

PIOTR WERNER

Uniwersytet Warszawski

**SYMULACJA ZMIAN ZASIĘGU OBSZARU
ZURBANIZOWANEGO AGLOMERACJI WARSZAWY
(EKSPERYMENT ZASTOSOWANIA
AUTOMATÓW KOMÓRKOWYCH)**

Abstract: Simulation of Changes in the Extent of the Urbanised Area of the Warsaw Agglomeration (an Experiment with the Use of the Cellular Automata Method). The author verifies the hypothesis that the present layout and extent of the Warsaw agglomeration determines further directions of the city's spatial development. To this end, he employs a method based on cellular automata theory.

Celem badania jest weryfikacja hipotezy, że istniejący układ i zasięg aglomeracji warszawskiej wyznacza dalsze kierunki rozwoju przestrzennego miasta. Zakłada się, że sąsiedztwo obszaru zurbanizowanego i nie-zurbanizowanego, a więc faktyczna granica miasta jest potencjalnym frontem ekspansji urbanizacji. Postępowanie badawcze zmierza, przez analizę rozmieszczenia (wzorów przestrzennych), do wnioskowania o procesach czaso-przestrzennych (Fotheringham *et al.*, 2000). Konwencjonalne modele dedukcyjne charakteryzują się pewnymi ograniczeniami, zwłaszcza w przypadku złożonych zjawisk czaso-przestrzennych (Fulong 1999). Skutecznie stosowane są w badaniach czaso-przestrzennych modele probabilistyczne, które wykorzystują koncepcję losowego rozwoju rzeczywistości, wykorzystując pojęcia: zdarzenia, prawdopodobieństwa, zmiennej losowej, empirycznego rozkładu prawdopodobieństwa (Ratajczak 1999).

W badaniach geograficznych, coraz częściej wykorzystuje się metody oparte na teorii automatów komórkowych (Takeyama, Couclelis

1997)¹. Automat komórkowy to urządzenie do przetwarzania informacji, którego moc obliczeniowa dorównuje maszynie Turinga (a więc komputerowi). Automat komórkowy składa się z trzech obiektów matematycznych: sieci komórek, zbioru stanów komórki oraz reguły automatu (który jest faktycznie równaniem ewolucji w czasie).

Z punktu widzenia metody zastosowanej do badań nad symulacją zmian zasięgu obszaru zurbanizowanego, jest to anamorficzna płaszczyzna (mapy), podzielona na regularną siatkę pól podstawowych (raster, sieć komórek), na którą naniesiono granice i obszar aglomeracji, tak aby te pola, które miasto obejmuje miały inną (jednolitą) charakterystykę niż pozostałe. Charakterystyki pól tworzą właśnie zbiór stanów komórek.

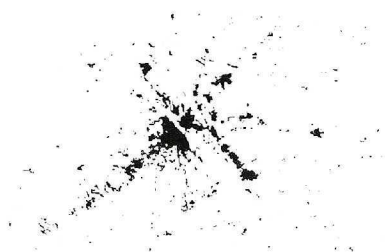
Do badań wybrano obszar aglomeracji warszawskiej, ze względu na to, że jest to obszar najlepiej znany autorowi, co umożliwia bardziej precyzyjne określenie szukanej reguły automatu. Symulacja zmian w czasie wymagała znalezienia takich danych, które można potraktować jako punkt wyjścia całej procedury oraz końcowych, umożliwiających weryfikację uzyskanych wyników.

Dane wyjściowe zaczerpnięto z polskiej przeglądowej mapy użytkowania ziemi (Uhorczak 1969). Na podstawie mapy *Osadnictwo* (w skali 1:1 000 000) wybrano poligon badawczy ograniczony współrzędnymi geograficznymi, długości geograficznej: 20°22'45" E i 21°51'18" E oraz szerokości geograficznej: 51°58'00" N i 52°30'38" N. Jest to fragment Niziny Mazowieckiej: Kotlina Warszawska i otaczające ją równiny. W centrum znajduje się aglomeracja warszawska z otaczającymi ją wokół mniejszymi miastami. Obszar obejmuje powierzchnię ok. 6445 km². Mapa w odwzorowaniu stożkowym w skali 1:1 000 000 pokazuje stan osadnictwa „w granicach generalizacji w mapie 1:100 000, zachowując przy tym jego charakter geograficzny i różnicowanie regionalne. (...) Doskonale występują skupienia osadnictwa miejskiego (...) w postaci wielkich aglomeracji, (...) ale też miast małych, które na tej mapie można bezbłędnie zidentyfikować.” (Uhorczak 1969).

