Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji, Vol. 21, 2010, s. 459–470
ISBN 978-83-61576-13-6

UŻYCIE AUTOMATÓW KOMÓRKOWYCH DO MODELOWANIA I SYMULACJI ZJAWISK PRZESTRZENNYCH

THE USE OF CELLULAR AUTOMATA FOR MODELING AND SIMULATION OF SPATIAL PHENOMENA

Ireneusz Wyczałek

Zakład Geodezji, Politechnika Poznańska

SŁOWA KLUCZOWE: Automaty Komórkowe, modelowanie przestrzenne, symulacje przestrzenne

STRESZCZENIE: Wiedza o charakterze zjawisk na danym terenie stanowi podstawę prognozowania ich zmian wskutek planowanego wdrożenia decyzji przestrzennych. Jednym ze sposobów wspomagania prognozowania jest symulacja, czyli dynamiczny model danego zjawiska. Powtarzanie Symulacji przy zmieniających się parametrach jest jednym z bardziej efektywnych sposobów wnioskowania decyzyjnego. Zjawiska przestrzenne charakteryzują się powtarzalnością lokalnych interakcji między sąsiadującymi ze sobą fragmentami powierzchni. Suma tych lokalnych procesów daje obraz zróżnicowanego przestrzennie zjawiska, zachodzącego na rozległych nieraz obszarach. Narzędziem, które bardzo dobrze odzwierciedla te lokalne interakcje są automaty komórkowe. W modelowaniu zjawisk przyrodniczych komórka-automat odzwierciedla pojedynczy fragment danego składnika środowiska. Zakładając interakcje, między różnymi składnikami modelu lub ich relacje z otoczeniem, możemy tak opisać działanie automatu, aby realizował je poprzez podatność na bodźce zewnętrzne lub oddziaływanie na stan otoczenia. W ramach prezentowanej pracy wdrożono automaty ukierunkowane na przekształcanie otoczenia, nazwane *Interaktywnymi Automatami Komórkowymi* (IAK). Podczas, gdy dane zmieniają swój stan w ograniczonym zakresie wartości, to w zależności od tego stanu oraz stanu otoczenia (modelowanego zjawiska) powodują zmiany zarówno w przestrzeni automatów jak i w modelowanym otoczeniu. Wykazano, że tak sformalizowane działanie ma szeroki zakres zastosowań przestrzennych, różniących się jedynie postacią reguły zmian. Potwierdzają to wyniki adaptacji takiego formalizmu do modelowania terenu, poklasyfikacyjnej agregacji obiektów obrazowych oraz symulacji obiegu wody.

1. WPROWADZENIE

Podstawą podejmowania właściwych decyzji administracyjnych, gospodarczych i ekonomicznych jest wnikliwa ocena zjawisk lub procesów przestrzennych, na które wpływa dana decyzja. Na poprawne rozpoznanie zjawiska lub procesu ma wpływ wiedza o jego aktualnym stanie oraz znajomość zasad rządzących jego przebiegiem. Analiza wpływu obiektów lub zjawisk przestrzennych na rozpatrywane wersje postępowania stanowi rutynowe działanie w wielokryterialnych procedurach wspomagających podejmowanie decyzji (Eastman i in., 1995, Malczewski, 1999). Rozważne analizy decyzyjne rozpatrują nie tylko wpływ obiektów na cel decyzyjny, ale też – na skutki wyboru poszczególnych

wariantów działania lub zaniechania tych działań. Z tego powodu dojrzała analiza wymaga oceny wielu wariantów w oparciu o różne kryteria. W każdym przypadku wynik analizy decyzyjnej zależeć będzie w równiej mierze od przyjętego sposobu postępowania jak i od opisu rozpatrywanych obiektów lub zjawisk. Opis ten zwykle przyjmuje postać *modelu*, czyli, jak to określa jedna z definicji zawartych w World English Dictionary, *uproszczonej reprezentacji albo opisu systemu lub skomplikowanych obiektów, szczególnie tych, które mają na celu ułatwienie obliczeń i prognoz*. Tak rozumiany model jest zatem opisem danego systemu lub zjawiska w formalny, uproszczony i uporządkowany wewnętrznie sposób. W przypadku problemów dotyczących przestrzeni środowiskiem analiz decyzyjnych może być GIS (Jose i Lucien, 1993; Chakhar i Martel, 2003), a sposobem wizualizacji wyników – mapa decyzyjna (Wyczałek, 2005).

W analizach przestrzennych najczęściej rozpatrywane są takie czynniki jak własność lub sposób użytkowania terenu oraz jego ukształtowanie i pokrycie. Przedmiotem analizy są ponadto relacje między różnymi kategoriami obiektów oraz zjawiska oddziałujące na te obiekty. Właściwości lub zachowania obiektów albo zjawisk mają z reguły globalny charakter, a jednocześnie charakteryzują się specyfiką związaną z danym miejscem i sytuacją. Istotny jest też fakt, że poszczególne sąsiadujące ze sobą jednostkowe elementy powierzchniowe danej kategorii posiadają zbliżone cechy lub zachowania, a ich zmiana, z reguły ewolucyjna, następuje w odniesieniu do pewnej grupy obiektów. Powyższa reguła jest zbieżna z Pierwszym Prawem Geografii Toblera (Miller, 1984), a odstępstwa od niej zwykle nie są uwzględniane w modelu danej cechy lub zachowania.

