



POLSKA AKADEMIA NAUK
Instytut Badań Systemowych

**BADANIA OPERACYJNE I SYSTEMOWE:
ŚRODOWISKO NATURALNE,
PRZESTRZEŃ, OPTYMALIZACJA**

**Olgierd Hryniewicz,
Andrzej Straszak,
Jan Studziński
red.**



**BADANIA OPERACYJNE
I SYSTEMOWE:
ŚRODOWISKO NATURALNE, PRZE-
STRZEŃ, OPTYMALIZACJA**

INSTYTUT BADAŃ SYSTEMOWYCH • POLSKA AKADEMIA NAUK

Seria: BADANIA SYSTEMOWE
tom 63

Redaktor naukowy:

Prof. dr hab. inż. Jakub Gutenbaum

Warszawa 2008

Olgierd Hryniewicz, Andrzej Straszak, Jan Studziński

**BADANIA OPERACYJNE I SYSTEMOWE:
ŚRODOWISKO NATURALNE, PRZESTRZEŃ,
OPTYMALIZACJA**

Publikacja była opiniowana do druku przez zespół recenzentów, którego skład podano w treści tomu

Opinie, wyrażone przez autorów w pracach, zawartych w niniejszym tomie, nie są oficjalnymi opiniami Instytutu Badań Systemowych PAN, ani Polskiego Towarzystwa Badań Operacyjnych i Systemowych.

Copyright © by Instytut Badań Systemowych PAN & Polskie Towarzystwo Badań Operacyjnych i Systemowych
Warszawa 2008

ISBN 83-894-7519-7
EAN 9788389475190

Redakcja i opracowanie techniczne: Jan W. Owskiński, Aneta M. Pielak, Anna Gostyńska

**Lista recenzentów
artykułów, wchodzących w skład tomów serii „Badania Systemowe”
związanych z konferencją BOS 2008**

Dr Paweł Bartoszczuk
Dr inż. Lucyna Bogdan
Dr hab. inż. Zbigniew Buchalski
Mgr inż. Hanna Bury
Prof. dr hab. Marian Chudy
Dr Jan Gadomski
Mgr Grażyna Grabowska
Mgr inż. Andrzej Jakubowski
Dr hab. inż. Ignacy Kaliszewski
Dr Andrzej Kałużko
Dr hab. Leszek Klukowski
Dr hab. inż. Wiesław Krajewski
Dr inż. Lech Kruś
Dr hab. inż. Marek Libura
Dr Barbara Mażbic-Kulma
Dr inż. Edward Michalewski
Dr inż. Jan W. Owiński
Dr inż. Grażyna Petriczek
Dr inż. Henryk Potrzebowski
Dr Maciej Romaniuk
Prof. dr hab. Piotr Sienkiewicz
Dr hab. Henryk Spustek
Prof. dr hab. Andrzej Straszak
Dr hab. inż. Jan Studziński
Prof. dr hab. Tomasz Szapiro
Mgr Anna Szediw
Dr inż. Grażyna Szkatuła
Dr hab. inż. Tadeusz Witkowski
Dr Irena Woroniecka-Leciejewicz
Dr hab. Sławomir Zadrożny
Dr inż. Andrzej Ziółkowski

**Komitet Konferencji
Badania Operacyjne i Systemowe 2008
Rembertów, Akademia Obrony Narodowej**

Patronat honorowy

Bogdan Klich, Minister Obrony Narodowej
Maciej Nowicki, Minister Środowiska i Zasobów Naturalnych

Komitet Sterujący

Janusz Kacprzyk, Prezes Polskiego Towarzystwa Badań Operacyjnych i Systemowych
Olgiard Hryniewicz, Dyrektor Instytutu Badań Systemowych
Janusz Kręcikij, Komendant Akademii Obrony Narodowej

Komitet Programowy

Piotr Sienkiewicz, *Przewodniczący*
Jacek Mercik, *Wiceprzewodniczący*

<i>Tomasz Ambroziak</i>	<i>Ryszard Budziński</i>	<i>Wojciech Cellary</i>
<i>Marian Chudy</i>	<i>Ludostaw Drelichowski</i>	<i>Jerzy Hołubiec</i>
<i>Olgiard Hryniewicz</i>	<i>Adam A. Janiak</i>	<i>Jerzy Józefczyk</i>
<i>Ignacy Kaliszewski</i>	<i>Józef Korbicz</i>	<i>Maciej Krawczak</i>
<i>Piotr Kulczycki</i>	<i>Małgorzata Łatuszyńska</i>	<i>Marek J. Malarski</i>
<i>Barbara Mażbic-Kulma</i>	<i>Zbigniew Nahorski</i>	<i>Andrzej Najgebauer</i>
<i>Włodzimierz Ogryczak</i>	<i>Wojciech Olejniczak</i>	<i>Jan W. Owsiański</i>
<i>Andrzej Piegat</i>	<i>Krzysztof Santarek</i>	<i>Roman Słowiński</i>
<i>Honorata Sosnowska</i>	<i>Henryk Spustek</i>	<i>Jan Stachowicz</i>
<i>Andrzej Straszak</i>	<i>Tomasz Szapiro</i>	<i>Andrzej Szymonik</i>
<i>Ryszard Tadeusiewicz</i>	<i>Eugeniusz Toczyłowski</i>	<i>Tadeusz Trzaskalik</i>
<i>Jan Węglarz</i>	<i>Tadeusz Witkowski</i>	<i>Stanisław Zajas</i>
	<i>Bogdan Zdrowski</i>	

