

**Andrzej Biłozor, Szymon Czyża,  
Karol Szuniewicz**

---

**Modelowanie procesu ewakuacji w  
przypadku zagrożeń  
terrorystycznych**

---

*Acta Scientiarum Polonorum. Administratio Locorum 12/1, 21-30*

---

2013

Artykuł został opracowany do udostępnienia w internecie przez Muzeum Historii Polski w ramach prac podejmowanych na rzecz zapewnienia otwartego, powszechnego i trwałego dostępu do polskiego dorobku naukowego i kulturalnego. Artykuł jest umieszczony w kolekcji cyfrowej [bazhum.muzhp.pl](http://bazhum.muzhp.pl), gromadzącej zawartość polskich czasopism humanistycznych i społecznych.

Tekst jest udostępniony do wykorzystania w ramach  
dozwolonego użytku.

## MODELOWANIE PROCESU EWAKUACJI W PRZYPADKU ZAGROŻEŃ TERRORYSTYCZNYCH

Andrzej Biłozor, Szymon Czyża, Karol Szuniewicz

Uniwersytet Warmińsko-Mazurski w Olsztynie

**Streszczenie.** Ewakuacja jest kluczowym aspektem zarządzania kryzysowego, które ma na celu ochronę ludności cywilnej w sytuacjach zagrożenia życia. Gdy działania te obejmują przestrzeń miejską, która jest niezwykle zróżnicowana, klasyczne metody modelowania nie zawsze dają zadowalające efekty. W artykule zaprezentowano możliwości zastosowania automatów komórkowych w modelowaniu procesu ewakuacji w przypadku ataku terrorystycznego. Wykorzystano przy tym oprogramowanie GIS pozwalające na przetwarzanie i wizualizację danych geoprzestrzennych. W wyniku tych rozważań opracowano dynamiczny model ewakuacji na obszarze Olsztyna oparty na prostych regułach i uwzględniający lokalne oddziaływania.

**Słowa kluczowe:** ewakuacja, atak terrorystyczny, GIS, automaty komórkowe

### WSTĘP

Zagadnienie ewakuacji w przypadku zagrożeń terrorystycznych wymaga poszukiwania nowych metod wspierających ten proces. Zróżnicowanie przestrzenne na obszarze miasta oraz nieprzewidywalność zachowań jednostek powoduje, że klasyczne metody modelowania nie zawsze dają zadowalające efekty. W referacie zaprezentowano rozważania nad możliwościami zastosowania automatów komórkowych jako skutecznego narzędzia obrazującego zróżnicowany proces ewakuacji ludności.

Zarządzanie w sytuacjach kryzysowych na terenie miasta jest zadaniem organów administracji publicznej. Obejmuje zapobieganie sytuacjom kryzysowym, przygotowanie do przejęcia nad nimi kontroli w drodze zaplanowanych działań, reagowanie w przypadku wystąpienia sytuacji kryzysowych oraz odtwarzanie infrastruktury lub przywrócenie jej pierwotnego charakteru.

Według wytycznych Szefa Obrony Cywilnej Kraju z dnia 5 stycznia 2011 r. do działalności w dziedzinie obrony cywilnej w 2011 r. jako jeden z głównych kierunków działania w 2011 r. przyjęto doskonalenie ewakuacji ludzi, zwierząt i mienia na wypadek masowego zagrożenia. Wymusza to na jednostkach zajmujących się tym zagadnieniem prowadzenie nieustannych analiz i studiów w celu poszukiwania coraz to lepszych modeli pozwalających na przewidywanie przebiegu tego procesu.

## CEL I PRZEDMIOT BADAŃ

Przestrzeń miejska ze względu na skalę możliwych strat ludzkich i materialnych jest szczególnie podatna i wrażliwa na występowanie różnego rodzaju katastrof cywilizacyjnych, w tym również tych związanych z terroryzmem. W zróżnicowanej i skomplikowanej strukturze miejskiej zarządzanie po wystąpieniu sytuacji kryzysowej jest zadaniem niezwykle trudnym wymuszającym poszukiwanie nowych, lepszych metod opisujących procesy zachodzące w tym czasie, w tym również ewakuację.

