

Wojciech Drzewiecki\*

AUTOMATY KOMÓRKOWE JAKO NARZĘDZIE MODELOWANIA  
I SYMULACJI PROCESÓW PRZESTRZENNYCH  
W SYSTEMACH INFORMACJI GEOGRAFICZNEJ\*\*

---

## 1. Wprowadzenie

Model to abstrakcja rzeczywistości, jej uproszczona wersja. Takim modelem jest również baza danych systemu informacji geograficznej. Zawiera ona jedynie pewien fragment realnego świata, wybrane aspekty rzeczywistości, wystarczające z punktu widzenia założonego celu systemu.

Przyjęcie założenia, iż baza danych systemu informacji geograficznej stanowi model realnego świata, ma daleko idące implikacje. Jeśli bowiem posiadamy model jakiegoś systemu, to możemy prowadzić na nim eksperymenty, np. symulując zachodzące w tym systemie procesy. GIS wspiera nas także i w tym zadaniu, dostarczając niezbędnych narzędzi manipulowania danymi i modelowania kartograficznego. Jednak pomimo zaimplementowania w niektórych systemach GIS (np. Idrisi32 czy ArcGIS) narzędzi takich jak COM (*Component Object Model*) czy możliwości pisania skryptów działających iteracyjnie pojawiają się wciąż głosy (por. np. [16]) wskazujące na niewystarczające możliwości modelowania procesów dynamicznych, tj. zmiennych w czasie. Jedną z propozycji wzbogacenia możliwości systemów informacji geograficznej jest wykorzystanie możliwości oferowanych przez automaty komórkowe.

## 2. Automat komórkowy

Automat komórkowy jest pojęciem z dziedziny matematyki. Za jego twórców uważa się Janosa von Neumanna i Stanisława Ulama.

---

\* Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Geodezji Górniczej i Inżynierii Środowiska, Zakład Fotogrametrii i Informatyki Teledetekcyjnej

\*\* Praca wykonana w ramach badań statutowych AGH nr 11.11.150.459

Deterministyczny automat komórkowy definiowany jest jako [15]:

- sieć komórek  $\{i\}$  przestrzeni  $D$ -wymiarowej,
- zbiór  $\{s_j\}$  stanów pojedynczej komórki, zawierający  $k$  elementów,
- reguła  $F$  określająca stan komórki w chwili  $t+1$  w zależności od stanu w chwili  $t$  tej komórki i komórek ją otaczających

$$s_i(t+1) = F(\{s_j(t)\}), j \in O(i),$$

gdzie  $O(i)$  jest otoczeniem  $i$ -tej komórki.

Istnieją również automaty probabilistyczne, w których funkcja  $F$  zależy od zmiennej losowej.

Automat komórkowy traktować można zatem [12] jako prosty system dynamiczny, w którym zgodnie z określoną regułą automatu stan każdej komórki w kolejnych krokach czasowych zależy od poprzedniego stanu tej komórki i komórek w jej otoczeniu. Automat komórkowy działa iteracyjnie, w dyskretnej przestrzeni i dyskretnym czasie.

### 3. Automaty komórkowe a GIS

Podział przestrzeni na jednorodne komórki (któremu automaty komórkowe zawdzięczają swoją nazwę) nasuwa skojarzenia z rastrowymi systemami GIS. Należy w tym miejscu zaznaczyć, iż pomiędzy automatami komórkowymi a rastrowymi systemami informacyjnej geograficznej istnieją zasadnicze różnice [31].

Tym, co różni klasyczne automaty komórkowe od GIS, jest między innymi sposób traktowania przestrzeni. W przypadku automatów komórkowych dwuwymiarowa przestrzeń ma często postać torusa (krańce płaszczyzny łączą się ze sobą), podczas gdy w systemie GIS mamy do czynienia z fragmentem płaszczyzny posiadającym swoje nieprzekraczalne granice. Zbiór stanów pojedynczej komórki automatu porównać można do zbioru atrybutów komórki rastra. W przypadku GIS atrybuty przybierają jednak wartości ze zbioru liczb rzeczywistych, podczas gdy w automatach komórkowych zbiór stanów zawiera ich skończoną liczbę, a wartości należą do zbioru liczb całkowitych. Wagner [31] zwraca również uwagę na fakt, iż automaty komórkowe nie dają możliwości realizacji tak podstawowych funkcji GIS, jak wprowadzanie danych czy zapytania do bazy danych.

