequence generator based on cellular automata] // Sbornik materialov: Vserossiyskaya yezhegodnaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya "Obshchestvo, nauka, innovatsii" (NPK-2015) [Collected materials of All-Russian annual scientific and practical conference "Society, science and innovation" (SPC-2015)]. — Kirov, 2015. — P. 1227–1231 (in Russian).
- Ломакин С. Г., Федотов А. М.* Анализ модели передачи информации в сети клеточных автоматов // Вестник НГУ. Сер. Информационные технологии. — 2014. — Т. 12, № 3. — С. 86–99.

- Lomakin S. G., Fedotov A. M.* Analiz modeli peredachi informatsii v seti kletochnykh avtomatov [The analysis of information transfer model in the network of cellular automaton] // Novosibirsk State University Journal of Information Technologies. — 2014. — Vol. 12, No. 3. — P. 86–99 (in Russian).
- Мазурин Д. С.* Математическая модель динамики транспортного потока на многополосной магистрали // Автоматика и телемеханика. — 2013. — № 5. — С. 156–166.
- Mazurin D. S.* Mathematical model of transportation flow dynamics on a multilane highway // Automation and Remote Control. — 2013. — Vol. 74, Issue 5. — P. 845–852. (Original Russian paper: *Mazurin D. S.* Matematicheskaya model' dinamiki transportnogo potoka na mnogopolosnoy magistrali // Avtomatika i telemekhanika. — 2013. — No. 5. — P. 156–166).
- Максимов А. А.* Количественная оценка изменений на полутоновых изображениях клеточным автоматом // Динамические системы. — 2016. — Т. 6 (34), № 2. — С. 135–147.
- Maksimov A. A.* Kolichestvennaya otsenka izmeneniy na polutonovykh izobrazheniyakh kletochnym avtomatom [Quantitative evaluation of changes on grayscale images by cellular automaton] // Dynamical Systems. — 2016. — Vol. 6 (34), No. 2. — P. 135–147 (in Russian).
- Малкин Г. В. и др.* Клеточные автоматы в системе распознавания чисел // Актуальные направления научных исследований: перспективы развития: материалы II Междунар. науч.-практ. конф. — Чебоксары, 16 июля 2017. — Чебоксары: ЦНС «Интерактив плюс», 2017. — С. 181–185.
- Malkin G. V. i dr.* Kletochnyye avtomaty v sisteme raspoznavaniya chisel [Cellular automata in a number identification system] // Materialy II Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii “Aktual'nyye napravleniya nauchnykh issledovaniy: perspektivy razvitiya” [Current avenues of scientific research: prospects of development: Proceedings of the 2nd International Scientific and Practical Conference]. — Cheboksary, 2017. — P. 181–185 (in Russian).
- Марковский М. В., Марковский А. В., Михненко М. В., Круглиевский В. Н., Колесник В. А.* Принципы моделирования развития пожароопасных ситуаций на базе математического аппарата клеточных автоматов // Морской вестник. — 2014. — № 3 (51). — С. 71–75.
- Markovskiy M. V., Markovskiy A. V., Mikhnenok M. V., Krugliyevskiy V. N., Kolesnik V. A.* Printsipy modelirovaniya razvitiya pozharoопасnykh situatsiy na baze matematicheskogo apparata kletochnykh avtomatov [Principles of modeling of fire situations on the basis of mathematical formalism of cellular automata] // Morskoy Vestnik. — 2014. — No. 3 (51). — P. 71–75 (in Russian).
- Марценюк М. А., Селетков И. П.* Использование нечеткого клеточного автомата для моделирования динамических процессов в средах с памятью // Современные информационные технологии и ИТ-образование. — 2015. — Т. 2, № 11. — С. 532–540.
- Martsenyuk M. A., Seletkov I. P.* Ispol'zovaniye nechotkogo kletochnogo avtomata dlya modelirovaniya dinamicheskikh protsessov v sredakh s pamyat'yu [The use of a fuzzy cellular automaton for simulation of dynamical processes in media with memory] // Modern Information Technologies and IT-Education. — 2015. — Vol. 2, No. 11. — P. 532–540 (in Russian).
- Матвиенко Д. А., Попова Е. В., Савинская Д. Н.* Прогнозирование динамики объемов продаж бутылированной минеральной питьевой воды на базе инструментария клеточных автоматов и математического аппарата нечетких множеств // Экономическое прогнозирование: модели и методы: материалы XII Международной научно-практической конференции. — Воронеж, 2014. — С. 90–96.
- Matviyenko D. A., Popova E. V., Savinskaya D. N.* Prognozirovaniye dinamiki ob'yemov prodazh butilirovannoy mineral'no pit'yevoy vody na baze instrumentariya kletochnykh avtomatov i matematicheskogo apparata nechetskikh mnozhestv [Forecasting the dynamics of sales volumes of bottled mineral drinking water based on the tools of cellular automata and the mathematical apparatus of fuzzy sets] // Materialy XII mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii “Ekonomicheskoye prognozirovaniye: modeli i metody” [Economic Forecasting: Models and Methods: Materials of the XII International Scientific and Practical Conference]. — Voronezh, 2014. — P. 90–96 (in Russian).
- Махалова Т. П., Русаков С. В.* Моделирование процессов заселения территорий с помощью клеточных автоматов // Историческая информатика. Информационные технологии и математические методы в исторических исследованиях и образовании. — 2014. — № 2-3 (8-9). — С. 113–123.
- Makhalova T. P., Rusakov S. V.* Modelirovaniye protsessov zaseleniya territoriy s pomoshch'yu kletochnykh avtomatov [Modelling of territory settlement by means of cellular automata] // Historical Information Science. Information Technology and Quantitative Methods in Historical Research and Education. — 2014. — No. 2-3 (8-9). — P. 113–123 (in Russian).

- Мельников Б. Ф., Пивиева С. В., Мельникова Е. А., Рудницкий В. Н.* Параллельная реализация задач дискретной оптимизации на основе мультиэвристического подхода: монография. — Самара: ООО «Издательство АСГАРД», 2017.
Mel'nikov B. F., Piviyeva S. V., Mel'nikova E. A., Rudnitskiy V. N. Parallel'naya realizatsiya zadach diskretnoy optimizatsii na osnove mul'tievristicheskogo podkhoda [Parallel implementation of discrete optimization on the basis of the multiheuristic approach]. — Samara: Izdate'l'stvo ASGARD, 2017 (in Russian).
- Меншуткин В. В., Филатов Н. Н.* Модели Ладожского озера с использованием трехмерных клеточных автоматов // Труды Карельского научного центра РАН. Сер. Лимнология. — 2017. — № 3. — С. 93–102.
Menshutkin V. V., Filatov N. N. Modeli Ladozhskogo ozera s ispol'zovaniyem trokhmernykh kletochnykh avtomatov [Models of lake Ladoga based on three-dimensional cellular automata] // Proceedinds of the Karelian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences. Ser. Limnology. — 2017. — No. 3. — P. 93–102 (in Russian).
- Меншуткин В. В., Филатов Н. Н.* Модель подледной экологической системы крупного озера, основанная на применении клеточных автоматов // Труды Карельского научного центра РАН. Сер. Лимнология. — 2016. — № 5. — С. 76–87.
Menshutkin V. V., Filatov N. N. Model' podlednoy ekologicheskoy sistemy krupnogo ozera, osnovannaya na primeneni-i kletochnykh avtomatov [A model of under-ice ecological system of a large lake based on the application of cellular automata] // Proceedinds of the Karelian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences. Ser. Limnology. — 2016. — No. 5. — P. 76–87 (in Russian).
- Меньшуткина Н. В., Иванов С. И., Матасов А. В.* Моделирование процесса деформации полимерных нанокompозитов с использованием параллельных вычислений на основе клеточных автоматов // Теоретические основы химической технологии. — 2017. — Т. 51, № 3. — С. 323–329.
Ivanov S. I., Matasov A. V., Menshutkina N. V. Cellular automata modeling of polymer nanocomposite deformation using parallel computing // Theoretical Foundations of Chemical Engineering. — 2017. — Vol. 51, Issue 3. — P. 335–340. (Original Russian paper: *Men'shutkina N. V., Ivanov S. I., Matasov A. V.* Modelirovaniye protsessa deformatsii polimernykh nanokompозитov s ispol'zovaniyem parallel'nykh vychisleniy na osnove kletochnykh avtomatov // Teoreticheskiye osnovy khimicheskoy tekhnologii. — 2017. — Vol. 51, No. 3. — P. 323–329.)
- Михаль О. Ф.* Синтез модели клеточного автомата на сети Петри. Часть I. Гносеологический аспект // Информатика, математическое моделирование, экономика: сборник научных статей по итогам Третьей Международной научно-практической конференции. Том 2. — Смоленск, 2013(a). — С. 89–94.
Mikhal' O. F. Sintez modeli kletochnogo avtomata na seti Petri. Chast' I. Gnoseologicheskiiy aspekt [Synthesis of a model of a cellular automaton using Petri's network. Part I. Gnoseological aspect] // Sbornik nauchnykh statey po itogam Tret'yey Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii "Informatika, matematicheskoye modelirovaniye, ekonomika". Tom 2 [Informatics, mathematical modeling, economics: Proceedings of the 3rd International Scientific and Practical Conference. Volume 2]. — Smolensk, 2013. — P. 89–94 (in Russian).
- Михаль О. Ф., Прокопов П. В.* Моделирование на MATHCAD клеточных автоматов с альтернативными конкурирующими правилами смены состояний клеток // Информатика, математическое моделирование, экономика: сборник научных статей по итогам III Международной научно-практической конференции. Том 2. — Смоленск, 2013(b). — С. 119–124.
Mikhal' O. F., Prokopov P. V. Modelirovaniye na MATHCAD kletochnykh avtomatov s al'ternativnymi konkuriruyushchimi pravilami smeny sostoyaniy kletok [Simulation of cellular automata using MATHCAD with alternative competing rules of change of states of cells] // Sbornik nauchnykh statey po itogam Tret'yey Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii "Informatika, matematicheskoye modelirovaniye, ekonomika". Tom 2 [Informatics, mathematical modeling, economics: Proceedings of the 3rd International Scientific and Practical Conference. Volume 2]. — Smolensk, 2013. — P. 119–124 (in Russian).
- Моисеенко Д. Д., Панин В. Е., Елсукова Т. Ф.* Роль локальной кривизны в волновом механизме зернограницного скольжения при деформации поликристалла // Физическая мезомеханика. — 2013. — Т. 16, № 3. — С. 81–93.
Moiseenko D. D., Panin V. E., El'sukova T. F. Role of local curvature in grain boundary sliding in a deformed polycrystal // Physical Mesomechanics. — 2013. — Vol. 16, Issue 4. — P. 335–347. (Original Russian paper: *Moiseyenko D. D., Panin V. E., Yelsukova T. F.* Rol' lokal'noy krivizny v volnovom mekhanizme zernogranichnogo skol'zheniya pri deformatsii polikristalla // Fizicheskaya mezomekhanika. — 2013. — Vol. 16, No. 3. — P. 81–93.)