Celem badań było stworzenie dynamicznego modelu ewakuacji miasta Olsztyna z wykorzystaniem automatów komórkowych, opartego na prostych regułach działania oraz uwzględniającego lokalne oddziaływania.

Na potrzeby tej pracy stworzono automat komórkowy, którego zbiór stanów zawiera tylko dwa elementy ( $k=2$ ), a mianowicie „0” i „1”. Inaczej mówiąc, komórka jest w tym momencie nieewakuowana (0) lub ewakuowana (1).

$$\sigma_{ij} = \begin{cases} 0 - \text{komórka nieewakuowana} \\ 1 - \text{komórka ewakuowana} \end{cases} \quad (1)$$

gdzie:

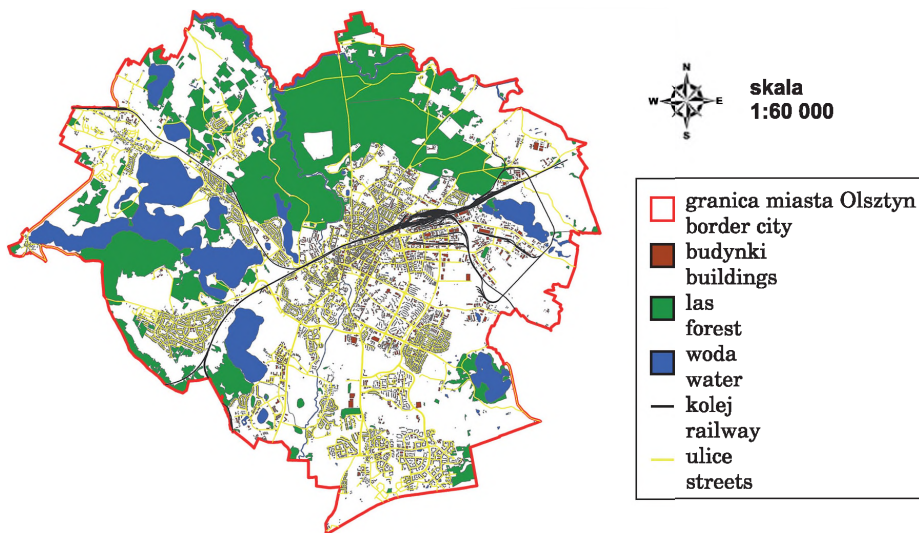
$\sigma_{ij}$  – stan danej komórki.

W naszej pracy skupiliśmy się głównie na procesie samoewakuacji jako dominującym elementem w procesie planowania i przeprowadzania ewakuacji. Zagadnienia związane z tym procesem, a mianowicie rozpoznanie potencjalnych kierunków i rejonów samoewakuacji, wyznaczenie dróg ewakuacji, a także ostatecznie kierowanie ruchem ludności stanowią najtrudniejszy do wykonania element.

## OBSZAR BADAŃ

Automat komórkowy obrazujący proces ewakuacji zbudowano dla części Olsztyna. Obecnie obszar miasta obejmuje powierzchnię 87,9 km<sup>2</sup>, co stanowi około 0,7% powierzchni województwa warmińsko-mazurskiego. Według danych GUS liczba ludności Olsztyna 31 grudnia 2009 r. wynosiła 176 457, a gęstość zaludnienia – 1998 osób na km<sup>2</sup> [Główny Urząd Statystyczny. 2011]. W granicach administracyjnych miasta znajduje się 11 jezior, a powierzchnia wszystkich wód wynosi 8,7 km<sup>2</sup>, co stanowi 9,9% powierzchni ogólnej. Lasy i zadrzewienia zajmują prawie 23% powierzchni ogólnej, a wszystkie formy terenów zieleni w mieście stanowią ponad 50% powierzchni [Olsztyn. Urząd Miasta... 2011].

Olsztyn, będąc miastem wojewódzkim, pełni w regionie wiele istotnych funkcji z zakresu administracji rządowej oraz samorządowej, a na jego terenie znajdują się liczne obiekty tzw. infrastruktury krytycznej, z których do najważniejszych zaliczyć możemy: urząd wojewódzki, urząd miasta, starostwo powiatowe, szpital wojewódzki, szpital miejski, komendę wojewódzką i miejską policji, komendę wojewódzką i miejską państwowej straży pożarnej, dworzec kolejowy i samochodowy, stacje energetyczne.



