

СТАНОВЛЕНИЕ ТЕОРИИ КЛЕТОЧНЫХ АВТОМАТОВ

Аладьев В.З.*, **Шишаков М.Л.****

* Международная академия ноосферы, Балтийское отделение, Таллинн

** Белорусско-швейцарская фирма 'ТДФ Экотех', Минск, Беларусь

Аннотация. На основе многолетних исследований предложена точка зрения на основные этапы становления теории клеточных автоматов, представляющих специальный тип высоко параллельных динамических систем, имеющих весьма широкий спектр приложений, прежде всего, в качестве аппарата моделирования объектов, процессов и явлений, которые носят ярко выраженный параллельный характер. Наряду с англоязычными авторами представлены также результаты советских и российских авторов, которые внесли значительный вклад в теорию клеточных автоматов и чьи работы не получили должного внимания в западных научных изданиях. Наконец, нами предложено место проблематики клеточных автоматов в системе современного естествознания с учетом ряда исторических моментов и значительной роли отечественных исследователей.

Ключевые слова: клеточные автоматы, однородные структуры, параллельные модели вычислений, параллельные динамические системы, моделирование.

FORMATION OF THE CELLULAR AUTOMATA THEORY

Aladjev V.Z.*, **Shishakov M.L.****

* International Academy of the Noosphere, Baltic Branch, Tallinn, aladjev@yandex.ru

** Belarusian-Swiss company 'TDF Ecotex', Minsk, shishakov@rambler.ru

Abstract. Based on many years of research, a point of view is proposed on the main stages of the development of the cellular automata theory, which represent a special type of highly parallel dynamic systems that have a very wide range of applications, primarily as a device for modeling objects, processes and phenomena that are clearly parallel in nature. Along with English-language authors, the results of Russian and Soviet authors are also presented, who made significant contributions to the cellular automata theory and whose work did not receive due attention in Western scientific publications. Finally, we have proposed a place for the problem of cellular automata in the system of modern natural science, taking into account a number of historical moments and the significant role of domestic researchers.

Keywords: cellular automata, homogeneous structures, parallel computing models, parallel dynamic systems, modeling.

Мы излагаем свою точку зрения на историю клеточных автоматов, учитывая наше знакомство с этой проблематикой на ранних этапах ее становления как отдельного направления. На сегодняшний день проблематика *клеточных автоматов (КА)* достаточно хорошо развита, являясь вполне самостоятельным направлением современной математической кибернетики, которое располагает собственной терминологией и аксиоматикой при наличии достаточно широкой

области различных приложений. При этом, следует отметить, что при освоении данной проблематики в СССР в русскоязычной терминологии, основа которой впервые была заложена нами в 1970 г. [1], для понятия «Клеточные автоматы» использовался термин «*Однородные структуры*» (ОС), который в настоящее время является общепринятым термином наряду с целым рядом других наших понятий, определений и обозначений [1,2,10-12]. Достаточно подробный список разноплановых публикаций по проблематике КА можно найти, например, в [2–8]. Поэтому в настоящей работе наряду с данным термином вполне может быть использован его русскоязычный эквивалент «*Однородные структуры*».

Клеточный автомат (КА) представляет собой параллельную систему обработки информации, состоящую из бесконечного числа взаимодействующих между собой идентичных конечных автоматов Мили (элементарного автомата). Мы можем интерпретировать КА как некую теоретическую основу искусственных высокопараллельных систем обработки информации. При этом, с логической точки зрения КА представляет собой бесконечный автомат со специфической внутренней структурой. Таким образом, теорию КА можно рассматривать как структурно-динамическую теорию бесконечных автоматов. Кроме того, модели КА могут служить прекрасной основой для моделирования многих дискретных процессов, представляя собой также достаточно интересные самостоятельные объекты для исследования. В последнее время вновь возродился несомненный интерес к проблематике КА (прежде всего в прикладном аспекте), и здесь было получено немало замечательных результатов. В дальнейшем изложении под КА в зависимости от контекста мы будем подразумевать как клеточные автоматы, так и отдельный клеточный автомат.

Итак, КА-аксиоматика обеспечивает такие *три* фундаментальных свойства, как однородность, локальность и параллельность функционирования. Если в такой вычислительной модели с каждым элементарным автоматом связать какой-то отдельный микропроцессор, то можно будет неограниченно увеличивать размер подобной вычислительной системы без существенного увеличения ее издержек как временных, так и конструктивных, требуемых для последующих расширений вычислительного пространства, и без каких-либо накладных затрат, связанных с координацией функционирования любого дополнительного числа элементарных микропроцессоров. Подобные модели высокопараллельных вычислений вполне допускают сугубо практические реализации, состоящие из достаточно большого числа элементарных микропроцессоров, ограниченных не столько некоторыми архитектурными соображениями, сколько некоторыми сугубо экономическими и технологическими причинами, определяемыми современным уровнем развития микроэлектроники, но с большими возможностями в будущем, прежде всего, в свете достаточно интенсивных работ в области нанотехнологий. Кроме того, КА модели могут успешно использоваться при решении задач по преобразованию информации: шифрование, кодирование, сжатие данных и ряда других [3,4,7].