Zjawiska przestrzenne takie jak hałas, rozprzestrzenianie się zanieczyszczeń lub skażenia wody, gleby lub powietrzna, procesy erozyjne lub sedymentacyjne charakteryzują się powtarzalnością lokalnych interakcji zachodzących między sąsiadującymi ze sobą fragmentami terenu. Suma tych lokalnych procesów daje obraz zjawiska zróżnicowanego przestrzennie i zachodzącego na rozległych nieraz obszarach. Jedną ze znanych i powszechnie stosowanych metod badania zjawisk przestrzennych jest symulacja, czyli dynamiczny model analizowanego zjawiska. Powtarzanie symulacji przy zmieniających się parametrach, połączone z oceną wyników tych zmian jest jednym z bardziej efektywnych sposobów wnioskowania decyzyjnego. Lokalne interakcje między obiektami związanymi z przestrzenią najlepiej odzwierciedlają *automaty komórkowe*. Stanowią one zwarty zbiór figur elementarnych, najczęściej regularnych, wypełniających w całości określoną przestrzeń i wykonujących równocześnie to samo zadanie, którego efektem jest zmiana własnego stanu w oparciu o analizę informacji o stanie elementów z najbliższego otoczenia.

Metoda automatów komórkowych została opracowana w latach 1950-tych przez J. von Neumanna (1966) w związku z pracami nad ideą samodzielnie powielających się urządzeń. W latach 70-tych automaty zyskały sławę w amerykańskim środowisku akademickim za przyczyną tzw. *gry w życie* (ang. *Game of life*) opracowanej przez J. Convay'a, ale były też podejmowane próby ich zastosowań w badaniach naukowych. Od połowy lat 80-tych, głównie dzięki aktywności S. Wolframa (1984), badania nad automatami zyskały miano nowego rodzaju nauki (ang. *New Kind of Science*). Do rozwoju naukowych zastosowań automatów przyczynili się między innymi Toffoli (1984) oraz Toffoli i Margolus (1987), którzy zaproponowali zastosowanie ich w badaniach nad modelami dynamicznymi, zastępując nimi modele bazujące na równaniach różniczkowych. W następnych latach automaty były z coraz większym powodzeniem używane do symulacji skomplikowanych systemów takich jak reprodukcja biologiczna, procesy chemiczne, zjawiska propagacji oraz

rozwoju siedlisk roślin. Szczególne znaczenie, z punktu widzenia kartografii i GIS, miały między innymi prace Batty i Xie (1994), White i Engelena (1993), Li i Yeh (2001), Dietzel i Clarke (2005) oraz Wagnera (1997) poświęcone modelowaniu rozrostu miast. Prowadzono też studia nad śledzeniem zmian zagospodarowania terenu metodami teledetekcyjnymi (Li i Yeh, 1998). W ramach badań nad rozwojem miast Lo i Xiaojun (2002) opracowali model AK bazujący na procesach, Ward i in. (2000) wykorzystali do tego celu metody stochastyczne, zaś Li i Yeh (2002) opracowali nową metodę symulacji ewolucji, łącząc AK z sieciami neuronowymi i GIS.

Idea automatów znajduje też zastosowanie w analizach matematycznych oraz w wielu pracach badawczych poświęconych modelowaniu zjawisk realnego lub wirtualnego świata. Dziedzina matematyki dyskretnej, bazująca na analizach zachowań automatów jest sukcesywnie rozwijana, dając coraz większe podstawy teoretyczne dla metody. Jednocześnie automaty wykorzystywane są do modelowania szerokiego spektrum problemów, począwszy od informatycznych (sieci), komunikacyjnych czy urbanistycznych, ale nade wszystko – związanych z modelowaniem zjawisk przyrodniczych, ekologicznych i społecznych. W celu realizacji coraz to bardziej odmiennych celów metodę automatów rozwijano, dodając im cechy systemu wieloagentowego, a także zdolności hierarchiczne i genetyczne, wielostanowość, mechanizm dziedziczenia, zdolność uczenia się i modyfikacji zachowań. Rozpatruje się zmienny przestrzennie rozkład komórek oraz ich wielkość i kształt, niestałość czasu, zmienność zasad sąsiedztwa i rozbudowaną strukturę reguły przejścia, o charakterze deterministycznym lub stochastycznym.

W realizowanym przez autora modelowaniu zjawisk przyrodniczych komórka-automat odzwierciedla pojedynczy fragment danego elementu środowiska: gruntu, powietrza, wody, roślin, zwierząt itp. Zakładając interakcje między różnymi składnikami modelu lub ich relacje z otoczeniem, możemy tak opisać działanie automatu, aby realizował te interakcje poprzez podatność na bodźce zewnętrzne lub oddziaływanie na stan otoczenia. W ramach omawianej pracy wdrożono automaty ukierunkowane na rozpoznawanie i przekształcanie swojego otoczenia. Wykazano, że tak sformalizowane działanie ma szeroki zakres zastosowań przestrzennych, różniących się jedynie postacią reguły zmian. Wdrażana jest adaptacja takiego formalizmu do modelowania powierzchni terenu, poklasyfikacyjnej agregacji obiektów obrazowych oraz symulacji obiegu wody.

