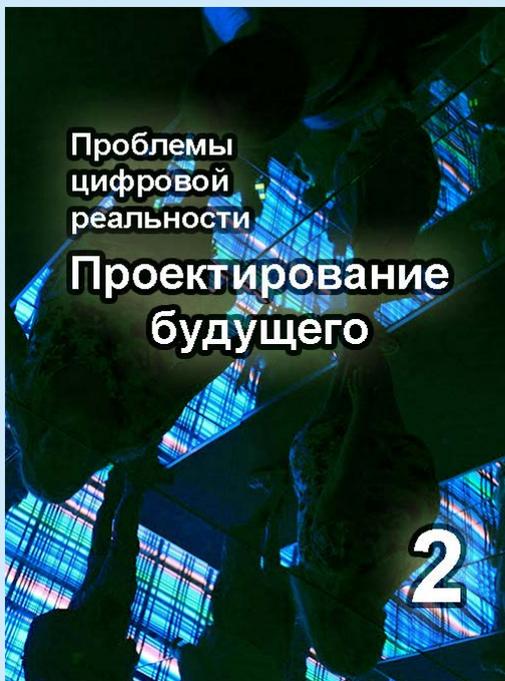




ИПМ им.М.В.Келдыша РАН

Будущее-2019 • Труды конференции



М.Е. Степанцов

**Клеточные автоматы
в моделировании
социально-экономических систем**

Рекомендуемая форма библиографической ссылки

Степанцов М.Е. Клеточные автоматы в моделировании социально-экономических систем // Проектирование будущего. Проблемы цифровой реальности: труды 2-й Международной конференции (7-8 февраля 2019 г., Москва). — М.: ИПМ им. М.В.Келдыша, 2019. — С. 138-143. — URL: <https://keldysh.ru/future/2019/13.pdf> doi:[10.20948/future-2019-13](https://doi.org/10.20948/future-2019-13)

Клеточные автоматы в моделировании социально-экономических систем

М.Е. Степанцов

НОЦ «Прикладная математика» ИПМ им. М.В. Келдыша РАН

Аннотация. В работе предлагается подход к построению моделей социально-экономической динамики, в том числе глобальных процессов, основанный на замене дифференциальных зависимостей клеточными автоматами. Приводятся примеры использования такого подхода для создания моделей движения неорганизованной группы людей, возрастной структуры профессиональной группы и дискретной модификации модели «власть–общество». Представлены результаты, полученные в процессе исследования построенных моделей. Среди них – расчет оптимальной и при этом безопасной конфигурации сужения подземного перехода, анализ динамики профессиональной группы учителей средних школ в период 2003-13 гг., основанный на прогнозах, полученных в 2003 г., а также несколько результатов моделирования системы «власть–общество», которые не могли быть получены в рамках непрерывной модели.

Ключевые слова: математическое моделирование, клеточные автоматы, социально-экономическая динамика, имитационное моделирование

Cellular automata in social and economical systems modeling

M.Ye. Stepanstov

REC “Applied mathematics” at Keldysh IAM RAS

Abstract. In this paper an approach to building models of socio-economic dynamics, including global processes, is proposed. The approach is based on replacing the differential dependencies by cellular automata. Examples are given of using the approach to create models of the movement of an unorganized group of people, the age structure of a professional group, and a discrete modification of the Power-Society model. The paper also contains the results obtained by studying the constructed models. The results include the optimal secure configuration of the narrowing of an underground passway, an analysis of the dynamics of the professional group of secondary school teachers in 2003-13, based on forecasts obtained in 2003, as well as several results of the

4. Математические модели цифрового мира

Power-Society system simulation, which could not be obtained within the continuous model.

Keywords: mathematical modeling, cellular automata, social and economical dynamics, simulation

Большое количество задач в социологии, экономике и смежных междисциплинарных областях требует для своего решения применения математического подхода, в частности – построения математических моделей и их применения в рамках таких исследований.

Многие методы, используемые для такого моделирования, имеют естественнонаучное происхождение и основаны на использовании непрерывных величин, дифференциальном и интегральном исчислении и других подобных методах. В то же время социальная и экономическая реальность носит существенно дискретный характер. Любые множества людей и отношения на них дискретны, пространство, в котором происходят социально-экономические процессы, во многих случаях также является дискретным, а при осуществлении какой-либо деятельности люди зачастую разбивают время на дискретные интервалы.