Niemniej jednak „uderzające podobieństwo” [31] automatów komórkowych i rastrowych systemów informacji geograficznej zachęcało do ich integracji. Koncepcja wykorzystania automatów komórkowych w zastosowaniach z dziedziny geografii pojawiła się już pod koniec lat 70. ubiegłego wieku. Pojęcie to wprowadził do geografii Tobler [28], przedstawiając propozycje wykorzystania automatów komórkowych w zagadnieniach z zakresu planowania przestrzennego. Pojawiające się w latach 80. prace dotyczące wykorzystania automatów komórkowych w geografii [9, 22] miały raczej charakter koncepcyjny i teore-

tyczny (por. [12]). Praktyczne próby modelowania z wykorzystaniem automatów komórkowych i GIS podjęte zostały z początkiem lat 90. XX w. [5, 11, 32]. W latach następnych liczni autorzy przedstawiali swoje propozycje integracji systemów GIS i automatów komórkowych [21, 27, 31, 37, 38].

Funkcjonalność automatów komórkowych może zostać zaimplementowana w systemach GIS poprzez zaprogramowanie odpowiedniego ciągu operacji, spośród których do najważniejszych zaliczyć należy różnego rodzaju zdefiniowane przez użytkownika filtry, nakładanie i reklasyfikację. W niektórych systemach funkcjonalność ta jest już częściowo dostępna dla użytkownika w postaci odpowiednich procedur (np. CELLATOM czy CA\_MARKOV w Idrisi32). Należy zaznaczyć, iż realizacja obliczeń może być w przypadku takiego rozwiązania czasochłonna (por. np. [31]). Stąd rozwiązania, w których automat komórkowy programowany jest poza systemem GIS, w taki jednak sposób, iż może się on z nim komunikować, pobierając dane i zwracając do systemu wyniki symulacji (por. np. [36]).

W automatach komórkowych wykorzystywanych w zastosowaniach geoinformatycznych przyjęto typowy dla GIS sposób organizacji przestrzeni. Z biegiem czasu wprowadzane były dalsze zmiany, tak iż obecnie w wielu przypadkach mówić należałoby raczej o rozwiązaniach opartych na automatach (ang. *cellular-based*) niż o automatach komórkowych sensu stricto.

Klasyczne automaty komórkowe stanowią „świat zamknięty” – nie zachodzi w ich przypadku żadne oddziaływanie pomiędzy przestrzenią będącą obszarem modelowania a światem zewnętrznym. Procesy i zdarzenia zachodzące w otoczeniu nie mają zatem żadnego wpływu na dynamikę modelu (por. [29]). W rzeczywistości jednak modelowany fragment realnego świata w różnoraki sposób połączony jest z otoczeniem, a jego funkcjonowanie zależy może od procesów czy zdarzeń w tym otoczeniu zachodzących. Zależności te mogą mieć również charakter hierarchiczny – np. modelowane miasto jest częścią regionu, itp. W geoinformatycznych zastosowaniach automatów komórkowych związki i oddziaływania ze światem zewnętrznym uwzględniane są zwykle w postaci nakładanych na model ograniczeń (ograniczenia te mogą zmieniać się w czasie, np. odzwierciedlając decyzje zawarte w planach zagospodarowania) lub algorytmów, według jakich działa reguła automatu (powiązanych np. z procesami zachodzącymi w makroskali) (por. [29, 33, 34]).

Automaty komórkowe wykorzystywane do modelowania procesów przestrzennych nie są również (w odróżnieniu od klasycznych automatów) homogeniczne. W automatach klasycznych przestrzeń dzielona jest na komórki jednolite z punktu widzenia działania automatu – stan każdej komórki może podlegać zmianom zgodnie z regułą automatu. W zastosowaniach geoinformatycznych wprowadzono dwa rodzaje komórek [33]: trwałe (ang. *fixed*) i funkcjonalne (ang. *functional*). W trakcie działania modelu zmianom ulegać może jedynie stan komórek funkcjonalnych – stan komórek trwałych pozostaje niezmienny.

Kolejne modyfikacje dotyczą sposobu traktowania otoczenia komórek automatu oraz definiowania reguł automatu (por. [6, 29]). W odniesieniu do otoczenia najważniejsze zmiany polegają na uwzględnieniu w rozważaniach odległości od danej komórki (np. poprzez wprowadzenie wagowania) oraz rezygnacji z zasady stacjonarności przestrzennej (ang. *spatial*

*stationarity*) otoczenia, wymagającej, by było ono definiowane w ten sam sposób dla każdej komórki (w automatach zmodyfikowanych dla GIS otoczenie definiowane dla poszczególnych komórek może różnić się np. w zależności od ich stanu). Zmiany dotyczące reguł automatu polegają nie tylko (jak była już mowa) na ich „otwarcu” na wpływ świata zewnętrznego (np. poprzez uzależnienie ich od procesów zachodzących w większej skali przestrzennej). Nastąpiło również zerwanie z zasadami uniwersalności i niezmienności – reguły mogą być różne dla komórek położonych w różnych fragmentach przestrzeni (np. zależne od rodzaju gleby) i zmieniać się w czasie.