Rys. 1. Mapa Olsztyna

Fig. 1. Map of Olsztyn

Źródło: Opracowanie własne.

Source: Own study.

Na powierzchnię fragmentu miasta ( $357\,770\text{ m}^2$ ), zlokalizowaną w samym jego centrum, nałożono sześciokątne pola podstawowe o powierzchni  $289\text{ m}^2$ , które stanowiły pojedyncze komórki tworzące automat komórkowy. Do zobrazowania kolejnych etapów ewakuacji wykorzystano opracowania kartograficzne przygotowane w programie ArcGis (rys. 1).

## AUTOMATY KOMÓRKOWE

Automaty komórkowe (*cellular automata*) są to narzędzia, których zastosowanie ograniczone jest do metod, w których nie zostały jeszcze użyte. Niektórzy widzą w nich pewien rodzaj alternatywnej matematyki, narzędzie do symulacji procesów fizycznych z dużą liczbą oddziałujących ze sobą układów, jak również obiekty matematyczne interesujące z punktu widzenia teorii procesów dynamicznych [Kułakowski 2002].

Twórcą automatów komórkowych jest Janos von Neumann, autor „Mathematical Foundations of Quantum Mechanics” próbujący stworzyć uproszczony model fizyki rzeczywistego świata [Konieczny 2006]. Jako początek powstania tej teorii datuje się koniec

lat 40. XX w., kiedy zajmował się on modelem „pierwotnej zupy”, substancji dającej początek życiu [Kułakowski 2002]. Jednak docelowo chciał stworzyć model maszyny samo-sterującej, która powielalaby swoją budowę i przekazywała swoje cechy. Jednak ze względu na niski stan zaawansowania technicznego w tamtych czasach ów projekt został zawieszony [Żygierewicz 2009].

Następnie pracami Neumanna zainteresował się Edgar Frank Codd, który przyczynił się do spopularyzowania idei automatów komórkowych. Pomimo iż zaprojektowany przez niego automat komórkowy był dużo prostszy niż koncepcja Neumanna, to potrafił obliczyć wszystkie możliwe funkcje oraz się rozmnażać [Żygierewicz 2009]. Podobnie jak wcześniej nie udało się tego pomysłu zrealizować, jednak bezpośrednio posłużył do skonstruowania przez J.H. Conway’a w latach 70. XX w., szczególnie popularnej w środowisku akademickim „Gry w życie”. W „Life” można widzieć model żyjącego środowiska; w użyciu jest terminologia „żywych” i „martwych” komórek. Ale jest to automat uniwersalny, czyli zdolny do każdej operacji logicznej. Można w jego ramach otrzymać na przykład kolejne rozwiązania wielkiego twierdzenia Fermata [Kułakowski 2002].

Kolejnym ważnym etapem w rozwoju idei automatów komórkowych były lata 80., kiedy weszły one do bibliotek fizyków, a jeden z głównych popularyzatorów tej idei Stephen Wolfram podjął próbę ich sklasyfikowania [Kułakowski 2002], niestety nieudaną. Sukces pozwoliłyby na pogrupowanie wszystkich dyskretnych procesów dynamicznych.

Pomimo tych niepowodzeń i niespełnienia wszystkich pokładanych w nich nadziei, lista zastosowań automatów komórkowych w technice wciąż rośnie. Warto zwrócić uwagę na prace Toffoli [1984] oraz Toffoli i Margolus [1987], którzy w znaczącym stopniu przyczynili się do rozwoju naukowych zastosowań automatów, proponując zastosowanie ich w badaniach nad modelami dynamicznymi, zastępując nimi modele bazujące na równaniach różniczkowych [Wyczałek 2010]. Następne lata przyniosły liczne przykłady zastosowań automatów do symulacji skomplikowanych systemów takich jak reprodukcja biologiczna, procesy chemiczne, zjawiska propagacji oraz rozwoju siedlisk roślin. Szczególnie znaczenie, z punktu widzenia kartografii i GIS, miały m.in. prace takich autorów jak: Batty i Xie [1994], White i Engelen [1993], Li i Yeh [2001], Dietzel i Clarke [2005] oraz Wagner [1997] poświęcone modelowaniu rozrostu miast [Wyczałek 2010].