Zasięg poligonu badawczego był zdeterminowany jednocześnie wyborem mapy, której mały fragment był wzorcem weryfikacji wyników symulacji. Była to mapa użytkowania ziemi: *CORINE land cover database* opra-

¹ Twórcą teorii automatów komórkowych byli John von Neumann i polski matematyk Stanisław Ulam. Przedstawienie teorii automatów komórkowych oraz teorii złożoności obliczeniowej wykracza poza zakres prezentowanego komunikatu. Szersze omówienie przedstawia Kulakowski w książce pt: *Automaty komórkowe* (<http://www.ftj.agh.edu.pl/%7Ekulakowski/AC/>).

cowana w ramach projektu *The European Topic Centre on Terrestrial Environment* i udostępniona przez Europejską Agencję Środowiska (EEA – European Environment Agency). Baza danych i mapa użytkowania ziemi CO-RINE obejmuje informacje od 1969 do 1996 r. Można więc przyjąć, że badany okres obejmuje 27 lat. Mapa jest w formacie rastrowym (BIL – *band interleaved by line*, kanały z przeplotem linii), a jej treść stanowi 50 (ponumerowanych) klas użytkowania ziemi. Odwzorowanie mapy to siatka azy-mutalna Lamberta, której punkt styczności definiują współrzędne 9°E i 48° N. Skala mapy cyfrowej została określona na 1:250 000. Wszystkie obiekty na mapie zostały zdigitalizowane (scyfrowane) na podstawie interpretowanych obrazów satelitarnych w skali 1:100 000. Rozdzielczość mapy została określona na ok. 150 m. Najmniejszymi jednostkami kartowanymi na mapie są obiekty o powierzchni 25 ha.



Ryc. 1. Zasięg obszarów zurbanizowanych i aglomeracji warszawskiej na poligonie badawczym według mapy użytkowania ziemi Uhorczaka w 1969 r. (zgeneralizowany, objaśnienia w tekście)



Ryc. 2. Zasięg obszarów zurbanizowanych i aglomeracji warszawskiej na poligonie badawczym według mapy użytkowania ziemi Corine w 1996 r.

Na podstawie map wyjściowych uzyskano dwie mapy cyfrowe poligonu badawczego: w 1969 r. (wyjściową) i 1996 r. (końcową) przedstawiające tylko zasięgi obszarów zurbanizowanych (ryc. 1 i 2). Mapę z 1969 r. dodatkowo zgeneralizowano, usuwając te wszystkie pola przedstawiające osadnictwo, które nie miały swojego odpowiednika na mapie końcowej z 1996 r. Wielkość poligonu badawczego została dobrana, tak aby można było w realnym czasie dokonać symulacji, a jednocześnie, aby przedstawiała rzeczywiście zasięg aglomeracji warszawskiej.

Regułę automatu komórkowego skonstruowano na podstawie analizy wizualnej obydwu map oraz biorąc pod uwagę wiedzę geograficzną o badanym obszarze (i intuicję oraz doświadczenie autora).

Regułę można przedstawić na podstawie róży wiatrów podzielonej na 8 kierunków świata, przypisując

każdemu z kierunków oraz centrum określone wagi (od 1 do 9). Tekstowe przedstawienie reguły to wymienione kolejno kierunki świata oraz centrum i ich wagi: {N2, NE5, E7, SE6, S1, SW8, W3, NW4, C9}.

4	2	5
3	9	7
8	1	6

Jest to reguła zaliczana do klasy tzw. *outer totalistics rules*. Stan komórki środkowej (wartość) jest ustalana na podstawie jej samej oraz pozostałych ośmiu ją otaczających mnożonych przez odpowiednie wagi. Aby zachować zakres wartości od 1 do 9 obliczane wartości komórek są normalizowane, tzn. każda wartość dzielona jest przez sumę wszystkich pozostałych. Samą symulację wykonano dla mapy z 1969 r. (wyjściowej) przedstawionej na ryc. 1, przekształconej w taki sposób, aby przedstawiała liczebność komórek scharakteryzowanych jako obszar zurbanizowany w otoczeniu Moore'a (3 x 3 komórki). W ten sposób zróżnicowano komórki na mapie na ryc. 1 oznaczone jako zasięg obszaru zurbanizowanego. Każda komórka (zaczerniona na rycinie) przyjęła wartość od 1 do 9 w zależności od liczby sąsiadujących z nią (także zaczernionych) pól.

Wykonano 27 kroków symulacji automatu komórkowego, odpowiadających okresowi 27 lat (od 1969 do 1996 r.). W każdym kroku symulacji (w każdym roku) automat komórkowy (3 x 3 komórki) przesunął się począwszy od lewego górnego rogu poligonu badawczego, wzdłuż rzędów, skończywszy na prawym dolnym rogu – aktualizując pola, stosownie do skonstruowanej reguły. Wynik symulacji przedstawia mapa na ryc. 3.



Ryc. 3. Symulacja zasięgu obszaru zurbanizowanego aglomeracji warszawskiej od 1969 do 1996 r.

