

УДК 681.518 (075.32)

## МОДЕЛИРОВАНИЕ РАЗВИТИЯ ГОРОДСКИХ СИСТЕМ НА ОСНОВЕ ТЕОРИИ ОДНОРОДНЫХ СТРУКТУР

*Патракеев И. М., Погорелов А. А.*

*Харьковский национальный университет городского хозяйства*  
*E-mail: ipatr59@yandex.ru, hawk45@list.ru*

Основной целью моделирования развития городских систем является прогнозирование городского планирования и обеспечения устойчивого развития территорий. Научно обоснованный подход к планированию и управлению пространственным развитием городских территорий должен быть основан на правильном понимании динамических процессов развития городских систем, то есть от прошлого к будущему через настоящее. В статье рассмотрены вопросы моделирования развития города с использованием теории классических однородных структур (ТОС), представляющей собой базовую компоненту общей теории однородных структур (*Cellular Automata*): новую и весьма перспективную среду моделирования многих дискретных параллельных процессов, явлений и феноменов, в том числе и для моделирования процессов пространственного развития городских систем.

**Ключевые слова:** город, моделирование, ОС-пространство, геоинформационные технологии, градостроительные решения, принятие решений, продукции.

### ВВЕДЕНИЕ

В течении последнего десятилетия, однородные структуры и их применение в моделировании процессов развития и планирования городской территории стали быстро завоевывать популярность среди исследователей городских систем [1, 2, 3, 4]. Это связано с тем, что ОС-структуры способны моделировать и визуализировать сложные пространственно-распределенные процессы. Однородные структуры (*Cellular Automata*) особенно подходят для моделирования процессов, явлений и феноменов протекающих в городских системах.

Процессы современной городской жизни столь многоплановы и динамичны, что требуются новые подходы к их осмыслению и прогнозированию перспектив развития городов. Однако понимание города как процесса требует иного, нетрадиционного взгляда на данный социокультурный

феномен. Сегодня на смену традиционным взглядам приходят новые интерпретации самого понятия «город» и формируются новые подходы к управлению этим сложным полифункциональным объектом.

Процесс развития городской системы напоминает нечеткий процесс не только с пространственной, но и временной точки зрения. С пространственной точки зрения не существует четких и определенных границ между зоной городской застройки, пригородной зоной и негородскими сельскохозяйственными территориями. С временной точки зрения процесс развития городской системы – это непрерывный процесс, который следует за общей тенденцией логики развития самоорганизующихся систем.

*Cellular Automata* - это дискретная динамическая система, существующая в *ОС*-пространстве, которое представлено в виде регулярных элементов, называемых ячейками, и время изменяется в такой системе в дискретные моменты времени. Каждая ячейка имеет конечное количество состояний. Состояние каждой ячейки изменяется согласно локальным правилам, то есть состояние ячейки в каждый момент времени меняется в зависимости от собственного состояния в текущий момент времени и состояния смежных ячеек в предыдущий момент времени.

В настоящей статье рассматривается клеточный автомат, моделирующий городскую систему размерностью  $n \times n$ . Состояние каждого клеточного автомата представляет область городской территории, которая подчиняется определенным особенностям процесса городского развития.

## 1. ОБЩИЕ ПРИНЦИПЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ НА ОСНОВЕ ПРИМЕНЕНИЯ ОДНОРОДНЫХ СТРУКТУР

Допустим, что  $S_{i,j}^t$  состояние ячейки  $x_{i,j}$ , которая имеет координаты  $i,j$  в момент времени  $t$ . Состояние ячейки принадлежит конечному множеству возможных состояний в клеточном пространстве. Пусть  $S_{i,j}^{t+1}$  состояние ячейки в момент времени  $t+1$ . Тогда можно записать, что

$$S_{i,j}^{t+1} = f(S_{i,j}^t, S_{\Omega_{i,j}}^t), \quad (1)$$

где  $\Omega_{i,j}$  - множество ячеек смежных по отношению к ячейке  $x_{i,j}$ ,  
 - множество состояний ячеек  $\Omega_{i,j}$  на момент времени  $t$ ,  
 $f$  - функция, представляющая множество правил изменения состояний ячейки.