2. PODSTAWY ORAZ WYBRANE SPOSOBY MODYFIKACJI AUTOMATÓW KOMÓRKOWYCH

Automaty Komórkowe (AK, ang. *Cellular Automata* – CA) są systemami dyskretnymi w czasie i przestrzeni, które mogą reprodukować skomplikowane globalne schematy i zachowania w oparciu o lokalne interakcje między komórkami wypełniającymi tę przestrzeń (Wolfram, 1984). Z obliczeniowego punktu widzenia są one metodą umożliwiającą generowanie cyklicznych zmian stanu komórek mniej lub bardziej regularnej siatki, zgodnie z zadaną regułą przejścia (ang. *transition rule*), której argumentami są chwilowe (aktualne) wartości komórki oraz jej najbliższych sąsiadów.

Jeżeli przez α oznaczymy regularną, uporządkowaną siatkę złożoną z jednakowych komórek c o budowie zależnej od wymiaru (n) przestrzeni i kształtu tychże komórek, przez S – skończony zbiór stanów, jaki komórka może przyjąć oraz przez N – skończony zbiór sąsiadów r, spełniający warunek:

$$\forall c \in N, \forall r \in \alpha : r + c \in \alpha \tag{1}$$

zaś funkcję przejścia (tj. zmiany stanu), definiującą reguły ewolucji automatu w kolejnych krokach (*m, m+1…*) oraz dynamikę tych przejść, zapiszemy jako:

$$f : S^m \rightarrow S^{m+1}, \tag{2}$$

to automat komórkowy stanowi czwórka:

$$AK \equiv (\alpha, S, N, f). \tag{3}$$

Aby opis automatu komórkowego był pełny, niezbędne jest określenie warunków jego zachowania na skrajach obszaru i stanów wyjściowych komórek.

Reguła przejścia ma stałą postać dla wszystkich komórek i całego procesu, jednak może zawierać pętle, wyrażenia warunkowe i inne składniki algorytmiczne. Sąsiedztwo służy określeniu, które komórki bezpośrednio wpływają na wynik reguły przejścia w danym miejscu. Zwykle stosowany jest jeden z dwóch podstawowych modeli sąsiedztwa komórki – von Neumann'a lub Moore'a. Proces zmian przebiega tak długo, aż osiągnięte zostaną zadane wartości graniczne albo przekroczona zostanie ustalona liczba iteracji.

Standardowo AK skupiają swoje działanie na zmianie własnego stanu, przyjmując jedną, z pewnej liczby dostępnych, wartości cech. Stan jest jedyną cechą komórki, służącą zarówno jako argument reguły zmian jak i dziedzina wyników jej użycia. Dla potrzeb modelowania rozrostu miast zaproponowano inne, konkurencyjne rozwiązanie AK, bazujące na stopniu przydatności danego fragmentu terenu. W tym celu koncepcja White *et al.* (1997) uwzględnia dwie dodatkowe cechy komórki – *prawdopodobieństwo zabudowy* (ang. *development probability*) i *przydatność pod zabudowę* (ang. *development suitability*). Ten rodzaj symulacji zakłada istnienie relacji między stanami, które uwzględniają prawdopodobieństwo i ich podatność na zmiany:

$$S^{t+1}\{x, y\} = f\left(P^t\{x, y\}\right) \tag{5}$$

$$P^t\{x, y\} = f'\left(DS^t\{x, y\}\right) \tag{6}$$

gdzie S jest stanem terenu w danym miejscu {x, y}, P – prawdopodobieństwem jego przekształcenia do stanu S, DS – podatnością na zmianę stanu, f i f' – regułami przejścia do innego stanu, a t – rozpatrywanym momentem czasu (w praktyce – iteracją). Zatem w tym rozwiązaniu przyszły stan komórki nie tylko zależy od stanu aktualnego jej i komórek z najbliższego sąsiedztwa, ale także uwzględnia stopień przydatności terenu oraz prawdopodobieństwo jego zmiany, identyfikując niejako teren z reprezentującymi go komórkami.

Koncepcja *automatów uczących się* (ang. *Cellular Learning Automata*, CLA) zakłada, że komórka analizując dane cechy terenu, na przykład wspomniane prawdopodobieństwo i podatność, przed przystąpieniem do zmiany cechy bada, czy jest możliwe dokonanie tej czynności. Pozytywną lub negatywną odpowiedź środowiska na podjętą próbę przyjmuje jako wiedzę, w jakim stopniu czynność ta może zostać dokonana. W dalszych krokach korzysta z tej wiedzy, i stopniowo modyfikuje ją wraz z pozyskiwaniem aktualnych danych. Są też proponowane inne rozwiązania zachowań danego automatu, wykorzystujące informacje statystyczne, wiedzę globalną i inne czynniki wpływające na podejmowanie decyzji przez regułę przejścia działającą wewnątrz danej komórki. Istnieje też wiele innych nowatorskich rozwiązań w koncepcji automatów opracowywanych do rozlicznych zastosowań, niekiedy bardzo odległych od geografii.

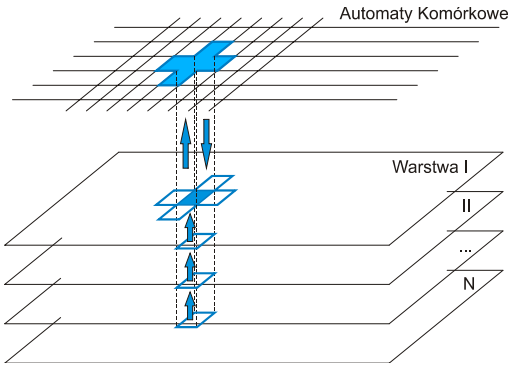
Idea wykorzystania automatów komórkowych jest ekscytującym źródłem pomysłów i inspiracji twórczych tworzących nową drogę integracji GIS z praktykami z zakresu planowania i projektowania inżynierskiego. Obecnie w popularnych systemach GIS implementowane są bardzo uproszczone rozwiązania bazujące na teorii automatów komórkowych. Podejmowane są próby zwiększenia zakresu i funkcjonalności AK w ramach GIS, na przykład poprzez użycie ich jako analitycznych silników do symulacji zjawisk dynamicznych (Park i Wagner, 1997).