- Мурашко И. А., Храбров Д. Е.* Методика проектирования генератора псевдослучайных тестовых последовательностей на клеточных автоматах с расширенным набором правил // Вестник Московского государственного университета приборостроения и информатики. Сер. Приборостроение и информационные технологии. — 2013. — № 47. — С. 78–93.
- Murashko I. A., Khrabrov D. E.* Metodika proyektirovaniya generatora psevdosluchaynykh testovykh posledovatel'nostey na kletochnykh avtomatakh s rasshirenym naborom pravil [Technique of designing of the generator of pseudo-casual tesy sequences on cellular automatic devices with the expanded set of rules] // Herald of the Moscow State University of Instrument-Engineering and Informatics. Ser. Instrument-Engineering and Information Technologies. — 2013. — No. 47. — P. 78–93 (in Russian).
- Мясниченко В. С., Колосов А. Ю., Сдобняков Н. Ю.* Клеточно-автоматная модель роста двумерных однокомпонентных и бинарных нанокристаллов // Межвузовский сборник научных трудов «Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов». — Вып. 8. — Тверь: Твер. гос. ун-т, 2016. — С. 253–258.
- Myasnichenko V. S., Kolosov A. Yu., Sdobnyakov N. Yu.* Kletochno-avtomatnaya model' rosta dvumernykh odnokomponentnykh i binarnykh nanokristallov Cellular automata model of the two-dimensional single component and binary nanocrystals growth // Mezhvuzovskiy sbornik nauchnykh trudov "Fiziko-khimicheskiye aspekty izucheniya klasterov, nanostruktur i nanomaterialov" [Interuniversity collection of proceedings "Physical and chemical aspects of the study of clusters, nanostructures and nanomaterials"]. — 2016. — No. 8. — P. 253–258 (in Russian).
- Нагорнов Ю. С., Потатуркина-Нестерова Н. И.* К вопросу моделирования межклеточного взаимодействия микроорганизмов в условиях Quorum Sensing методом клеточных автоматов // Материалы III Научно-практической конференции «Междисциплинарные исследования в области математического моделирования и информатики». — Тольятти, 20–21 февраля 2014. — С. 408–412.
- Nagornov Yu. S., Potaturkina-Nesterova N. I.* K voprosu modelirovaniya mezhkletochnogo vzaimodeystviya mikroorganizmov v usloviyakh Quorum Sensing metodom kletochnykh avtomatov [On the question of modeling of intercellular interaction of microorganisms in the conditions of Quorum Sensing by cell automata method] // Materialy III Nauchno-prakticheskoy konferentsii "Mezhdistsiplinarye issledovaniya v oblasti matematicheskogo modelirovaniya i informatiki" [Materials of the 3rd scientific and practical conference "Interdisciplinary research in the field of mathematical modeling and informatics"]. — Tolyatti, 2014. — P. 408–412 (in Russian).
- Надеждин И. С.* Моделирование распространения электрических разрядов между металлическими шариками в водном растворе // Научно-технический вестник Поволжья. — 2017. — № 4. — С. 153–155.
- Nadezhdin I. S.* Modelirovaniye rasprostraneniya elektricheskikh razryadov mezhdru metallicheskimy sharikami v vodnom rastvore [Modeling the distribution of electric discharge among metal balls in aqueous solutions] // Scientific and Technical Volga region Bulletin. — 2017. — No. 4. — P. 153–155 (in Russian).
- Недогонова Т. А., Попова Е. В.* Линейный клеточный автомат как инструментальный формирование памяти временного ряда цен на мазут // Материалы VII Международной научно-практической интернет-конференции «Анализ, моделирование и прогнозирование экономических процессов». — 20 декабря – 20 февраля 2016. — С. 197–200.
- Nedogonova T. A., Popova E. V.* Lineynyy kletochnyy avtomat kak instrumentariy formirovaniya pamyati vremennogo ryada tsen na mazut [Linear cellular automaton as a tool for forming the time series memory of prices for black oil] // Materialy VII Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy internet-konferentsii «Analiz, modelirovaniye i prognozirovaniye ekonomicheskikh protsessov» [Proceedings of the 7th International Scientific and Practical Internet-Conference "Analysis, Simulation and Forecast of Economic Processes"]. — 2016. — P. 197–200 (in Russian).
- Нижниковский А. В.* Методическое обеспечение формирования ключевой информации в беспроводных мобильных сетях на базе дискретных отображений класса «клеточные автоматы»: дисс. на соиск. степ. канд. техн. наук // Институт инженерной физики. — Серпухов, 2013. — 109 с.
- Nizhnikovskii A. V.* Methodical support for formation of key information in wireless mobile networks based on discrete maps belonging to the class of cellular automata: dissertation for the degree of Candidate of Engineering Sciences // Institute of Engineering Physics. — Serpukhov, 2013. — 109 p.
- Носова М. В., Кочкаров А. А.* Моделирование и сценарный анализ информационной конкуренции в сетевых системах // Труды XXII Международной конференции «Проблемы управления безопасностью сложных систем». — Москва, 2014(а). — М.: Издательский центр РГГУ, 2014. — С. 279–281.