Komitet Organizacyjny

Jan W. Owsiański, Andrzej Kałużko, Mieczysław Pelc, Zbigniew Piątek

Sekretariat

Krystyna Warzywoda, Monika Majkut, Aneta M. Pielak, Krzysztof Sep,
Anna Stachowiak, Halina Świeboda, Tadeusz Winiarski

Redakcja wydawnictw

Janusz Kacprzyk, Piotr Sienkiewicz, Andrzej Najgebauer,
Olgiard Hryniewicz, Andrzej Straszak, Jan Studziński,
Jan W. Owsiański, Zbigniew Nahorski, Tomasz Szapiro

Przestrzeń i transport

ADAPTACJA FUNKCJONALNA AUTOMATU KOMÓRKOWEGO W PROCESIE MODELOWANIA DYNAMICZNYCH SYSTEMÓW MIEJSKICH

Andrzej Wiśniewski

Instytut Informatyki, Akademia Podlaska, ul. 3 Maja 54, 08-110 Siedlce

W artykule omówiono podstawowe etapy adaptacji automatu komórkowego (CA), jako zasadniczego narzędzia wspomagającego GIS w modelowaniu dynamiki systemów miejskich. Istotnym uzupełnieniem tego kierunku jest omówiona integracja CA oraz GIS z systemem wielo-agentowym. Wskazane zostały przesłanki oraz zaproponowano kierunki dalszego doskonalenia rozważanego procesu modelowania.

1. Wprowadzenie

Zasadniczą przesłanką poszukiwania efektywnych metod modelowania planowania i rozwoju systemów miejskich jest obserwowany współcześnie dramatyczny wzrost systemów miejskich w krajach słabo rozwiniętych jako wynik trendu nieformalnego zasiedlania. Ocenia się, że więcej niż 60% miejskiej populacji tych krajów żyje w obszarach (noszących różne nazwy m.in.: favele w Brazylii, elobis w Kamerunie, getta, slumsy) proliferacji miasta w trudnych do akceptacji warunkach głodu, braku pracy i higieny – Sietchiping (2004), Veerbeek (2004). Powyższy problem rozlewania się miast, może w mniej drastycznym rozmiarze i formie, wydaje się jednak dotyczyć większość państw, o czym mogą świadczyć zalecenia zapisane w „Strategii Lizbońskiej”, a w szczególności w „Strategii zrównoważonego rozwoju Unii Europejskiej” przyjętej w Goeteborgu w 2001 r. Wskazywany efekt rozpraszania urbanizacji w obszarze państw Unii wynika z wielu czynników bezpośrednich takich, jak rosnąca zamożność i zwiększone zainteresowanie wyższą jakością życia charakteryzującą się zwiększonym zapotrzebowaniem na tereny i przestrzeń, zmianami w strukturze społecznej (starzenie społeczeństwa i wzrost liczby małych gospodarstw domowych), jak i pośrednich – w postaci segregacji przestrzennie-funkcjonalnej jako wyniku oddalenia miejsc pracy od miejsc zamieszkania, placówek handlowych, czy usługowych – Kozłowski (2006).

Modelowanie dynamiki miast oparte na konwencjonalnych procedurach okazuje się niewystarczające. Wprowadzenie geograficznych systemów informacyjnych (Geographical Information Systems – GIS) w późnych latach pięćdziesiątych, a następnie osiągnięcie względnej dojrzałości narzędzia (połączenie baz danych zawierających graficzny opis obiektów z bazami danych zawierającymi ich opis tekstowy i numeryczny) w końcu lat osiemdziesiątych sprzyjało upowszechnieniu tej technologii. Równoległy rozwój podstaw teoretycznych systemu (m.in. analiza i statystyka danych przestrzennych, modelowanie kartograficzne) stworzyła warunki dla powstania nowej dziedziny nauki Geographic Information Science (GISci) Urbański (1997). Możliwości GIS w procesie modelowania dynamiki są jednak

ograniczone, zaś wynikają z pierwotnych jego celów transformacji statycznych danych oraz funkcji ograniczonych do analizy statycznych danych przestrzennych. Szeroko stosowanymi metodami wspomagającymi w tym zakresie GIS stały się od początku lat dziewięćdziesiątych m.in. automaty komórkowe, systemy wieloagentowe, sieci neuronowe, algorytmy genetyczne.