W niniejszej pracy GIS traktowany jest jako środowisko informatyczne nowoczesnej kartografii, a w szczególności – źródło danych przestrzennych i narzędzi ich eksploracji, a także modelowania i wizualizacji kartograficznej, zaś wśród metod realizacji tych prac jest miejsce także do rozwiązań bazujących na automatach komórkowych – niekoniecznie w postaci gotowych narzędzi danego systemu.

3. PROPOZYCJA NOWEGO PODEJŚCIA DO AUTOMATÓW KOMÓRKOWYCH

Wydaje się, że wskazane wyżej tendencje rozwojowe w ramach teorii automatów komórkowych generują nową jakość prowadzącą do istotnych modyfikacji pierwotnej idei AK. Planując konieczny powrót do tej idei należy więc wrócić do takiego zakresu działań w ramach reguły przejścia, którego jedynym wynikiem wewnątrz struktury AK jest zmiana stanu danej komórki, zaś inne działania mogą odnosić się do obiektów istniejących poza tą strukturą. Innymi słowy, zakłada się otwartość struktury automatu na otoczenie w takim stopniu, aby reguła przejścia mogła w oparciu o informację o jego stanie podejmować decyzję dotyczącą wnętrza automatu. Dopuszcza się przy tym, że oprócz rozpoznawania otoczenia automat potrafi je też modyfikować. Automaty realizujące powyższe cele nazwano *Interaktywnymi Automatami Komórkowymi – IAK* (ang. *Interactive Cellular Automata*, ICA). Działanie ich pokazano schematycznie na rysunku 1.

Regułę przejścia można interpretować jako zachowanie automatu i rozpatrywać je wraz z jego cechami statycznymi. Zatem zachowanie *IAK* wykracza poza typowy dla niego zasięg sąsiedztwa, jednak w granicach zasięgu spostrzegania otoczenia i ingeruje w to otoczenie również w określonym zasięgu oddziaływania.



Rys. 1. Idea współdziałania Interaktywnych Automatów Komórkowych ze swoim otoczeniem (opracowanie własne)

Struktura *IAK* jest więc następująca:

$$IAK = (\alpha, E, S, N, f) \tag{7}$$

gdzie *α, S, N* i *f* mają identyczne znaczenie jak w formule (3) zaś *E* jest środowiskiem (otoczeniem) automatów, którym w zagadnieniach geograficznych jest jedna lub kilka warstw informacyjnych GIS.

W tak sformułowanym ujęciu automaty modelujące rozrost miast będą tworzyły wizję rozwoju zabudowy w bazie danych GIS, i z tejże bazy będą pozyskiwały wiedzę o przydatności danego terenu pod zabudowę oraz prawdopodobieństwie realizacji tej zabudowy w najbliższej przyszłości. Same zaś będą się zmieniały jedynie w ramach kilku możliwych stanów odpowiedzialnych za ich przyszłe zachowanie. Podobnie automaty uczące się będą czerpały z GIS-owego źródła wiedzy i swoje doświadczenie przechowywały w bazie danych.

4. WYBRANE ROZWIĄZANIA

W ramach realizacji idei Interaktywnych Automatów Komórkowych autor opracował trzy rozwiązania modeli istotnych z punktu widzenia metod kartograficznych, służących wspomaganiu decyzji przestrzennych. Są to:

1) Metoda modelowania powierzchni terenu w oparciu o zbiór rozproszonych punktów wysokościowych – *TeMCA* (ang. *Terrain Modeling Cellular Automata*),

2) Metoda agregacji teledetekcyjnych danych obrazowych – *DBclasCA* (ang. *Density Based classifying Cellular Automata*),

3) Metoda symulacyjna spływu wody powierzchniowej i podziemnej – *HydroCA* (ang. *Hydrological modeling Cellular Automata*).

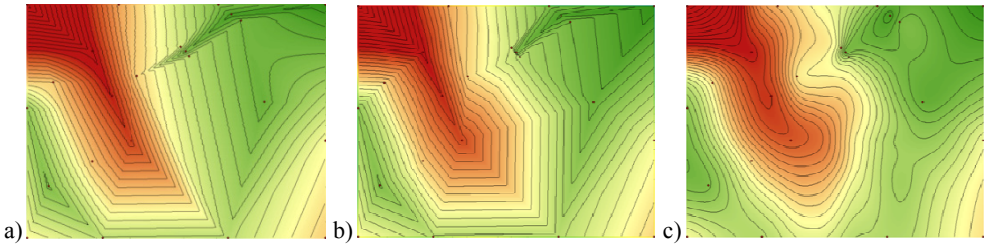
W poszczególnych metodach wykorzystuje się różne warstwy informacyjne gromadzone w bazach danych GIS, różne też są sposoby i zakresy ich przetwarzania. Dobór przykładów ma z jednej strony związek z ich przydatnością do przestrzennych analiz decyzyjnych, z drugiej zaś – ma ilustrować uniwersalność przyjętego rozwiązania (tj. *IAK*). Dla uproszczenia każde z rozwiązań realizowane jest w przestrzeni modelu rastrowego o jednolitym podziale terytorialnym, zgodnym z definicją przestrzeni automatów. Nie ma jednak jakichkolwiek przeciwwskazań, aby ta struktura miała zróżnicowaną rozdzielczość przestrzenną lub wręcz odnosiła się do modelu wektorowego. Nie ma też żadnych ograniczeń w stosunku do rozdzielczości czasowej.