Три вышеуказанных свойства, такие как высокие однородность, параллельность и локальность взаимодействий, обеспечиваются самой КА-аксиоматикой, тогда

как важное с физической точки зрения свойство КА – обратимость их динамики – задается программным путем. В силу указанных свойств даже классические КА представляют собой высокоабстрактные модели реального физического мира, функционирующие в пространстве и времени. Поэтому они во многом намного лучше многих других формальных архитектур могут быть отображены на ряд физических реалий в их современном понимании. При этом, сама КА-концепция достаточно хорошо адаптирована на решение различных задач моделирования в таких областях, как математика, кибернетика, информатика, теоретическая физика, дискретная синергетика, теория динамических систем, робототехника, биология развития и т.д. Многочисленные наглядные примеры, имеющиеся на сегодня, говорят о том, что КА могут представить весьма серьезный интерес как новая, весьма перспективная среда моделирования и исследования различных дискретных процессов и явлений, определяемых указанными выше свойствами; при этом выводя КА-проблематику на новый междисциплинарный уровень а, с другой стороны, как достаточно интересный самостоятельный математический объект исследования [7,8]. И в этом направлении налицо заметный прогресс.

Имеющиеся современные тенденции разработки перспективной архитектуры высокопараллельных вычислительных средств, проблематика моделирования дискретно-параллельных процессов, дискретная математика и синергетика, параллельные дискретные динамические системы, проблемы искусственного интеллекта и робототехники, высокопараллельная обработка информации и алгоритмы, физическое и биологическое моделирование наряду со многими другими предпосылками в различных областях современного естествознания определяют в последние годы новый рост интереса к формальным клеточным моделям различного типа, обладающим высокой параллельностью действия – клеточные автоматы (КА) являются одними из основных моделей данного типа. За время, прошедшее после выхода первых монографий и сборников статей, посвященных различным теоретическим и прикладным аспектам проблематики КА, в этом направлении достигнут определенный прогресс, что связано, прежде всего, с успехами теоретического характера наряду с довольно существенным расширением области применения различных моделей КА, в первую очередь в информатике, кибернетике, физике, моделировании, биологии развития наряду с существенным ростом числа исследователей в этом направлении. Тогда же в США, Германии, Великобритании, Японии, Венгрии, Эстонии и др. появилось немало работ, обобщающих результаты по тем либо иным направлениям КА проблематики, включая ее многочисленные приложения в различных областях. Так, наши монографии и статьи на содержательном уровне представляли собой обзоры основных наших результатов, полученных *Tallinn Research Group (TRG)*, по проблематике КА и ее приложениям [1-7]. С начала наших исследований по проблематике КА, прежде всего, с ее прикладным акцентом на математическую биологию развития, со временем сформировалась неформальная TRG, которая состояла из исследователей ряда ведущих научных центров бывшего СССР. В то же время состав TRG не являлся строго постоянным и менялся в достаточно широких пределах в зависимости от исследуемых проблем. В работах [1–7] был

представлен анализ деятельности TRG, в определенной степени поучительный для исследования динамики развития проблематики КА как самостоятельного научного направления в целом. Там же можно найти основные на тот момент направления наших исследований и основные полученные нами результаты.

На сегодня КА исследуются с разных точек зрения и постоянно обнаруживаются взаимосвязи объектов такого типа с уже существующими задачами. Для общего ознакомления с обширной проблематикой КА в целом, а также с отдельными ее основными направлениями в частности, рекомендуем обратиться к интересным и разносторонним обзорам таких исследователей, как *V. Cimagalli, K. Culik, A.R. Smith, A. Lindenmayer, P. Sarkar, T. Toffoli, M. Mitchell, R. Vollmar, S. Wolfram, В.З. Аладьев, М.Л. Шишаков* и др. [8]. Ряд книг и монографий таких авторов, как *E.F. Codd, T. Toffoli, R. Vollmar, M. Sipper, А. Адаматский, В.З. Аладьев, М. Garzon, M. Duff, P. Kendall, B. Voorhees, O. Martin, K. Preston, S. Wolfram, А. Ильшинский, N. Margolus, B. Voorhees, В. Кудрявцев*, наряду с некоторыми другими содержат довольно интересный исторический экскурс в проблематику КА; однако, между тем, к сожалению до сих пор отсутствует единая точка зрения на исторический аспект в этом вопросе. В этой связи представляется довольно своевременной возможность еще раз кратко подчеркнуть нашу точку зрения на исторический аспект проблематики КА: представленный краткий исторический экскурс ставит своей целью очертить основные этапы становления проблематики КА, оставив вне рамок обсуждаемой темы многочисленные подробности и детали.

Начав собственные исследования по КА-проблематике в 1969 г., мы на основе анализа большого количества публикаций и личного контакта с целым рядом на тот момент ведущих исследователей в этом направлении располагаем вполне определенной информацией, касающейся объективного развития ее основных направлений, прежде всего, теоретического характера, позволяя с достаточной степенью объективности освещать ключевые этапы ее развития; в то же время многочисленные детали исторического характера, касающиеся проблематики КА, читатель может найти, например, в целой серии работ, представленных в ссылках [4,7,8,10-12].

