

Tomasz ROZWADOWSKI

Wydział Architektury, Politechnika Gdańska

MODELE KOMÓRKOWE W PROJEKTOWANIU ZŁOŻONYCH SYSTEMÓW MIEJSKICH

Streszczenie. W artykule przedstawiono ogólne podstawy symulacji rozwoju urbanistycznego na podstawie modeli komórkowych. Nowa teoria, wykorzystująca aparat matematyczny stworzony do badań i modelowania dynamiki układów nieliniowych, rozszerza również możliwości poznawcze i wykorzystanie systemów GIS w szeroko pojmowanym planowaniu przestrzennym. Jej szybki rozwój w ostatnich latach i niezwykle osiągnięcia w poznaniu procesów rządzących podstawową dynamiką złożonych systemów emergencyjnych czynią z niej jeden z bardziej istotnych nurtów również we współczesnych badaniach rozwoju urbanistycznego i uzasadniają duże zainteresowanie, jakie wzbudza w wielu ośrodkach naukowych na świecie.

CELLULAR MODELS IN PLANING COMPLEX URBAN SYSTEMS

Summary. Understanding urban growth process is a fundamental issue both in preparation of development plan and elaboration of sustainable growth management policy. Structural development of human settlements can be characterized as a complex process with strong feedback. The assumption that very few fundamental laws govern this process has inspired rather notable research in the field of urban growth for the last decade. Cellular automata provide the key to the dynamics of this process and allows modeling that integrates socioeconomic with environmental issue and operates at both micro and macro geographical scales.

1. Współczesne procesy przestrzenne

Niezwykłe tempo i żywość procesów przemian ludzkich siedzib w ciągu ostatnich kilkunastu dekad nie ma odpowiednika w całej historii rozwoju cywilizacji. Charakterystyczną cechą współczesnego rozwoju jest również ciągłe przyspieszenie wszelkich przekształceń i nieznana dotychczas ich skala.

Istnieją szacunki, według których ogólna liczba mieszkańców miast na świecie wzrasta obecnie o ok. milion osób tygodniowo. Na początku dwudziestego stulecia zaledwie około tuzina miast liczyło powyżej miliona mieszkańców, a siedem procent ludności świata można było klasyfikować jako ludność miejską. Pod koniec wieku udział mieszkańców miast w ogólnej liczbie ludności świata według różnych opracowań wzrósł do 47-51%, natomiast

liczba miast powyżej miliona mieszkańców przekroczyła pół tysiąca, największe z nich osiągnęły powyżej dwudziestu milionów mieszkańców [19].

Na współczesny rozwój urbanistyczny, obok procesów burzliwej urbanizacji peryferyjnych obszarów miejskich, nakładają się dwa inne wzajemnie powiązane przejawy dynamiki przestrzennej, tj. zanikanie centralnych obszarów miejskich i pojawianie się nowych miast satelitarnych lub wielkich dzielnic z funkcjami konkurencyjnymi dla pierwotnego centrum miasta. Równoległe do tych przemian zachodzą także całkowicie nowe procesy dotyczące przetwarzania informacji, systemów transportowych i innych powiązań ekonomicznych. Pojawiają się niespotykane dotychczas formy użytkowania terenów i organizacji społeczeństw. Przemiany te wymagają poważnych badań i studiów, gdyż oczywiste jest, że ich bezpośrednie konsekwencje w głębokim zakresie będą dotyczyć i wpływać na środowisko miejskie XXI wieku [2].

Obecne zrozumienie procesów przemian jest niewystarczające. Pomimo przeszło stuletnich wysiłków i studiów „nowożytnej” urbanistyki, nasze umiejętności i możliwości kontrolowania i wpływania na te procesy sprowadzają się do krótkotrwałych i ograniczonych przestrzennie oddziaływań lokalnych planów urbanistycznych. Z drugiej strony historia prób kontrolowania tego procesu liczy sobie co najmniej cztery tysiące lat. Analiza źródeł historycznych ujawnia próby tworzenia oraz istnienie instrumentów mających zadanie oddzielenia rozrastającego się miasta od jego przedmieść, czy kontrolowania gęstości zabudowy już w sumeryjskim Ur, starożytnym Rzymie czy elżbietańskim Londynie [12].