2. Automaty komórkowe

Wykorzystywane w modelowaniu dynamiki systemów miejskich modele automatów komórkowych można sklasyfikować ze względu na zdefiniowany w ich strukturze stopień determinizmu. Takie postępowanie tworzy trzy grupy modeli, które można traktować jako etapy modyfikacji (ewolucji) architektury automatów komórkowych wykorzystywanych w procesie modelowania. W pierwszej z nich znajduje się klasyczna konstrukcja automatu komórkowego składającego się z n -wymiarowej dyskretnej siatki komórek, przy czym każda z nich jest automatem. Przestrzeń siatki jest w całości i ściśle wypełniona komórkami. Stan każdej komórki jest określony jedną wartością ze skończonego zbioru wartości stanów. Zmiany wartości stanów komórki, określane jako jej ewolucja, zależą od poprzedniego stanu komórki oraz od stanów określonej w modelu liczby sąsiadów i są definiowane ustaloną dla danego automatu lokalną regułą. Formalnie automat komórkowy A definiujemy jako czwórkę: $A \equiv (\alpha, S, N, f)$ gdzie: α - oznacza uporządkowaną i regularną siatkę złożoną z komórek (najczęściej oznaczanych symbolem c), S - skończony zbiór stanów komórki, N - ustaloną liczbę jej sąsiadów oraz f - regułę ewolucji stanów automatu komórkowego (określaną także jako funkcja przejścia). Jeśli stan komórki w chwili t oznaczymy jako x_t , zaś stan zdefiniowanej liczby sąsiadów jako $u(x_t)$ to stan rozważanej komórki w kolejnym kroku czasowym można opisać jako: $x_{t+1} = f(u(x_t), x_t)$, gdzie f to omawiana wcześniej funkcja przejścia.

Klasyczne środowisko automatu komórkowego nie wspomaga na wymaganym poziomie rzeczywistej dynamiki systemu miejskiego głównie ze względu na brak zgodności nieskończonej, regularnej struktury siatki automatu z ograniczoną w przestrzeni, o nieregularnym podziale zagospodarowaną powierzchnią systemu rzeczywistego. Ponadto system rzeczywisty podlega zmianom wywołanym przez różne mechanizmy, zaś jego elementy składowe mogą odmiennie reagować na stosowane ogólne reguły wymuszające zmiany.

Automat komórkowy działając na ogólnych zasadach zdefiniowanych wcześniej nie wykazuje zdolności tworzenia zróżnicowanej, lokalnej dynamiki. Ponadto w klasycznej postaci automatu nie uwzględnia się możliwości oddziaływania długodystansowego, często występującego w rzeczywistym systemie, ograniczając sąsiedztwo do wyboru jednego z przyjętych jego modeli. Konstrukcja klasycznego automatu komórkowego jest deterministyczna. Przykładem modeli IS (Informal Settlement – swobodne zasiedlanie), które mogą być zaliczone do omawianej grupy są UGM (Urban Growth Model) oraz jego udoskonalona wersja SLEUTH (Slope, Land cover, Exclusion areas, Urban extent, Transportation network) opracowane przez grupę Clarke i in.(1997). Model SLEUTH jest symulatorem rozwoju miasta opartym na modelu automatu komórkowego. Akceptując podstawowe założenia

klasycznego automatu (regularna siatka, sąsiedztwo Moore'a, dwa wyróżnione stany komórki centralnej) odmiennie zdefiniowano lokalną funkcję przejścia jako zbiór pięciu odrębnych funkcji umożliwiających adaptację stanu komórki (automodyfikacja), stosownie do przyjętych parametrów, sąsiedztwa oraz tempa wzrostu, Clarke (2003). Mimo dość istotnego, w stosunku do klasycznego, rozszerzenia modelu CA model Clarke'a posiada szereg ograniczeń, do których można zaliczyć m.in. wyróżnienie jedynie dwóch stanów modelowanego obszaru (miasto i niemiasto) nieodwzorowujących całości zbioru rzeczywistych stanów wykorzystania terenu, ignorowanie tak istotnych parametrów, jak zatrudnienie, wzrost populacji lub czynników takich, jak polityka wzrostu miasta, czy oddziaływania społeczno-kulturalne – Sietchiping (2004), Schock (2000).

Do tej grupy można także zaliczyć rozszerzenia pokonujące ograniczenia klasycznych modeli CA, głównie związane z brakiem dopasowania kształtu i rozmiaru siatki struktury klasycznej modeli do nieregularnej i skończonej struktury obiektów rzeczywistych. Większość udanych rozwiązań wykorzystuje diagram Woronoja (określany także jako tessellacja Dirichleta lub komórki Woronoja). Omawiany model jest wynikiem dekompozycji dwuwymiarowej płaszczyzny zawierającej zbiór n punktów (w analizowanym przypadku geosymulacji) na zbiór komórek Woronoja wokół każdego obiektu. Zastosowanie tego modelu pozwala na dynamiczną zmianę kształtu i rozmiaru komórek, a także liczby sąsiadów – Shiyuan i in.(2004), O'Donoghue i in.(2001).