Рассматривая ячейку  $x_{i,j}$  как принадлежащую окрестности самой ячейки  $x_{i,j}$  то можно выражение (1) записать в виде

$$S_{i,j}^{t+1} = f(S_{\Omega_{i,j}}^t), \quad (2)$$

Выражение (2) можно записать в вербальной форме, которая иллюстрирует общие принципы работы модели, основанной на клеточных автоматах:

ЕСЛИ что-либо случается в окрестностях ячейки,  
 ТО что-либо может случиться с ячейкой в следующий временной шаг.

Модели, основанные на клеточных автоматах, обычно содержат множество утверждений в виде правил ЕСЛИ-ТО, которые и определяют специфические правила изменения состояний ячеек. Например, известная игра английского математика Джона Конвея «*Life*» может быть выражена в виде трех простых утверждений:

ЕСЛИ имеется три или более ячеек в окрестности шаблона Э.Ф.Мура (рисунок 1) в состоянии «жизнь» относительно ячейки, находящейся в состоянии «жизнь»

ТО рассматриваемая ячейка сможет выжить в следующей генерации, то есть ее состояние не изменится.

ЕСЛИ имеется меньше чем две или более чем три ячеек в окрестности шаблона Э.Ф.Мура в состоянии «жизнь» относительно рассматриваемой ячейки, которая находится в состоянии «жизнь»

ТО рассматриваемая ячейка не сможет выжить в следующей генерации, то есть ячейка будет переведена в состояние «гибель».

ЕСЛИ имеется только три ячейки в окрестности Э.Ф.Мура в состоянии «жизнь» относительно рассматриваемой ячейки, которая находится в состоянии «гибель»

ТО рассматриваемая ячейка, в следующей генерации переходит в состояние «жизнь».

Таким образом, в утверждениях ЕСЛИ-ТО необходимо определить четыре основных элемента для функционирования модели основанной, на клеточных автоматах: сами ячейки, состояния ячеек, окрестности и правила изменения состояний ячеек.

		-1, 1	0, 1	1, 1	
		-1, 0	0, 0	1, 0	
		-1, -1	0, -1	1, -1	

Рис. 1. Шаблон соседства Э.Ф. Мура.

Что касается городских систем, то ячейка может отображать изменение состояния территории от не урбанизированной территории к урбанизированной, или изменения в особенностях и специфике землепользования района, области или региона, где могут существовать процессы функционально-пространственного развития. Под правилами изменения состояния ячеек в моделях городских систем могут пониматься процессы, явления которые влияют, воздействуют на динамику социально-экономических отношений и пространственную организацию города в целом.

Таким образом, применение однородных структур в определенном смысле является уникальным явлением: с одной стороны – клеточные автоматы представляют собой формальный аппарат высокопараллельных вычислений (подобно формальному аппарату, которым являются машины Тьюринга для последовательных вычислений), с другой стороны – основу для формального моделирования целого ряда процессов, феноменов и объектов в прикладных

исследованиях во многих областях современного естествознания, в том числе и в развитии методов пространственного моделирования градостроительных систем [3].

Основной целью моделирования развития городских систем является прогнозирование городского планирования и обеспечения устойчивого развития территорий. Научно обоснованный подход к планированию и управлению пространственным развитием городских территорий должен быть основан на правильном понимании динамических процессов развития городских систем, то есть от прошлого к будущему через настоящее [3].

Городское развитие можно представить как переход от преимущественно негородского общества к городскому, которое возможно за счет увеличения существующих городских поселений и за счет развития новых городов. Люди накапливаются в городских районах в попытке получить лучший доступ к товарам, обслуживанию, в целом стремятся к более благоприятным возможностям и более престижной и оплачиваемой работе.

В результате финансовая, социальная, и культурная жизнь расцветает в большом городском пространстве, привлекая все больше и больше населения для жизни, работы, производства и потребления внутри городского пространства.

В 2007 году 50% мирового населения жили в больших и малых городах, что по оценке составляет более 60 млн. людей двигаются в города ежегодно. Более того, такой размер поступления людей в города будет сохраняться в течении ближайших 30 лет [3].

Изменения в финансовой и социальной активности внутри города, необходимость размещения все прибывающего населения, то есть внутренняя миграция и появление новых и изменение старой социальной активности населения ведет к реорганизации землепользования, необходимости строительства жилых и промышленных, офисных зданий, создание новых зон обслуживания в соответствии с современными требованиями.