Zmiany wprowadza się również do sposobu traktowania czasu. W klasycznych automatach komórkowych zmiany stanu komórek zachodzą równocześnie, w równych krokach czasowych. Pojawiają się jednak modele przestrzenne łączące GIS, automaty komórkowe i systemy agentowe, w których działanie agentów wprowadza asynchroniczność do automatów komórkowych – wywoływane przez nich zmiany stanu komórek zachodzą w różnych momentach [29].

#### 4. Przykłady zastosowań

Automaty komórkowe jako narzędzie modelowania i symulacji procesów przestrzennych w systemach informacji geograficznej znalazły jednak zastosowanie przede wszystkim w aplikacjach związanych z modelowaniem przestrzeni miejskiej oraz planowaniem przestrzennym. Efektywność procesu planowania w znacznej mierze zależy od znajomości mechanizmów funkcjonowania systemu przestrzennego, jakim jest miasto czy region oraz zdolności przewidywania konsekwencji podejmowanych decyzji i zalecanych działań. Stąd dążenie planistów do tworzenia zintegrowanych, dynamicznych modeli przestrzennych w sposób możliwie najwierniejszy odzwierciedlających rzeczywistość [4, 16].

Metodyka wykorzystywania zintegrowanych z systemami informacji geograficznej automatów komórkowych do modelowania zmian sposobu użytkowania terenu rozwijana jest w kilku ośrodkach naukowych na świecie. W wielu przypadkach prace te mają charakter teoretyczny bądź eksperymentalny. Niektóre z nich zaowocowały jednak wypracowaniem modeli o charakterze operacyjnym, znajdujących zastosowanie jako narzędzia wspomagające procesy planistyczne.

##### 4.1. Modele RIKS

Za jedną z ciekawszych metodologicznie propozycji tego rodzaju uznać z pewnością należy rodzinę modeli opracowaną w Holandii w Research Institute for Knowledge Systems (RIKS). Bazuje ona na wykorzystaniu tzw. ograniczanych automatów komórkowych (ang. *constrained cellular automaton*). Opis budowy i funkcjonowania tego typu modeli przedstawiony zostanie w oparciu o publikację White'a *et al.* [36].

Modele realizowane są w programie zintegrowanym z rastrowym systemem GIS – komórki automatu komórkowego są tożsame z komórkami rastra. Autorzy przyjęli założenie, iż modelowana przestrzeń nie jest jednorodna. Jej fragmenty (komórki rastra) różnią się pod względem cech fizycznych i środowiskowych (np. nachylenie, gleba itp.), obowiązujących na ich obszarze norm prawnych (np. zapisy planu zagospodarowania, obszary chronione itp.) oraz dostępności.

Trzy wymienione typy różnic uwzględnione są w modelu w postaci:

- 1) przydatności (ang. *suitability*),
- 2) strefowości (ang. *zoning*),
- 3) dostępności (ang. *accessibility*).

Dla każdej z komórek określana jest przydatność (w skali od 0 do 1) dla modelowanych rodzajów użytkowania. Przydatność określana jest w systemie GIS metodą analizy wielokryterialnej w oparciu o zawarte w bazie dane (np. gleby, nachylenie, poziom hałasu, itp.). Ponadto dla każdej komórki określona jest również przynależność do stref dopuszczających (lub nie) wystąpienie danego rodzaju użytkowania. Strefy te odpowiadają strefom określonym w planach zagospodarowania, granicom obszarów chronionych, itp., a ich zasięgi mogą zmieniać się w trakcie modelowania (co daje możliwość odzwierciedlenia ewentualnych zmian stanu prawnego). Dla każdej z komórek określone są również wartości wektora dostępności (ang. *accessibility*) reprezentujące wagę czynnika dostępności do sieci komunikacyjnej dla poszczególnych modelowanych typów użytkowania terenu. Dostępność obliczana jest jako funkcja odległości komórki od najbliższej komórki sieci, a wartości dostępności normalizowane są w zakresie od 0 do 1. Dla rodzajów użytkowania wymagających dobrej dostępności do sieci komunikacyjnej parametr oblicza się wg wzoru

$$A_j = a_j / (d + a_j),$$

natomiast dla rodzajów użytkowania, dla których preferowana jest zależność odwrotna (im dalej od dróg, tym lepiej), stosowany jest wzór

$$A_j = d / (d + a_j),$$

gdzie:

- $A_j$  – wartość dostępności dla użytkowania  $j$ ,
- $D$  – odległość komórki od najbliższej komórki sieci,
- $a_j$  – współczynnik charakteryzujący znaczenie czynnika dostępności dla użytkowania  $j$  (w niektórych wersjach modelu może być również zależny od rodzaju sieci komunikacyjnej).