***TeMCA* – metoda modelowania powierzchni terenu**

Wykorzystanie IAK do tworzenia NMT na bazie rozproszonych punktów terenowych wymaga jedynie wysokościowej warstwy informacyjnej GIS. W proponowanym rozwiązaniu, na etapie przygotowawczym, na strukturę modelu przenosi się cechy punktów pomiarowych (rzędne pikiet) i między nimi definiuje punkty pośrednie. W celu ulokowania wyników w środkach komórek stosuje się metodę najbliższego sąsiada (NN). Jednocześnie w przestrzeni automatów odpowiednie komórki uzyskują stan 0, 3 lub 4 (z zakresu 0...4). Procedura modelowania realizowana jest wzdłuż wierszy komórek (tj. w sąsiedztwie von Neumanna z wagami 0 przypisanymi do komórek z sąsiednich wierszy). Wskutek poszczególnych działań komórki modelu uzyskują coraz to bardziej sprecyzowane wysokości, zaś odpowiadające im komórki automatów – wzrastające wartości stanu. Kiedy wszystkie

komórki w danym sąsiedztwie mają stan 3 rozpoczyna się etap wygładzania, który jest realizowany w pełnym sąsiedztwie von Neumanna, ale z możliwością regulacji wag poszczególnych komórek. Warunkiem przejścia do stanu 4 jest spełnienie zadanego kryterium wielkości zmian.

Rysunek 2 ilustruje wynik modelowania przykładowego fragmentu terenu (a) w porównaniu z modelem TIN (b) oraz NMT wygenerowanym metodą splajnu z naprężeniem (c). Przebieg rowu oraz wyrównanie prawego zbocza na modelu (a) zadano w aplikacji realizującej metodę *TeMCA,* na podstawie informacji terenowej. Metoda została szerzej omówiona w pracy Wyczałek (2010).



Rys. 2. Model terenu opracowany metodą *TeMCA* (a) w porównaniu z modelem TIN (b) oraz NMT powstałym metodą splajnu z naprężeniem (c)
(Opracowanie własne przy użyciu aplikacji *TeMCA* i programu ArcEditor 9.3)

Kolejnym krokiem rozwoju automatów *TeMCA* było uwzględnienie cech podatności poszczególnych komórek modelu na wygładzanie oraz, zmiennego przestrzennie, stopnia wygładzenia powierzchni. Pozwoliło to na zróżnicowanie przestrzenne wyników modelowania.

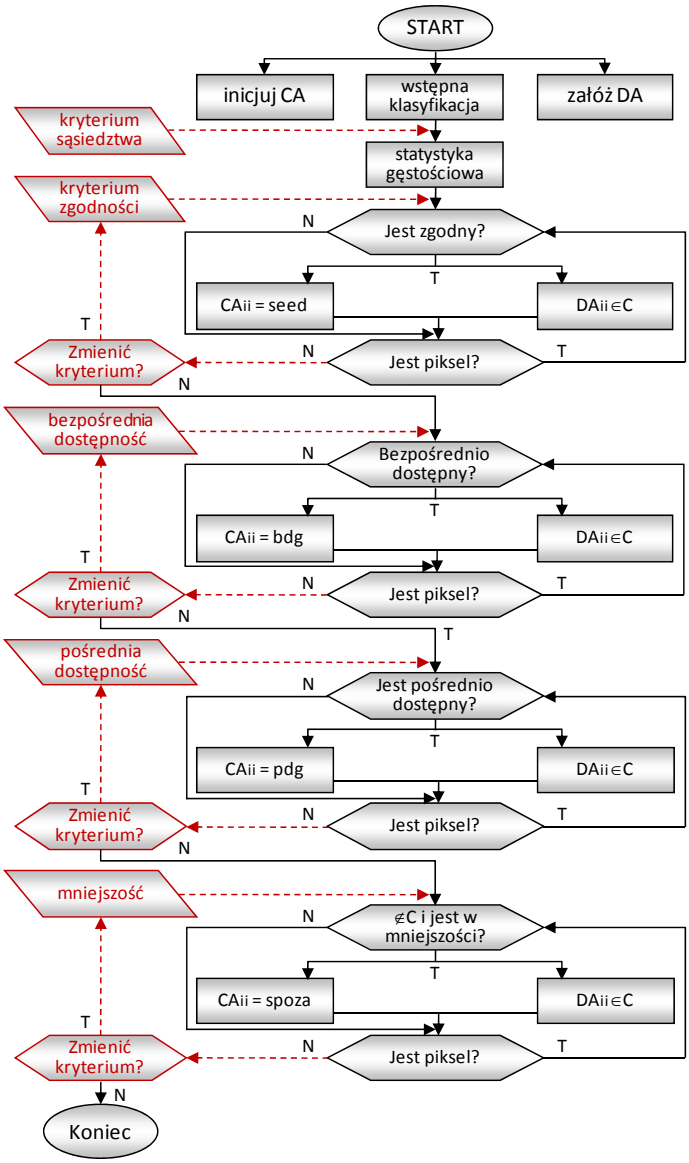
***DBclasCA* – metoda agregacji teledetekcyjnych danych obrazowych**