Для обеспечения эффективного регулирования городских процессов, связанных с территориальным развитием города, необходимо использовать системный подход и математического моделирование.

## **2. МЕТОДИКА ПОСТРОЕНИЯ ДИСКРЕТНОЙ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ДИНАМИКИ РАЗВИТИЯ ГОРОДСКОЙ СИСТЕМЫ**

Формально однородная структура определяется как упорядоченная четверка компонент

$$OC = \langle Z^d, A, \tau^{(n)}, X \rangle,$$

$Z^d$  - компонента, представляющая собой множество представляет собой целочисленную решетку в  $E^d$  пространстве, чьи элементы служат для пространственной идентификации единичных автоматов. При этом компонента  $Z^d$  определяет однородное пространство структуры, в котором она функционирует.

$A$  – конечное непустое множество, называемое алфавитом внутренних состояний единичных автоматов структуры, представляющее собой множество состояний, которые может принимать каждый элементарный автомат структуры.

$\tau^{(n)}$  – локальная функция переходов (ЛФП), которая задает состояние каждому единичному автомату структуры в момент времени  $t$  на основе состояний всех соседних ему автоматов (согласно индекса соседства  $X$ ) в момент времени  $t - 1$ .

$X$  – индекс соседства структуры, представляет собой упорядоченный кортеж  $n$  элементов, который служит для определения клеточных автоматов-соседей с которыми данный единичный автомат непосредственно связан информационными каналами, то есть обменивается информацией.

В качестве примера рассматривается динамика развития территории города Харькова. При моделировании использовались данные, полученные на основании использования аэрофотоснимков, космических снимков современной застройки городской территории и планов исторической застройки города, (рис. 1).

Математическая модель имеет следующий вид:

$$\begin{aligned} & Z^2 - 2-OC \text{ пространство размерности } n \times n; \\ & i, j - \text{ координаты ячейки,} \\ & \text{где } 0 \leq i \leq n, \\ & \quad 0 \leq j \leq n, n \in N. \end{aligned}$$

Для рассматриваемого примера  $N = 10300$ .

В начальный момент времени имеется 4 типа объектов: «объект застройка», «объект железная дорога», «объект реки», «объект дороги (магистралей)».

Обозначим в общем виде множество всех типов объектов, используемых в модели:

$$G = \{ g_k^{(i_n, j_n)} \mid (i_n, j_n) \in Z^2, n \in N, k = \overline{1,4} \},$$

где  $k$  – общее количество типов объектов  $G$  в начальный момент времени;

$(i_n, j_n)$  – индексы  $n$ -го объекта типа  $G$ , характеризующие расположение данного объекта в  $OC$ -пространстве  $Z^2$ .

Для каждого объекта должно выполняться неравенство:

$$(\forall_{v,w} \in N) \ [g]_{ik} \ (|i_v - i_w| + |j_v - j_w| > 0),$$

которое означает, что каждый объект в  $OC$ -пространстве  $Z^2$  имеет отдельную ячейку.

Наиболее вероятным подходом к рассмотрению хронологической последовательности расширения городской территории является учет ландшафтных особенностей местоположения города. Для обозначения рек, железной дороги, транспортных магистралей и мест непригодных для строительства по своим топографическим особенностям используются «мертвые» зоны – ограниченные участки  $OC$ -пространства. В таких «мертвых» зонах не возможно появление объектов застройки. На рис. 1 показаны входные данные для пространственного моделирования развития городской территории, полученные в результате векторизации картографической информации и обработке космических снимков средствами геоинформационных технологий.

Функционирование модели осуществляется в дискретной шкале времени  $t = 0, 1, \dots$  и определяется локальной функцией перехода (*ЛФП*)  $\tau^{(n)}$ , которая задает состояние каждому единичному автомату *ОС*-пространства в момент времени  $t$  на основе состояний всех соседних ему автоматов в момент времени  $(t-1)$ . В модели используется классический шаблон соседства Э.Ф Мура.

Более подробно построение алгоритмов моделирования в классических однородных структурах изложено в работах [5, 6].