Intensywnie zagospodarowana przestrzeń współczesnego miasta stanowi złożony, nieciągły i podlegający permanentnym zmianom system, w którym czynnik naturalny i ludzki są tak ściśle powiązane, że wszelkie próby jego studiowania i kontrolowania okazują się coraz trudniejsze. Rozpatrywany w dłuższym okresie czasu rozwój miasta wydaje się być procesem trudnym do scharakteryzowania, nie poddającym się planowaniu i kontroli.

2. Miasto jako system emergencyjny?

Złożoność natury znalazła się w obszarze zainteresowania nauki na początku XX w. W końcu lat pięćdziesiątych rozpoczęto badania procesów spontanicznego tworzenia się w systemach złożonych nowych wzorów i ich autonomiczną adaptację do zmieniającego się otoczenia. Różne obserwacje, różne koncepcje, założenia i metody wyprowadzone przez naukowców z bardzo odległych od siebie dziedzin powoli zaczęły jednak łączyć się we wspólny nurt nowego podejścia – załączków teorii złożoności i samoorganizacji [15]. Okazało się, że spontaniczne pojawianie się nowych struktur jest stosunkowo łatwe do

zaobserwowania zarówno w laboratorium, jak i w codziennym otaczającym nas świecie. Badając różne rodzaje systemów wykazano, że przejście układów na wyższy poziom organizacyjny dokonuje się na skutek lokalnych oddziaływań relatywnie prostych elementów, które składają się na cały system. Układy takie, złożone z odpowiednio dużej liczby pojedynczych komponentów, o wzajemnych oddziaływaniach opartych na stosunkowo prostych prawidłowościach i ograniczonych do najbliższego własnego sąsiedztwa, przyjęto nazywać systemami złożonymi (albo precyzyjniej: zdecentralizowanymi wielokomponentowymi systemami o dużym zasięgu przestrzennym). Występowanie uporządkowanych zjawisk kolektywnych powodowane przez wzajemne oddziaływanie pojedynczych elementów określa się jako własności emergencyjne systemu. Złożoność coraz powszechniej traktowana zaczęła być jako nieodłączna cecha natury, a nie tylko skutek kombinacji wielu prostych procesów zachodzących na bardziej elementarnym poziomie [10], [11].

Niezwykłe osiągnięcia w poznaniu procesów rządzących podstawową dynamiką systemów złożonych pozwoliły również w badaniach urbanistycznych na postawienie szeregu nowych frapujących tez. Zaawansowane badania nad dynamiką przemian przestrzennych stały się zagadnieniem w pełnym znaczeniu słowa wielodyscyplinarnym, którego pole obserwacji należy umiejscowić na pograniczu geografii, ekonomii, planowania przestrzennego i urbanistyki, a podstaw teoretycznych dostarczają przede wszystkim fizyka teoretyczna, matematyka układów nieliniowych i informatyka. Wszystkie te dziedziny mają swój wkład w powstanie ogólnej teorii układów złożonych - dziedziny poszukującej prawidłowości w funkcjonowaniu i rozwoju makrostruktur, kształtujących się w systemach wielokomponentowych wskutek wzajemnego oddziaływania komponentów [8].

Wielu naukowców zauważyło, że dla układów osadniczych spełnione są trzy podstawowe kryteria, które musi spełniać system emergencyjny. Po pierwsze miasto funkcjonuje w nieodwracalnym medium, jakim jest czas biegnący w jednym kierunku, po drugie jego dynamika rozwoju, będąc wynikiem nakładania się różnorodnych strategii przestrzennych, procesów społecznych i zjawisk losowych wykazuje silnie nieliniowy charakter i po trzecie - co oczywiste - miasto składa się z dostatecznie dużej liczby niezależnie funkcjonujących elementów. Ostatnie lata przyniosły uporządkowanie metodologii badań i powszechne uznanie społeczeństwa, a także miast i regionów, które ono wytworzyło za takie wielokomponentowe systemy złożone [1][4][8][9][14]. Założenie, że procesy skomplikowanych przemian przestrzennych układów osadniczych mogą być kierowane zaledwie kilkoma prostymi prawidłowościami, odnoszącymi się do podstawowych elementów składowych, zaczyna stymulować w ostatnich latach coraz szerszy i bardziej

znaczący nurt badań. To z kolei zaowocowało przystosowaniem wielu dziedzin empirycznych do modelowania różnorodnych zagadnień przestrzennych i socjoekonomicznych, a ostatnie lata przyniosły pierwsze prace wykorzystujące w modelach automaty komórkowe.