## PODSTAWY AUTOMATÓW KOMÓRKOWYCH

Automaty komórkowe to systemy dyskretne w czasie i przestrzeni, „które mogą reprodukcować skomplikowane globalne schematy i zachowania w oparciu o lokalne interakcje między komórkami wypełniającymi tę przestrzeń” [Wyczałek 2010]. W ujęciu deterministycznym według Kułakowskiego automat jest pojęciem matematycznym, który „jest:

- siecią komórek  $\{i\}$  przestrzeni  $D$ -wymiarowej,
- zbiorem  $\{s_i\}$  stanów pojedynczej komórki, zwykle ten sam dla wszystkich komórek, zawierających  $k$  elementów,
- regułą  $F$  określającą stan komórki w chwili  $t+1$  w zależności od stanu  $t$ -ej 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” [Kułakowski 2002].

Ostateczny opis automatu komórkowego należy uzupełnić o warunki zachowania na skrajach obszaru oraz stany wyjściowe komórek.

Proces, który zachodzi w automacie, jest ściśle określony regułą, stałą dla wszystkich komórek, która zarówno może mieć prostą postać, jak również może zawierać pętle, wyrażenia warunkowe i inne składniki algorytmiczne. Sąsiedztwo, najczęściej definiowane za pomocą dwóch modeli (rys. 2): Neumana (1+4 – kolor zielony) i Moore'a (1+8 – kolory zielony i żółty), pozwala na wskazania, które z komórek będą miały wpływ na stan komórki w danym miejscu.



Rys. 2. Sąsiedztwo w automatach komórkowych

Fig. 2. Neighborhood in cellular automata

Źródło: Opracowanie własne na podstawie Koniecznego [2006]

Source: Own study based on Konieczny [2006]

Proces przebiegający w automacie komórkowym może zostać zakończony w dwojaki sposób – po osiągnięciu założonych wartości granicznych lub po przekroczeniu określonej liczbie powtórzeń.

## OPRACOWANIE MODELU PROCESU EWAKUACJI

Stworzony model ewakuacji odnosił się do samoewakuacji. Ten etap procesu ewakuacji zwrócił naszą uwagę ze względu na swój dominujący charakter oraz słabą organizację. Niekontrolowane przemieszczanie się ludności nie daje zbyt wiele czasu na podejmowanie decyzji, wobec czego zastosowaliśmy automaty komórkowe jako narzędzie pozwalające na modelowanie tego procesu.

Na potrzeby tej pracy określiliśmy następujące reguły przejść:

- zmiana stanu komórek następuje od wewnątrz do zewnątrz obszaru ewakuacji;
- przesunięcie następuje wtedy, gdy komórka docelowa jest pusta;
- komórka nie zmienia swojego stanu, jeżeli sąsiednia komórka jest ewakuowana;
- wszystkie pola są uaktualniane jednocześnie;
- do wyboru komórki docelowej zastosowano generator liczb losowych.

Badany obszar, zlokalizowany w centrum miasta Olsztyn, wybrano ze względu na częste występowanie imprez masowych (np. imprezy Sylwestrowej) – rysunek 3.

Przy przeprowadzeniu symulacji ewakuacji z tego terenu przyjęto, że w trakcie trwania imprezy o charakterze masowym otrzymujemy informację o mającym nastąpić ataku terrorystycznym – podłożeniu materiału wybuchowego. Zagrożenie wynikało z użycia bomby rurowej o sile odpowiadającej użyciu 2.3 kg trotylu. Informacje dotyczące zasięgu ewakuacji pozyskano ze stron Federalnej Agencji Zarządzania Kryzysowego (tab. 1).

