

# МЕТОД КЛЕТОЧНЫХ АВТОМАТОВ В МОДЕЛИРОВАНИИ ГОРОДСКИХ ТЕРРИТОРИЙ

**Гущина Екатерина Сергеевна,**

старший преподаватель кафедры градостроительства,  
Пензенский государственный университет архитектуры и строительства,  
Пенза, Россия, e-mail: modiliani\_24@mail.ru

**Кувшинова Ольга Александровна,**

старший преподаватель кафедры информационно-вычислительных систем,  
Пензенский государственный университет архитектуры и строительства,  
Пенза, Россия, e-mail: oly791702@mail.ru

УДК 711.4:004.94  
ББК 85.118

## Аннотация

*В статье приведен обзор применения клеточных автоматов в градостроительном анализе. Основная привлекательность метода заключается в том, что он моделирует сложное поведение системы исходя из простых правил. Данный инновационный подход позволяет учитывать множество факторов, влияющих на развитие городов, а также моделировать пространственную структуру на основе принципов самоорганизации и понимать город как естественную систему, развивающуюся по своим объективным закономерностям. На основе тематического обзора сделаны выводы и приведены рекомендации по дальнейшему применению клеточных автоматов в градостроительном проектировании.*

## Ключевые слова:

*имитационное моделирование, клеточные автоматы, градостроительные системы, генеральный план города*

## Введение. Актуальность вопроса

Разрастание и усложнение пространственных структур городов стало глобальной проблемой, в связи с этим появляется необходимость в новых методах анализа, имитирования и прогнозирования.

Существующие прикладные методы градостроительных исследований либо морально устарели с изменением социально-экономических процессов, проходящих в городах, либо изначально имели одностороннюю форму, не принимающую во внимание объективные процессы самоорганизации городского пространства. По сути, генеральный план города – это статичная модель градостроительного объекта на определенную перспективу. Зачастую эта модель либо далека от реалий, либо в ней не учтены важные параметры системы. Здесь все зависит от степени квалификации лица, разрабатывающего градостроительную документацию, от корректных исходных данных и лица, принимающего решения по реализации Генерального плана. С целью повышения качества проектных разработок авторы предлагают на реальных примерах моделей клеточных автоматов рассмотреть процесс моделирования городской среды.

Данные модели не могут претендовать на стопроцентно точную реалистичность прогноза, но они приближают проектировщиков к повышению эффективности проводимых исследований пространственной организации города, которая впоследствии может быть реализована в виде программы-симулятора.

Авторы данной статьи предлагают рассмотреть принципы работы клеточных автоматов и их применение на примерах реальных градостроительных систем.

## Теоретическая база исследования

В общем понимании под клеточными автоматами подразумеваются сети элементов, меняющих свое состояние в последовательные дискретные моменты времени по определенному закону в зависимости от состояния рассматриваемого элемента и его соседей в предыдущий дискретный момент времени. Клеточные автоматы принимаются как некие модели реальности, в которых даже маловероятное событие может качественно изменить поведение всей системы, привести к появлению сценариев развития. Определяются основные элементы для функционирования модели: решетка, состоящая из ячеек, состояние ячеек, окрестности – состояние соседних ячеек, в пределах которых могут применяться правила перехода и временной интервал.

Суть такого моделирования состоит из следующих четырех принципов:

1. Есть решетка клеток ( $i$ ), представляющая собой носитель пространственных функций, каждая клетка имеет некоторую смежность и влияние на другие клетки.
2. Каждая клетка может принимать только одно состояние в любой момент времени – по имени  $D_i(t)$  – из множества состояний ( $D$ ), которые определяют исход системы. Для получения самой обычной и простой в 2-мерном случае сетки ячейка может принимать либо состояние  $D_i(t) = 0$  или  $D_i(t) = 1$ , указывающее, является ли мертвой / пустой или живой / заполненной клеткой соответственно.
3. Состояние любой клетки зависит от состояний и конфигураций других клеток, расположенных в окрестности этой клетки (названный  $\Omega_i$ ). Что касается городских систем, то ячейка может отображать изменение состояния территории от не урбанизированной к урбанизированной или изменения в особенностях и специфике землепользования района, области или региона, где могут существовать процессы функционально-пространственного развития [1, с. 118].
4. И, наконец, существуют правила перехода ( $f$ ) в определенный шаг времени ( $t$ ), которые управляют изменением состояния в каждой ячейке как некоторая функция из того, что существует или происходит в окрестных клетках. Под правилами изменения состояния ячеек в моделях городских систем могут пониматься процессы, явления, которые воздействуют на динамику социально-экономических отношений и пространственную организацию города в целом [1, с. 118]. Самое главное при применении клеточных автоматов в городском контексте – чтобы правила перехода были адекватны реальности.

С каждой итерацией (которой придается смысл отрезка времени) и определенными правилами перехода каждая ячейка может принимать следующие состояния: смерть (от изоляции или переполненности), устойчивое состояние, рождение (рост).

В ноябре 2010 г. была представлена работа «Developpement urbain fractal sous contraintes d'accessibilites» (MUP-City) [2], в которой разработано практическое применение фрактальной размерности. С помощью метода клеточных автоматов прогнозируется развитие урбанизированных территорий. MUP-City позволяет создать сценарии жилой застройки в пригородных районах с целью предотвращения фрагментации городских пространств и сведения к минимуму количества и продолжительности автомобильных поездок. Цель проекта достигается по-

вышением уровня урбанизации вокруг точек высокой транспортной доступности и центров общественного обслуживания посредством увеличения плотности жилого фонда.

Концепция данного проекта предусматривает:

- приоритетное развитие территории вдоль транспортных коммуникаций;
- выявление в узлах этих транспортных систем сети торговых центров и уровней обслуживания с выявлением радиусов их влияния;
- внедрение пространственных конфигураций, которые включают хорошую визуализацию и физическую доступность;
- сохранение разнообразия ландшафта через систему пригородных территорий;
- предотвращение фрагментации пригородов.

MUP-City базируется на нескольких концепциях моделирования из области искусственного интеллекта: это экспертные системы оценки, клеточные автоматы и системы итерационных функций.

Моделирование включает три методологических этапа:

- 1) определение многомасштабных морфологических стандартов (фрактальная размерность, морфологические показатели и т.д.) и стандартов доступности (расстояние);
- 2) диагностика перечисленных показателей, разработка сценариев развития;
- 3) оценка смоделированных сценариев.

Суть метода состоит в следующем: городская местность разбивается на клетки, с помощью методов фрактальной геометрии рассчитываются показатели фрактальной размерности каждой клетки. Каждой клетке задаются параметры (взвешиваются): близость к дороге (принимаются во внимание все пути), наличие объектов общественного обслуживания (вид, функции и периодичность обслуживания), наличие жилой застройки и свободных пространств. С помощью определенных правил урбанизации, которые установили авторы данной методики, задается развитие каждой клетки по принципу работы клеточных автоматов. Принимается во внимание взаимовлияние соседних клеток с определенным набором параметров друг на друга.

Правила перехода заключаются в следующем:

- Обеспечение хорошей пространственной доступности каждой клетки. Оцениваемая клетка должна быть смежной с урбанизированной ячейкой и не должна закрывать доступ к открытому пространству для окружающих урбанизированных клеток.
- Обеспечение пространственной доступности к объектам бытового обслуживания (торговая функция и услуги) с ежедневной/ еженедельной формой посещаемости. Оцениваемая клетка должна быть близко от торгового центра или от объекта бытового обслуживания.
- Близость к существующей дорожной сети. Оцениваемая клетка должна быть рядом с дорогой или ее пересекать.

Итог такого моделирования заключается в получении ячеек, представляющих интерес для дальнейшего урбанизированного развития территории. Стоит сказать, что данный проект насчитывает огромное количество сценариев возможного развития, что практически нереально для традиционных типов анализа и прогнозирования. А именно: 64 сценария для оценки стабильности и надежности модели; 16 сценариев урбанизации; 5 реалистичных сценариев для тестирования утилиты MUP-City для развития города; 20 реалистичных сценариев для улучшения доступа к магазинам и услугам, 36 реалистичных сценариев в рамках экспериментального исследования для разработки местных стратегий развития.