3. Modelowanie procesów urbanistycznych

Automat komórkowy można postrzegać jako dyskretny model obliczeniowy. Posiada on formę sieci identycznych oddziałujących na siebie komponentów zwanych komórkami (ang. cells). Dla typowego automatu komórkowego charakterystyczne są: sieć komórek w przestrzeni D -wymiarowej, zbiór stanów pojedynczej komórki zawierający k elementów, i reguły F_{si}^t , określające stan komórki w chwili $t+1$ w zależności od jej stanu w chwili t oraz stanu komórek ją otaczających (gdzie s_i jest otoczeniem i -tej komórki.)

Wynalezione w latach czterdziestych przez Johna von Neumanna i polskiego matematyka Stanisława Ulama automaty komórkowe długi czas były abstrakcyjnym tworem matematycznym, którym zajmowało się wąskie grono teoretyków matematyki. Dopiero upowszechnienie się komputerów osobistych i wykorzystanie automatu przez Conway'a w latach siedemdziesiątych do prostej gry, która zyskała wielką popularność w kręgach uniwersyteckich, spowodowało burzliwy i szybko rozprzestrzeniający się na różne dziedziny proces naukowych zastosowań automatów komórkowych [3].

Fakt, że stosunkowo prosty i łatwo dostępny komputer osobisty był w stanie przejąć na siebie masowe obliczenia zachowań automatu pozwalając naukowcom skoncentrować się na efektach jego działania, zaowocował szybko rosnącym zbiorem publikacji dokumentujących sukcesy aplikacyjne nowej metody. Podstawowa idea jest stosunkowo prosta - na regularnej sieci zbiór zasad zmusza niezależnie funkcjonujące komórki do zmian stanu w zależności od stanu samej komórki i stanu najbliższego jej otoczenia. Jeśli proces jest kontynuowany, wszystkie komórki zmieniają swój stan w dyskretnych krokach na skutek równoległe prowadzonych obliczeń. Wynikiem takiej dynamiki całkowicie niezależnych elementów są zaskakująco regularne i uporządkowane wzory. Zjawisko takie jest analogiczne do obserwowanych w naturze skoordynowanych działań złożonych systemów, będących skutkiem przypadkowej aktywności pojedynczych elementów składających się na ten system.

Koncepcyjne powiązanie z teorią złożoności i samoorganizacji pomimo pewnych uproszczeń powoduje, iż automaty komórkowe umożliwiają budowę realistycznych modeli zachowania ziarnistych substancji, reakcji chemicznych, zachowania lawin czy rozprzestrzeniania się epidemii [9]. Niezwykła efektywność obliczeń prowadzonych przez automat komórkowy jest konsekwencją dyskretności czasu i przestrzeni, skończonej liczby

stanów pojedynczej komórki i równoczesnego globalnego aktualizowania ich stanu [8]. W ostatnich latach pojawia się coraz więcej opracowań, w których dynamika systemów miejskich również opisywana jest jako wynik prostych oddziaływań między mikroobiektemi, np. migracja mieszkańców odnosząca się do poszczególnych gospodarstw, a nie zachowania całej społeczności (Schelling 1978), występowanie godzin szczytu w komunikacji miejskiej uzależnione od zachowania pojedynczych pojazdów (Nagel, Rasmussen 1996), czy globalne efekty ekonomiczne wynikające z lokalnej dynamiki (Krugman 1996). W roku 1994 ukazały się pionierskie prace dotyczące modeli strukturalnego rozwoju miasta oparte na podobnych założeniach (Batty and Xie 1994), [18].

W zastosowaniach urbanistycznych symulacja odzwierciedla i opisuje, w jaki sposób skoordynowane zjawiska pojawiają się jako rezultat przypadkowych zachowań pojedynczych elementów systemu. Konsekwencją tego jest możliwość operowania na dowolnie dużym zespole niezależnie funkcjonujących elementów. Elementami takimi w zależności od rodzaju modelu mogą być poszczególne działki budowlane, pojazdy, gospodarstwa domowe czy nawet mieszkańcy w symulatorach zjawisk migracyjnych [4] [16]. W modelach urbanistycznych możliwe jest uzyskanie bardzo realistycznych wyników nawet przy zastosowaniu prostego automatu [20]. Komórki automatu sąsiadują ze sobą podobnie jak działki budowlane, każda może przyjmować dowolny stan ze zbioru stanów dozwolonych, zdefiniowanych np. jako przemysł, usługi, mieszkalnictwo etc., a zbiór określonych zasad transformacji odniesionych do dowolnie określonego sąsiedztwa może opisywać określony sposób zachowania poszczególnych komórek [16].