Reguła automatu komórkowego:
{N2, NE5, E7, SE6, S1, SW8, W3,
NW4, C9}



Ryc. 4. Porównanie zasięgów symulowanego i rzeczywistego obszaru zurbanizowanego aglomeracji warszawskiej w 1996 r. (kolor ciemniejszy – zasięg symulowany).

Reguła automatu komórkowego:
{N2, NE5, E7, SE6, S1, SW8, W3,
NW4, C9}.

Zgodność 86,05%

Tabela 1

Powierzchnie zasięgu symulowanego i rzeczywistego obszaru zurbanizowanego aglomeracji warszawskiej dla 1996 r. względem powierzchni poligonu badawczego

Udział procentowy	Powierzchnia zasięgu rzeczywistego (%)	Powierzchnia bez zasięgu rzeczywistego (%)	Razem powierzchnia zasięgu symulowanego (%)
Powierzchnia zasięgu symulowanego (%)	9,07% (584,56 km ²)	11,56% (745,04 km ²)	20,63% (1329,60 km ²)
Powierzchnia bez zasięgu symulowanego (%)	2,39% (154,04 km ²)	76,98% (4961,36 km ²)	79,37% (5115,40 km ²)
Razem powierzchnia zasięgu rzeczywistego (%)	11,46% (738,60 km ²)	88,54% (5706,40 km ²)	100% (6445 km ²)

Całą procedurę symulacji wykonano w programie GIS: Idrisi32. Umożliwiło to także uzyskanie wyników w postaci zestawienia statystycznego (tab. 1) i syntetycznej mapy porównawczej: wyników symulacji i mapy rzeczywistego zasięgu obszaru zurbanizowanego aglomeracji warszawskiej (ryc. 2, 3, 4).

Następnie wykonano dalsze kroki symulacji zmian zasięgu obszarów zurbanizowanych aglomeracji warszawskiej za następne 27 lat (od 1996 r.) czyli w 2023 r. Obraz wysymulowany przedstawia ryc. 5. Punktem wyjścia był z kolei stan rzeczywisty dla 1996 r.

Powierzchnia zasięgu symulowanego jest prawie dwa razy większa (1,8) od zasięgu rzeczywistego i obejmuje 80% „trafionych” komórek. Jeżeli wziąć pod uwagę zgodność powierzchni bez zasięgu symu-

lowanego i rzeczywistego łącznie z obszarem, gdzie zasięg symulowany i rzeczywisty pokrywają się (suma wartości pól po przekątnej w tabeli w kierunku NW-SE), to stopień zgodności symulacji z sytuacją rzeczywistą wynosi 86,05%.

Wolfram (2002, s. 299) rozpatrując mechanizmy złożoności i losowości zjawisk wyróżnia ich trzy kategorie: spowodowane czynnikami zewnętrznymi (z otoczenia – ujmowane przez modele stochastyczne), wynikające z początkowych warun-



Ryc. 5. Zasięg symulowany obszarów zurbanizowanych aglomeracji warszawskiej w 2023 r. Reguła automatu komórkowego: {N2, NE5, E7, SE6, S1, SW8, W3, NW4, C9}

ków (opisywane przez teorię chaosu) oraz uznane przez niego za najczęściej występującą sytuację – losowość i złożoność jest częścią reguł określonego systemu, które można ująć w postaci prostych algorytmów. Celem tego badania było także sprawdzenie tego ostatniego stwierdzenia dla określonej sytuacji w Polsce.

Oczywiście można poszukiwać jeszcze bardziej precyzyjnej reguły i jej uzasadnienia.

Poszukując właściwej reguły automatu komórkowego, zrezygnowano z zasady różnicowania wartości komórek otaczających i rozszerzono przedział liczb, które można użyć jako wagi dla obrazu wyjściowego. Po wielokrotnych próbach zastosowano regułę {N1, NE1, E1, SE1, S1, SW1, W1, NW1, C92}:

1	1	1
1	92	1
1	1	1

Dalsze zwiększanie wagi komórki w centrum, nie zmieniało w sposób istotny wyników symulacji (por. tab. 2), gdyż w każdym kroku procedury wagi poszczególnych komórek były normalizowane.

Powierzchnia zasięgu symulowanego stanowi 1,3 obszaru zasięgu rzeczywistego i obejmuje 77% „trafionych” komórek. Jeżeli wziąć pod uwagę zgodność powierzchni bez zasięgu symulowanego i rzeczywistego łącznie z obszarem, gdzie zasięg symulowany i rzeczywisty pokrywają się (suma wartości pól po przekątnej w tabeli w kierunku NW-SE), to stopień zgodności symulacji z sytuacją rzeczywistą wynosi w tym przypadku 91,26%.