Kolejnym rozszerzeniem funkcjonalności CA jest wprowadzenie składowej stochastycznej do formuł reguły przejścia, przy zachowaniu deterministycznego modelu rozważanego obszaru. Do tej grupy modeli można zaliczyć wektorowe modele CA, m.in. Moreno i in. (2006) oraz rozszerzone modele CA, m.in. Engelen i in.(1997), Engelen (2004). Model wektorowy CA jest rozszerzeniem klasycznego modelu CA, w którym trzy z definiowanych pięciu elementów (przestrzeni, zbioru stanów, sąsiedztwa, reguł przejścia oraz czasu) są modyfikowane. W omawianej konstrukcji odmiennie są definiowane przestrzeń, sąsiedztwo oraz reguły przejścia. Przyjęty nieregularny podział przestrzeni dwuwymiarowej, zbliżony do modelu Woronoja, wymagał zdefiniowania funkcji pomocniczej g określającej wpływ sąsiedztwa (np. komórki a) na obiekt (komórkę b) centralną w postaci – Moreno i in. (2006): $g_{ab} \cong g(A(t), p, d_{ab})$, gdzie: $A(t)$ – powierzchnia komórki a w strukturze sąsiedztwa obiektu b w czasie t ; p prawdopodobieństwo przejścia ze stanu komórki b do stanu komórki a ; d_{ab} odległość pomiędzy środkiem geometrycznym komórki a a środkiem geometrycznym komórki b . Funkcja przejścia jest zależna od wielkości powierzchni komórki sąsiedztwa oraz wyżej zdefiniowanej funkcji oddziaływania g_{ab} .

W opracowaniu projektu SimLucia, który można zaliczyć do omawianej grupy, wykorzystano regularną siatkę CA reprezentującą analizowany obszar małej wyspy St.Lucia (Morze Karaibskie) łącznie z otaczającymi przybrzeżnymi wodami – Engelen i in.(1997). Każda z komórek może znajdować się w jednym ze zbioru 15 stanów reprezentujących wykorzystanie obszaru (na cele m.in. rolnicze, leśne, handel i usługi, osiedla wiejskie i miejskie). Ewolucja stanu komórki jest opisana kla-

sycznym schemat zależności przyszłego stanu komórki od stanu aktualnego oraz stanu wyróżnionego sąsiedztwa. Model sąsiedztwa znacznie odbiega od klasycznych i obejmuje 196 komórek przypisanych do 30 wyróżnionych pierścieni. Zastosowane w modelu reguły uszeregowano hierarchicznie zależnie od priorytetu zastosowania (priorytet 1: manualne interwencje dla obszarów szczególnych, priorytet 2: uwzględniający elewację analizowanego obszaru, priorytet 3: reguły w tym priorytecie stosowane do wybranych stanów z pełnego ich zbioru, m.in. naturalnej wegetacji, lasu, rolniczego, handlu i usług, określają potencjał przejścia w odniesieniu do każdej z wyróżnionych rodzajów aktywności). Formuła potencjału przejścia wyraża siłę, z jaką prawdopodobnie komórka zmieni dotychczasowy stan na stan określony potencjałem przejścia. Potencjał przejścia P_z jest obliczany jako suma ważona w postaci: $P_z \cong f(S_z)f(A_z)\sum_d \sum_i (w_{z,y,d} \times I_{d,i}) + \varepsilon_z$, gdzie: $f(S_z)$ funkcja wyrażająca odpowiedniość komórki dla zadanej aktywności z ; $f(A_z)$ funkcja wyrażająca dostępność danej komórki dla zadanej aktywności z ; $w_{z,y,d}$ parametr wagi odniesiony do komórki o położeniu y w obszarze sąsiedztwa (dystans $0 < d < 30$); i – indeks komórki w obszarze sąsiedztwa; $I_{d,i}$ współczynnik położenia komórki w obszarze sąsiedztwa; ε_z stochastyczny składnik reprezentujący zakłócenia.

Model SimLucia funkcjonuje na dwóch poziomach: poziomie makro opisującym podsystemy naturalne, ekonomiczne, społeczne reprezentowane zbiorem zmiennych i ich powiązaniem (w tym charakteryzującymi długodystansowe oddziaływanie) oraz na poziomie mikro opisującym krótko zakresowe oddziaływanie i lokalne decyzje. Współczynniki wzrostu ustalane na poziomie makro są zmiennymi wejściowymi dla modelu CA funkcjonującym na poziomie mikro.

Do drugiej grupy można także zaliczyć powiązania modelu CA z teorią zbiorów rozmytych. Do oszacowania zmiany wykorzystania obszarów jest w tym przypadku zastosowane deterministyczne podejście charakterystyczne dla klasycznego CA, natomiast algorytmy zmiany stanu są oparte na regułach rozmytych w ogólnej postaci IF..THEN. W przypadku definiowania wielu rozmytych przesłanek reprezentujących związek pomiędzy komórką centralną a jej sąsiadami stopień spełnienia reguły oblicza się łącząc wszystkie terminy za pomocą rozmytego AND (np. z pomocą operatora MIN). Do opisu sąsiedztwa wykorzystywany jest najczęściej model Moore'a. W prostych rozwiązaniach definiowane są dwie, trzy przesłanki (Singh, 2003; Giusti i in., 2005), natomiast w zaawansowanych tworzy się bazę wiedzy reguł. Przykładem tego podejścia jest projekt Mesogia-Mandelas i in. (2007). Zasadniczym celem modelu jest uwzględnienie wielu zróżnicowanych czynników wpływających na wzrost miasta poprzez zastosowanie dwóch oddzielnych mechanizmów rozmytego wnioskowania odniesionych do wewnętrznego zbioru „naturalnych” czynników charakteryzujących wewnętrzne cechy systemu (*propensity*) oraz stopnia wykorzystania obszaru na cele miejskie. W obu obszarach zostały wykorzystane konstrukcje reguł odniesione do zmian parametrów w wymienionych obszarach. Test modelu obejmujący lata 1994, 2001 oraz 2004 został przeprowadzony dla obszaru Mesogia (wschodni obszar basenu Attyki). Zgodność wyników uzyskanych z modelu z danymi referencyjnymi jest zaskakująca, mimo mniejszej efektywności procesu symulacyjnego w przypadku przetwarzania nowych obszarów miejskich.