С теоретической точки зрения концепция КА была введена в конце 40-х годов прошлого века Дж. фон Нейманом по совету С. Улама с целью определения более реалистичной и хорошо формализованной модели изучения поведения сложных эволюционных систем, включая самовоспроизведение – размножение живых организмов. В то время как С. Улам использовал КА-подобные модели, в частности, для исследования проблемы роста кристаллов и некоторых других дискретных систем, растущих по рекуррентным правилам. Структуры, которые исследовали он и его коллеги, имели в основном размерности 1 и 2, между тем рассматривались и более высокие размерности. Кроме того, наряду с другими теоретическими вопросами поведения клеточных структур данного типа также оставались в поле зрения вопросы универсальной вычислимости. Несколько позже подобные структуры начал исследовать и А. Чёрч в связи с работами в области бесконечных абстрактных автоматов и математической логики [8]. КА-

модель Дж. фон Неймана получила дальнейшее развитие в работах его прямых последователей, чьи результаты совместно с законченной и отредактированной первой моделью были опубликованы А. Бёрксом в его прекрасных работах [8], во многом определивших развитие исследований в этом направлении в течение нескольких последующих лет. В процессе исследований по КА-проблематике А. Бёркс организовал в Мичиганском университете исследовательский коллектив «*The Logic of Computer Group*», из которого впоследствии вышел целый ряд первоклассных специалистов по КА-проблематике (Дж. Холланд, Т. Тоффоли, Р. Лэинг и многие другие).

При этом, учитывая исторический аспект КА–проблематики, следует помнить о важном вкладе в эту проблематику, который внесли пионерские работы *Конрада Цузе* (Германия) и с которыми мировое научное сообщество было ознакомлено достаточно поздно и зачастую без его упоминания в этом историческом аспекте. При этом *Конрад Цузе* не только создал первые программируемые компьютеры (1935–1941), изобрел первый язык программирования высокого уровня (1945), но и первым подал идею «*Rechnender Raum*» (*Вычислимых Пространств*) или в современной терминологии – Клеточные автоматы. Более того, *Конрад Цузе* предположил, что физические процессы по своей сути являются вычислениями, а наша Вселенная — неким «Клеточным автоматом» [8]. В конце 70-х прошлого века такой взгляд на Вселенную был новаторским, тогда как сейчас данная идея вычислительной Вселенной уже никого не удивляет, занимая логическое место в современных теориях ряда исследователей, работающих в области квантовой механики [8]. К сожалению, даже в настоящее время идеи *К. Цузе* во многом не в полной мере знакомы достаточно дотошным исследователям в этой области. Итак, в целях исключения каких-либо спекулятивных исторических аспектов, имеющих место по сей день, в последующих исторических исследованиях необходимо обратить самое пристальное внимание на данное существенное обстоятельство. Так, именно поэтому, лишь спустя много лет аналогичные идеи были переизданы, популяризированы и переработаны в исследованиях других исследователей, таких как *С. Вольфрам*, *Т. Тоффоли*, *Э. Фредкин* и других [8]. Более того, сама концепция КА была введена *Джоном Нейманом*. Возможно, *Джон Нейман*, будучи знакомым с идеями *К. Цузе*, смог бы использовать КА не только для моделирования процесса воспроизведения автоматов, но также для построения модели высокопараллельных (а не последовательных) вычислений.

С более практической точки зрения и игровых экспериментов КА заявили о себе в конце 60-х прошлого века, когда *Дж. Н. Сопвай* представил ныне известную игру «*Жизнь*». Эта игра стала очень популярной и привлекла внимание к клеточным автоматам как многочисленных ученых из разных областей, так и любителей [8]. При этом игра, вероятно, является наиболее известной моделью КА; при этом эта модель обладает способностью к самовоспроизведению и универсальным вычислениям. Моделируя процесс работы произвольной машины Тьюринга КА моделью, *Дж. Н. Сопвай* доказал ее способность к универсальной вычислимости. Позже был предложен довольно простой способ реализации любой булевой функции в конфигурациях игры «*Жизнь*» [8]. Итак, даже такая простая модель

оказалась эквивалентной универсальной машине Тьюринга. Действительно, к данной модели КА существует значительный интерес и не исчезает до сих пор, прежде всего, к ее различным компьютерным реализациям [8]. Таким образом, ранние идеи и исследования первоклассных математиков и кибернетиков, таких как *К. Цузе, Джон фон Нейман, С. Улам, А. Чёрч* совместно с рядом их прямых последователей мы вполне можем отнести к **первому** этапу формирования КА проблематики в целом.

Потребность в хорошей формализованной среде для моделирования процессов биологического развития и, прежде всего, процесса самовоспроизведения была одной из базовых предпосылок, которые стимулировали начало КА-концепции. При этом Дж. Нейман и целый ряд его прямых последователей исследовали ряд вопросов вычислительных и конструктивных возможностей первых КА-моделей. Вышеуказанные работы конца 50-х прошлого века привлекли внимание к этой проблематике ряд исследователей [8]. Отметим, что однородные структуры (0С) переоткрывались и не раз под разными названиями: так в электротехнике они известны как итеративные сети, в чистой математике как раздел топологической динамики, в биологических науках как клеточные структуры и т.д.