Особый интерес представляют исследования моделирования развития городских территорий посредством клеточных автоматов от возникновения городской застройки (например, крепость)

и ряда итераций (преобразований каждой ячейки в новую форму), где отчетливо прослеживается процесс пространственного развития городских структур [1,3]. В работе [1] приводится исследование городской планировочной структуры Харькова. С помощью имитационного моделирования посредством клеточных автоматов с начала XX в. и до 2004 г. была получена модель планировки города, которая приближенно отображает реальное пространственное развитие города. Такие же результаты на примере Тамбова были получены при моделировании процесса роста города от основания города (1636) до нашего времени [3].

В рамках данного тематического обзора остановимся на исследовании, проведенном командой RIKS из Нидерландов [5]. Цель его заключалась в моделировании роста города Сидней (Австралия) через понимание предпочтений в распределении жилых территорий и моделировании сценариев роста города на основе различных вариантов планирования. Основная стратегия исследования заключалась в децентрализации и ограничении расширения городской территории Сиднея. В рамках исследования была получена карта пригодности городских территорий, которая включала три показателя: доступность центрального делового района, автомобильные и железнодорожные сети и их буферные зоны и уклоны рельефа городской территории. В исследование для калибровки модели также включались карты землепользования (городского зонирования), карта сельскохозяйственных угодий, растительности и др. В модель были внесены ограничительные факторы, такие как национальные парки, реки, водохранилища, территории аэропортов и т.д. – на этих территориях моделирование запрещено. Таким образом, посредством клеточных автоматов модель была откалибрована по отношению к двум картам от 1956 и 2006 г. Затем модель была использована для прогнозирования городских моделей по двум сценариям роста города – запланированного и развивающегося естественным путем.

Планируемый сценарий привел к более компактному росту. Установлено, что сценарий планируемого роста может быть получен путем изменения только карты пригодности в границах города добавлением большей пригодности в зонах активного развития и городских подцентров. В то же время естественный рост города без предопределения будущего вектора развития привел к обширному разрастанию вдоль транспортных связей. Сценарии развития могут быть использованы для визуализации последствий принятых решений и способствуют практической реализации устойчивого развития. Автор [5] указывает на хорошую прогностичность метода клеточных автоматов, но выделяет ряд рекомендаций для последующих исследований: необходимо совершенствовать методы нахождения правил перехода, находить способы комбинаций методов, основанных на данных, с методами, основанными на знаниях, а также поиск новых методов калибровки информации с учетом пространственных и временных закономерностей.

Интересна работа [6], где на примере города Эр-Рияд (Саудовская Аравия) был получен инструмент планирования на основе клеточных автоматов, который имел возможность моделирования городского роста.

Модель применена для проверки последствий нескольких различных сценариев развития города: устойчивый рост, создание новых пригородных центров и внедрение новых городов-спутников.

В модели учтены факторы, влияющие на разрастание городских территорий (локальный, региональный и глобальный), а также использованы исторические изображения Эр-Рияда, карты землепользования, дорожные карты, генеральные планы и др. Одной из новинок этой модели является разработка правил перехода, основанных на теории нечетких множеств, а не на теории вероятностей, применяемой в более ранних исследованиях.

Модель состоит из трех взаимосвязанных программных модулей: калибровка, моделирование и прогнозирование. Основная задача калибровочного модуля – создание оптимальных значе-

ний или веса входных переменных. Потом передается в симуляционный модуль, далее в модуль прогнозирования, где отображается потенциальная картина и процесс роста городов на основе будущих стратегий.

Модель показала хороший результат развития и роста города, но все-таки некоторые участки не были учтены. Тем не менее, основной результат показывает, что есть хорошее визуальное сходство между картами и симуляционными результатами, которые напоминают настоящий город.