Функционирование в *ОС*-пространстве выполняется в дискретной шкале времени, и определяется *ЛФП*, которые задают состояние каждому единичному автомату структуры в момент времени  $t$  на основе состояний всех соседних ему автоматов (в нашем случае согласно шаблона Э.Ф. Мура) в момент времени  $(t-1)$ . Другими словами *ЛФП* определяют, по какому правилу участки городского пространства будут изменять свое состояние, следовательно, правила определяют характер процесса развития в данном локальном пространстве.

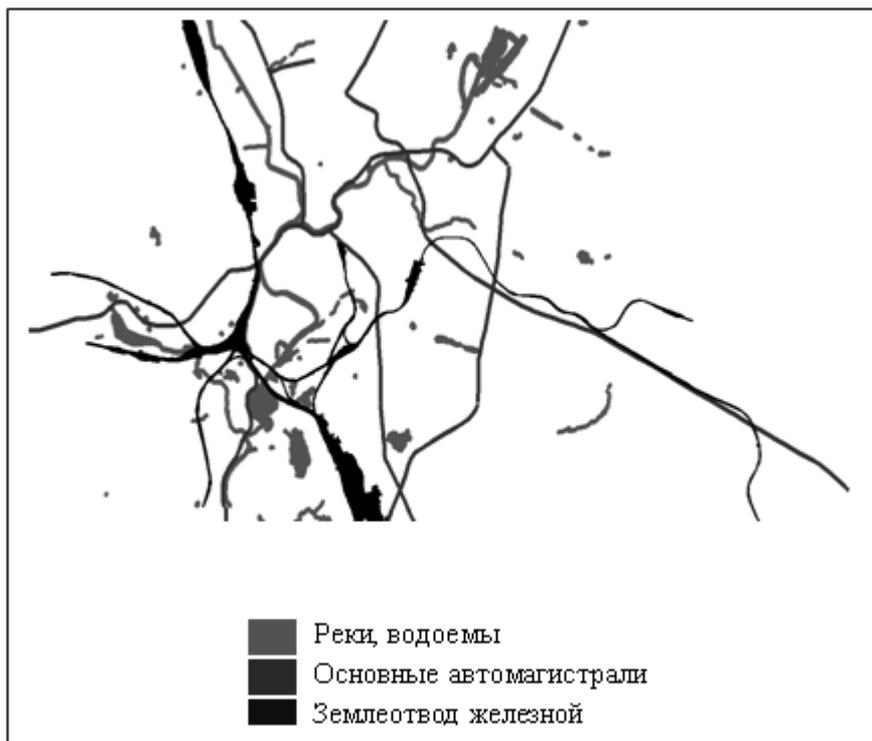


Рис. 1. Входные данные для пространственного моделирования развития городской территории.

Такие правила обычно представлены в виде набора продукций "ЕСЛИ-ТО", которые по своей сути достаточно просты. Однако, совокупность таких простых конструкций позволяет моделировать сложные процессы пространственного развития городской системы [6].

Некоторые правила в виде продукций "ЕСЛИ-ТО", реализованные в данной модели представлены в таблице 1-3.

## Правило 1

Таблица 1

ЕСЛИ	в шаблоне соседства Мура существует три или более разработанных земельных участка среди земельных участков, принадлежащих пригородной зоне,
ТО	земельные участки, принадлежащие пригородной зоне, будут переведены в состояние, соответствующее состоянию участков городской зоны.

## Правило 2

Таблица 2

ЕСЛИ	в шаблоне соседства Мура существует один или два разработанных земельных участка среди земельных участков, принадлежащих пригородной зоне и через них проходит транспортная магистраль,
ТО	земельные участки, принадлежащие пригородной зоне, будут переведены в состояние, соответствующее состоянию участков городской зоны.

## Правило 3

Таблица 3

ЕСЛИ	в шаблоне соседства Мура существует один или два разработанных земельных участка среди земельных участков, принадлежащих пригородной зоне и через них проходит железная дорога,
ТО	земельные участки, принадлежащие пригородной зоне, будут переведены в состояние, соответствующее состоянию участков городской зоны.

С учетом локальных правил 1-3 сценарий развития городского пространства на рассматриваемой территории показан на рисунке 3. Показано начальное состояние перед началом моделирования (а) результат моделирования, полученный на 353 итерации.

Для проверки адекватности данной модели рассмотрим соответствие результатов, полученных при моделировании, имеющимся планам города Харькова (рис. 4). На рисунке показаны результаты моделирования динамики городской

застройки и картографических данных на период начала XX века и на период 2004 года.