Celem tej metody jest wydzielenie na wstępnie sklasyfikowanym obrazie obszarów o tym samym typie pokrycia, co wymaga zgrupowania pikseli przypisanych do różnych, szczegółowych klas wchodzących w skład klasy dominującej na danym obszarze. Działanie takie prowadzi do wchłonięcia przez klasy dominujące rozproszonych pikseli należących do klas niezbyt licznie reprezentowanych w danym miejscu. Wykorzystano do tego celu metodę grupowania gęstościowego, opisaną między innymi w autorskiej pracy (Wyczałek, 2006). Obok warstw obrazowych niezbędne jest wydzielenie w środowisku GIS warstwy z wynikami klasyfikacji nienadzorowanej. Źródłowe warstwy obrazowe są niepodatne na modyfikacje, a jedyną czynnością odnoszącą się do nich jest wykonanie wstępnej klasyfikacji nienadzorowanej. Użyteczne może okazać się ich wcześniejsze wzmocnienie lub transformacja, przetworzenie do postaci indeksu roślinności itp. Zakłada się, że czynności te są wykonywane na etapie przygotowania danych, przed rozpoczęciem omawianej procedury agregacyjnej.

Zasadniczą zdolnością zastosowanych tu automatów jest rozpoznawanie parametrów statystycznych obrazu w określonym otoczeniu komórki centralnej. W celu lepszego opisu okno modułu rozpoznającego otoczenie składa się z kilkunastu lub więcej komórek. W granicach tego okna automat zlicza gęstości występowania poszczególnych klas, wydziela klasy dominujące i na tej podstawie decyduje, czy dana komórka rastra ma zostać uznana jako zalążek danej klasy pokrycia. Do komórek zalążkowych w następnych iteracjach dołączane są kolejne przylegające komórki, które są określane jako bezpośrednio

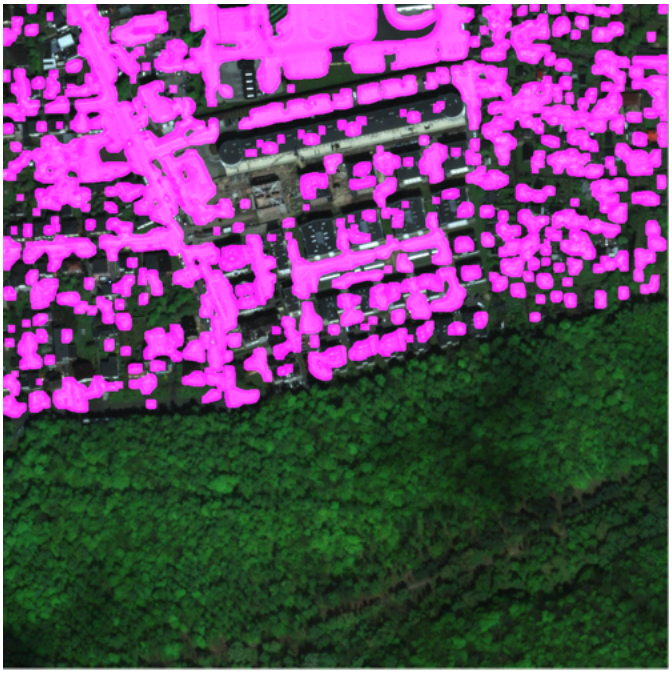
lub pośrednio osiągalne gęstościowo (Wyczałek, 2006). W efekcie powstaje zbiór zwartych klas pokrycia terenu, oczyszczonych z nielicznych pikseli przynależnych do innej klasy. Działanie takie prowadzi do zamierzonej generalizacji mapy pokrycia terenu.

Ideowy schemat blokowy algorytmu pokazano na rysunku 3, natomiast kolejny, 4 rysunek ilustruje efekt grupowania pikseli dla wybranego obiektu zarejestrowanego na 8-kanałowym obrazie z sensora satelitarnego WorldView-2.



Rys. 3. Realizacja Interaktywnych Automatów Komórkowych w poklasyfikacyjnej agregacji obiektów obrazowych (Opracowanie własne)

W omawianej metodzie dziedzina wartości automatu obejmuje charakterystyczne dla metody gęstościowej typy pikseli – zalążka, piksela osiągalnego bezpośrednio lub pośrednio albo nie przynależnego do rozpatrywanej klasy. Klasy wstępnie przypisane do poszczególnych komórek mogą być zmieniane wskutek kolejnych przybliżeń do ostatecznego modelu pokrycia. Dalszym krokiem w realizacji tego algorytmu jest uwzględnianie stopnia prawdopodobieństwa przynależności do danej klasy, określanego w oparciu o dotychczasową wiedzę o danym terenie (np. w oparciu o informację historyczną zawartą w bazach GIS). Poprzez porównanie z GIS dokonywana jest też ocena dokładności agregacji.