В отечественной практике моделирования развития городских территорий выделяется команда центра системных исследований «Интегро» г.Уфа [8], где ведется усовершенствование системы имитационного моделирования развития города на основе клеточных автоматов. Каждый элемент городской среды может быть адекватно описан многослойным дискретным клеточным автоматом в метрическом пространстве. Каждый элемент несет свою функцию (хранит, переносит, перерабатывает), для каждого элемента определена модель, имитирующая поведение соответствующего класса элементов. Базовая интернет-система, обеспечивающая сбор, обработку и хранение информации о реальном состоянии территории Уфы используется городским управлением для сбора информации о городских процессах. Эта информация применяется для калибровки моделей города и его подсистем. Подробнее о модели в источнике [7]. Отличительной особенностью данной системы является то, что она интегрирована с «опросной системой в Интернет, что позволяет учитывать в моделях развития города текущие конъюнктурные и общие традиционные для города психологические характеристики населения и его отдельных групп» [7].

## **Выводы**

Главное преимущество всех перечисленных моделей – их возможности в разведочном сценарии решений и в прогнозировании. Данный метод моделирования может обеспечить более реалистичное поведение системы и, следовательно, гораздо лучше подходит для анализа городских систем, чем традиционные методы.

Выделение главных компонентов градостроительной системы в очень простой модели и экспериментирование с ней позволяют в дальнейшем лучше понимать механизмы сложной жизнедеятельности города.

Пространственная точность получаемых моделей, конечно, не достижима в связи с непредсказуемостью входящих параметров (размещение новых объектов, изменение функционала территории, человеческий фактор и т.д), но тем не менее моделирование городской территории дает огромную вариативность развития, что, безусловно, облегчает процесс принятия управленческих решений.

В этих условиях использование рассмотренных в статье моделей с учетом имеющихся ресурсных ограничений позволит вырабатывать более рациональные и целесообразные решения в области стратегического планирования.

К слабым сторонам метода клеточных автоматов можно отнести некоторые ограничения, которые могут повлиять на результаты моделирования городской среды. В частности, клеточные автоматы не могут обрабатывать процессы, называемые «сверху вниз» – изменения, осуществляемые директивными органами. Также система ограничена своей внутренней логикой, элементы-клетки привязаны к виртуальной основе – решетке, поэтому может быть весьма ограниченно применена для моделирования многообразия сложных процессов, формирующих урбанистическую среду.

## Заключение

Управление и моделирование городским развитием – многогранная проблема. Клеточные автоматы в значительной степени продемонстрировали свою способность к комплексному решению поставленных задач на основе самоорганизации городских систем. Их преимущества – пространственность, динамика и простота вычислительной эффективности, а также способность имитировать реальное пространственно-временное поведение.

## Библиография:

1. Патракеев, И.М., Погорелов, А.А. Моделирование развития городских систем на основе теории однородных структур / Учен. зап. Таврич. национального ун-та им. В.И. Вернадского. Се. «География». Т. 26 (65). 2013 – № 1, – С. 116–126.
2. Frankhauser P., Tannier, C. Developpement urbain fractal sous contraintes d'accessibilites / P. Frankhauser, C. Tannier. – Universitй de Franche-Comtй et de Bourgogne, 2010, p 83.
3. Соломина, О.А. Универсальный симулятор на основе клеточного автомата / О.А. Соломина, А.А. Арзамасцев. – Т. : Вестн. Тамб. ун-та. Сер. естеств. и техн. науки, 2008. – 109 с
4. Соломина, О.А. Моделирование динамики роста городской застройки на основе клеточного автомата / О.А. Соломина, А.А. Арзамасцев // Вестник Тамбовского ун-та. Сер. естеств. и техн. науки, 2008. – 111 с
5. Lahti, J. Modelling urban growth using cellular automata: A case study of Sydney, Australia / J. Lahti.— the Netherlands: International Institute for Geo-Information Science and Earth Observation Enschede.— 2008 p. 77
6. Khalid Al-Ahmadia, Alison Heppenstallb, Linda Seeb, Jim Hogg Modeling Urban Growth Dynamics using Cellular Automata and GIS. – URL: [http://www.saudigis.org/FCKFiles/File/SaudiGISArchive/3rdGIS/Papers/47\\_E\\_KhalidAlahmadi\\_KSA.pdf](http://www.saudigis.org/FCKFiles/File/SaudiGISArchive/3rdGIS/Papers/47_E_KhalidAlahmadi_KSA.pdf).
7. Горбачев, В.Г., Назыров, Т.Э. Система имитационного моделирования развития городской территории / В.Н. Горбачев, Т.Э.Назыров. – Уфа: Уфим. гос. авиацион. техн. ун-т: Интегро, 2012.
8. [www.integro.ru](http://www.integro.ru)