W trzecim nurcie mieści się model DYNAMICA - Almeida i in. (2002). Model, wykorzystujący ujęcie stochastyczne do oszacowania zmiany wykorzystania obszaru oraz stochastyczne algorytmy zmiany stanu, został zastosowany do opisu dynamiki średniej wielkości miasta (Bauru - zachodnia część stanu Saõ Paulo - Brazylia). Wykorzystany model klasyczny CA w rozważanym podejściu zachowuje stałe liczby i rozmiary komórek w trakcie całego procesu symulacji. Zbiór stanów komórek odwzorowuje możliwe alternatywy zmiany wykorzystania analizowanego obszaru, zaś komórka przyjmuje w danej chwili jeden stan. Wyróżniono pięć możliwych zmian stanu: nie-miejskie na mieszkalne, nie-miejskie na przemysłowe, nie-miejskie na usługi, mieszkalne na usługi oraz mieszkalne na zróżnicowane wykorzystanie obszaru. Sąsiedztwo komórki opisane jest modelem Moore'a. Prawdopodobieństwo zmiany sposobu wykorzystania obszaru zostało oparte na podejściu „weight of evidence” (czynnik Bayesa). Dla określenia tempa przejścia dla każdego ze zdefiniowanych typów zmiany zagospodarowania obszaru wykorzystano proces Markowa pierwszego rodzaju. W ujęciu retrospektywnym wyniki symulacji wykazały znaczącą zgodność z danymi referencyjnymi.

Kolejnym krokiem rozszerzającym możliwości GIS jest integracja różnych modeli i podejść. Do głównych nurtów można zaliczyć powiązania sieci neuronowych z modelem CA oraz modeli CA z systemem wielo-agentowym. Pierwsza z wymienionych koncepcji łączy model sieci Kohonena nazwanej przez jego twórcę samoorganizującym się odwzorowaniem (Self-Organizing Map - SOM) z klasycznym modelem automatu komórkowego (CA). SOM jest siecią opartą na uczeniu konkurencyjnym, a zatem celem uczenia jest wytworzenie takiej struktury, która w najbardziej odpowiedni sposób będzie odwzorowywać zależności obserwowane w przestrzeni wektorów wejściowych. Warunkiem właściwego powiązania obu modeli jest przyjęcie identycznego rozmiaru siatki, co umożliwi przypisanie każdego neuronu do odpowiedniej komórki w siatce automatu. Zadaniem automatu komórkowego jest aktywacja lub dezaktywacja neuronu w kolejnym kroku aktualizacji wektora wag. Działanie zintegrowanych modeli umożliwia realizację dwóch odrębnych procesów: filtrowania danych wyjściowych oraz w wersji sprzężenia zwrotnego modyfikację reguł sąsiedztwa w sieci neuronowej. Publikowane wyniki działania prototypu w zakresie symulacji rozwoju systemu miejskiego budzą pewne nadzieje, mimo że istotne elementy omawianego podejścia (m.in. wstępne przetwarzanie danych wejściowych, wielowymiarowość danych wejściowych, identyfikacja mechanizmu sprzężenia zwrotnego), stanowią przedmiot dalszych prac badawczych – Castilla i in. (2007).

3. Systemy wielo-agentowe oraz integracja narzędzi

Znaczącym trendem w geosymulacji jest wykorzystanie systemów wielo-agentowych w celu modelowania trudnych lub niemożliwych do rozwiązania, dla jednego agenta lub systemu monolitycznego, problemów modelowania m.in.: handlu, reagowania kryzysowego, społecznej struktury. Widoczne są w proponowanych modelach dwa kierunki: symulacji zachowań izolowanych grup (pieszych, klientów) w ograniczonych przestrzeniach (przejść, pasaży) oraz modelowania wpływu zagro-

zeń kryminalnych na przestrzenną strukturę własności w systemie miejskim. Modelowanie izolowanych grup wymaga uwzględnienia zachowania indywidualnego agenta ze względu na aspekty badawcze. W sytuacji analizy zachowania klientów w pasażu handlowym główna uwaga musi być skupiona na wyposażeniu agenta w bazę wiedzy i właściwości niezbędne dla realizacji ustalonego planu lub planu tworzego ad hoc, w tym jego percepcję, procesy zapamiętywania, możliwości komunikowania się, podejmowania decyzji itp. Zindywidualizowane przejścia różnych agentów wzdłuż pasaży stanowią więc sekwencję działań realizowanych zgodnie z przyjętą listą (planem) lub wyborem preferowanej ścieżki w sytuacji jego braku. Sekwencja odwiedzin w poszczególnych kioskach pasaży może być przerywana czasem symulowanego posiłku, po czym agent wraca do kontynuacji (jeśli wstępna lista nie została wyczerpana) zakupów. Do modelowania systemu agentów wykorzystano środowisko MAGS (MultiAgent GeoSimulation) – Ali i in. (2008).