- Nosova M. V., Kochkarov A. A.* Modelirovaniye i stsenarnyy analiz informatsionnoy konkurentsii v setevykh sistemakh [Modeling and scenario analysis of information competition in network systems] // Trudy XXII Mezhdunarodnoy konferentsii "Problemy upravleniya bezopasnost'yu slozhnykh system" [Proceedings of the 22nd International Conference "Problems in Controlling the Security of Complex Systems"]. — Moscow, 2014. — P. 279–281 (in Russian).
- Носова М. В., Сенникова Л. И.* Моделирование распространения информации в децентрализованных сетевых системах и нерегулярной структурой // Новые информационные технологии в автоматизированных системах: материалы XVII Научно-практического семинара. — М.: ИПМ им. М. В. Келдыша, 2014(b). — С. 329–335.
- Nosova M. V., Sennikova L. I.* Modelirovaniye rasprostraneniya informatsii v detsentralizovannykh setevykh sistemakh i neregulyarnoy strukture [Modeling of information dissemination in decentralized network systems and with irregular structure] // Materialy semnadsatogo nauchno-prakticheskogo seminar "Novyye informatsionnyye tekhnologii v avtomatizirovannykh sistemakh" [New information technologies in automated systems: proceedings of the 17th Scientific and practical workshop]. — Moscow, 2014. — P. 329–335 (in Russian).
- Панин В. Е. и др.* Механизмы демпфирования упругой энергии в переходном слое между покрытием и подложкой в условиях контактного взаимодействия // Прикладная механика и техническая физика. — 2014. — Т. 55, № 2. — С. 148–158.
- Panin V. E., Moiseenko D. D., Panin S. V., Maksimov P. V., Goryacheva I. G., Cheng C. H.* Mechanisms of elastic energy dissipation in the transition layer between a coating and a substrate under contact interaction // Journal of Applied Mechanics and Technical Physics. — 2014. — Vol. 55, Issue 2. — P. 318–326. (Original Russian paper: *Panin V. E. et al.* Mekhanizmy dempfirovaniya uprugoy energii v perekhodnom sloye mezhdu pokrytiyem i podlozhkoy v usloviyakh kontaktnogo vzaimodeystviya // Prikladnaya mekhanika i tekhnicheskaya fizika. — 2014. — Vol. 55, No. 2. — P. 148–158.)
- Петров А. П., Степанцов М. Е.* Дискретная распределенная модификация модели «власть–общество» на основе клеточного автомата // Препринты ИПМ им. М. В. Келдыша. — 2014. — № 100. — URL: <http://library.keldysh.ru/preprint.asp?id=2014-100> (дата обращения: 04.05.2018).
- Petrov A. P., Stepanov M. E.* Diskretnaya raspredelennaya modifikatsiya modeli «vlast'–obshchestvo» na osnove kletochnogo avtomata [A discrete distributed "power–society" model modification based on cellular automaton] // Keldysh Institute PREPRINTS. — 2014. — No. 100 (in Russian). — Available at: <http://library.keldysh.ru/preprint.asp?id=2014-100> (accessed: 04.05.2018).
- Повитухин С. А.* Имитационная модель конкуренции на рынке оказания услуг населению // Экономическая наука сегодня: теория и практика: материалы III Междунар. науч.-практ. конф. — Чебоксары, 26 дек. 2015. — Чебоксары: ЦНС «Интерактив плюс», 2015. — С. 293–295.
- Povitukhin S. A.* Imitatsionnaya model' konkurentsii na rynke okazaniya uslug naseleniyu [Simulation model of competition in the market of rendering services to the population] // Materialy III Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii "Ekonomicheskaya nauka segodnya: teoriya i praktika" [Economic science today: theory and practice: materials of the III International Scientific and Practical Conference]. — Cheboksary, 2015. — P. 293–295 (in Russian).
- Попов Ф. С.* Математическое моделирование эффекта Портевена – ле Шателье с помощью клеточных автоматов // Аэрокосмическая техника, высокие технологии и инновации. — 2015. — Т. 1. — С. 420–423.
- Popov F. S.* Matematicheskoye modelirovaniye effekta Portevena – le Shatel'ye s pomoshch'yu kletochnykh avtomatov [Mathematical modeling of the Portevin – Le Chatelier effect using cellular automata] // Aerospace equipment, high technologies and innovations. — 2015. — Vol. 1. — P. 420–423 (in Russian).
- Потапенко А. А., Моор В. К.* Моделирование городской среды на основе вычислительных теорий // Новые идеи нового века – 2016: материалы XVI Международной научной конференции. Т. 1. — Хабаровск, 2016. — Хабаровск: Изд-во Тихоокеан. гос. ун-та, 2016. — С. 281–285.
- Potapenko A. A., Moor V. K.* Modelirovaniye gorodskoy sredy na osnove vychislitel'nykh teoriy [Simulation of the Urban Environment Using Computational Theories] // Materialy Shestnadsatoy Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii: Novyye idei novogo veka [The new Ideas of New Century – 2016: The XVI International Scientific Conference Proceedings]. — Khabarovsk, 2016. — P. 281–285 (in Russian).
- Псахье С. Г., Хори Я., Коростелев С. Ю., Смолин А. Ю., Дмитриев А. И., Шилько Е. В., Алексеев С. В.* Метод подвижных клеточных автоматов как инструмент для моделирования в рамках физической мезомеханики // Известия вузов. Физика. — Томск: ТГУ, 1995. — Т. 38, № 11. — С. 58–69.

- Psahje S. G., Hori Ya., Korostelev S. Yu., Smolin A. Yu., Dmitriev A. I., Shil'ko E. V., Alekseev S. V.* Metod podviznykh kletochnykh avtomatov kak instrument dlya modelirovaniya v ramkah fizicheskoi mezomehaniki [The method of mobile cellular automata as a tool for modeling in the framework of physical mesomechanics] // Russian Physics Journal. — Tomsk: TSU, 1995. — Vol. 38, No. 11. — P. 58–69.
- Романов А. М.* Методика оптимизации параметров cell-архитектуры алгоритма имитозащиты служебных сигналов радиосети специального назначения // Глобальный научный потенциал. — 2014. — № 2 (35). — С. 80–83.
- Romanov A. M.* Metodika optimizatsii parametrov cell-arkhitektury algoritma imitozashchity sluzhebnykh signalov radioseti spetsial'nogo naznacheniya [The Procedure of Cell Architecture Parameters Optimization to Provide Dummy Messages Defence of Special Wireless Network Service Signals by Using Original Cryptographic Transformation Algorithm] // Global Scientific potential. Information science. — 2014. — No. 2 (35). — P. 80–83 (in Russian).
- Рубцов С. Е., Павлова А. В.* Клеточно-автоматное моделирование миграции и гравитационного осаждения примеси в потоке жидкости // Экологический вестник научных центров Черноморского экономического сотрудничества. — 2017. — № 3. — С. 46–52.
- Rubtsov S. E., Pavlova A. V.* Kletочно-avtomatnoye modelirovaniye migratsii i gravitatsionnogo osazhdeniya primesi v potoke zhidkosti [Cellular automata modeling of migration and gravitational sedimentation of impurity in a liquid flow] // Ecological Bulletin of Research Centers of the Black Sea Economic Cooperation. — 2017. — No. 3. — P. 46–52 (in Russian).
- Рудницкий В. Н., Мельникова Е. А., Пустовит М. О.* Распараллеливание и оптимизация выполнения расчетов процесса развития пожара на основе трехмерных клеточных автоматов // Вектор науки ТГУ. — 2014. — № 1 (27). — С. 22–26.
- Rudnitskiy V. N., Mel'nikova E. A., Pustovit M. O.* Rasparallelivaniye i optimizatsiya vypolneniya raschetov protsessa razvitiya pozhara na osnove trekhmernykh kletochnykh avtomatov [Parallelization and optimization of fire propagation oricess calculation basis on three-dimensional cellular automata] // Vektor Nauki of Togliatti State University. — 2014. — No. 1 (27). — P. 22–26 (in Russian).
- Рябуша В. А.* Применение клеточного автомата для моделирования эволюции интенсивного пучка заряженных частиц в магнитном поле // Процессы управления и устойчивость. — 2015. — Т. 2, № 1. — С. 485–490.
- Ryabusha V. A.* Primeneniye kletochnogo avtomata dlya modelirovaniya evolyutsii intensivnogo puchka zaryazhennykh chastits v magnitnom pole [The application of the cellular automaton for simulating an intense charged particles beam evolution in a magnetic field] // The XLVI annual international conference on Control Processes and Stability (CPS'15). — 2015. — Vol. 2, No. 1. — P. 485–490 (in Russian).
- Сабельфельд К. К., Киреева А. Е.* Дискретное стохастическое моделирование рекомбинации электронов и дырок в 2D- и 3D-неоднородных полупроводниках // Прикладная дискретная математика. Дискретные модели реальных процессов. — 2016. — № 4 (34). — С. 110–127.
- Sabelfeld K. K., Kireyeva A. E.* Diskretnoye stokhasticheskoye modelirovaniye rekombinatsii elektronov i dyrok v 2D- i 3D-neodnorodnykh poluprovodnikakh [Discrete stochastic simulation of the electrons and holes recombination in the 2D- and 3D-inhomogeneous semiconductor] // Applied Discrete Mathematics. — 2016. — No. 4 (34). — P. 110–127 (in Russian).
- Сабельфельд К. К., Киреева А. Е.* Параллельная реализация стохастической клеточно-автоматной модели рекомбинации электронов и дырок в 2D и 3D неоднородных полупроводниках // Вестник ЮУрГУ. Сер. Вычислительная математика и информатика. — 2017. — Т. 6, № 1. — С. 87–103.
- Sabelfeld K. K., Kireyeva A. Ye.* Parallelnaya realizatsiya stokhasticheskoy kletочно-avtomatnoy modeli rekombinatsii elektronov i dyrok v 2D- i 3D-neodnorodnykh poluprovodnikakh [Parallel implementation of stochastic cellular automata model of electron-hole recombination in 2D and 3D heterogeneous semiconductors] // Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computational Mathematics and Software Engineering. — 2017. — Vol. 6, No. 1. — P. 87–103 (in Russian).
- Сарсенова С. М., Сарсенов Р. М.* Исследование пространственно-временных структур, сформированных радиационным воздействием // Наука вчера, сегодня, завтра: сб. ст. по матер. XLIII Междунар. науч.-практ. конф. — № 2 (36). — Новосибирск: СибАК, 2017. — С. 88–92.
- Sarsenova S. M., Sarsenov R. M.* Issledovaniye prostranstvenno-vremennykh struktur, sformirovannykh radiatsionnym vozdeystviyem [Research of spatial and temporal structures formed under radiation] // Sbornik statey po materialam XLIII Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii "Nauka vchera, segodnya, zavtra" [Science yesterday, today and tomorrow: Proceedings of the XLIII International Scientific and Practical Conference]. — Novosibirsk, 2017. — P. 88–92 (in Russian).