Tabela 1. Zasięg ewakuacji w przypadku podłożenia „bomby rurowej”

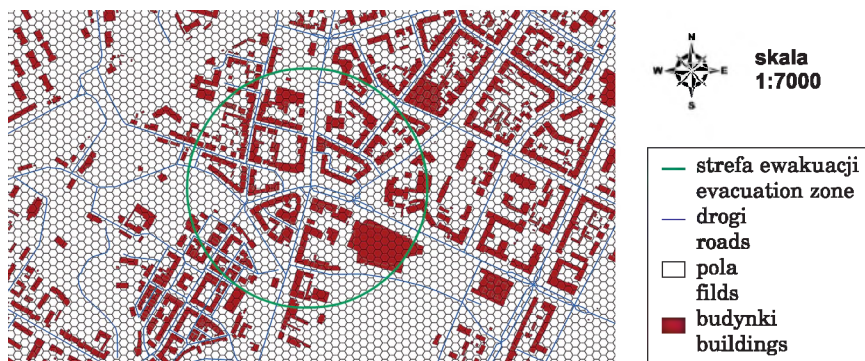
Table 1. Explosive evacuation distance when pipe bomb was used

Opis zagrożenia Description of the risk	Masa ładunku (TNT ekwiwalent) Mass of the load (TNT equivalent)	Zasięg ewakuacji z budynków Range evacuation of buildings	Zasięg ewakuacji z przestrzeni otwartej Range evacuation of open space
Pipe bomb	2.3 kg	21 m	259 m

Źródło: Opracowanie własne na podstawie FEMA 2005.

Source: Own study based on FEMA 2005.

Na mapę badanego obszaru naniesiono pola podstawowe oraz obrysy budynków. Środek koła ewakuacji umieszczono w centrum analizowanego terenu (rys. 3).



Rys. 3. Obszar badań

Fig. 3. Study area

Źródło: Opracowanie własne

Source: Own study

Następnie, w wyniku analizy indeksu określającego stopień zabudowywania terenu, część pól, którymi nie mogłaby odbyć się ewakuacja, została wyłączona z symulacji. Użyty wskaźnik intensywności zabudowy określa wartość liczbowa wyrażającą stosunek powierzchni całkowitej wszystkich kondygnacji nadziemnych budynków zlokalizowanych na danej działce lub terenie do powierzchni tej działki lub terenu,

$$I = \frac{P}{T} \quad (2)$$

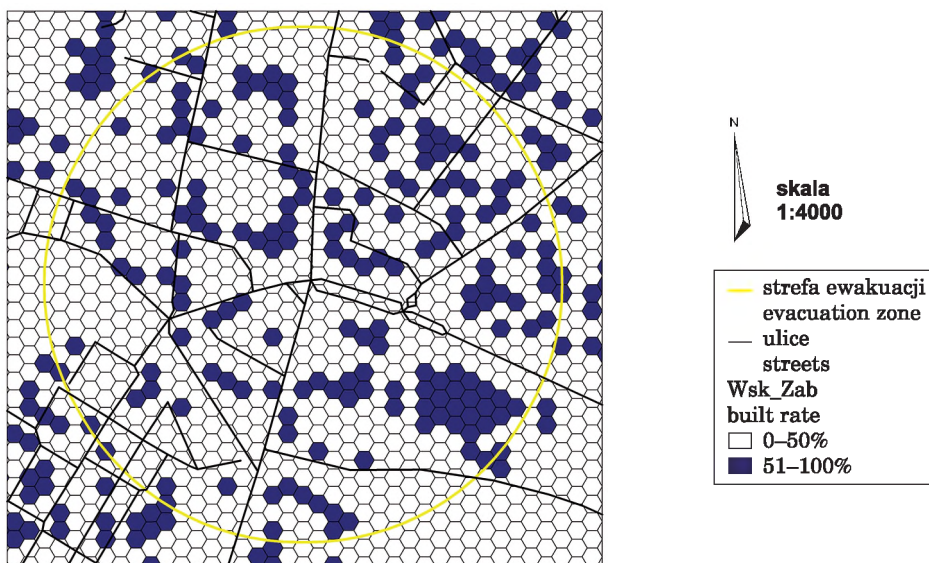
gdzie:

$I$  – wskaźnik intensywności zabudowy;

$P$  – suma powierzchni wszystkich kondygnacji nadziemnych budynku liczona po zewnętrznym obrysie muru;

$T$  – powierzchnia działki lub terenu [Architektura.info. 2011].