Zbliżone podejście jest prezentowane przez Torrensa (2007) w propozycji modelowania zachowania pieszych w ograniczonej przestrzeni z jednym wejściem i jednym wyjściem. Sytuacja przestrzenna jest wstępem do modelowania panicznych zachowań tłumu. W rozważanym przypadku architektura systemu modelującego, nawiązując do wcześniejszych opracowań tego autora dalej charakteryzowanych, obejmuje pięć podstawowych typów klas pozwalających na rozróżnienie zachowań agentów: World reprezentujący środowisko miejskie, także stanowiący klasę bazową dla innych klas modelu; WorldFixedObjects reprezentujący miejską infrastrukturę i zróżnicowane obiekty (w tym, drzewa, parkujące samochody itp.); MobileObjects reprezentujący indywidualne osoby, tłum, grupy oraz zróżnicowaną materię (dym, palące się elementy, rozprzestrzeniające się toksyny); Goals- klasa wykorzystywana do strukturyzacji zdarzeń; Probes - klasa wyposażona w funkcję selekcji, sortowania, wymiany z bazą danych systemu GIS oraz przestrzennej i statystycznej analizy danych. Agent modelujący osobę poruszającą się pieszo jest wyposażony w model w plan poruszania się w danej przestrzeni zarówno dla sytuacji swobodnego przemieszczania się, jak i sytuacji: wymagającej mobilizacji, indywidualnego postrzegania otoczenia, modyfikowania zachowania w sytuacji kolizji (mechanizm oparty na technikach AI wyboru zachowania w zależności od: czasu, miejsca, ilości), wyboru najkrótszej ścieżki do wyjścia. Wyniki symulacji wskazują na możliwość szerszego zastosowania modelu w analizie zachowań społecznych, czy interakcji klasy człowiek- środowisko.

Pewnym wariantem wykorzystania systemu wielo-agentowego (Multi-Agent Systems – MAS) jest model symulacji procesów ekologicznych i społecznych obszaru miejskiego – Grigoletti i in.(2007). W celu modelowania procesów zmian własności obszaru miejskiego jako funkcji zmiany odczuwalnego poziomu bezpieczeństwa symulację oparto na wyróżnieniu dziesięciu rodzajów agentów dwóch kategorii: agentów mobilnych reprezentujących policję, przestępców, nabywców, kupujących lub sprzedających nieruchomości oraz agentów statycznych reprezentujących obiekty typu: nieruchomości, posterunków policyjnych, więzienia. Dodatkowo zdefiniowane są w modelu automaty pomocnicze typu agenta wykorzystywane do pobierania informacji dotyczących symulacji. Model symulujący zjawisko stratyfikacji społecznej odwzorowanej na strukturze miasta oparto na uproszczonych

założeniach: skłonności osiedlania się grup ludności z wysokimi dochodami w obszarach o niskiej przestępczości (w modelu oznacza to obszary w pobliżu posterunków policyjnych), przy czym taka grupa może wybrać dowolne miejsce zgodne z własną preferencją, zaś grupy o średnich dochodach wybierają miejsca nie zajęte przez poprzednią grupę oraz charakteryzujące się średnim poziomem przestępczości. Grupa osób o niskich dochodach nie ma możliwości dokonania wyboru. Eksperyment symulacyjny przynosi po niewielu krokach oczekiwaną modyfikację struktury zasiedlania uwzględniającej poziom dochodów zamieszkałych grup osób. Przestrzenna struktura modelu odwzorowuje rzeczywisty obszar miejski miasta Porto Alegre (Brazylia).

Próbą integracji niektórych z omówionych mechanizmów wspomagających proces modelowania dynamiki systemów miejskich jest model OBEUS (Object-Based Environment for Urban Simulations) – Benenson i in. (2004). Jego podstawą jest środowisko systemów automatów GAS (Geographic Automata Systems) z obiektowo zorientowanym systemem GIS. Tak opracowane środowisko stanowi pewien ujednoczony schemat reprezentacji dyskretnej systemów geograficznych. Z technicznego punktu widzenia omawianych grup modeli system łączy dwa rodzaje modeli automaty komórkowe oraz system wielo-agentowy. W modelu wyróżnione są dwie klasy obiektów: obiekty stałe (o charakterystyce zbliżonej do CA i odwzorowujące m.in. sieć dróg, budynki, parki) oraz obiekty mobilne (odwzorowujące zachowania m.in.: pojazdów, pieszych, domowników). Definiowane w modelu obiekty konceptualnie stanowią automaty geograficznie zorientowane i z tego punktu widzenia modelowany miejski system jest odwzorowany jako zbiór geograficznych automatów (GAS). Zagadnienie modelowania sąsiedztwa obiektów nieruchomości jest rozwiązywane podobnie, jak w klasycznym automacie, natomiast relacje sąsiedztwa obiektów mobilnych stanowią pewne wyzwanie, wymuszając przeniesienie cech obiektów stałych na relacje między wyróżnionymi obiektami ruchomymi (właścicielami, czy domownikami obiektów stałych). W tym kontekście model OBEUS stanowi pewien krok w kierunku pełnej integracji omawianych modeli.