- Селетков И. П., Марценюк М. А.* Моделирование роста мегаполиса с помощью матричного нечеткого клеточного автомата // Математика и междисциплинарные исследования – 2016: сборник докладов Всероссийской научно-практической конференции молодых ученых с международным участием. — Пермь, 16–19 мая 2016. — С. 238–241.
Seletkov I. P., Martsenyuk M. A. Modelirovaniye rosta megapolisa s pomoshch'yu matrichnogo nechotkogo kletochnogo avtomata [Modelling urban growth using matrix fuzzy cellular automata] // Sbornik dokladov Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii molodykh uchenykh s mezhdunarodnym uchastiyem “Matematika i mezhdistsiplinarnyye issledovaniya – 2016” [Collection of reports of the All-Russian scientific-practical conference of young scientists “Mathematics and Interdisciplinary Research – 2016”]. — Perm, 2016. — P. 238–241 (in Russian).
- Селетков И. П., Марценюк М. А.* Нечеткий клеточный автомат для моделирования эффекта температурной памяти // Математическое моделирование в естественных науках. — 2015. — Т. 1. — С. 399–403.
Seletkov I. P., Martsenyuk M. A. Nchetkiy kletochnyy avtomat dlya modelirovaniya effekta temperaturnoy pamyati [Fuzzy cellular automata for temperature field control] // Matematicheskoye modelirovaniye v yestestvennykh naukakh. — 2015. — Vol. 1. — P. 399–403 (in Russian).
- Сергиенко Е. Н., Вожакова Ю. В., Белоусова Н. В.* Проблемы генерации псевдослучайных последовательностей // V Международная научно-прикладная конференция «Современные информационные технологии в управлении качеством»: сборник статей. — Пенза, 2016. — С. 5–10.
Serghiynko E. N., Vozhakova Yu. V., Belousova N. V. Problemy generatsii psevdosluchaynykh posledovatel'nostey [The problems of the generation of pseudorandom sequences] // Sbornik statey: V Mezhdunarodnaya nauchno-prikladnaya konferentsiya “Sovremennyye informatsionnyye tekhnologii v upravlenii kachestvom” [Proceedings of the 5th International Scientific and Applied Conference “Modern Information Technologies in Quality Control”]. — Pensa, 2016. — P. 5–10 (in Russian).
- Смолин А. Ю., Аникеева Г. М., Шилько Е. В., Псахье С. Г.* Моделирование деформации наноструктурных покрытий на титановой подложке при наноиндентировании // Вестник Томского государственного университета. Математика и механика. — 2013. — № 4 (24). — С. 111–125.
Smolin A. Yu., Anikayeva G. M., Shil'ko E. V., Psakh'ye S. G. Modelirovaniye deformatsii nanostrukturnykh pokrytiy na titanovoy podlozhke pri nanoindentirovani [Modeling deformation of nanostructured coatings on a titanium substrate under nanoindentation] // Tomsk State University Journal of Mathematics and Mechanics. — 2013. — No. 4 (24). — P. 111–125 (in Russian).
- Смолин А. Ю., Еремина Г. М.* Численное исследование влияния материала подложки на деформирование и разрушение системы «покрытие–подложка» // Вестник Томского государственного университета. Математика и механика. — 2017. — № 48. — С. 91–106.
Smolin A. Yu., Yeremina G. M. Chislennoye issledovaniye vliyaniya materiala podlozhki na deformirovaniye i razrusheniye sistemy “pokrytiye–podlozhka” [Numerical study of the influence of substrate material on deformation and fracture of the coating–substrate system] // Tomsk State University Journal of Mathematics and Mechanics. — 2017. — No. 48. — P. 91–106 (in Russian).
- Смолин А. Ю., Еремина Г. М., Сергеев В. В. и др.* Трехмерное моделирование методом подвижных клеточных автоматов упругопластического деформирования и разрушения покрытий при контактном взаимодействии с жестким индентором // Физическая мезомеханика. — 2014. — Т. 17, № 3. — С. 64–76.
Smolin A. Yu., Eremina G. M., Sergeev V. V., Shilko E. V. Three-Dimensional Movable Cellular Automata Simulation of Elastoplastic Deformation and Fracture of Coatings in Contact Interaction with a Rigid Indenter // Physical Mesomechanics. — 2014. — Vol. 17, Issue 4. — P. 292–303. (Original Russian paper: *Smolin A. Yu., Yeremina G. M., Sergeyev V. V. et al.* Trekhmernoye modelirovaniye metodom podvizhnykh kletochnykh avtomatov uprugoplasticheskogo deformirovaniya i razrusheniya pokrytiy pri kontaktnom vzaimodeystvii s zhestkim indentorom // Fizicheskaya mezomekhanika. — 2014. — Vol. 17, No. 3. — P. 64–76).
- Соколов И. А., Миловидова А. А.* Обзор свойств клеточных автоматов, их применения // Сетевое научное издание «Системный анализ в науке и образовании». — 2017. — № 1. — URL: [file:///C:/Users/Serg/Downloads/ad5566e85b3a3548be952049713cdaef%20\(4\).pdf](file:///C:/Users/Serg/Downloads/ad5566e85b3a3548be952049713cdaef%20(4).pdf) (дата обращения: 17.04.2018).
Sokolov I. A., Milovidova A. A. Obzor svoystv kletochnykh avtomatov, ikh primeneniya [Overview of cellular automata and their applications] // Setevoye nauchnoye izdaniye “Sistemnyy analiz v nauke i obrazovanii”. — 2017. — No. 1 (in Russian). — Available at: [file:///C:/Users/Serg/Downloads/ad5566e85b3a3548be952049713cdaef%20\(4\).pdf](file:///C:/Users/Serg/Downloads/ad5566e85b3a3548be952049713cdaef%20(4).pdf) (accessed: 17.04.2018).

- Соколова М. Л., Семенихин Д. В.* Проектирование 3D-моделей ветвящихся узоров // Труды Академии технической эстетики и дизайна. — 2015. — № 1. — С. 13–15.
Sokolova M. L., Semenikhin D. V. Proyektirovaniye 3D-modeley vetvyashchikhsya uzorov [Design of 3D models of branching patterns] // Proceedings of the academy of technical aesthetics and design. — 2015. — No. 1. — P. 13–15 (in Russian).
- Солодовниченко М. А., Замятин А. В.* Алгоритм распространения лесного пожара с использованием модели Ротермела и клеточных автоматов // Информационные технологии. — 2013. — № 8. — С. 58–63.
Solodovnichenko M. A., Zamyatin A. V. Algoritm rasprostraneniya lesnogo pozhara s ispol'zovaniyem modeli Roter-mela i kletochnykh avtomatov [Algorithm of Forest Fire Spread with Rothermel Model and Cellular Automata] // Information Technologies. — 2013. — No. 8. — P. 58–63 (in Russian).
- Стемпковский А. Л.* Отказоустойчивые архитектуры микроэлектронных вычислительных систем // Информационные технологии и вычислительные системы. — 2001. — № 2/3. — С. 40–50.
Stempkovskiy A. L. Otkazoustoychivyye arkhitektury mikroelektronnykh vychislitel'nykh sistem [Failure-resistant architectures of microelectronic computation systems] // Journal of Information Technologies and Computing Systems. — 2001. — No. 2/3. — P. 40–50 (in Russian).
- Степанов М. В., Евдокимова А. А.* Алгоритм моделирования самоорганизации квантовых клеточных автоматов в наноразмерных структурах // Наноматериалы и наноструктуры – XXI век. — 2016. — Т. 7, № 3. — С. 43–49.
Stepanov M. V., Yevdokimova A. A. Algoritm modelirovaniya samoorganizatsii kvantovykh kletochnykh avtomatov v nanorazmernykh strukturakh [The simulation algorithm of self-organization of quantum cellular automata at nano-scale structures] // Journal Nanomaterials and Nanostructures – XXI Century. — 2016. — Vol. 7, No. 3. — P. 43–49 (in Russian).
- Степанцов М. Е.* Дискретная математическая модель системы «власть–общество–экономика» на основе клеточного автомата // Компьютерные исследования и моделирование. — 2016. — Т. 8, № 3. — С. 561–572.
Stepantsov M. E. Diskretnaya matematicheskaya model' sistemy "vlast'-obshchestvo-ekonomika" na osnove kletoch-nogo avtomata [A discrete "power-society-economics" model based on cellular automaton] // Computer Research and Modeling. — 2016. — Vol. 8, No. 3. — P. 561–572 (in Russian).
- Степанцов М. Е.* Моделирование системы «власть–общество–экономика» с элементами коррупции на основе клеточных автоматов // Математическое моделирование. — 2017. — Т. 29, № 9. — С. 101–109.
Stepantsov M. E. Simulation of the "Power–Society–Economics" System with Elements of Corruption Based on Cellular Automata // Mathematical Models and Computer Simulations. — 2018. — Vol. 10, Issue 2. — P. 249–254. (Original Russian paper: *Stepantsov M. Ye.* Modelirovaniye sistemy "vlast'-obshchestvo-ekonomika" s elementami korruptsii na osnove kletochnykh avtomatov // Matematicheskoye modelirovaniye. — 2017. — Vol. 29, No. 9. — P. 101–109.)
- Сухинин Б. М.* Высокоскоростные генераторы псевдослучайных последовательностей на основе клеточных автоматов // ПДМ. — 2010. — № 2 (8). — С. 34–41.
Suhinin B. M. Vysokoskorostnye generatory psevdosluchainyh posledovatel'nostej na osnove kletochnykh avtomatov [High-speed pseudo-random sequence generators based on cellular automata] // ADM. — 2010. — No. 2 (8). — P. 34–41.
- Темиров А. А.* Алгоритмы линейного клеточного автомата для прогнозирования урожайности зерновых // Новые технологии. — 2015(a). — № 4. — С. 138–144.
Temirov A. A. Algoritmy lineynogo kletochnogo avtomata dlya prognozirovaniya urozhaynosti zernovykh [Algorithms of the linear cellular automatic machine for the forecasting grain productivity] // Novyye tekhnologii. — 2015. — No. 4. — P. 138–144 (in Russian).
- Темиров А. А.* Концепция двухуровневой клеточно-автоматной прогнозной модели. Часть I // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. — 2015(b). — № 6 (68). — С. 183–191.
Temirov A. A. Kontseptciya dvukhurovnevoy kletochno-avtomatnoy prognoznoy modeli. Chast' I [Concept of two-level cellular-automaton predictive model. Part I] // Izvestiya Kabardino-Balkarskogo nauchnogo tsentra RAN. — 2015. — No. 6 (68). — P. 183–191 (in Russian).
- Темиров А. А.* Концепция двухуровневой клеточно-автоматной прогнозной модели. Часть II // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. — 2016(c). — № 1 (69). — С. 42–48.