Siłą takich modeli nie jest jednak przewidywanie przyszłości miasta, gdyż systemy samoorganizujące się są w swej naturze nieprzewidywalne i tym samym trudne do kontrolowania. Jest to raczej środowisko testowe, w którym można przeprowadzać dające się powtarzać, obserwować i kontrolować eksperymenty umożliwiające obserwację natury procesów urbanizacji czy też sprawdzać strategie planistyczne poprzez iteracyjne poznawanie potencjalnych możliwości rozwoju na zasadzie „jeżeli-to...” [14].

4. Zakończenie

Nie ma wątpliwości, że w całym zagadnieniu badawczym jesteśmy na początku drogi, daleko przed stworzeniem nowej dyscypliny. Nie pozostawiające wątpliwości wyniki obserwacji i doświadczeń są wciąż bardzo trudne w interpretacji. Nie powstały też jak dotąd teoretyczne podstawy tworzenia skomplikowanych wzorów i zachowań, takich jak

przetwarzanie i transmisja informacji czy wykonywanie obliczeń przez obserwowane systemy. Wiele zagadnień można zaledwie zidentyfikować. Niemniej obiecujące wyniki eksperymentów i pierwsze próby zastosowania w modelach komórkowych sieci neuronowych i algorytmów genetycznych zachęcają do dalszych kroków, a kontynuowanie badań pozwala mieć nadzieję na głębszy wgląd również w naturę procesów rządzących funkcjonowaniem systemów osadniczych, co w przyszłości może zaowocować zwiększeniem efektywności narzędzi planowania miast.

Literatura

1. Allen P.M.: Cities and regions as evolutionary, complex systems, *Geographical Systems*, nr 4, 1997, s. 103-130.
2. Anders W.: Zarys koncepcji miasta jako systemu antropogenicznego oraz proekologicznych zasad jego kształtowania, Centralny Program Badań Podstawowych, Grupa tematyczna 04.10.11.02, część I, SGGW-AR, Warszawa 1991.
3. Bandini S. Mauri G. : Cellular automata: From theoretical parallel computational model to its application to complex systems, *Parallel Computing*, nr 27, 2001, s. 539-553.
4. Batty M.: New way of looking at cities, *Nature*, nr 377, 1995, s. 574.
5. Batty M.: Progress, success, and failure in urban modeling, *Environment and Planning*, nr 11, 1979, s. 863-878.
6. Burrough P.A.: GIS (as systems and as science)?, *Computers, Environment and Urban Systems*, nr 24, 2000, s. 1-3.
7. Domański R.: Miasto innowacyjne. Wyd. Naukowe PWN, Warszawa 2000.
8. Domański R.: Gospodarka przestrzenna. Wyd. Naukowe PWN, Warszawa 2002.
9. Gilbert N., Doran J.: *Simulating Societies: The Computer Simulation of Social Phenomena* London, 1994, UCL Press.
10. Holland J.H.: *Hidden Order: How Adaptation Build Complexity*, Reading MA, Addison-Wesley, 1995.
11. Manson S.M.: Simplifying complexity: a review of complexity theory, *Geoforum*, nr 32, 2001, s. 405-414.
12. Morris A.J.: *History of Urban Form*, Longmans, Londyn, 1997.
13. Portugali J.: Self-organizing cities, *Futures*, nr 29, nr 4/5, 1997, s. 235-380.
14. Portugali J., Benenson I.: Artificial planning experience by means of a heuristic cell-space model: simulating international migration in the urban process, *Environment and Planning A*, nr 27, 1995, s. 1647-1665.
15. Prigogine I.: *Kres pewności, czas, chaos i nowe prawa natury*, W.A.B. C.I.S., Warszawa 2000.
16. Sayer R.A.: Understanding urban models versus understanding cities, *Environment and Planning*, nr 11, 1979, s. 853-862.
17. Smith M.: Painting by numbers – mathematical models of urban systems, *Environment and Planning*, B25, 1998, s. 483-493.
18. Schweitzer F., Steinbrink J.: Estimation of megacity growth. Simple rules versus complex phenomena, *Applied Geography*, vol. 18, No 1, 1998, s. 69-81.
19. United Nations Centre for Human Settlements: *An Urbanizing World. Global Report on Human Settlements*, Oxford University Press 1996.