В качестве **второго** этапа формирования КА-проблематики вполне можно рассматривать публикацию широко известных работ *E.F. Moore* и *John Myhill* по проблеме неконструируемости в классических КА-моделях, которые наряду с решением определенных математических задач в определенном смысле стали катализаторами активности, привлекая к этой проблеме довольно пристальное внимание целого ряда математиков и исследователей из других областей [8]. Так, например, с КА-проблематикой мы познакомились в 1969 году благодаря переводу на русский язык великолепной работы под редакцией профессора *R. Bellman*, которая содержала известные статьи *E.F. Moore, S. Ulam* и *J. Myhill* [1]. Сформировались научные группы по КА-проблематике в США, Германии, Японии, Венгрии, Италии, Франции, СССР (ЭССР, TRG, 1969).

Дальнейшее развитие и популяризация КА-проблематики могут быть связаны с именами таких исследователей, как *S. Cole, E. Moore, J. Myhill, H. Yamada, G.T. Herman, S. Amoroso, E. Codd, E. Banks, J. Buttler, В.З. Аладьев, T. Yaku, H. Nishio, J. Holland, A.R. Smith, A. Maruoka, Y. Kobuchi, T. Ostrand, G. Hedlund, M. Kimura, A. Waksman* и ряда других исследователей, чьи работы в 60-е – 70-е прошлого века привлекли внимание к этой проблематике с теоретической точки зрения; они решили и сформулировали немало достаточно интересных проблем [8]. В дальнейшем математики, физики и биологи начали использовать КА с целью изучения собственных специфических задач. В частности, в начале 60-х – конце 70-х годов прошлого века многочисленные исследователи подготовили основу для вхождения КА-проблематики в нынешний этап ее развития, который вполне может характеризоваться объединением ранее разрозненных идей и методов на общих концептуальных и методологических платформах, а также достаточно существенным расширением областей ее применения.

Начало **третьего** периода можно отнести к началу 80-х годов прошлого века, когда к КА-проблематике вновь возобновился интерес, связанный с достаточно активными исследованиями по проблеме искусственного интеллекта, работам по перспективной архитектуре высокопараллельных компьютерных систем, физическому моделированию и ряду других важных мотиваций. Так, по нашему мнению, именно с работ таких исследователей, как *Bennet C., Grassberger P., Boghosian B., Crutchfield J., Chopard B., Culik II K., Gács P., Green D., Gutowitz H., Langton C., Martin O., Ibarra O., Kobuchi Y., Margolus M., Mazoyer J., Wolfram S., Toffoli T., Аладьев В.З., Бандман О.Л.* и др. возник новый всплеск интереса к КА как перспективной среде, прежде всего, физического моделирования. Довольно обширный перечень ссылок (как на советских, так и на русскоязычных авторов) можно найти в [4,8]. В настоящее время КА-проблематика достаточно широко исследуется с различных точек зрения и постоянно ищутся и обнаруживаются взаимосвязи вполне схожих однородных структур со многими существующими проблемами. Этой проблематикой занимается целый ряд достаточно больших групп исследователей во многих странах и, прежде всего, в Германии, Италии, США, Великобритании, Франции, Японии, Австралии, России. Отметим, научная деятельность в этом направлении осуществлялась и в Эстонии в рамках TRG, целый ряд результатов которой получил международное признание, внося свой вклад в определенные разделы современной КА-проблематики.

Современная точка зрения на теорию КА (ОС) сформировалась под влиянием работ таких исследователей, как *Adamatzky A.I., Aladjev V.Z., Amoroso S., Arbib M., Bagnoli F., Bandini S., Bandman O.L., Bays C., Banks E.R., Barca D., Barzdin J., Binder P., Boghosian B., Burks A. W., Butler J., Cattaneo G., Chate H., Chowdhury D., Church A., Codd E.F., Crutchfield J.P., Culik K.II, Das A.K., Durand B., Durrett R., Fokas A.S., Fredkin E., Gács P., Gardner M., Gerhardt M., Griffeth D., Green D., Golze U., Grassberger P., Gutowitz H., Hedlund G., Honda N., Cole S., Hemmerling A., Holland J., Ibarra O.H., Ikaunieks E., Ilachinskii A., Jen E., Kaneko K., Kari J., Kimura M., Kobuchi Y., Langton C., Legendi T., Lieblein E., Lindenmayer A., Moore E., Maneville P., Margolus N., Martin O., Maruoka A., Mazoyer J., Mitchell M., Morita K., Myhill J., Nasu M., Neumann J., Nishio H., Ostrand T., Pedersen J., Podkolzin A., Sato T., Richardson D., Sarkar P., Shereshevsky M., Sipper M., Smith A. Sutner K., Takahashi H., Thatcher J., Toffoli T., Toom A., Tseitin G.E., Varshavsky V.I., Vichniac G., Vollmar R., Voorhees B., Wuensche A.A., Waksman A., Weimar J., Wolfram S., Willson S., Yaku T.* среди других многочисленных исследователей из ряда стран.