- Temirov A. A.* Kontsepsiya dvukhurovnevoy kletочно-avtomatnoy prognoznoy modeli. Chast' II [Concept of two-level cellular-automaton predictive model. Part II] // *Izvestiya Kabardino-Balkarskogo nauchnogo tsentra RAN.* — 2016. — No. 1 (69). — P. 42–48 (in Russian).
- Титов В. Г.* Клеточные автоматы для приближенного вычисления элементарных функций // *Научный альманах.* — 2015. — № 7 (9). — С. 1033–1036.
Titov V. G. Kletochnyye avtomaty dlya priblizhennogo vychisleniya elementarnykh funktsiy [Cellular automata for approximate calculation of the elementary functions] // *Science Almanac.* — 2015. — No. 7 (9). — P. 1033–1036 (in Russian).
- Титова Е. Е.* Сложность конструирования изображений клеточными автоматами // *Интеллектуальные системы. Теория и приложения.* — 2013. — Т. 17, № 1-4. — С. 191–195.
Titova E. E. Slozhnost' konstruirovaniya izobrazheniy kletochnymi avtomatami [Complexity of image construction with cellular automata] // *Intelligent systems.* — 2013. — Vol. 17, No. 1-4. — P. 191–195 (in Russian).
- Тихомиров А. В., Шальто А. А.* Применение направленной мутации для генерации клеточных автоматов // *Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики.* — 2014. — № 2 (90). — С. 93–98.
Tikhomirov A. V., Shalyto A. A. Primeneniye napravlennoy mutatsii dlya generatsii kletochnykh avtomatov [Application of the directed mutation to cellular automata generation process] // *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics.* — 2014. — No. 2 (90). — P. 93–98 (in Russian).
- Травкин А. В.* Модели самоорганизации // *Вестник современных исследований.* — 2017. — № 4-1. — С. 101–104.
Travkin A. V. Modeli samoorganizatsii [Self-organization models] // *Vestnik sovremennykh issledovaniy.* — 2017. — No. 4-1. — P. 101–104 (in Russian).
- Туркменова Р. Т.* Методы распознавания текста на узбекском языке на основе клеточных автоматов // *Современные материалы, техника и технологии.* — 2016. — № 1 (4). — С. 215–220.
Turkmenova R. T. Metody raspoznavaniya teksta na uzbekskom yazyke na osnove kletochnykh avtomatov [Methods of Text Identification in the Uzbek Language on the Basis of Cellular Automata] // *Sovremennyye materialy, tekhnika i tekhnologii.* — 2016. — No. 1 (4). — P. 215–220 (in Russian).
- Федотов Н. М., Жарый С. В., Маликова Г. С.* Применение клеточных автоматов для моделирования фибрилляций предсердий на триангулированной сфере // *Электронные средства и системы управления.* — 2013. — № 1. — С. 124–128.
Fedotov N. M., Zharyy S. V., Malikova G. S. Primeneniye kletochnykh avtomatov dlya modelirovaniya fibrillyatsiy predserdiy na triangulirovannoy sfere [Application of Cellular Automata for Simulation of Auricle Fibrillations on a Triangulated Sphere] // *Elektronnyye sredstva i sistemy upravleniya.* — 2013. — No. 1. — P. 124–128 (in Russian).
- Хашин С. И.* Динамическая сегментация последовательности кадров // *Машинное обучение и анализ данных.* — 2013. — Т. 1, № 6. — С. 787–795.
Khashin S. I. Dinamicheskaya segmentatsiya posledovatel'nosti kadrov [Dynamic segmentation of frames sequences] // *Machine Learning and Data Analysis.* — 2013. — Vol. 1, No. 6. — P. 787–795 (in Russian).
- Храбров Д. Е., Мурашко И. А.* Методика проектирования сигнатурного анализатора на клеточных автоматах для встроенного самотестирования // *Вестник ГГТУ им. П. О. Сухого.* — 2015. — № 3 (62). — С. 37–43.
Khrabrov D. E., Murashko I. A. Metodika proyektirovaniya signaturnogo analizatora na kletochnykh avtomatakh dlya vstroynnogo samotestirovaniya [The Method of Designing Signature Analyzer Based on Cellular Automata for Built-In Self-Testing] // *Vestnik GGTU im. P. O. Sukhogo.* — 2015. — No. 3 (62). — P. 37–43 (in Russian).
- Чередниченко А. В.* Клеточно-автоматное моделирование прогнозирования разрушения нагруженных материалов методом нормированного размаха Херста // *Вестник КузГТУ.* — 2015. — № 4 (110). — С. 126–130.
Cherednichenko A. V. Kletочно-avtomatnoye modelirovaniye prognozirovaniya razrusheniya nagruzhennykh materialov metodom normirovannogo razmakha Khersta [Cellular automaton simulation the fracture predication load materials with the Hurst's rescaled range] // *Bulletin KuzSTU.* — 2015. — No. 4 (110). — P. 126–130 (in Russian).
- Черепанцев А. С.* Характеристики и свойства динамической системы в диссипативной модели землетрясений Олами–Федера–Кристенсена // *Физическая мезомеханика.* — 2015. — Т. 18, № 6. — С. 86–97.

- Cherepantsev A. S.* Charakteristiki i svoystva dinamicheskoy sistemy v dissipativnoy modeli zemletryaseniy Olami-Federa-Kristensena [Characteristics and properties of dynamic system in the dissipative Olami-Feder-Christensen earthquake model] // Physical Mesomechanics. — 2015. — Vol. 18, No. 6. — P. 86–97 (in Russian).
- Чернявская А. С., Бобков С. П.* Моделирование процесса теплопереноса в движущейся жидкости // Вестник ИГЭУ. — 2014. — № 4. — С. 1–5.
Chernyavskaya A. S., Bobkov S. P. Modelirovaniye protsessa teploperenosa v dvizhushcheysya zhidkosti [Simulation of heat transfer in a moving fluid] // Vestnik IGEU. — 2014. — No. 4. — P. 1–5 (in Russian).
- Чернявская А. С., Бобков С. П.* Применение дискретных методов для моделирования течения жидкостей // Известия высших учебных заведений. Сер. Химия и химическая технология. — 2013. — Т. 56, № 3. — С. 92–95.
Chernyavskaya A. S., Bobkov S. P. Primeneniye diskretnykh metodov dlya modelirovaniya techeniya zhidkostey [Discrete methods application for fluids flow simulation] // Russian Journal of Chemistry and Chemical Technology. — 2013. — Vol. 56, No. 3. — P. 92–95 (in Russian).
- Шальто А. А.* Работы по однородным структурам и клеточным автоматам, выполненные в СССР, России и бывших республиках СССР [Электронный ресурс]. — URL: <http://is.ifmo.ru/automata/2016/cellular-automata.pdf>, <http://www.computer-museum.ru/articles/books/1066/> (дата обращения: 17.04.2018).
Shalyto A. A. Raboty po odnorodnym strukturam i kletochnym avtomatam, vypolnennyye v SSSR, Rossii i byvshikh respublikakh SSSR [Research work carried out in the USSR, Russia and former republics of the USSR on homogeneous structures and cellular automata] [Electronic resource]. — Available at: <http://is.ifmo.ru/automata/2016/cellular-automata.pdf>, <http://www.computer-museum.ru/articles/books/1066/> (accessed: 17.04.2018).
- Шевченко В. Я., Кривовичев С. В., Тананаев И. Г., Мясоедов Б. Ф.* Клеточные автоматы как модели самосборки неорганических структур (на примере селенатов уранила) // Физика и химия стекла. — 2013. — Т. 39, № 1. — С. 3–15.
Shevchenko V. Ya., Krivovichev S. V., Tananaev I. G., Myasoedov B. F. Cellular automata as models of inorganic structures self-assembly (Illustrated by uranyl selenate) // Glass Physics and Chemistry. — 2013. — Vol. 39, Issue 1. — P. 1–10. (Original Russian paper: *Shevchenko V. Ya., Krivovichev S. V., Tananayev I. G., Myasoyedov B. F.* Kletochnyye avtomaty kak modeli samosborki neorganicheskikh struktur (na primere selenatov uranila) // Fizika i khimiya stekla. — 2013. — Vol. 39, No. 1. — P. 3–15.)
- Шестаков А. В.* Моделирование нейросетевых взаимодействий с использованием механизма клеточных автоматов // Научный журнал КубГАУ. — 2016. — № 124 (10). — URL: <http://ej.kubagro.ru/2016/10/pdf/36.pdf> (дата обращения: 04.06.2018).
Shestakov A. V. Modelirovaniye neyrosetevykh vzaimodeystviy s ispol'zovaniyem mekhanizma kletochnykh avtomatov [Modeling neural interactions with the use of cellular automation] // Scientific Journal of KubSAU. — 2016. — No. 124 (10) (in Russian). — Available at: <http://ej.kubagro.ru/2016/10/pdf/36.pdf> (accessed: 04.06.2018).
- Шинкарев А. А.* Трехступенчатое унифицированное представление моделей транспортных потоков на основе клеточного автомата // Международный научно-исследовательский журнал. — 2015. — № 3 (34), часть 1. — С. 126–129.
Shinkarev A. A. Trekhstupenchatoye unifitsirovannoye predstavleniye modeley transportnykh potokov na osnove kletochnogo avtomata [Three-stepped unified representation of traffic flow models based on cellular automata] // International Research Journal. — 2015. — No. 3 (34), Part 1. — P. 126–129 (in Russian).
- Шинкаренко А. А., Губарев С. В., Берг Д. Б., Манжуров И. Л.* Фрактальная размерность полей поверхностных загрязнений: влияние расположения источников // Современные проблемы науки и образования. — 2013. — № 6. — С. 57.
Shinkarenko A. A., Gubarev S. V., Berg D. B., Manzhurov I. L. Fraktal'naya razmernost' poley poverkhnostnykh zagryazneniy: vliyaniye raspolozheniya istochnikov [The fractal dimension of surface pollution fields: the dependence on sources location] // Modern problems of science and education. — 2013. — No. 6. — P. 57 (in Russian).
- Шлагов Д. А., Решетникова Е. В.* Клеточные автоматы в вычислительной гидродинамике // Инновационные технологии в науке и образовании: материалы VII Междунар. науч.-практ. конф. — Чебоксары, 24 июля 2016. — Чебоксары: ЦНС «Интерактив плюс», 2016(a). — № 3 (7). — С. 212–214.
Shlagov D. A., Reshetnikova E. V. Kletochnyye avtomaty v vychislitel'noy gidrodinamike [Cellular Automata in Computational Hydrodynamics] // Materialy VII Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii "Innovatsionnyye tekhnologii v nauke i obrazovanii" [Proc. 7th International Research and Practice Conference "Innovative technologies in science and education"]. — Cheboksary, 2016. — P. 212–214 (in Russian).