Rys. 4. Wydzielenie powierzchni nieprzepuszczających wody na wyostrzonej kompozycji barwnej obrazu WorldView-2
(Opracowanie własne, wykonane za pomocą programu *BDclasCA*)

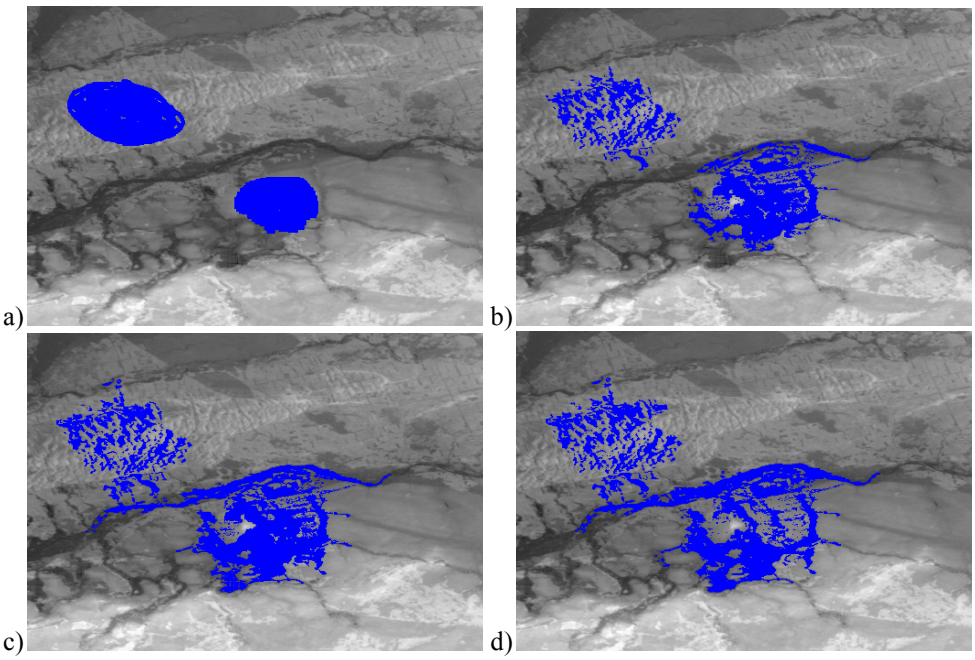
Symulacja spływu wody za pomocą automatów *HydroCA*

Problematyka modelowania dynamiki zjawisk hydrologicznych i wodno-gruntowych jest szeroko rozpatrywana i rozwijana w rozlicznych podejściach teoretycznych i stosowana w praktyce. Podjęcie tematu poprzez użycie automatów komórkowych ma na celu inne spojrzenie na wciąż aktualny i nadal nie do końca rozwiązany problem szczegółowego monitoringu i odpowiedzialnego zarządzania zasobami wodnymi. Procedura symulacyjna opracowana w ramach niniejszej pracy ma następujący przebieg:

1) określenie poziomu wody powierzchniowej w komórce (stan istniejący + dopływy),
2) obliczenie ubytków wody (wsiąkanie, parowanie),
3) obliczenie wartości spływu powierzchniowego (do sąsiednich komórek),
4) obliczenie spływu podziemnego.

Zasób wody powierzchniowej, zawartej w rozpatrywanej przestrzeni, powstaje jako suma opadów oraz dopływu wody z zewnątrz – na powierzchni terenu i w gruncie. Większość wody spływa po powierzchni, po części wsiąka w grunt (infiltracja) lub wpływa do urządzeń kanalizacyjnych, po części zaś jest wchłaniana przez rośliny i wyparowywane (transpiracja). Spływająca po powierzchni gruntu woda odprowadzana jest do zbiorników lub cieków wody. Również część wód gruntowych uchodzi do otwartych zbiorników lub cieków. albo wydostaje się na powierzchnię terenu

Automaty komórkowe sterują tymi procesami korzystając z informacji bazodanowej o ukształtowaniu i pokryciu terenu, o chłonności gruntu, o warstwach podziemnych gruntu i o wodzie gruntowej. W oparciu o tę wiedzę modelowany jest bilans wodny, a ruch wody jest obliczany w oparciu o prawa zachowania energii i masy. Wszystko zaś jest rozpoznawane i modelowane w ramach sąsiedztwa von Neumanna przenikającego przez wszystkie warstwy informacyjne. Podstawą obliczeń spływu wody jest znajomość jej ilości we wszystkich komórkach z tego sąsiedztwa, a wynikiem – ilość wody przemieszczającej się do dalszych komórek. Rysunek 5 ukazuje cztery wybrane stany z modelu 3-D uwzględniającego wspomniane wyżej składniki bilansu.



Rys. 5. Wybrane fazy symulacji spływu wody powierzchniowej
(Opracowanie własne za pomocą programu *HydroCA*)

5. WNIOSKI

Z uwagi na przeglądowy charakter pracy skupiono się na prezentacji nowego podejścia do idei automatów komórkowych, odnoszącego się do wyjściowej idei, ale ukierunkowanym na nowoczesne rozwiązania. Automaty interaktywne (IAK) pełnią tu rolę koordynatora

realizowanego zadania. Ograniczony z definicji zbiór dopuszczalnych stanów komórek odnosi się zatem do poziomu sterowania na poziomie automatu, zaś wartości wynikowe parametrów danego zjawiska – o odpowiednio dostosowanym typie danych – przypisywane są do danej warstwy informacyjnej GIS. Takie rozwiązanie zapewnia jednocześnie wierność idei automatów oraz oczekiwaniom co do opisu modelowanego zjawiska. Podane przykłady ilustrują uniwersalność tak zdefiniowanego podejścia do automatów komórkowych.