Stan komórki w modelu oznacza dominujący sposób użytkowania na obszarze wewnątrz komórki. Występujące w modelu stany (sposoby użytkowania) podzielić można na dwie grupy: zmieniające się w trakcie modelowania i stałe. Te drugie nie ulegają zmianie, ale brane są pod uwagę w określaniu reguł automatu.

Otoczenie jest zdefiniowane jako okrąg o promieniu ośmiu komórek (196 komórek). Wpływ otoczenia obliczany jest dla każdego ze stanów, jakie może przyjąć dana komórka, według wzoru

$$N_j = \sum_x \sum_d w_{xkd} I_{xd}$$

gdzie:

- $N_j$  – wpływ otoczenia na przejście w stan  $j$ ,
- $w_{xkd}$  – waga dla wszystkich komórek  $x$  w stanie  $k$  w odległości  $d$ ,
- $I_{xd}$  – funkcja delta przyjmująca wartość 1, jeśli komórka znajduje się w stanie  $k$ , lub 0 – w innych przypadkach.

Wartości wag odzwierciedlać mogą pozytywny lub negatywny wpływ danego rodzaju użytkowania terenu na możliwość zaistnienia określonego użytkowania w rozważanej komórce. Zwykle siła zależności zwiększa się lub zmniejsza wraz z odległością, ale model umożliwia dowolne jej kształtowanie.

Dla każdej komórki, której stan ulec może zmianie, obliczany jest potencjał przejścia

$$P_j = v S_j Z_j A_j N_j$$

gdzie:

- $P_j$  – potencjał dla użytkowania  $j$ ,
- $v$  – skalowalny parametr stochastyczny,
- $S_j$  – przydatność dla użytkowania  $j$ ,
- $Z_j$  – wartość parametru strefowości dla użytkowania  $j$ ,
- $A_j$  – wartość parametru dostępności dla użytkowania  $j$ ,
- $N_j$  – wpływ otoczenia dla użytkowania  $j$ .

Reguła automatu ma postać: „Zmień użytkowanie w komórce na to, dla którego ma ona największą wartość potencjału, biorąc pod uwagę wymaganą ilość komórek określoną w danej iteracji dla poszczególnych rodzajów użytkowania przez model w skali makro”.

Realizacja powyższej reguły polega na uporządkowaniu komórek według wartości ich potencjału dla poszczególnych rodzajów użytkowania, a następnie przechodzeniu ich do danego rodzaju użytkowania, poczynawszy od tych o najwyższym potencjale. Po osiągnięciu wymaganej liczby komórek dla danego rodzaju użytkowania potencjał dla tego rodzaju użytkowania jest ignorowany.

Modelowanie ilości komórek o określonym rodzaju użytkowania wymaganych w poszczególnych krokach czasowych (model w skali makro) może odbywać się na różne sposoby (por. [16]). W najprostszym przypadku wykorzystywane są linie trendu – jedna dla każdego rodzaju użytkowania (np. [34]). Wartości te mogą być również określane poprzez zintegrowany model globalny (traktujący modelowany obszar jako całość) uwzględniający procesy demograficzne, społeczne, ekonomiczne i in. (np. [33, 35]).

## 4.2. Model MOLAND

Najbardziej zaawansowane rozwiązanie (oparte na modelach RIKS) zaimplementowano w modelu MOLAND (*Monitoring Land Use/Cover Dynamics*) zastosowanym m.in. na obszarze metropolitalnym Dublinia [3, 16]. Autorzy modelu postawili sobie za cel skonstruowanie działającego w środowisku GIS systemu umożliwiającego symulację zmian sposobu użytkowania terenu i wyposażonego w narzędzia wspierania procesu decyzyjnego. System informacji geograficznej dostarcza narzędzi umożliwiających wprowadzanie danych, zarządzanie nimi, manipulowanie, przeprowadzanie analiz przestrzennych i wizualizację. Modelowanie zmian sposobu użytkowania przeprowadzane jest przy użyciu ograniczonego automatu komórkowego. Komórki automatu, tożsame z komórkami rastra GIS, odpowiadają fragmentom modelowanego obszaru, a ich stany – najważniejszym rodzajom użytkowania terenu, jakie na tym obszarze występują (lub mogą występować). Reguły automatu sprzężone są zarówno z zachodzącymi w środowisku procesami fizycznymi, jak i procesami społeczno-ekonomicznymi. Sprzężenie to jest dwukierunkowe, tzn. z jednej strony procesy te kształtują reguły automatu, a z drugiej – zachodzące zmiany sposobu użytkowania wpływają na zachodzące w otoczeniu procesy.

System pomyślany jest jako narzędzie wspomagające proces planistyczny w skali regionalnej i obejmuje trzy poziomy hierarchiczne: globalny (cały obszar modelowania), regionalny (poszczególne jednostki administracyjne) i lokalny (komórki o powierzchni 4 ha). Modelowanie odbywa się w dwóch skalach: makro (obejmującej poziom globalny i regionalny) oraz mikro (na poziomie lokalnym).