4. Alternatywne kierunki rozwoju i podsumowanie

Model automatu komórkowego stanowi wygodne narzędzie dla reprezentacji rzeczywistych, nieruchomych obiektów. Przedstawione przykłady zastosowań automatów w procesie symulacji dynamiki systemu miejskiego obrazują pewną formę ewolucji w zakresie wykorzystania ich możliwości (funkcji). Forma procesu adaptacji jest widoczna w stopniowym dostosowywaniu klasycznych założeń automatu do rozszerzanego zakresu modelowania potrzeb i właściwości analizowanego środowiska. Dominującą grupę stanowią modele zachowujące klasyczny podział obszaru w postaci abstrakcyjnej siatki automatu. Kierunkiem racjonalizacji w tym zakresie jest koncepcja wykorzystania diagramu Woronoja, zapewniająca większą zgodność kształtu i struktury całej siatki z rzeczywistą strukturą podziału modelowanego obszaru. Reguły decydujące o zachowaniu, określające wybór określonego stanu z dostępnego, dla odwzorowywanego obiektu, zbioru stanowiły, jak przedstawiono, przedmiot intensywnych poszukiwań i modyfikacji. Deklarowany zbiór stanów dostępnych dla komórki reprezentującej dany obszar obejmuje najczęściej sposób

(cele) jego wykorzystania – m.in. cele przemysłowe, usługi, mieszkaniowe, miejskie, rekreacyjne, chronione (parki, rezerwy). W analizowanych modelach metoda definiowania algorytmów reguł wyraźnie ewoluje od podejść deterministycznych do probabilistycznych oraz rozmytych. Kierunkiem zasadniczo zmieniającym podejście w modelowaniu dynamiki miasta jest integracja modeli automatów komórkowych oraz systemów wielo-agentowych odwzorowujących odpowiednio obiekty stałe i mobilne.

Zasadniczym celem zastosowania omawianych narzędzi jest symulacja dynamiki systemów miejskich. Mimo ustalonego sposobu postrzegania (paradygmatu) procesu wzrostu miasta (system miejski wykazuje właściwości samo-organizacji, jego wzrost charakteryzuje się pewnymi uniwersalnymi cechami, wiele miast wykazuje zbliżoną morfologię) nadal nie zostały opracowane jego podstawy teoretyczne. Analizowane zagadnienie należy do kategorii problemów o skrajnym stopniu złożoności. Postrzegana spójność systemu miejskiego jest w części wynikiem zróżnicowanych stopni swobody procesów samo-organizacji, a przy tym należy wskazać, że nie istnieje jeden czynnik konstytuujący strukturę miasta. Z tego punktu widzenia rozwój technologii modelowania dynamiki systemu miejskiego należy wiązać z dalszym doskonaleniem m.in. form reprezentacji, zwiększoną selektywnością definiowanych reguł i parametrów, rozszerzeniem modeli wzrostu o analizę wrażliwości elementów w sytuacjach m.in. awarii, katastrof. Zagadnienie poszukiwania bardziej efektywnych form reprezentacji można dostrzegać w adaptacji diagramów Voronoi, preferencji modelu sąsiedztwa Von Neumanna oraz dzielenia na partycje komórek, wydaje się jednak, że możliwości dalszego rozszerzania stanów i reguł w obrębie komórki są z różnych przyczyn ograniczone. Pewne rozwiązanie tej kwestii może stanowić powrót do modelu wielowarstwowego (m.in. podłoże, infrastruktura sieci kanalizacyjnej, wodociągowej, telekomunikacyjnej, energetycznej, pokrycie terenu, struktura demograficzna) i modelowania obszarów w oparciu o rozważane rodzaje modeli. Przy takim podejściu reprezentacja integrująca strukturę warstwową może wykorzystywać podejście obiektowe z zagnieżdżonymi atrybutami cech opisanych parametrami charakteryzującymi warstwy składowe.

Literatura

- Ali W., Moulin B. (2008) MultiAgent GeoSimulation of human behaviors in microscale geographic environment: The case of the shopping behavior in a mall; <http://ncg.nuim.ie/geocomputation/sessions/8B/8B2.pdf>.
- Almeida de C.M., Monteiro A.M., Câmara G. (2002) Modelling Urban Use Dynamics through Bayesian Probabilistic Methods in a Cellular Automaton Environment; www.ltid.inpe.br/geu/Revistas%20Internacionais/Claudia%20Almeida_Ceus.pdf.
- Almeida de C.M., Monteiro A.M.V., Câmara G., Soares-Filho B.S., Cerqueira G.C., Pennachin C.L., Batty M. (2005) GIS and remote sensing as tools for the simulation of urban land-use change; www.ltid.inpe.br/geu/Revistas%20Internacionais/Claudia%20Almeida_IJRS.pdf.
- Almeida de C.M. (2005) Simulation and Prediction of Urban Land Use Change as a Tool for Better Planning; <http://mtc-m12.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/sergio/2005/02.16.10.53/doc/mso167.pdf>