- Шлагов Д. А., Решетникова Е. В.* Разработка библиотеки для реализации клеточных автоматов // Образование и наука в современных условиях: материалы IX Междунар. науч.-практ. конф. — Чебоксары, 8 окт. 2016. — Чебоксары: ЦНС «Интерактив плюс», 2016(b). — № 4 (9). — С. 160–162.
- Shlagov D. A., Reshetnikova E. V.* Razrabotka biblioteki dlya realizatsii kletochnykh avtomatov [Development of a Library for Realization of Cellular Automata] // Materialy IX Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii “Obrazovaniye i nauka v sovremennykh usloviyakh” [Proc. IX International Research-to-practice conference “Education and science in the modern context”]. — Cheboksary, 2016. — P. 160–162 (in Russian).
- Шмидт Ю. Д., Лободина О. Н.* О некоторых подходах к моделированию пространственной диффузии инноваций // Пространственная экономика. — 2015. — № 2. — С. 103–115.
- Shmidt Yu. D., Lobodina O. N.* O nekotorykh podkhodakh k modelirovaniyu prostranstvennoy diffuzii innovatsiy [Some Approaches to Modeling the Spatial Diffusion of Innovations] // Spatial Economics. — 2015. — No. 2. — P. 103–115 (in Russian).
- Шумилов А. С., Благодатский С. А.* Моделирование роста грибного мицелия с помощью клеточного автомата // III Пушинская школа-конференция «Биохимия, физиология и биосферная роль микроорганизмов»: материалы конференции. — Пушино, 5–9 декабря 2016. — С. 54–56.
- Shumilov A. S., Blagodatskiy S. A.* Modelirovaniye rosta gribnogo mitseliya s pomoshch'yu kletochnogo avtomata [Modeling of the Growth of a Fungoid Mycelium Using a Cellular Automaton] // Materialy konferentsii “III Pushchinskaya shkola-konferentsiya “Biokhimiya, fiziologiya i biosfernaya rol' mikroorganizmov” [3rd School Conference in Pushchino “Biochemistry, Physiology and Biospheric Role of Microorganisms”: Proceedings of the Conference]. — Pushchino, 2016. — P. 54–56 (in Russian).
- Якимова Л. П.* Моделювання просторово-часової динаміки пенсійного соціуму // Бізнесінформ. — 2013. — № 9. — С. 84–89.
- Jakimova L. P.* Modeljuvannja prostoroovo-chasovoї dinamiki pensijnogo sociumu [Modeling the spatial-temporal dynamics of the pension society] // Biznesinform. — 2013. — No. 9. — P. 84–89 (in Ukrainian).
- Achasova S. M.* Cellular automata self-replicating matrix of artificial biological cells // Проблемы информатики. — 2016. — № 3. — С. 13–25.
- Achasova S. M., Bandman O. L., Markova V. P., Piskunov S. V.* Parallel Substitution Algorithm. Theory and Application // Singapore: World Scientific. — 1994. — 220 p.
- Akbarzadeh M. J., Molahosseini A. S.* Design of a Galois field multiplier circuit using quantum-dot cellular automata // Наука. Инновации. Технологии. — 2014. — № 3. — С. 91–98.
- Baranski M., Maciak T.* Automaty komorkowe w modelowaniu ewakuacji // ВіТР. — 2016. — Vol. 43, Issue 3. — P. 127–142.
- Cumana S. et al.* Application of silica aerogels as stationary phase in supercritical fluid chromatography: experimental study and modeling with cellular automata // Вестник СПбГУ. — 2013. — Сер. 4, вып. 1. — С. 80–95.
- Markova V. P., Ostapkevich M. B.* The comparison of MPI and LUNA capabilities using the implementation of cellular automata wave interference // Problems of Informatics. — 2017. — No. 2. — P. 1–2.
- Myroniv I., Zhikharevich V., Ostapov S.* Realization of information technology of character recognition based on competing cellular automata // Eastern-European Journal of Enterprise technologies. — 2017. — No. 3/2 (87). — P. 18–24.
- Stempkovsky A. L., Vlasov P. A., Kozin G. V.* Algorithmic Environment for VLSI Design on Cellular Automata // Proceedings of a Joint Symposium : Information Processing and Software, Systems Design Automation, Academy of Sciences of the USSR, Siemens AG, FRG. — Moscow, June 5/6, 1990. — Springer-Verlag. — P. 308–312.
- Zaitsev D. A.* Simulating Cellular Automata by Infinite Petri Nets // Journal of Cellular Automata. — 2018. — No. 13 (1-2). — P. 121–144.

Приложение. КА для «чайников»

Для читателя, плохо знакомого с тематикой КА, необходимо дать краткое введение в предмет и ссылки на фундаментальные работы, если он захочет углубить свое знакомство.

Начнем с определения КА. Чтобы уяснить смысл КА, самое верное — взять лист бумаги в клеточку и нарисовать первые 4 хода эволюции глайдера (рис. П1) в игре «Жизнь» (Game of Life, GoL).

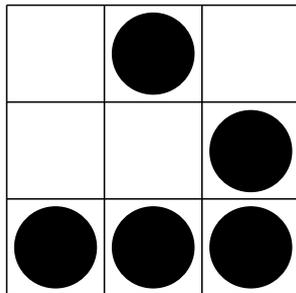


Рис. П1. Глайдер как символ игры «Жизнь» и эмблема хакеров. Фигура переходит в себя через 4 хода со смещением на 1 клетку вниз вправо, т. е. «скользит» (to glide)

Поле игры бесконечное, а присутствие фишки в ячейке означает наличие живой клетки. В отличие от шашек или шахмат, где ход меняет лишь часть диспозиции на доске, в КА изменится в общем случае вся диспозиция. Она называется глобальной конфигурацией, а ее смена диктуется ГФП, равносильной синхронно применяемыми к каждой ячейке ЛФП. Как показывает практика, студенты труднее всего усваивают это свойство синхронности. ЛФП для GoL навеяно биологией: клетка «умирает» (фишка исчезает, состояние ячейки становится равным 0) от недоселенности, если число живых соседей меньше 2, или от перенаселенности, если число таких соседей больше 3; оптимальное число живых соседей равно 3, и тогда рождается новая клетка (состояние ячейки переходит в 1).

Пронумеруем всех соседей, кроме самой ячейки (удобно ввести вектор-состояние соседей s_α). Тогда синхронность выражается как $s^{t+1} = f(s^t, s_1^t, \dots, s_n^t) \equiv f(s^t, s_\alpha^t)$, когда все аргументы функции (она получает название ЛФП) берутся по состоянию на момент времени t , а вот величина слева — в следующий момент времени ($t + 1$). Но какие ячейки считать соседними? Два наиболее часто используемых варианта: окрестность Мура (8 ячеек) и окрестность, или шаблон, Неймана (4 — север, юг, запад, восток). Однако никто не воспрещает брать более широкую окрестность, как говорят, радиуса 2 (и тогда до 25 аргументов у ЛФП) или асимметричную, например, не учитывать южного соседа. Для гексагональной решетки тоже вводятся аналоги шаблонов Мура и Неймана.

Напомним, что поле бесконечно, а все ячейки неотличимы по множеству состояний, шаблону своей окрестности и правилам обработки (ЛФП). Отсюда второе название КА — однородные структуры. Другое название — итеративные массивы — восходит к разработчикам первых компьютеров 50-х гг., отождествивших КА с реальным физическим объектом для проведения вычислений. Грубо говоря, это матрица процессоров (рис. П2) или, если считать КА математической абстракцией, матрица конечных автоматов, связанных по «входам-выходам». Важно отметить, такая система открытая, предназначенная для обработки поступающих сигналов, но для математической традиции КА — система закрытая, эволюция которой полностью определяется ЛФП и начальной конфигурацией (КА «варится в собственном соку»). Процессорные элементы жестко прикреплены к узлам решетки.