W wyniku wyliczenia wskaźnika zabudowy otrzymaliśmy obszar, dla którego przeprowadzono symulację procesu ewakuacji.



Rys. 4. Wskaźnik zabudowy

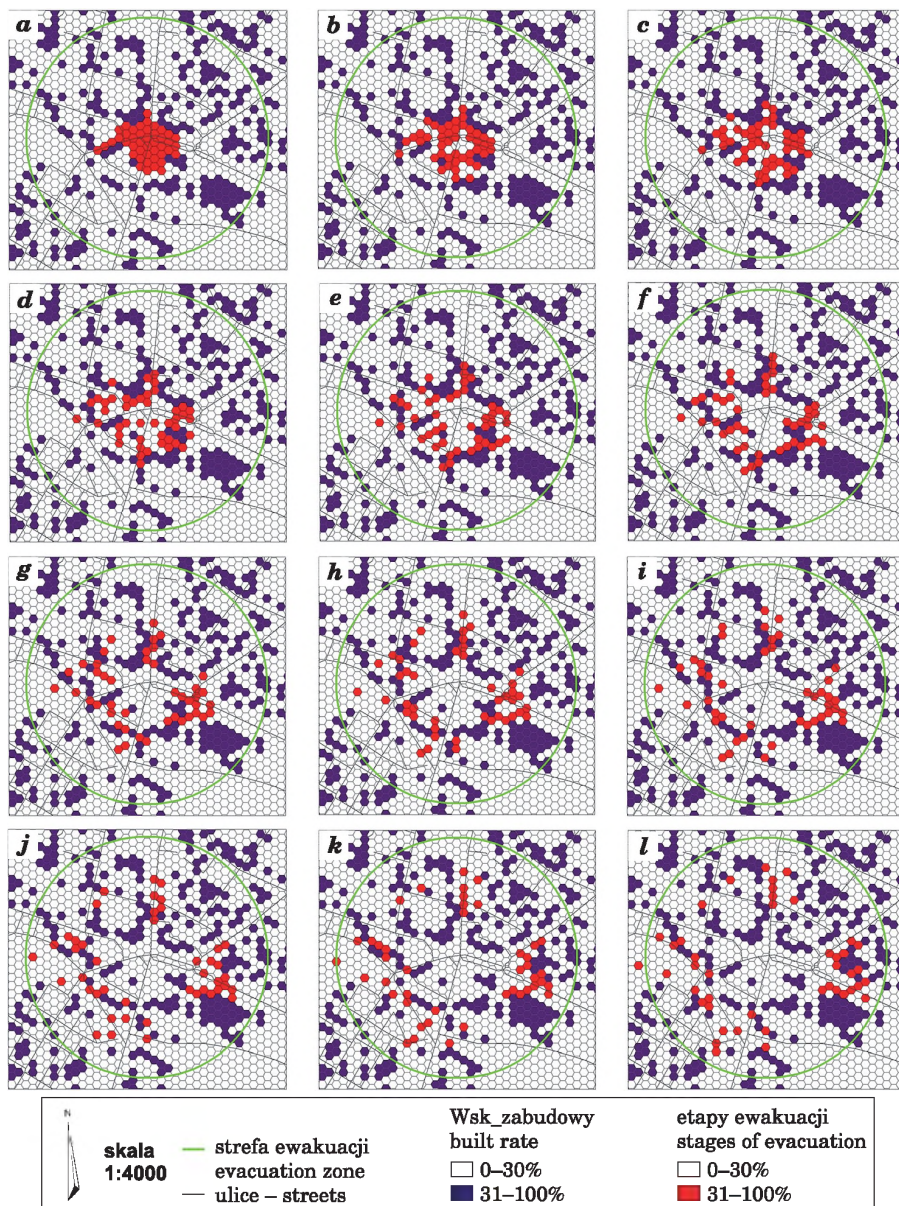
Fig. 4. Indicator of building development

Źródło: Opracowanie własne

Source: Own study

Kolejnym etapem po uwzględnieniu wskaźnika zabudowy była budowa automatu komórkowego opartego na przyjętych regułach przejść. Przeprowadzono symulację dla kilkunastu postępień, aż do momentu opuszczenia przez pierwsze osoby obszaru ewakuacji (rys 5).