Таким образом, во многих случаях дискретные модели таких процессов являются более адекватными, чем непрерывные.

Одним из возможных дискретных подходов к моделированию социально-экономической динамики является использование моделей класса клеточных автоматов. При этом, с одной стороны, такие модели необходимо строить непосредственно на основе существенных свойств моделируемого явления, но с другой – их макродинамика должна соответствовать макродинамике существующих непрерывных моделей.

Последнее требование может быть выполнено, если строить такие модели, не определяя априори их параметров, затем применить к ним метод среднего поля, получив, таким образом, усредненную динамику переменных модели, и, наконец, подобрать параметры так, чтобы эта динамика соответствовала известным результатам, полученным при помощи непрерывных моделей.

Изложенный подход позволил, в частности, построить математические модели для решения следующих задач.

1. Движение неорганизованной группы людей

В рамках данного исследования была рассмотрена задача о моделировании движения неорганизованной группы людей в условиях, когда существуют некоторые препятствия к такому движению.

Модель была построена на базе клеточного автомата с окрестностью Марголуса [1], применяемого для моделирования диффузионных процессов. Правило Марголуса состоит в том, что поле автомата разбивается двумя способами на блоки размером 2x2 клетки (рис. 1а),

затем каждый блок случайным образом поворачивается по или против часовой стрелки (рис. 1б). К диффузионной составляющей движения была добавлена детерминированная направленная (рис. 1в). Препятствия моделировались путем запрета на перемещение частиц в заданных областях поля клеточного автомата.

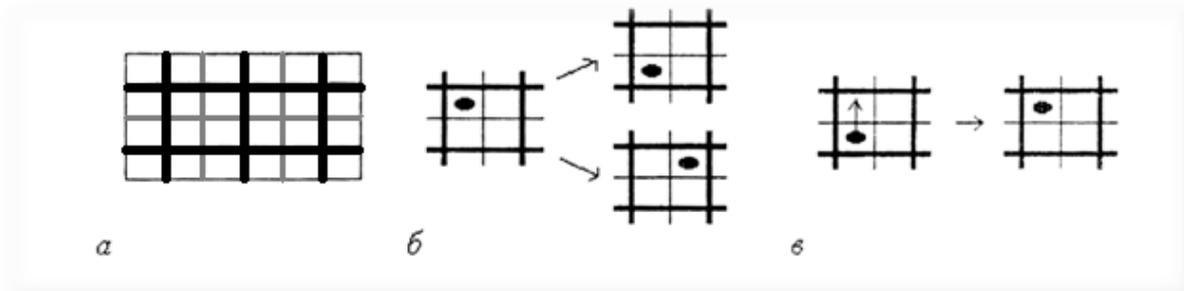


Рис. 1. Правила клеточного автомата с окрестностью Марголуса, моделирующего направленное движение группы людей

Для этой модели [2] получаем следующее распределение плотности людей вдоль оси x , соответствующей основному направлению их движения:

$$u_t = \left(\frac{11}{2} - 6u + 2u^2\right) u_{xx} - 12(1 - u)(u_x)^2 - \left(\frac{7}{4} - 4u\right) u_x.$$

Использование традиционного подхода потребовало бы решения этого уравнения аналитически либо при помощи некоторого численного метода. Применение же клеточного автомата позволяет осуществить непосредственное имитационное моделирование для каждой конкретной задачи.

Среди таких задач был рассмотрен вопрос о наибольшем угле трехкратного сужения подземного перехода (в этом случае длина сужения будет наименьшей, что выгодно конструктивно), при котором не возникнет заметного затора при потоке людей большой плотности (рис. 1). Моделирование этой ситуации при различных значениях параметров показало, что таким значением является $\varphi_{кр} = \frac{\pi}{4}$.