Как видно из приведенного рисунка, данная модель позволяет получить достоверную информацию о динамике роста территории города.

В качестве заключения необходимо отметить, что развитие территории города определяет среду жизнедеятельности населения и потому имеет большое общественное значение. В силу этих обстоятельств, градостроительные проекты должны быть максимально открытыми и получать одобрение со стороны горожан. Для согласования целей и задач градостроительного развития с самыми широкими слоями населения, деловыми кругами и городской властью, необходимо максимально открытое обсуждение генерального плана и всех градостроительных решений [4].

В этих условиях, использование рассмотренных в статье моделей, с учетом имеющихся ресурсных ограничений позволит выработать более адекватные и более целесообразные решения в области стратегического управления развитием территории города.

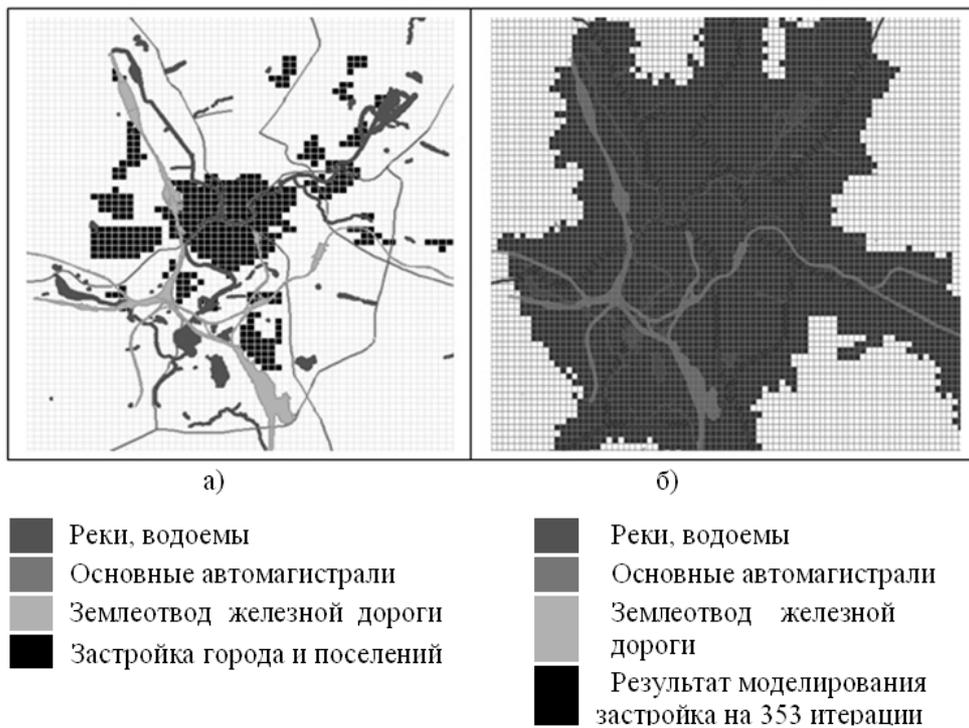


Рис. 3. Начальное состояние (а) и результат (б) моделирования развития городской территории с использованием однородных структур.