Na poziomie globalnym w oparciu o zakładane scenariusze rozwoju ekonomicznego i demograficznego prognozowane są dla modelowanego obszaru zmiany wielkości populacji oraz liczby miejsc pracy w poszczególnych sektorach gospodarki. Wyniki modelowania w postaci linii trendu wprowadzane są do modelu w skali regionalnej.

W skali regionalnej modelowane jest przemieszczanie się mieszkańców oraz miejsc pracy pomiędzy poszczególnymi jednostkami administracyjnymi, w oparciu o określaną dla nich atrakcyjność (jako miejsca zamieszkania i lokowania działalności ekonomicznej) oraz ich pozycję w systemie (z uwzględnieniem sieci dróg i sieci transportu publicznego). Autorzy systemu podkreślają, iż na atrakcyjność poszczególnych jednostek administracyjnych wpływają wyniki modelowania na poziomie lokalnym – na ich podstawie obliczane są parametry określające jakość przestrzeni (ang. *quality of the space*). Na poziomie tym wyróżnić można cztery submodele: ekonomiczny (zatrudnienie w poszczególnych rodzajach działalności i relokacja miejsc pracy pomiędzy regionami), demograficzny (zapotrzebowanie na mieszkania w poszczególnych regionach), transportowy (przemieszczanie się ludności pomiędzy regionami) oraz użytkowania (przekształcający wyniki modelowania na poziomie regionalnym na wielkość zapotrzebowania powierzchni dla poszczególnych rodzajów użytkowania – wielkość ta stanowi dane wejściowe do modelu w skali lokalnej).

W skali lokalnej ma miejsce modelowanie sposobu użytkowania terenu z wykorzystaniem automatu komórkowego. W dublińskiej aplikacji systemu MOLAND określono 22 klasy użytkowania terenu. Sześć z nich (sieć drogowa i kolejowa, lotniska, miejsca eksploatacji kopalni, składowiska odpadów, wody, sztuczne nierolnicze obszary porośnięte ro-

ślinnością) ma charakter trwały – dla komórek w tych klasach nie następuje zmiana sposobu użytkowania. Kolejnych sześć (grunty orne, pastwiska, lasy, zarośla, mokradła, łąki) ma charakter pasywny – są przedmiotem modelowania, ale zapotrzebowanie na tego rodzaju tereny nie jest określone w modelu, w odróżnieniu od funkcji aktywnych (zabudowa zwarta gęsta, zabudowa zwarta umiarkowana, zabudowa rozproszona, zabudowa rozproszona rzadka, tereny przemysłowe, tereny handlowe, tereny usług, tereny portowe, nieużytki), dla których wielkość potrzebnej powierzchni ustalana jest na poziomie regionalnym.

Model zweryfikowany został dla obszaru metropolitalnego Dublina w oparciu o dane z lat 1968 i 1998. Wyniki weryfikacji zdaniem autorów [3] pozwalają na stwierdzenie, iż model może stanowić narzędzie symulacji proponowanych rozwiązań planistycznych.

Model MOLAND zastosowano również do modelowania rozwoju Lagos w Nigerii [2]. W tym przypadku model skalibrowano w oparciu o dane z lat 1984–2000 i przeprowadzono symulację dla następujących 20 lat (tj. do roku 2020). Zdaniem autorów uzyskane rezultaty potwierdziły efektywność modelu.

#### 4.3. Model SLEUTH

W Stanach Zjednoczonych modelem wykorzystywanym w licznych studiach i symulacjach procesów urbanizacji i zmian sposobu użytkowania jest SLEUTH (por. [7]). Model ten stosowano do prognozowania rozwoju (w skali 20–50 lat) obszaru San Francisco, Washington-Baltimore [8], południowej Kalifornii [13], Chicago [40], Atlanty [20], Tampa Bay [41, 42] oraz Lizbony i Porto [23]. Wykorzystywano go również do oceny proponowanych strategii rozwoju przestrzennego [14]. W ramach realizowanego obecnie projektu Gigalopolis [30] model wykorzystywany jest do wspierania procesu planowania przestrzennego w regionie południowego wybrzeża Kalifornii. Szczegółowy opis modelu zawierają publikacje [8, 30].

Nazwa modelu powstała z pierwszych liter warstw zawierających dane wejściowe: *Slope* (nachylenie terenu w procentach), *Land cover* (pokrycie/użytkowanie), *Exclusion* (wyłączenia – warstwa określająca ograniczenia dotyczące zabudowy), *Urbanization* (zabudowa), *Transportation* (sieć transportowa), *Hillshade* (cieniowany NMT – używany jako tło dla prezentacji wyników).