2. Моделирование динамики профессиональной группы

Другой важной задачей, математическую модель которой оказалось возможным построить в рамках данного подхода, является динамика возрастной структуры и численности профессиональной группы. Эта модель создана путем обобщения математической модели возрастной структуры преподавателей высшей школы, предложенной в [3] в рамках решения общей задачи прогноза развития ситуации в образовании. Апробация модели была осуществлена путем рассмотрения профессиональной группы учителей средних школ [4].

4. Математические модели цифрового мира

В качестве основы модели был взят одномерный клеточный автомат, в котором $q^n(t)$ задает состояние клетки под номером t на n -ном шаге по времени.

Правила этого автомата зададим в обозначениях [4]

$$q^{n+1}(t+1) = (1 - \mu(t,s))q^n(t) + p(t,s)v(t).$$

Здесь $\mu(t,s)$ – коэффициент мобильности, равный доле учителей возраста t , которая при данном уровне материального обеспечения s (включающего заработную плату и социальные льготы) по каким бы то ни было причинам перестанет работать в среднем образовании. Новым параметром модели является $p(t,s)$ – коэффициент привлекательности профессии, определяемый как вероятность того, что получивший предложение работать в данной области представитель некоторой социальной группы примет это предложение. Этот коэффициент также зависит от возраста потенциального работника и уровня материального обеспечения s . Сама же величина s складывается из объективной (реальная заработная плата) и субъективной (оценка работником денежного эквивалента получаемых им социальных льгот) частей. Эту величину проще всего выражать в относительных единицах, беря за точку отсчета уровень обеспечения в некоторый момент времени. Наконец, $v(t)$ – объем выпуска педагогическими высшими и средними специальными учебными заведениями специалистов возраста t .

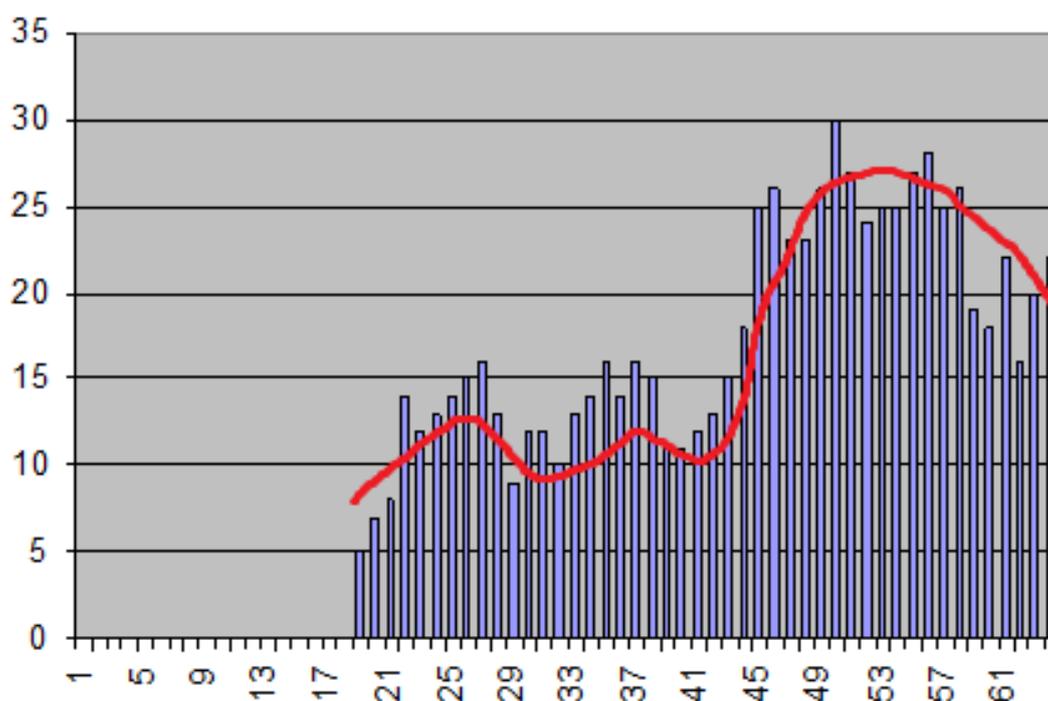


Рис. 2. Реальное распределение учителей по возрастам (сплошная линия) к 2013 году и результаты прогнозирования по сценарию 4.