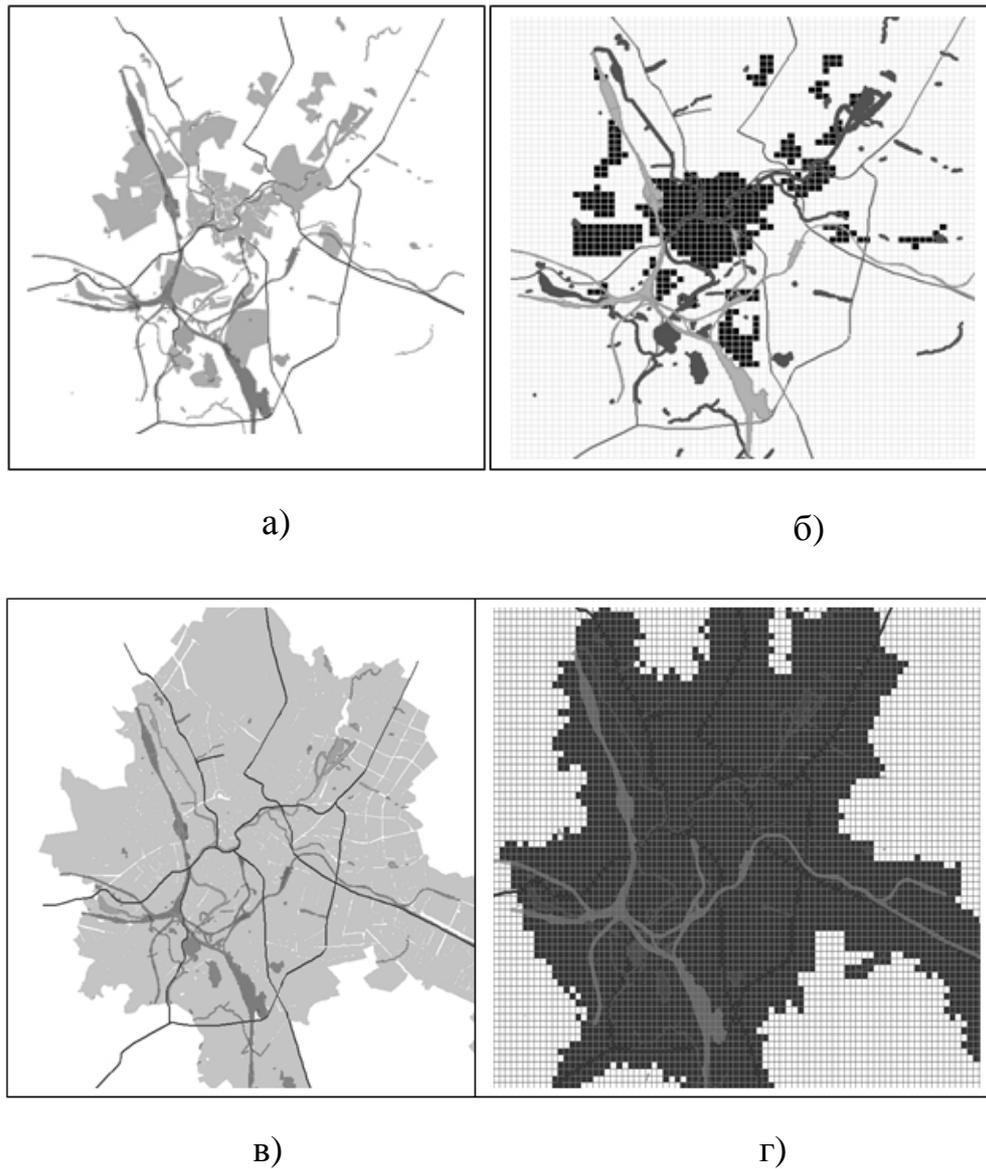


Рис. 4. Сравнение результатов моделирования динамики городской застройки и картографических данных в различные моменты времени:  
а) застройка города на начало XX века и ее представление в модели (б);  
в), г) 2004 год и модель, полученная на 353 итерации.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотренная методика позволяет повысить эффективность проводимых исследований пространственной организации города и реализована в виде программы-симулятора, основанной на теории однородных структур (ТОС), у истоков которой стояли такие современные кибернетики и математики, как Джон фон Нейман, С.Улам и Э.Мур [1]. Симулятор реализован в виде программного комплекса в среде разработки VBA ArcGIS 9.3.

## Список литературы

1. Прикладные аспекты теории однородных структур : материалы 8-й Белорусской математической конференции, (Минск, 19-24 июня 2000 г.) / Институт математики Национальной Академии наук Беларуси. – М. : Институт математики Национальной Академии наук Беларуси, 2000.
2. 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.
3. Культурное пространство региона [Электронный ресурс] / Томский государственный университет. – 2007. – Режим доступа: [www.tsias.ru/cdo/index](http://www.tsias.ru/cdo/index).
4. Никулина Ю.Н. Функциональное пространство города и городское управление / Ю.Н. Никулина – М. : Акад.упр. при Президенте Респ. Беларусь, 2008. – С. 123-129. – (Науч. тр. акад. упр. при Президенте Респ. Беларусь; Т. 2).
5. Waddell P. UrbanSim: Modeling urban development for land use, transportation and environmental planning / Waddell P. – Journal of the American Planning Association, 2011. – Vol. 68, 297-314.
6. Theoretical and Practical Issues on Cellular Automata, Proceedings of the Fourth International Conference on Cellular Automata for Research and Industry (ACRI 2000), Cellular Models of Urban Systems David O'Sullivan Paul M. Torrens, June, 2000.