W modelu tym zmiana stanu komórki kontrolowana jest w oparciu o pięć parametrów [14, 30]:

- 1) *dispersion coefficient* – kontroluje możliwość przypadkowego wybrania piksela jako miejsca nowej zabudowy;
- 2) *breed coefficient* – określa prawdopodobieństwo, iż nowo zabudowane miejsce stanie się nowym centrum urbanizacji;
- 3) *spread coefficient* – określa prawdopodobieństwo, z jakim piksel będący nowym centrum urbanizacji będzie generował urbanizację sąsiadów;
- 4) *slope coefficient* – kontroluje wpływ nachylenia terenu na powstawanie zabudowy;
- 5) *road gravity coefficient* – kontroluje wpływ, jaki na powstawanie zabudowy ma bliskość sieci komunikacyjnej.

Parametry te wraz z informacją o ograniczeniach w zabudowie (całkowitych lub częściowych) stanowią podstawę określenia reguł automatu.

Symulowane mogą być cztery typy rozwoju:

- 1) rozwój spontaniczny (ang. *spontaneous growth*) – przypadkowa urbanizacja terenu
- 2) powstawanie nowych centrów rozwoju (ang. *new spreading center growth*),
- 3) powiększanie się obszarów zurbanizowanych (ang. *edge growth*),
- 4) urbanizacja wzdłuż ciągów komunikacyjnych (ang. *road-influenced growth*).

Implementacja modelu przebiega w dwóch fazach. W fazie kalibracji analizowane są dane historyczne. Do jej przeprowadzenia niezbędne jest wprowadzenie danych o obszarach zabudowanych (minimum dla czterech okresów), sieci transportowej (minimum dwa stany), użytkowaniu (minimum dwa stany) oraz nachyleniu terenu i ograniczeniach zabudowy. Reguły sformułowane w trakcie kalibracji stanowią podstawę do symulacji dalszego rozwoju. Model ma zdolność samoistnej modyfikacji reguł w oparciu o symulacje przeprowadzane z wykorzystaniem techniki Monte Carlo.

#### 4.4. Inne przykłady

Wu [38] wykorzystuje zintegrowany z systemami informacji geograficznej automat komórkowy o regułach określanych z wykorzystaniem logiki rozmytej, w celu modelowania rozprzestrzeniania się zabudowy o charakterze miejskim na przyległe tereny rolnicze. Szerszy zakres wykorzystania logiki rozmytej proponują [19]. W ich ujęciu wykorzystywana jest ona nie tylko do formułowania reguł działania automatu, ale również do określania stanów komórek (różna wartość funkcji przynależności do zbiorów „zabudowany” i „niezabudowany”).

W odpowiedziach na pytanie, jak określać reguły automatów komórkowych przeznaczonych do modelowania przestrzeni miejskiej i zachodzących zmian użytkowania terenu poza wykorzystaniem zbiorów rozmytych pojawiają się m.in. propozycje wykorzystania metod probabilistycznych [1], sieci neuronowych [17, 18], regresji wielokrotnej [26], metody Monte Carlo [7] oraz analizy wielokryterialnej [39].

Spośród innych przykładów zastosowań automatów komórkowych zintegrowanych z GIS warto przytoczyć m.in. modelowanie zmian krajobrazu zachodzących na obszarach użytkowanych rolniczo procesów deforestacji i wtórnej sukcesji lasów [24] czy symulację rozwoju nielegalnych osiedli (slumsów) w metropoliach krajów rozwijających się [25].

Ciekawe wykorzystanie automatów komórkowych proponują autorzy [43]. Opracowali oni przestrzenno-czasowy model służący ocenie zapotrzebowania na miejsca składowania odpadów w szybko rozwijających się obszarach zurbanizowanych i alokacji składowisk. W skład modelu wchodzi automat komórkowy służący do symulowania rozwoju przestrzennego miasta, arkusz kalkulacyjny, w którym szacowane jest zmieniające się w czasie zapotrzebowanie na powierzchnię konieczną dla składowania odpadów oraz system GIS przeznaczony do modelowania przydatności terenu pod składowiska oraz alokacji składowisk. Model został przetestowany na obszarze aglomeracji Porto Alegre w Brazylii.

## 5. Podsumowanie

Świat rzeczywisty jest zbyt skomplikowany, by jego budowa i funkcjonowanie mogły zostać dokładnie odtworzone, nawet przy zastosowaniu najdoskonalszych systemów komputerowych. Od modeli powinniśmy zatem nie tyle oczekiwać zdolności bezbłędnego przewidywania stanów modelowanego systemu, co raczej traktować je jako narzędzie pomagające nam zrozumieć otaczającą nas rzeczywistość i wspomagające podejmowanie decyzji.