- Benenson I., Torrens P.M. (2004) Geographic Automata Systems: A New Paradigm for Integrating GIS and Geographic Simulation; http://www.geocomputation.org/2003/Papers/Benenson_Paper.pdf
- Castilla A.C., Blas N.G. (2007) Self-organizing map and cellular automata combined technique for advanced mesh generation in urban and architectural design; <http://www.foibg.com/ijitk/ijitk-vol02/ijitk02-4-p09.pdf>,
- Clarke K.C., Hoppe S., Gaydos L. (1997) A self-modifying cellular automata model of historical urbanization in the San Francisco Bay area; <http://www.geog.ucsb.edu/~kclarke/Papers/clarkehoppengaydos.pdf>,
- Clarke K.C. (2003) The Limit of Simplicity: Toward Geocomputational Honesty In Urban Modeling; http://www.geocomputation.org/2003/Papers/Clarke_Paper.pdf,
- Engelen G. (2004) Cellular Automata for modeling land use change driven by socioeconomic, environmental and policy factors; <http://www.proland.iung.pulawy.pl/materials/wp1/engelen.pdf>,
- Engelen G., Uljee I., White R. (1997) Vulnerability Assessment of Low-lying Coastal Areas and Small Islands to Climate Change and Sea Level Rise. Phase 2: Case Study St.Lucia. Report& SimLucia User Manual, Maastricht 1997; http://www.dpi.inpe.br/cursos/tutoriais/modelagem/software_demos/simlucia/SimLuciaManual.pdf
- Giusti E., Marsili-Libelli S. (2005) Modeling the submerged vegetation in the Orbetello lagoon with fuzzy cellular automata; http://www.dsi.unifi.it/~marsili/Papers/Orbetello_fuzzy.pdf,
- Grigoletti P.S., Rocha Costa da A.C. (2007) An Architecture Based on Multi-agent Systems and Geographic Database for the Development of Georeferenced Ecological And Social Simulations; <http://www.geoinfo.info/geoinfo2007/papers/S7P1.pdf>,
- Mandelas E.A., Hatzichristos Th., Prastacos P.(2007), A Fuzzy Cellular Automata Based Shell for Modeling Urban Growth – A Pilot Application in Mesogia Area; http://www.plan.aau.dk/~enc/AGILE2007/PDF/17_PDF.pdf,
- Moreno N., Marceau D.J. (2006) A vector-based cellular automata model to allow changes of polygon shape; http://www.ucalgary.ca/gcl/articles/Moreno_2006_Modeling.pdf,
- O'Donoghue D.P., Mullally E.-C. (2001) Extending Irregular Automata with Geometric Proportional Analogies; <http://www.cs.nuim.ie/~dod/pubs/07-gisruk.pdf>,
- Schock S. red, (2000) Projecting Land Use Change. A Summary of Model for Assessing the Effects of Community Growth and Change on Land Use Patterns; <http://faculty.washington.edu/pwaddell/Models/REPORTfinal2.pdf>,
- Shiyuan H., Deren L. (2004) Vector Cellular Automata Based Geographical Entity; <http://www.hig.se/~bjg/geoinformatics/files/p249.pdf>,
- Sietchiping R. (2004) A Geographic Information Systems and Cellular Automata-Based Model of Informal Settlement Growth; <http://eprints.infodiv.unimelb.edu.au/archive/00000592/01/Sietchiping.pdf>,
- Singh A.K. (2003) Modelling Land Use Cover Changes using Cellular Automata in a Geospatial Environment, Eschede 2003; http://www.itc.nl/library/Papers_2003/msc/gfm/anuj.pdf,
- Torrens P.M. (2007) Geospatial exoskeletons for automata in agent-base model (2007); <http://www.geosimulation.org/papers/2007-Torrens-agent-2007.pdf>,
- Urbański J. (1994) *Zrozumieć GIS. Analiza informacji przestrzennej*. Warszawa.
- Veerbeek W. (2004) SOUP: Self Organizing Urban Planning, prezentacja; <http://www.few.vu.nl/~decoi/lectures/wveerbeek.pdf>
- Zapart P. (1994) *Komputerowe systemy informacji przestrzennej*. Warszawa.

IBS PAN *Konf.*

46003

Bibl. podręczna

**Olgierd Hryniewicz, Andrzej Straszak, Jan Studziński
red.**

**BADANIA OPERACYJNE I SYSTEMOWE:
ŚRODOWISKO NATURALNE, PRZESTRZEŃ,
OPTYMALIZACJA**

Książka składa się z artykułów przedstawiających wyniki prac z dziedziny badań operacyjnych i systemowych, poświęconych środowisku naturalnemu i zarządzaniu nim, zwłaszcza w zakresie ochrony atmosfery, globalnego ocieplenia i walki z nim, jakości i zaopatrzenia w wodę. Tematyka ta jest rozszerzona o aspekty przestrzenne, regionalne i samorządowe, a także planowanie i funkcjonowanie infrastruktury. Tom zamykają prace metodyczne, dostarczające technik, będących podstawą prezentowanych zastosowań.

**ISBN 83-894-7519-7
EAN 9788389475190**

Instytut Badań Systemowych PAN
tel. (4822) 3810241 / 3810273 e-mail: biblioteka@ibspan.waw.pl