Статья поступила в редакцию 13.11.2018

Лицензия Creative Commons

Это произведение доступно по лицензии Creative Commons «Attribution-ShareAlike» («Атрибуция – На тех же условиях») 4.0 Всемирная.





# THE METHOD OF CELLULAR AUTOMATA IN THE MODELLING OF URBAN AREAS

**Gushchina, Ekaterina S.**

Senior Lecturer, Urban Planning,  
Penza State University of Architecture and Civil Engineering,  
Penza, Russia, e-mail: [modiliani\\_24@mail.ru](mailto:modiliani_24@mail.ru)

**Kuvshinova, Olga A.**

Senior Lecturer, Information and Computation Systems,  
Penza State University of Architecture and Civil Engineering,  
Penza, Russia, e-mail: [oly791702@mail.ru](mailto:oly791702@mail.ru)

## Abstract

*The article reviews the use of cellular automata in urban planning analysis. The method is attractive because it models the complex behavior of a system proceeding from simple rules. This innovative approach enables one to allow various factors influencing city development and model a spatial structure based on the principle of self-organization and understand the city as a natural system evolving by its own objective laws. Conclusions are drawn based on the thematic review and recommendations are suggested for further use of cellular automata in urban planning.*

## Keywords:

*simulation, cellular automata, urban planning systems, city master plan*

## References:

1. Patrakeyev, I.M., Pogorelov, A.A. (2013) Modeling the development of urban systems based on the theory of homogeneous structures. Transactions of the V.I.Vernadsky Tavrida National University. Series: Geography, Vol. 26 (65), No. 1, p. 116–126. (in Russian)
2. Frankhauser, P., Tannier, C. (2010) Developpement urbain fractal sous contraintes d'accessibilites. Université de Franche-Comté et de Bourgogne, p. 83.
3. Solomina, O.A., Arzamastsev, A.A. (2008) A universal cellular-automaton-based simulator. Tambov: Bulletin of Tambov University. Series: Natural and Engineering Sciences (in Russian)
4. Solomina, O.A., Arzamastsev, A.A. (2008) Modelling the growth of urban estates based on cellular automata. Tambov: Bulletin of Tambov University. Series: Natural and Engineering Sciences (in Russian)
5. Lahti, J. (2008) Modelling urban growth using cellular automata: A case study of Sydney, Australia. The Netherlands: International Institute for Geo-Information Science and Earth Observation Enschede, p. 77.
6. Khalid Al-Ahmadi Kh., Heppenstallb, A., Seeb, L., Hogg, J. Modeling Urban Growth Dynamics Using Cellular Automata and GIS. Available from: [http://www.saudigis.org/FCKFiles/File/SaudiGISArchive/3rdGIS/Papers/47\\_E\\_KhalidAlahmadi\\_KSA.pdf](http://www.saudigis.org/FCKFiles/File/SaudiGISArchive/3rdGIS/Papers/47_E_KhalidAlahmadi_KSA.pdf) (accessed on 31.10.2018)
7. Gorbachev, V.G., Nazyrov, T.E. (2012) Urban Development Simulation System. Ufa: Ufa State Aviation Technical University: Integro. (in Russian)
8. [www.integro.ru](http://www.integro.ru)