Наряду с нашими работами по КА-проблематике необходимо отметить немало советских исследователей, получивших в этом направлении фундаментальные и достаточно значительные результаты в 60-е – 80-е годы прошлого века. Среди них: Адамацкий А. (идентификация КА-моделей), Бандман О. (асинхронные КА), Блишун А. (рост конфигураций), Блюмин С. (рост конфигураций), Болотов А.А. (симуляция среди классов КА), Варшавский В.И. (синхронизация КА, симуляция анизотропных КА на изотропных), Георгадзе А., Мандшгаладзе П., Матевосян А. (рост конечных конфигураций; универсальные КА-модели и стохастические, и детерминированные, КА модели и параллельные грамматики), Леонтович А.,

Ставская О., Добрушин Р., Васильев Н., Митюшин Л., Тоом А. (стохастические КА), Икауниекс Э. (неконструируемые конфигурации), Коганов А. (стабильные конфигурации, универсальные КА, моделирование КА), Колотов А.Т. (КА-модели возбудимых сред), Левенштейн В. (синхронизация в КА), Курдюмов Г., Левин Л. (стохастические КА), Макаревский А.И. (реализация булевых функций в КА), Петров Е.И. (синхронизация 2d-КА), Подколзин А.С. (симуляция КА; асимптотика глобальной динамики; универсальные КА), Поспелов Д. (однородные структуры и распределенный искусственный интеллект в моделях КА), Прангишвили И., Евреинов Э.В. (КА-подобная архитектура высокопараллельных процессоров), Решодько Л. (КА возбудимых сред), Ревин О. (моделирование анизотропных КА на изотропных КА), Солнцев С. (рост конфигураций), Цетлин М. (игры в КА, коллективы автоматов), Цейтлин Г. (алгебры сдвиговых регистров), Щербаков Е. (универсальные алгебры параллельных подстановок) и целый ряд других.

Предполагается, что КА-модели могут сыграть чрезвычайно важную роль как концептуальных, так и прикладных моделей пространственно-распределенных динамических систем, среди которых в первую очередь представляют особый интерес вычислительные, физические и биологические клеточные системы. В данном направлении уже имеет место достаточно существенная деятельность многих исследователей, получивших достаточно обнадеживающие результаты [4,7,8]. Наконец, теоретические результаты вышеупомянутых и многих других исследователей инициировали современную математическую теорию КА, эволюционировавшую до настоящего времени в самостоятельное направление абстрактной теории автоматов, которое имеет достаточно много интересных приложений в различных областях науки и техники, в частности, в биологии развития, физике, параллельной обработке информации, компьютерных науках и информатике, связанных с математическим и компьютерным моделированием созданием перспективной архитектуры высокоэффективных компьютеров и т.д., существенно поднимая концепцию КА на новый междисциплинарный уровень. Выше изложена наша весьма краткая точка зрения на основные этапы развития и становления теории КА; на сегодняшний день существует несколько обзоров, посвященных этому вопросу, например [8], многие работы по КА-проблематике в той или иной степени также касаются этого вопроса [2-8]. Следует отметить, что вопрос в определенной степени носит весьма субъективный характер, и это необходимо иметь в виду.

Между тем некоторые исследователи в порыве определённой эйфории готовы представить КА-подход как универсальное средство решения всех проблем и познания внешних вещей, полагая его «Новым видом» науки универсального характера. В этой связи следует отметить обширную и претенциозную книгу С. Вольфрама [9], название которой носит скорее рекламно-коммерческий, чем научно-обоснованный характер. Эта книга содержит много результатов, которые были получены гораздо ранее многими другими исследователями, в том числе советских авторов (см. ссылки в [4,7,8] и некоторых других). При этом приоритет многих фундаментальных результатов в данной области принадлежит другим исследователям. Нездоровое тщеславие автора книги не позволяет ему без

предвзятости смотреть на историю КА в целом. Вообще говоря, *С. Вольфрам* достаточно легкомысленно обращается с авторством результатов, полученных по КА-проблематике, поэтому может сложиться впечатление – все сделанное в этой области принадлежит в основном ему. Отметим, данная книга содержит в основном результаты компьютерного моделирования с очень простыми типами КА, делая на их основе выводы и предположения с довольно сомнительными надежностью и качеством. В книге можно встретить раздражающую плотность пассажей, в которых автор выдает за свои идеи, которые являются «общими знаниями» среди экспертов в соответствующих областях. Похоже, такие и очень похожие на них отрывки и умозаключения *С. Вольфрама* вызывают совершенно определенные сомнения в рассудительности и научной порядочности автора. Наконец, мы абсолютно не согласны, что книга *С. Вольфрама* представляет «Новый вид» науки; при этом книгу было бы приятнее читать, если бы она была скромнее. На наш взгляд, книга представляет во многом спекулятивный взгляд как на КА-проблематику, так и на науку в целом. Здесь мы только отметим, что вопреки преследуемым целям книга не только не была неким откровением для исследователей, работающих по КА-проблематике, но в определенной степени вызвала немного искаженное представление об области исследования, которая является достаточно перспективной со многих точек зрения. С относительно подробной точкой зрения, которая касается книги, читатель может ознакомиться в [4,8] и ряде других. Между тем, несмотря на вышесказанное относительно книги, она может представлять определенный интерес с учетом отмеченных и некоторых других замечаний. На наш взгляд, объемная книга *С. Вольфрама* не вносит ничего принципиально нового в теорию клеточных автоматов и, прежде всего, в ее математическую составляющую.