Praca została wykonana w ramach tematu badawczego nr N N526 134834 finansowanego ze środków Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego w latach 2008–2010. Przegląd bibliograficzny w Internecie dokonano za pomocą wyszukiwarki Google.

6. LITERATURA

Batty M., Xie Y, 1994. From cells to cities. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 21, s. 531–548.

Chakhar S., Martel J.-M., 2003. Enhancing geographical information systems capabilities with multi-criteria evaluation functions. *Journal of Geographic Information and Decision Analysis*, 7 (2), s. 47–71.

Dietzel C., Clarke K., 2005. The effect of disaggregating land use categories in cellular automata during model calibration and forecasting. *Computers, Environment and Urban Systems*.

Eastman J.R., Jin W., Kyem P.A.K., Toledano J., 1995. Raster Procedures for Multi-Criteria/ Multi-Objective Decisions, *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 61 (5), s. 539–547.

Jose M.C.P., Lucien D., 1993. A Multiple Criteria Decision-Making approach to GIS-based Land Suitability Evaluation. *International Journal of Geographic Information Systems*, 7 (5), s. 407–424.

Li X., Yeh A.G.O., 1998. Principal component analysis of stacked multi-temporal images for the monitoring of rapid urban expansion in the Pearl River Delta. *International Journal of Remote Sensing*, 19, s. 1501–1518.

Li X., Yeh A.G.O., 2001. Calibration of cellular automata by using neural networks for the simulation of complex urban systems. *Environment and Planning A*, 33, s. 1445–1462.

Li X., Yeh A.G.O., 2002, Neural-network-based cellular automata for simulating multiple land use changes using GIS. *International Journal of Geographical Information Science*, 16 (4), s. 323–343.

Lo C.P., Xiaojun Y., 2002. Drivers of Land-use / Landcover Changes and Dynamic Modelling for the Atlanta, Georgia Metropolitan Area. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 68 (10), s. 1073–1082.

Malczewski J., 1999. *GIS and Multicriteria Decision Analysis*. John Wiley & Sons, Inc., New York.

Park S., Wagner D.F., 1997. Incorporating Cellular Automata simulators as analytical engines in GIS. *Transactions in GIS*, 2 (3), s. 213–231.

von Neumann J., 1966, *Theory of Self-Reproducing Automata, Burks*, A.W. (Ed.), Urbana, Illinois: University of Illinois Press.

Miller H.J., 2004. Tobler's First Law and spatial analysis. *Annals of the Association of American Geographers*, 94 (2), s. 284–289.

Toffoli T., 1984. Cellular automata as an alternative to (rather than an approximation of differential equations in modeling physics. *Physica*, 10D, s. 117–27.

Toffoli T., Margolus N., 1987, *Cellular Automata: A New Environment for Modeling*. Cambridge, MA , MIT Press.

Wagner D.F., 1997. Cellular automata and geographic information systems. *Environment and Planning B: Planning and Design*. 24 (2), s. 219–234.

Ward D. Murray A. T., Phinn S. R., 2000. A stochastically constrained cellular model of urban growth, *Computers, Environment and Urban Systems*, Vol. 24, s. 539–558.

White R., Engelen G., 1993. Cellular automata and fractal urban form: A cellular modeling approach to the evolution of urban land-use patterns, *Environment and Planning* A, 25, s. 1175–1199.

Wolfram S., 1984. Cellular automata as models of complexity. Nature, 311, s. 419–424.

Wyczałek I., 2005. The design on revitalization of landscape of an urban green with the use of cartographic methods of decision aid. A Coruna, Spain, 9-16 July 2005, , (CD).

Wyczałek I., 2006. Wykorzystanie decyzyjnych automatów komórkowych w klasyfikacji wysokorozdzielczych obrazów satelitarnych. *Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji*, Vol. 16, s. 577–586.

Wyczałek I., 2010. Nowa metoda modelowania powierzchni terenu dla potrzeb analiz i symulacji przestrzennych. *Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji* (w druku).

THE USE OF CELLULAR AUTOMATA FOR MODELING AND SIMULATION OF SPATIAL PHENOMENA

KEY WORDS: cellular automata, spatial modeling, spatial simulation

SUMMARY: Knowledge of the nature of phenomena in a given area is the basis for prediction of the changes resulting from a planned implementation of spatial decisions. A way to aid the prediction is a simulation, e.g. a dynamic model of a phenomenon. Repeating the simulation with changing parameters is one of the most effective ways for decision making. Spatial phenomena are characterized by repetition of local interactions between neighboring pieces of the surface. The sum of these local processes gives an image of a spatially varying phenomenon occurring sometimes over wide areas.
A tool that best reflects these local interactions are cellular automata. In modeling natural phenomena a cell-automaton reflects a single part of the environment. Assuming the interactions between different components of the model, or their relationship with the environment, we can describe the operation of the slot to pursue them due to its susceptibility to external stimuli, or the impact on the state of the environment. As a part of this work, automata have been implemented aimed at transforming the environment, called Interactive Cellular Automata (ICA). While the data changes in a limited range of values, depending on their state and the state of the environment (modeled phenomena), they cause changes both in the space of the automata and the modeled environment as well. It has been shown that such formal action has a wide range of spatial applications that differ only by the form of the transition rule. This has been confirmed by the results of the adaptation of such formalism for modeling the site after classification, aggregation of object imaging and simulation of water circulation.

dr inż., Ireneusz Wyczałek
e-mail: Ireneusz.Wyczalek@put.poznan.pl
telefon: 61 6652 420
fax: 61 6652 432