Od pierwszych propozycji wykorzystania automatów komórkowych do modelowania procesów przestrzennych minęło nieco ponad ćwierć wieku. Obecnie stały się jednym z narzędzi wzbogacających możliwości modelowania procesów dynamicznych w systemach informacji geograficznej. Można przypuszczać, iż wraz z pojawianiem się w komercyjnych pakietach GIS specjalistycznych procedur ułatwiających ich stosowanie (por. np. IDRISI 32) zakres ich wykorzystania będzie się poszerzał.

## Literatura

- [1] Almeida C.M., Batty M., Monteiro A.M.V., Camara G., Soares-Filho B.S., Cerqueira G.C., Pennachin C.L.: *Stochastic cellular automata modeling of urban land use dynamics: empirical development and estimation*. Computers, Environment and Urban Systems, vol. 27, 2003
- [2] Barredo J.I., Demicheli L.: *Urban sustainability in developing countries' megacities: modeling and predicting future urban growth in Lagos*. Cities, vol. 20, No 5, 2003
- [3] Barredo J.I., Kasanko M., McCormick N., Lavalle C.: *Modelling dynamic spatial processes: simulation of urban future scenarios through cellular automata*. Landscape and Urban Planning, vol. 64, 2003
- [4] Barredo J.I., Lavalle C., Demicheli L., Kasanko M., McCormick N.: *Sustainable urban and regional planning: The MOLAND activities on urban scenario modelling and forecast*. Luxembourg, European Commission, Joint Research Centre, Institute for Environment and Sustainability, Office for Official Publications of the European Communities 2003
- [5] Batty M., Xie Y.: *From cells to cities*. Environment and Planning B: Planning and Design, vol. 19, 1994
- [6] Cecchini A., Rinaldi E.: *Cellular Automata: A Useful and Effective Tool for Reading, Interpreting, Describing, Forecasting the Behaviour of Urban Systems*. 17th International Conference of the System Dynamics Society "System Thinking for New Millennium", Wellington, New Zealand, 2000 (<http://www.systemdynamics.org/conf2000/index.htm>)
- [7] Clarke K.C., Hoppen S., Gaydos L.J.: *A self-modifying cellular automaton model of historical urbanization in the San Francisco Bay area*. Environment and Planning B: Planning and Design, vol. 24, 1997

- 
- [8] Clarke K.C., Gaydos L.J.: *Loose-coupling of cellular automaton model and GIS: longterm urban growth prediction for San Francisco and Washington/Baltimore*. International Journal of Geographical Information Science, vol. 12, No 7, 1998
- [9] Couclelis H.: *Cellular worlds: a framework for modeling micro-macro dynamics*. Environment and Planning A, vol. 17, 1985
- [10] Couclelis H.: *Macrostructure and microbehavior in a metropolitan area*. Environment and Planning B: Planning and Design, vol. 16, 1989
- [11] Embutsu I., Baba K., Goodchild M., Church R., Takeyama M.: *A cellular automaton modeling for urban heat island mitigation*. Proceedings of the GIS/LI '94 American Congress on Surveying and Mapping, Bethesda 1994
- [12] Engelen G., Geertman S., Smits P., Wessels C.: *Dynamic GIS and Strategic Physical Planning Support: a practical application to the Ijmond / Zuid-Kennemerland region*. [w:] Stillwell J., Geertman S., Openshaw S. (red.), Geographical Information and Planning, Springer 1999
- [13] Herold M., Goldstein N., Clarke K.: *The spatiotemporal form of urban growth: measurement, analysis and modeling*. Remote Sensing of Environment, vol. 86, 2003
- [14] Jantz C.A., Goetz S.J., Shelley M.K.: *Using the SLEUTH urban growth model to simulate the impacts of future policy scenarios on urban land use in the Baltimore-Washington metropolitan area*. Environment and Planning B: Planning and Design, vol. 30, 2003
- [15] Kułakowski K.: *Automaty komórkowe*. Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie, Ośrodek Edukacji Niestacjonarnej 2000
- [16] Lavalley C., Barredo J.I., Mc Cormick N., Engelen G., White R., Uljee I.: *The MOLAND model for urban and regional growth forecast. A tool for the definition of sustainable development paths*. Luxembourg, European Commission, Joint Research Centre, Institute for Environment and Sustainability 2004
- [17] Li X., Yeh A.G.O.: *Calibration of cellular automata by using neural networks for the simulation of complex urban systems*. Environment and Planning A, vol. 33, 2001
- [18] Li X., Yeh A.G.O.: *Neural-network-based cellular automata for simulating multiple land use changes using GIS*. International Journal of Geographical Information Science, vol. 16, No 4, 2002
- [19] Liu Y., Phinn S.R.: *Modelling urban development with cellular automata incorporating fuzzy-set approaches*. Computers, Environment and Urban Systems, vol. 27, 2003
- [20] Lo C.P., Yang X.: *Drivers of land-use/land-cover changes and dynamic modeling for the Atlanta, Georgian Metropolitan area*. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, vol. 68, 2002
- [21] Park S., Wagner D.F.: *Incorporating Cellular Automata simulators as analytical engines in GIS*. Transactions in GIS, vol. 2, No 3, 1997
- [22] Phipps M.: *Dynamical behavior of cellular automata under constraints of neighbourhood coherence*. Geographical Analysis, vol. 21, 1989
- [23] Silva E.A., Clarke K.C.: *Calibration of the SLEUTH urban growth model for Lisbon and Porto, Portugal*. Computers, Environment and Urban Systems, vol. 26, 2003