Наконец, сделаем одно довольно существенное замечание относительно места КА-проблематики в научной архитектуре. Синхронизируясь с точкой зрения на КА-проблематику, заявленной в [3], видение данного вопроса представляется следующим образом. Наш многолетний опыт исследований в области КА как на теоретическом, так и особенно на прикладном уровне говорит о следующем:

(1) КА-модели (*клеточные автоматы, однородные структуры*) представляют собой особый класс бесконечных абстрактных автоматов со специфической внутренней структурой, обеспечивающей чрезвычайно высоко-параллельный уровень обработки информации и вычислений; такие модели образуют особый класс дискретных динамических систем, функционирующих сугубо параллельно на основе принципа локального близкодействия;

(2) КА может служить приемлемой моделью высокопараллельной обработки так же, как машина Тьюринга (нормальный алгоритм Маркова, системы продукции, Post машина и ряд других) служат формальными моделями последовательных вычислений; с такой точки зрения КА-модели можно также рассматривать и как алгебраические системы обработки конечных или бесконечных слов, заданных в конечных алфавитах, на основе конечного набора параллельных подстановок; в частности, КА-модель вполне может интерпретироваться как некая система

параллельного программирования, когда правила параллельных подстановок выступают в качестве параллельного языка программирования низшего уровня;

(3) принцип локального взаимодействия элементарных конечных автоматов, составляющих КА-модель, который в результате определяет их глобальную динамику, позволяет использовать КА и как отличную среду моделирования достаточно широкого круга объектов, процессов и явлений; при этом, свойство обратимости, допускаемое КА, делает их достаточно интересными средствами для физического моделирования и для создания достаточно перспективных вычислительных структур, основанных на нанотехнологиях;

(4) КА-модели представляют собой достаточно интересный самостоятельный математический объект, чья суть заключается в высокопараллельной обработке слов как в конечных, так и в бесконечных алфавитах.

При этом, КА-подход можно увязать с модельным аналогом дифференциальных уравнений в частных производных, которые описывают те или иные процессы с той разницей, что если дифференциальные уравнения описывают процесс в среднем, в КА-модели, определенной соответствующим образом, определенный исследуемый процесс действительно встроен, и динамика КА-модели довольно наглядно представляет качественное поведение изучаемого процесса. Таким образом, следует соответствующим образом определить необходимые свойства и правила локального взаимодействия элементарного автомата, который лежит в основе такой КА-модели. КА-подход может быть эффективно использован для исследования процессов, описанных довольно сложными дифференциальными уравнениями, не имеющими аналитического решения, а также для процессов, которые вообще не могут быть описаны такими уравнениями. Более того, КА являются достаточно перспективной средой моделирования для исследования таких явлений, процессов и объектов, для которых нет известных классических средств либо они достаточно сложны.

Как мы уже отмечали, в отличие от многих других современных областей науки, теоретическая часть КА-проблематики не столь заметно пересекается со второй ее прикладной составляющей, поэтому мы вполне можем рассматривать КА-проблематику как два довольно независимых направления: исследование КА как математических объектов и использовать КА для моделирования; при этом второе направление характеризуется еще более широким спектром приложений. Уровень развития второго направления в значительной степени определяется возможностями современных вычислительных систем, так как КА-модели, как правило, строятся на базе огромного числа элементарных автоматов, имеющих, как правило, достаточно сложные правила локального взаимодействия между собой.

Несомненный интерес к ним возрастает в связи с возможностью практической реализации на КА высокопараллельных вычислений на основе современных успехов микроэлектроники наряду с перспективами обработки информации на молекулярном уровне (методы нанотехнологий); тогда как сама КА-концепция предусматривает создание концептуальных и практических моделей различных

пространственно-распределенных динамических систем, из которых наиболее интересными и перспективными являются физические системы. Действительно, модели, довольно очевидным образом сводящие те или иные макроскопические процессы к строго определенным микроскопическим процессам, представляют особый гносеологический и методологический интерес, поскольку они обладают достаточно большой убедительностью и прозрачностью. А именно, с этой точки зрения особый интерес представляют КА-модели различного типа, прежде всего с прикладной точки зрения при изучении многих явлений, процессов и объектов в различных областях, прежде всего в биологии развития, физике и кибернетике.