Дискретность состояний ячейки, с нашей точки зрения, просто наследуется КА из абстракции конечного автомата, и на практике математического моделирования вполне можно через нее перешагнуть, но тогда и КА будет неклассическим. Более важен вопрос внешних,

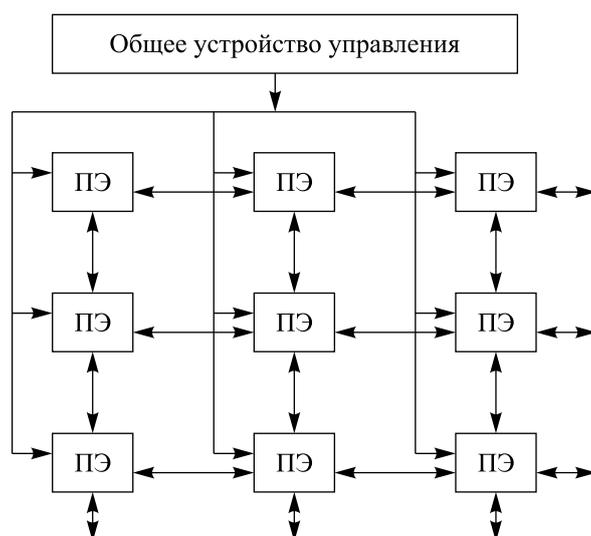


Рис. П2. Матричный процессор: упрощенная схема (60-е гг., ПЭ — процессорный элемент). Уберите устройство управления и связи с ним и получите двумерный КА

а может быть, и внутренних границ, которые неизбежны при моделировании физических или проектировании вычислительных систем. У граничных ячеек по определению нехватка соседей, и на практике применяются три стратегии:

- *поле с замыканием* — восполняем нехватку соседей справа, беря их слева с другой границы (так, квадрат становится, через цилиндр, тором);
- *естественное поле* — если ЛФП сформулировано словесно, как в GoL, то проблема решается небольшим изменением параметров, например, можно поменять пороги в 2 и 3 для угловых ячеек на 0 и 1, а для краевых — на 1 и 2;
- *поле с линией смерти* — запретить изменять граничным ячейкам начальные значения или фиксированное значение.

По нашему мнению, поскольку граничные ячейки уже имеют «нарушенный» шаблон, т. е. уже нарушена однородность, то необходимо для них всегда выписывать/специфицировать ЛФП, сохраняя стандартное множество состояний. Обратим внимание, что внутренняя ячейка, исполняя свое ЛФП, «не знает» своих абсолютных координат (i, j) в матрице. Конструкции ти-

па $s^{t+1} := \begin{cases} 0, & i > j, \\ 1, & i \leq j \end{cases}$ незаконны.

Итак, чтобы задать КА, необходимо определить семь компонент:

- 1) размерность (решетку, или, как иногда обобщают, множество имен);
- 2) шаблон окрестности (или алгоритм определения координат или имен соседей);
- 3) состояние ячейки (вернее, множество состояний);
- 4) локальную функцию перехода (в чем «соль» моделирования) ЛФП;
- 5) особенности границ: окрестность и ЛФП для граничных ячеек;
- 6) режим функционирования (порядок выполнения ЛФП для образования ГФП);
- 7) начальную конфигурацию.

Немного философии и истории. Что соответствует состоянию ячейки КА? Мы говорили ранее о фишках, которые могут рождаться, умирать и, самое главное, перераспределяться между ячейками КА, порождая иллюзию движения (интересно, что для глайдера GoL действует закон сохранения — всегда 5 фишек в фигуре). Тогда смысл ячейки КА — некий объем физического пространства, для которого подсчитывается число туда попавших фишек (под фишками можно понимать электроны, атомы, мономеры, живые клетки, людей и т. п., дискретных объектов, обобщая). Реальны фишки, но не ячейки. Эту семантику мы называем *традицией Цу-*

зе, по фамилии одного из основателей теории КА и создателя немецкого компьютера Конрада Цузе.

Но мы могли считать наоборот, фишек вовсе нет, и сама ячейка представляет собой монаду, онтологическую единицу. Например, два состояния GoL соотнесены с цветом, белый или черный, самой ячейки. И цветность понимать виртуально, как это делается в физике элементарных частиц. Более того, все эти монады не обязательно находятся в физическом пространстве, а в абстрактном метафизическом. Сама Вселенная есть гигантский КА, есть «вычисляющее пространство» (таков перевод названия основной книги Цузе). Однако такую семантику мы называем *традицией Неймана*. Авторы считают именно ее наиболее близкой для себя. Например, классический вопрос «что есть движение?» находит ответ-аналогию «движение иллюзорно, как волна на футбольном стадионе».

Наконец, исторически понятия «конечный автомат» и «клеточный автомат» разрабатывались почти одними людьми (Эдвард Мур). Атмосфера 40-х и 50-х гг. XX в. была общей для зарождающейся кибернетики (прежде всего Норберт Винер), попыток моделирования биологических объектов и раздражимости тканей (Розенблатт и Розенблут). Алан Тьюринг писал о сетях логических элементов, соединенных случайно, одновременно занимаясь морфогенезом. Одно из направлений моделирования искусственного интеллекта и социума развивалось в СССР Михаилом Цетлиным. Он отталкивался от нового тогда понятия «конечный автомат» и предположил его ассоциацию с разумным существом-агентом, способным перемещаться (не обязательно в пространстве) и менять свои связи с другими агентами. Цетлин изучал ансамбли конечных автоматов, не привязанных жестко к решетке и без шаблона окрестности. Эту семантику мы называем *традицией Цетлина*. Если семантики Цузе и Неймана синтаксически эквивалентны, то семантика Цетлина (и мультиагентные системы) весьма неочевидным образом вписывается в жесткую формулу КА (вопрос синтаксической эквивалентности — это интересный и нерешенный вопрос).

В то историческое время появилась и конструкция нейронных сетей, а внутри их теории появилась, или, точнее, обновилась концепция коннекционизма. В радикальном варианте — «связи всё, элементы ничто». Под зонтик коннекционизма попадают КА и НС, а также более специальная абстракция «сеть Петри». Характерной ее особенностью и является эти пресловутые фишки, путешествующие между местами-состояниями на основе условий мест-переходов. Принципиальными отличиями между НС и КА, с нашей точки зрения, являются:

- память (есть у ячейки КА, нет у нейрона; нейрон призван обрабатывать сигнал, а не хранить что-либо, но в абстракции КА начисто отсутствует понятие сигнала, оно в теории КА возникает уже позже как агрегированная характеристика наподобие траектории глайдера);
- регулярность (в НС нейроны объединены не на основе решетки, а хаотизированно или, как правило, на основе слоев, т. е. локальность постепенно теряется и вообще исчезает для полносвязных НС);
- открытость («да» для НС, «нет» для КА, см. замечание выше об обработке сигнала).

Сходства также значительны:

- ЛФП КА и связка «взвешенная сумма – функции активации» относятся к обработке сигналов от соседей;
- примечательно, что, несмотря на формальную гибкость определения КА, для наиболее известных КА соседи равноправны, как в GoL («если сумма состояний соседей...»); также сходство в наличии параметров-порогов (пресловутые «2-3» в GoL и пороговый характер функций активации);
- потенциальная возможность обучать КА.

С сетями Петри у КА общая семантика Цузе, а также возможность введения асинхронности в поведение сети. Численный метод particles-in-cell идеологически близок, например, к КА-моделям гидродинамики.

Базовые спецификации КА. Многообразие вариаций семи компонент КА придает абстракции КА фундаментальный характер и богатство приложений. Но удобно иметь некий репер

для сравнения многообразных КА, точку отсчета в математическом определении — классический клеточный автомат (ККА). Специфицируем его так:

- 1) регулярная бесконечная решетка в d -мерном пространстве с узлами $x \in \mathbb{Z}^d$, \mathbb{Z} — множество целых чисел;
- 2) шаблон окрестности имеет радиус, не превосходящий $r \in \mathbb{N}$: каждой точке d -мерного куба $\|x - x_i\|_{j \leq d} \leq r$ ставится в соответствие булево число принадлежности шаблону (i — номер соседа, j — номер координаты);
- 3) состояние ячейки дискретно и принимает конечное число значений, без разделения на компоненты, т. е. S есть алфавит;
- 4) ЛФП имеет два вида: $f: S \times S^\alpha \rightarrow S$, $f: S^\alpha \rightarrow S$; в последнем, редком случае сама ячейка не включается в свою окрестность; общее число соседей α ; в первом, стандартном случае арность ЛФП $\alpha + 1$;
- 5) границ нет, поэтому нет и особых условий;
- 6) строго синхронный режим работы;
- 7) начальная конфигурация произвольна — $g: \mathbb{Z}^d \rightarrow S$.

Какой же самый простой КА? Одномерный, бинарный, единичного радиуса ККА ($d = 1$, $S = \{0,1\}$, $r = 1$, $\alpha = 2$). Такой КА называется *элементарным*. ЛФП удобно задавать не таблицей, а натуральным числом от 0 до 255 (таблица П1). Выписываются все локальные конфигурации, каждой соотносят 0 или 1, в результате получается двоичный код некоего числа. Для не очень сложных случаев ЛФП можно представить диаграммой де Брюина (рис. П3). Это ориентированный нагруженный граф, в вершинах которого стоят окрестности без крайнего соседа, а каждое ребро доопределяет всю окрестность и нагружается будущим состоянием ячейки. Если вершина начальная, то нет соседа справа, а если конечная — нет соседа слева. Известна диаграмма Брюина и для GoL.