При помощи данной модели на основе данных исследований 2003 г. было проведено прогнозирование динамики возрастной структуры учителей средних школ Москвы и Ярославской области с горизонтом прогноза 10 лет. Расчеты осуществлялись для пяти сценариев изменения социальной обеспеченности учителей.

1. Сохранение ситуации 2003 г.
2. Прекращение дополнительной социальной поддержки учителей.
3. Скачкообразное повышение уровня обеспечения до оптимального в начале периода прогнозирования.
4. Постепенное повышение уровня обеспечения до среднего по стране в течение 3 лет.
5. Постепенное повышение уровня обеспечения до среднего по стране в течение 5 лет.

Из всех рассмотренных только пятый сценарий к концу периода приводил к восстановлению стабильной возрастной структуры профессиональных групп в обоих регионах. В реальности к 2013 г. был реализован вариант, близкий к четвертому сценарию, что подтверждается сравнением результатов прогноза и реальной возрастной структуры учителей (рис. 2). При этом проблема дефицита кадров в отрасли была в целом решена, однако проявились предсказанные моделью внутренние структурные проблемы профессиональной группы [5].

3. Дискретная модификация модели А.П. Михайлова «власть–общество»

Классическая нелинейная модель «власть–общество» А.П. Михайлова [6] рассматривает взаимное влияние системы власти и социально-экономической ситуации в обществе. В некоторых случаях при ее анализе возникают определенные противоречия между непрерывным характером классической модели и дискретностью моделируемой реальности. Кроме того, в непрерывной модели не всегда удается без существенного увеличения вычислительной сложности учесть возможные различия параметров модели между регионами.

В рамках рассматриваемого подхода была построена модификация модели трехуровневой системы «власть–общество», основанная на клеточном автомате с псевдососедями [7], в котором клетки моделируют отдельные муниципалитеты. При этом показано, что в среднем динамика количества власти в автомате соответствует динамике непрерывной модели. В то же время новая модель позволяет без значительного повышения вычислительной сложности рассматривать любое варьирование параметров по регионам, а также введение дополнительных переменных, таких как объем производства или уровень коррупции.

Таким образом, макродинамика дискретной модели соответствует непрерывной в границах применимости последней, и при этом в рамках новой модели могут быть получены результаты, недоступные в рамках классического подхода.

Среди таких результатов можно выделить следующие:

4. Математические модели цифрового мира

1. Территории с более высоким коэффициентом прироста населения являются более восприимчивыми к той модели управления, которая задается верхними уровнями иерархии.

2. Наличие транспортных связей между муниципалитетами заметно улучшает положительную динамику социально-экономического развития моделируемой системы.

3. Динамика среднего количества власти в системе с коррупцией менее стабильна.

Можно предположить, что рассмотренный подход к построению дискретных моделей на основе клеточных автоматов взамен непрерывных окажется эффективным для решения широкого круга задач моделирования социально-экономических процессов.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, проекты 18-01-00551 и 19-010-00423.

Литература

1. Тоффоли Т., Марголюс Н. Машины клеточных автоматов. М.: Мир, 1991. – 280 с.
2. Степанцов М.Е. Математическая модель направленного движения группы людей // Математическое моделирование. 2004. Т.16, №3, с.43-49.
3. Капица С.П., Курдюмов С.П., Малинецкий Г.Г. Синергетика и прогнозы будущего. Серия «Синергетика: от прошлого к будущему». Изд. 3. – М.: УРСС, 2003. — 288 с.
4. Степанцов М.Е. Дискретная модель возрастной структуры учителей средней школы // Математическое моделирование. 2005. Т.17, №3, с.61-66.
5. Капицын А.В. Исследование взаимосвязи между индивидуально-психологическими особенностями учителей средних школ и успешностью их педагогической деятельности // ФЭН-НАУКА, 2012. №6, с.45-47.
6. Михайлов А.П. Математическое моделирование власти в иерархических структурах // Математическое моделирование. 1994. Т.6, №6, с.108-138.
7. Степанцов М.Е. Моделирование системы «власть-общество-экономика» с элементами коррупции на основе клеточных автоматов // Математическое моделирование. 2017. Т.29, №9, с.101-109.