**Погорелов О.А. Моделивання розвитку міських систем на основі теорії однорідних структур / О. А. Погорелов, И. М. Патракеєв // Вчені записки Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського. Серія: Географія. – 2013. – Т. 26 (65). – № 1– С. 116-126.**

В статті розглянуті питання моделювання розвитку міста з використанням теорії однорідних структур (ТОС), що являє собою базову компоненту загальної теорії однорідних структур (*Cellular Automata*): нову та вельми перспективну середу моделювання багатьох дискретних паралельних процесів, явищ та феноменів, у тому числі й для моделювання процесів просторового розвитку міських систем.

**Ключові слова:** місто, моделювання, ОС-простір, геоінформаційні технології, містобудівні рішення, прийняття рішень, продукції.

## MODELLING THE DEVELOPMENT OF URBAN SYSTEMS BASED ON THE THEORY OF HOMOGENEOUS STRUCTURES

*Pogorelov A. A., Patrakeev I. M.*

*Scientific Notes of Taurida National V. I. Vernadsky University*

*E-mail:* [ipatr59@yandex.ru](mailto:ipatr59@yandex.ru), [hawk45@list.ru](mailto:hawk45@list.ru)

The main purpose of modeling the development of urban systems is the prediction of urban planning and sustainable development of the territories. Evidence-based approach to planning and management of spatial development of urban areas should be based on a correct

understanding of the dynamic processes of urban systems, that is, from the past to the future through the present. The paper deals with the development of simulation using the classical theory of homogeneous structures, which is a basic component of the general theory of homogeneous structures (Cellular Automata): a new and challenging environment modeling many discrete parallel processes, phenomena and phenomena including for process modeling spatial development of urban systems.

During the last decade, homogeneous structures and their use in modeling the processes of development planning and urban areas are rapidly gaining popularity among researchers of urban systems. This is due to the fact that the OS-structures are able to simulate and visualize complex spatially distributed processes. Homogeneous structures (Cellular Automata) are particularly suitable for modeling processes, phenomena and phenomena occurring in urban systems.

The processes of modern urban life is so multifaceted and dynamic, which requires new approaches to understanding and forecasting the prospects for urban development. However, the understanding of how the process requires a different, unconventional look at the socio-cultural phenomenon.

Today, replacing the traditional view comes a new interpretation of the concept of "city" and the formation of new approaches to the management of these complex multi-functional object.

The process of development of the urban system resembles a fuzzy process is not only spatial but also temporal point of view. From the spatial point of view, there is no clear and definite boundaries between the zone of urban, suburban area and non-urban agricultural areas. From the time point of view, the process of development of the urban system - it is an ongoing process that follows the general trend of the logic of development of self-organizing systems.

Cellular Automata - a discrete dynamical systems in the OS space, which is represented in the form of regular elements called cells, and is converted in such a system at discrete points in time. Each cell has a finite number of states. The state of each cell varies according to local regulations, i.e. the cell state at each time point varies depending on its own state at the current time and the state of adjacent cells in the previous time.

Our procedure improves the efficiency of the studies of the spatial organization of the city and is implemented as a software simulator, based on the theory of homogeneous structures, which stood at the origins of such modern mathematics and cybernetics, as John von Neumann, and S.Ulam E.Mur. The simulator is implemented as a software package in the development environment VBA ArcGIS 9.3.

**Keywords:** urban, modeling, OS-structure, geoinformation technologies, decision-making, products.

#### References

1. Waddell P. UrbanSim: Modeling urban development for land use, transportation and environmental planning / Waddell P. – Journal of the American Planning Association, 2011. – Vol. 68, 297-314.
2. Theoretical and Practical Issues on Cellular Automata, Proceedings of the Fourth International Conference on Cellular Automata for Research and Industry (ACRI 2000), Cellular Models of Urban Systems David O'Sullivan Paul M. Torrens, June, 2000.

*Поступила в редакцию 22.04.2013 г.*