Равноправие соседей, изотропность направлений, что важно для описания диффузии, находят выражение в *тоталистических* и *полутоталистических* КА (GoL). Здесь ЛФП имеет соответственно формы $f\left(s + \sum_i s_i\right)$, $f\left(s, \sum_i s_i\right)$, где суммирование ведется по всем соседям. Для квантовой физики большую роль играет свойство «легальности»: $f(0,0,\dots,0) = 0$ — если ячейка и все соседи обладают низшим энергетическим состоянием, то ячейка не выйдет из него.

Таблица П1. Вольфрамовская нумерация для «правила 184»

Текущая окрестность клетки	111	110	101	100	011	010	001	000
Новое состояние клетки	1	0	1	1	1	0	0	0

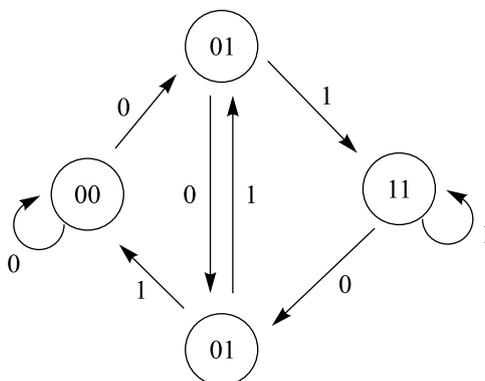


Рис. П3. Диаграмма де Брюина для правила 184

Важнейшую роль, особенно в связи с теоремой Ландауэра об энергетической цене вычислений, играют *обратимые* (reversible) КА. Для них всегда можно по текущей конфигурации определить единственного предшественника. Очевидно, GoL не есть ОКА; задача — определить по заданным ЛФП, обратим КА или нет, — алгоритмически разрешима только для $d = 1$. Известна красивая теорема о садах Эдема (следствие из теоремы Мура–Майхилла):

Если КА допускает конфигурации, имеющие несколько предшественников, то для данного КА существуют конфигурации, не имеющие предшественника (сады Эдема).

Для GoL известно несколько примеров «райских садов».

Иногда логика модели заставляет снимать требование синхронности и применять *асинхронный* КА. С точки зрения программиста, это экономит память, так как не нужно постоянно держать в ней прошлое состояние КА, но резко снижает быстродействие из-за сложности распараллеливания. Для синхронного КА результат не зависит от порядка пробегания цикла по всем ячейкам. Возможен и смешанный вариант: например, эволюция глайдера в GoL будет разной, если условно раскрасить всю доску в шахматном порядке, а затем исполнить ЛФП для черных ячеек, а позже — для белых, и наоборот. ГФП представляется суперпозицией ЛФП всех ячеек. Понятие хода несколько утрачивает смысл для асинхронных КА.

Важной разновидностью КА являются *блочные* и очень близкие к ним *разделенные* (КА на разбиении, partitioned CA). Понятие шаблона окрестности трансформируется в понятие блока. ЛФП изменяет не только центральную ячейку, но и другие ячейки блока. Блоки не пересекаются, т. е. в математическом смысле это разбиение поля КА. На каждом временном ходу разбиение меняется, так что старые блоки пересекаются с новыми: в противном случае терялась бы связность КА. Известен блочно-поворотный механизм Марголуса, изобретенный для демонстрации обратимости в бильярдных вычислениях и позже приспособленный для симуляции диффузии (рис. П4). По крайней мере, для БКА Марголуса, где ячейки блока обмениваются своими значениями, как при повороте всего блока, показана эквивалентность ККА, — нужно ввести в состояние ячейки флаг блочности. БКА удобны в тех моделях, где требуется учесть законы сохранения. Для более сложных случаев, особенно если присутствуют вероятности, эта эквивалентность неочевидна, как и для КА на разбиении. В них состояние ячейки расщепляется на компоненты, обычно ассоциируемые с пространственным разделением (например, ячейка в форме гексагона легко делится на 3 ромба). Тогда в ЛФП используются близкие компоненты состояния соседей, а не полное состояние.

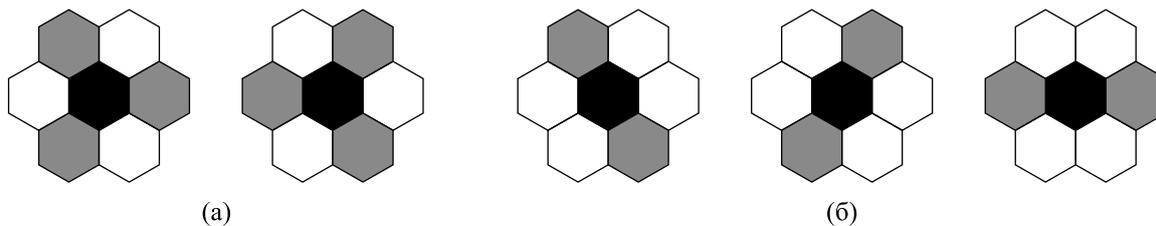


Рис. П4. Блочный КА на гексагональной сетке: двухтактный (а) и трехтактный (б). Обычный шаблон окрестности (6 ячеек) порождает блоки — 2 по 3 или 3 по 2

Другие спецификации КА. Часто используется, но редко называется вид КА с *альтернативой*. Формально он эквивалентен классическому КА. Его ЛФП можно записать, например,

$$\text{в виде } f(\xi, s, s^\alpha) = \begin{cases} \text{idem}, & \xi = 0, \\ f_1(s, s^\alpha), & \xi = 1, \\ f_2(s, s^\alpha), & \xi = 2, \end{cases} \text{ где } \xi \text{ — переменная-селектор.}$$

В зависимости от значения селектора реализуется та или иная функция перехода из некоего набора, например, состояние ячейки остается неизменным (idem). Селектор может быть ра-

зыгрываемой случайной величиной или компонентной состоянием ячейки. В последнем случае удобно «замораживать» ячейки.

Концепции динамического КА и подвижного КА близки. Вторая, по-видимому, напрямую использует пространственные координаты, вводя их в состояние ячейки, а первая предполагает более абстрактный способ реконfigurирования окрестности.

10 книг по КА. Мы выбрали условно 10 публикаций, которые должны быть в библиотеке каждого специалиста по клеточным автоматам.

1. Гарднер М. Крестики-нолики / пер. с англ. — М.: Мир, 1988. Глава 20 из книги http://www.chernyshov.com/Life/GLAV_20.pdf — популярное введение в GoL не потеряло значения, написано живым языком.
2. Sarkar, Palash. (2000). A Brief History of Cellular Automata. ACM Comput. Surv. 32. 80–107. <https://ru.scribd.com/document/75545970/Palash-Sarkar-A-Brief-History-of-Cellular-Automata> — неплохой обзор на английском.
3. Kari J. Cellular automata. Lecture notes. — University of Turku, Finland, 2016. — URL: <http://users.utu.fi/jkari/ca2016/> — курс лекций финского математика, внесшего существенный вклад в теорию КА, см. также <https://www.cs.tau.ac.il/~nachumd/models/CA.pdf>; крайне полезно тем, кто ищет строгость определений и стройность математической теории.
4. фон Нейман Дж. Теория самовоспроизводящихся автоматов. — М.: Либроком, 2010. — Серия «Науки об искусственном». Это свежее переиздание классической книги, составленной Артуром Бёрксом (1966) из заметок фон Неймана; русское издание 1971 г. под редакцией В. И. Варшавского (<http://www.klex.ru/nsj>).
5. Zuse K. Rechnender Raum (Calculating Space) (1969). Можно найти в книге A Computable Universe: Understanding & Exploring Nature as Computation, World Scientific, 2012, под ред. A. German and H. Zenil — <http://www.mathrix.org/zenil/ZuseCalculatingSpace-GermanZenil.pdf> — на русском языке, насколько известно, отсутствует.
6. Цетлин М. Л. Исследования по теории автоматов и моделированию биологических систем (1969) — <https://www.twirpx.com/file/285677/> — фактически первая книга по мультиагентному моделированию.
7. Варшавский В. И. и др. Однородные структуры. — М.: Энергия, 1973. Взгляд на КА с точки зрения микроэлектроники и разработчиков вычислительных систем. Однако более интересна и математически выверена книга того же автора «Коллективное поведение автоматов» (1973) — <https://sheba.spb.ru/delo/kolpoved-avtomat-1973.htm>, где прослеживаются идеи М. Л. Цетлина.
8. Кудрявцев В. Б., Подколзин А. С., Болотов А. А. Основы теории однородных структур. — М.: Наука, 1990. — 296 с. — название говорит за себя.
9. Тоффоли Т., Марголюс Н. Машины клеточных автоматов. — М.: Мир, 1986. — одна из классических книг по КА на русском языке, где авторы продвигают специализированную под КА ЭВМ и приводят множество примеров.
10. Wolfram S. A New Kind of Science. Wolfram Press, 2003. <https://www.twirpx.com/file/2281653/> — более чем 1000-страничный «талмуд», рыхлый по структуре, с абстрактными отступлениями, своего рода «энциклопедия по КА», прежде всего по одномерным КА.