- [24] Soares-Filho B.S., Cerqueira G.C., Pennachin C.L.: *DINAMICA – a stochastic cellular automata model designed to simulate the landscape dynamics in an Amazonian colonization frontier*. *Ecological Modelling*, vol. 154, 2002
- [25] Sietchiping R.: *A Geographic Information Systems and Cellular Automata-Based Model of Informal Settlement Growth*. Australia, School of Anthropology, Geography and Environmental Studies, The University of Melbourne 2004 (doctoral thesis)
- [26] Sui D.Z., Zeng H.: *Modeling the dynamics of landscape structure in Asia's emerging desakota regions: a case study in Shenzhen*. *Landscape and Urban Planning*, vol. 53, 2001
- [27] Takeyama M., Couclelis H.: *Map dynamics: integrating cellular automata and GIS through Geo-Algebra*. *International Journal of Geographical Information Science*, vol. 11, No 1, 1997
- [28] Tobler W.: *Cellular geography*. [w:] Gale S., Olsson G. (red.), *Philosophy in Geography*, Dordrecht, D Reidel 1979
- [29] Torrens P.M.: *How cellular models of urban systems work (1. Theory)*. Working Paper Series, Paper 28. University College London, Centre for Advanced Spatial Analysis 2000
- [30] USGS: *Project Gigalopolis: urban and land cover modeling*. US Geological Survey, 2003 (<http://www.ncgia.ucsb.edu/projects/gig/>)
- [31] Wagner D.F.: *Cellular automata and geographic information systems*. *Environment and Planning B: Planning and Design*, vol. 24, 1997
- [32] White R., Engelen G.: *Cellular automata and fractal urban form: a cellular modelling approach to the evolution of urban landuse patterns*. *Environment and Planning A*, vol. 25, 1993
- [33] White, R., Engelen G.: *Cellular automata as the basis of integrated dynamic regional modelling*. *Environment and Planning B*, vol. 24, 1997
- [34] White, R., Engelen G., Uljee I. : *The use of constrained cellular automata for high-resolution modelling of urban land use dynamics*. *Environment and Planning B*, vol. 24, 1997
- [35] White, R., Engelen G., Uljee I.: *Modelling Land Use Change with Linked Cellular Automata and Socio-Economic Models: A Tool for Exploring the Impact of Climate Change on the Island of St. Lucia*. [w:] Hill M., Aspinall R. (red.), *Spatial Information for Land Use Management*, Gordon and Breach 2000
- [36] White, R., Straatman B., Engelen G.: *Planning Scenario Visualization and Assessment: A Cellular Automata Based Integrated Spatial Decision Support System*. [w:] Goodchild M.F., Janelle D. (red.), *Spatially Integrated Social Science*, New York, USA, Oxford University Press 2004
- [37] Wu F.: *SimLand: a prototype to simulate land conversion through the integrated GIS and CA with AHP-derived transition rules*. *International Journal of Geographical Information Science*, vol. 12, No 1, 1998
- [38] Wu F.: *Simulating urban encroachment on rural land with fuzzylogic-controlled cellular automata in a geographical information system*. *Journal of Environmental Management*, vol. 53, 1998
- [39] Wu F., Webster C.J.: *Simulation of Land Development through the Integration of Cellular Automata and Multicriteria Evaluation*. *Environment and Planning B*, vol. 25, 1998

- 
- [40] Xian G., Acevedo W., Nelson J.: *Urban development in the Chicago area – a dynamic model study*. Proceedings of the Fourth International Conference on Integrating GIS and Environmental Modeling (GIS/EM4), Banff, Alberta, Canada 2000
- [41] Xian G., Crane M.: *Assessments of urban growth in the Tampa Bay watershed using remote sensing data*. Remote Sensing of Environment, vol. 97, 2005
- [42] Xian G., Crane M., Steinwand D.: *Dynamizing modeling of Tampa Bay urban development using parallel computing*. Computers and Geosciences, vol. 31, 2005
- [43] Leao S., Bishop I., Evans D.: *Spatial-temporal model for demand and allocation of waste landfills in growing urban regions*. Computers, Environment and Urban Systems, vol. 28, No 4, 2004