Если первое направление достаточно интенсивно развивается математиками, то весомый вклад в развитие второго направления вносит существенно более представительный круг исследователей из разных теоретических и прикладных областей (физики, химии, биологии, техники и т.д.). Итак, если теоретические исследования по КА-проблематике в целом ограничиваются классическими, полигенными и стохастическими КА-моделями, тогда как результаты второго направления основываются на существенно более широком представлении классов и типов КА-моделей. В целом можно подчеркнуть, если классические КА-модели представляют собой, прежде всего, формальные математические системы, исследуемые в соответствующем контексте, то их многочисленные обобщения представляют собой весьма перспективную среду моделирования различных объектов, процессов и явлений.

В заключении еще раз следует отметить то достаточно важное обстоятельство, что при обсуждении классических клеточных автоматов (*ККА*) мы подчеркнули следующий довольно существенный момент. Мы рассматривали *ККА*-модели, являющиеся классом *параллельных дискретных динамических систем*, как некие формальные алгебраические системы обработки конечных конфигураций в конечных алфавитах независимо, как правило, от их микропрограммируемой среды, т.е. без использования их клеточной организации на присущем им самом низшем уровне, что отличает наш подход к исследованию данных объектов от подходов ряда других исследователей. Более того, мы рассматриваем модели *ККА* как формальный математический объект, который имеет специфическую внутреннюю организацию, не приписывая им определенную универсальность и общность в восприятии мира. При таком подходе *ККА* рассматриваются нами на достаточно формальном уровне, не позволяющем в полной мере использовать их внутреннее свойство чрезвычайно высокого параллелизма в такой области как вычисления и обработка информации в целом.

Естественно, для решения ряда различных прикладных задач в КА-моделях и получения серии тонких результатов, в первую очередь модельного характера, необходим подход на уровне микропрограммы, когда исследуемый процесс, алгоритм или явление непосредственно встраивается в КА-модель, используя ее параметры: размерность, индекс соседства, алфавит состояний и функцию локального перехода. При таком подходе можно получать решения множества важных приложений с обобщениями довольно высокого уровня теоретического

характера. В частности, путем прямого встраивания универсальных логических элементов или целых вычислительных алгоритмов в такие объекты возможно конструктивно доказывать существование универсальной вычислимости и т.д. Несмотря на такую чрезвычайно простую концепцию *ККА*, по большому счету они обладают довольно сложной динамикой. Во многих случаях теоретические исследования их динамики сталкиваются с довольно сложной задачей. Поэтому компьютерное моделирование этих структур, позволяющее эмпирическим путем исследовать их динамику, является достаточно мощным инструментом. По этой причине этот вопрос вполне закономерен для исследований КА-проблематики, учитывая тот факт, что КА-модели на формальном уровне представляют собой динамические системы высокопараллельных подстановок.

И на самом деле проблема компьютерного моделирования КА решается на двух *основных* уровнях: моделирование динамики КА на компьютерах традиционной архитектуры и моделирование КА на аппаратной архитектуре, соответствующей максимально возможной концепции КА; т.н. *КА-ориентированная* архитектура компьютерных систем. Таким образом, компьютерное моделирование моделей КА играет достаточно существенную роль при теоретических исследованиях их динамики; между тем, это еще более существенно в практической реализации КА-моделей различных процессов. В настоящее время разработан целый ряд весьма интересных систем программно-аппаратных средств для исследования различных типов моделей КА; их характеристики можно найти в ссылках [3,8]. В наших работах было представлено немало программ в различных программных системах для различных компьютерных платформ. Так, был запрограммирован ряд довольно интересных программ для симулирования КА-моделей в системах компьютерной математики *Mathematica* и *Maple*. Так, на основе компьютерного моделирования было получено много интересных теоретических результатов по *ККА* и их использованию в таких областях, как математика, биология развития, кибернетика, физика, химия и др. Однако этот вопрос наряду с прикладными аспектами КА-моделей в настоящей статье не рассматриваются, отправляя заинтересованного читателя к довольно детальному обсуждению этих аспектов в списках литературы соответствующих публикаций [8] наряду со ссылками в [2-7]; множество интересных работ можно найти в интернете по соответствующим ключевым фразам. С каждым годом число таких работ существенно растет.

Проблематика, рассматриваемая исследованиями TRG, во многом обусловлена интересами и вкусами авторов наряду с традициями творческой деятельности в данной области. Наконец, отметим, что в нашей деятельности можно выделить три основных направления: (1) исследование классических КА как формального параллельного алгоритма обработки конфигураций в конечных алфавитах, (2) использование классических и обобщенных КА в математике и компьютерных средствах высокопараллельного действия, и (3) математическая биология и биология развития. С нашими результатами по двум последним направлениям заинтересованный читатель сможет достаточно подробно ознакомиться в [2-7, 10-12] и в многочисленных ссылках, содержащихся в них, а также в ссылках, ассоциированных со многими другими исследователями в данной области.

АННОТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА И ССЫЛКИ

1. Аладьев В.З. К теории однородных структур.– Таллинн: Изд-во Академии наук ЭССР, 1972, 259 с.

Монография впервые в СССР ввела русскоязычную терминологию основных определений и понятий теории однородных структур (классических клеточных автоматов), представила ряд новых результатов и проблем для исследования, в значительной степени инициировав интерес к данной проблематике в СССР. На ежегодном собрании Эстонской академии наук книга была отмечена как одна из лучших работ Академии за 1972 год.