Tabela 1

Powierzchnie zasięgu symulowanego i rzeczywistego obszaru zurbanizowanego aglomeracji warszawskiej dla 1996 r. dla reguły {N1, NE1, E1, SE1, S1, SW1, W1, NW1, C92} względem powierzchni poligonu badawczego

Udział procentowy	Powierzchnia zasięgu rzeczywistego (%)	Powierzchnia bez zasięgu rzeczywistego (%)	Razem powierzchnia zasięgu symulowanego (%)
Powierzchnia zasięgu symulowanego (%)	8,84% (569,74 km ²)	6,11% (393,79 km ²)	14,95% (963,53 km ²)
Powierzchnia bez zasięgu symulowanego (%)	2,63% (169,50 km ²)	82,42% (5311,97 km ²)	85,05% (5481,47 km ²)
Razem powierzchnia zasięgu rzeczywistego (%)	11,47% (739,24 km ²)	88,53% (5705,76 km ²)	100% (6445,00 km ²)



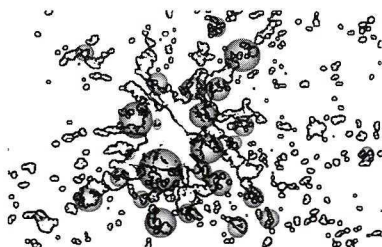
Ryc. 6. Porównanie zasięgów symulowanego i rzeczywistego obszaru zurbanizowanego aglomeracji warszawskiej w 1996 r.

(jaśniejszy odcień szarości na mapie oznacza zgodność zasięgów, a kolor biały zgodność braku zasięgów). Reguła automatu komórkowego: {N1, NE1, E1, SE1, S1, SW1, W1, NW1, C92}. Zgodność 91,26%



Ryc. 7. Zasięg symulowany obszarów zurbanizowanych aglomeracji warszawskiej w 2023 r.

Reguła automatu komórkowego: {N1, NE1, E1, SE1, S1, SW1, W1, NW1, C92}



Ryc. 8. Wysymulowane obszary prawdopodobnego rozwoju przestrzennego aglomeracji warszawskiej w 2023 r. Reguła automatu komórkowego: {N1, NE1, E1, SE1, S1, SW1, W1, NW1, C92}

Obraz wyników symulacji z zastosowaniem reguły {N1, NE1, E1, SE1, S1, SW1, W1, NW1, C92} przedstawiają ryc. 6 (dla 1996 r.) i ryc. 7 (dla 2023 r.)

Analiza wizualna map przedstawiających zasięg symulowany obszarów zurbanizowanych aglomeracji warszawskiej w 2023 r. pokazuje, że prawdopodobnie będzie on przebiegał właśnie wzdłuż jego obecnych granic (por. ryc. 8). Natomiast wyraźnie zaznaczają się obszary wzmóżonej ekspansji przestrzennej (ciemniejsze na ryc. 8) przy granicach administracyjnych m.st. Warszawy na północy (Legionowo, Tarchomin), na północ-

nym wschodzie (Marki, Żąbki, Rembertów) i na południowym wschodzie (Anin, Wawer) na praskim brzegu Wisły. Drugim takim obszarem jest Łuk Siekierski w kierunku Wilanowa na lewym brzegu Wisły. Prawdopodobnie najbardziej intensywny rozwój będzie dotyczył kierunku południowo-zachodniego wzdłuż szlaku komunikacyjnego na Kraków i Katowice. Na północnym zachodzie obserwowane, prawdopodobne obszary rozwoju to Wola, Bemowo i Żoliborz aż do granicy Kampinoskiego

Parku Narodowego. Na podstawie wysymulowanego obrazu można ocenić, że obszar zurbanizowany badanego poligonu powiększy się więcej niż dwukrotnie (276 km² w 1969 r., 740 km² w 1996 r., do 1927 km² w 2023 r.).

Literatura

- Fotheringham A.S., Brundson C., Charlton M., 2000, *Quantitative Geography. Perspectives on Spatial Data Analysis*. Sage Publications, London, Thousand Oaks, New Delhi.
- Fulong Wu, 1999, *GIS-based Simulation as an Exploratory Analysis for Space-time Processes*. Journal of Geographical Systems, Springer Verlag, vol 1, s. 199-218.
- Ratajczak W., 1999, *Modelowanie sieci transportowych*. Wyd. UAM, Poznań.
- Takeyma M., Couclelis H., 1997, *Map Dynamics Integrating Cellular Automata and GIS through Geo-Algebra*. International Journal of Geographical Information Science, Taylor&Francis, vol 11, No 1, 73-91.
- Uhorczak F., 1969, *Polska przeglądowa mapa użytkowania ziemi*. Prace Geograficzne, nr 17, IGiPZ PAN, PWN, Warszawa.
- Wolfram S., 2002, *A New Kind of Science*. Wolfram Media Inc., Champaign.