Rys. 5. Etapy ewakuacji: *a* – stan nr 0, *b* – stan nr 1, *c* – stan nr 2, *d* – stan nr 3, *e* – stan nr 4, *f* – stan nr 5, *g* – stan nr 6, *h* – stan nr 7, *i* – stan nr 8, *j* – stan nr 9, *k* – stan nr 10, *l* – stan nr 11  
 Fig. 5. Stages of evacuation: *a* – condition nr 0, *b* – condition nr 1, *c* – condition nr 2, *d* – condition nr 3, *e* – condition nr 4, *f* – condition nr 5, *g* – condition nr 6, *h* – condition nr 7, *i* – condition nr 8, *j* – condition nr 9, *k* – condition nr 10, *l* – condition nr 11

Źródło: Opracowanie własne

Source: Own study

## WNIOSKI

Wykorzystanie automatów komórkowych oraz oprogramowania GIS do symulowania samoewakuacji ludności na terenie miasta umożliwi przewidywanie kolejnych jej etapów oraz tworzenie dynamicznych map ewakuacji.

Automaty komórkowe jako prosty model odzwierciedlający zachowanie ludności podczas ewakuacji pozwalają na szybkie analizowanie tego procesu, tym samym mogą stać się przydatnym narzędziem ułatwiającym jego kierowaniem.

Sytuacja nagłego zagrożenia, którym jest atak terrorystyczny, wymaga uwzględnienia nie tylko konkretnych cech przestrzeni, lecz także analizowania oddziaływania poszczególnych obszarów miasta względem siebie.

## PIŚMIENNICTWO

- Architektura.info, <http://www.architektura.info>, dostęp: 1.10.2011 r.
- Batty M., Xie Y., 1994. From cells to cities. *Environment and Planning B: Planning and Design* 21, 531–548.
- 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*, FEMA, Risk Management Series Risk Assessment, A how to guide to mitigate potential terrorist attacks against buildings, s. 452.
- Główny Urząd Statystyczny, [www.gus.gov.pl](http://www.gus.gov.pl), dostęp: 1.10. 2011 r.
- Kułakowski K., 2002. *Automaty komórkowe*, AGH im. S. Staszica, Ośrodek Edukacji Niestacjonarnej, Kraków.
- Konieczny P., 2006. *Automaty komórkowe*, *Miesięcznik Matematyczno-Fizyczno-Astronomiczny „Delta”* 8, 1–3.
- Li X., Yeh A.G.O., 2001. Calibration of cellular automata by using neural networks for the simulation of complex, *Environment and Planning A*, 33, 1445–1462.
- Olsztyn. Urząd Miasta Olsztyna, [www.olsztyn.eu](http://www.olsztyn.eu), dostęp: 1.10.2011 r.
- Toffoli T., 1982. Cellular automata as an alternative to rather than an approximation of differential equations in modeling physics, *Physica 10 D*, 117–127.
- 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), 219–234.
- 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, 1175–1199.
- Wyczalek I., 2010. *Użycie automatów komórkowych do modelowania i symulacji zjawisk przestrzennych*, *Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji* vol. 21, Wrocław.
- Żygierewicz J., Modelowanie. *Automaty komórkowe*, [http://brain.fuw.edu.pl/~jarek/MODELOWANIE/Automaty\\_komorkowe.pdf](http://brain.fuw.edu.pl/~jarek/MODELOWANIE/Automaty_komorkowe.pdf), dostęp: 12.01.2009 r.

**THE MODELING PROCESS OF EVACUATION IN CASE OF TERRORIST ATTACK**

**Abstract.** Evacuation is a key aspect of crisis management, which is intended to protect civilians in life-threatening situations. In a situation where the operations include extremely diverse urban space; traditional modeling methods do not always give satisfactory results. This paper presents the possibility of using cellular automata to model the process of evacuation in the event of a terrorist attack. The work uses GIS software with processing and visualization of Geo-spatial data. As a result of these considerations, we have developed a dynamic model of evacuation in the city of Olsztyn based on simple rules and taking into account the local interaction.

**Key words:** evacuation, terrorist attack, GIS, cellular automata

Zaakceptowano do druku – Accepted for print: 28.02.2013