2. Aladjev V.Z. Mathematical theory of homogeneous structures and their applications.– Tallinn: Valgus Press, 1980, 270 p.

Книга представляет основную работу, проделанную TRG в области теории КА и ее приложений за 1970-1980 гг. В книге рассматриваются такие вопросы, как: архитектура теории КА и ее приложений, общие динамические аспекты КА, ряд моделей КА, а также основные, по мнению автора, проблемы для дальнейших исследований в области проблематики КА.

3. Аладьев В.З. Однородные структуры: Теоретические и прикладные аспекты.– Киев: Изд-во Техника, 1990, 272 с.

В монографии представлены основные результаты TRG, выполненные в 1969–1989 гг. в области КА и их приложений в параллельной обработке информации, математической и теоретической биологии, информатике, моделировании. На сегодня теория КА составляет вполне самостоятельный подраздел современной математической кибернетики.

4. Аладьев В.З. Классические однородные структуры: Клеточные автоматы.– USA: Palo Alto: Fultus Books, 2009, 535 с., ISBN 159682137X

Монография базируется на спецкурсе «*Классические однородные структуры (классические клеточные автоматы)*», прочитанном для студентов старших курсов, магистрантов и докторантов факультета математики и информатики Гродненского государственного университета (*Беларусь*) в апреле – мае. 2008.

5. Aladjev V.Z. Classical Cellular Automata: Mathematical Theory and Applications.– Germany: Saarbrücken: Scholar`s Press, 2014, 512 p., ISBN 97836390713459

6. Aladjev V.Z., Shishakov M.L., Vaganov V.A. Selected problems in the theory of the classical cellular automata.– USA: Lulu Press, 2018, 410 p., ISBN 9789949987627

BookAuthority отметило книгу среди 100 лучших электронных книг по конечным автоматам. *CNN*, *Forbes* и *Inc* сообщают: *BookAuthority* определяет и оценивает лучшие книги в мире, основываясь на рекомендациях ведущих специалистов и экспертов – <https://bookauthority.org/books/best-selling-finite-automata-ebooks>

7. Аладьев В.З., Ваганов В., Шишаков М.Л. Базовые элементы теории клеточных автоматов.– USA: Lulu Press, 2019, 418 с., ISBN 9780359735129

Представлены некоторые результаты, относящиеся к теории классических КА и их приложений. Данные результаты составляют существенную составляющую

общей теории клеточных автоматов. В частности, изучались вопросы такие как: проблема неконструируемости конфигураций, экстремальные конструктивные возможности *ККА*, моделирование в *ККА*, декомпозиция глобальных функций перехода в *КА*, параллельные формальные грамматики и языки, определяемые *КА* и целый ряд других.

8. Ссылки по *КА*-проблематике – www.hs-ca.narod.ru или <http://ca-hs.weebly.com>

9. Wolfram S. A New Kind of Science.– N.Y.: Wolfram Media, 2002, 1197 p.

10. Интервью – <https://all-andorra.com/ru/viktor-aladev-o-bazovyx-elementax-odnorodnyx-struktur-i-teorii-kletochnyx-avtomatov>

11. Беларусь у Асобах і Падзеях: Аладзьеў Віктар Захаравіч (*in Byelorussian*) – <https://bis.nlb.by/ru/documents/140947>

12. Краткий экскурс в творческую активность TRG <https://drive.google.com/file/d/1-cb0AmDwgyAZoueY47VZDNCqQQgrjEuZ/view?usp=sharing>

Книга представляет экскурс в творческую активность TRG за 1970 – 2022 гг. с акцентом на исследования и разработки в таких областях, как мэйнфреймы, персональные компьютеры, общая теория статистики, вопросы параллельной обработки информации и вычислений, компьютерная техника, математические компьютерные системы (*MathCAD, Maple, Mathematica*), системное и прикладное программирование, автоматизированные системы управления, математические проблемы теории клеточных автоматов, математическая биология развития. Проводя исследования и разработки, зачастую в существенно разных областях, на таком междисциплинарном уровне для некоторых из них были разработаны и практически применены новые оригинальные подходы и решения. Настоящая книга может представить определенный интерес как ретроспективный взгляд на развитие указанных направлений в *СССР* (прежде всего в *ЭССР*) и республиках бывшего *СССР*. Особое внимание в области теоретических исследований было уделено теории классических клеточных автоматов (однородных структур) и их приложениям, тогда как в прикладных областях серьезное внимание уделялось системам компьютерной математики (*MathCAD, Maple, Mathematica*), различным вопросам программирования на больших ЭВМ и на персональных компьютерах, общей теории статистики и автоматизированным системам управления (*АСУ*). Отметим, в рамках деятельности TRG получены наиболее значимые результаты по определяющим для группы направлениям – теории классических однородных структур (клеточных автоматов) и системам компьютерной математики. Наконец, книга представляет определенный познавательный интерес, в первую очередь, с точки зрения анализа развития и функционирования исследовательских групп как самостоятельных научных сообществ, чья роль в научных исследованиях со временем будет только возрастать.

Апрель 10, 2024