

PRZEGLĄD WYBRANYCH PODEJŚĆ W ZAKRESIE PROGNOZOWANIA ROZWOJU OBSZARÓW MIAST

THE REVIEW OF SOME CHOSEN APPROACHES TO FORESEE THE DEVELOPMENT OF URBAN AREAS

Małgorzata Radło – Kulisiewicz

Politechnika Warszawska, Wydział Geodezji i Kartografii, Zakład Fotogrametrii
Teledetekcji i Systemów Informacji Przestrzennej,

SŁOWA KLUCZOWE: SIP, urbanizacja, miejskie modele prognostyczne

STRESZCZENIE: Praktyczne znaczenie Systemów Informacji Przestrzennej SIP w planowaniu i zarządzaniu dla obszarów miast jest coraz bardziej widoczne. W zarządzaniu niewielkich miast zwykle wystarczą proste analizy przestrzenne w ramach SIP, by wspierać decyzje planistów, bowiem zmieniające się otoczenie jest uwarunkowane raczej małą liczbą czynników. Natomiast dla dużych miast i obszarów z większą dynamiką miejską, proste analizy nie wystarczą, by uwzględnić splot parametrów o różnym nasileniu i znaczeniu. Stąd często potrzeba tworzenia bardziej wyrafinowanych rozwiązań. Część z nich jest modelowaniem opartym bezpośrednio o funkcjonalność i możliwości SIP pozwalającym na analizę i przewidywanie skutków różnych wariantów, scenariuszy projektowanych rozwiązań. Inne rozwiązania odnoszą się do kompleksowych, dedykowanych (niezależnych lub zintegrowanych z SIP) modeli stosowanych także w prognozowaniu rozwoju obszarów miast.

Celem artykułu jest przedstawienie popularnych technik z zakresu modelowania miast oraz podkreślenie znaczenia SIP jako środowiska do tworzenia prostych modeli ułatwiających podejmowanie decyzji w kształtowaniu wizji rozwoju miasta i jako środowiska do integracji zaawansowanych modeli prognostycznych. Artykuł dotyczy następujących kwestii związanych z planowaniem i zarządzaniem przestrzenią miejską; od obowiązujących standardów dotyczących materiałów planistycznych w Polsce, przez możliwości, które udostępniają rozwiązania sieciowe przydatne na poziomie gminnym i krajowym, po istniejące techniki w modelowaniu miast na świecie. Tłem dla omawianych kwestii są Systemy Informacji Przestrzennej (ich rola w tym zakresie), które w naturalny sposób wpisują się w tę tematykę. Możliwość analizowania wieloźródłowych danych na różnych poziomach szczegółowości, w różnych wariantach i zakresach predestynują SIP na środowisko zarządzania przestrzenią miejską. Zaś uwzględnienie również czynników ekonomiczno - społecznych w zintegrowanych z SIPem określonych technikach prognostycznego modelowania miast, pozwala zrozumieć zależności sterujące złożonymi zjawiskami miejskimi. Zarządzanie miastem w zintegrowany i przemyślany sposób z pewnością obniży koszty związane z rozbudową tkanki miejskiej i pozwoli uniknąć bezładu zabudowy miejskiej.

1. WSTĘP

Z języka łacińskiego *urbs*, *urbis* to miasto, przymiotnik *urbanus* to miejski. Jak podaje Wielka Encyklopedia PWN (Warszawa 2005) urbanizacja to proces społeczny i kulturowy wyrażający się w rozwoju miast, wzroście ich liczby, powiększaniu się obszarów miejskich

i udziału ludności miejskiej w całości zaludnienia (bądź udział ludności żyjącej według miejskich wzorów). Urbanizacja jest procesem złożonym, przebiegającym w czterech zasadniczych płaszczyznach: demograficznej, przestrzennej, ekonomicznej i społecznej. W Słowniku Pojęć Geografii Społeczno-Ekonomicznej wyróżniono cztery fazy urbanizacji-etapy rozwoju urbanizacji różniące się poziomem zaawansowania tego procesu oraz charakterem i natężeniem jego symptomów i aspektów. Podkreśla się przy tym, że urbanizacja jest procesem rozwiniętym w czasie, a zatem składającym się z określonej sekwencji następujących po sobie faz, przez które przechodzą poszczególne kraje czy regiony, a kolejność tych faz jest niezmienna. Urbanizacja musi więc dokonywać się w całym swym cyklu. Wyróżnia się następujące fazy:

- urbanizacja właściwa (wstępna) polega na koncentracji ludności i działalności społeczno - gospodarczych w mieście, następuje najczęściej pod wpływem uprzemysłowienia (miasto przemysłowe),
- suburbanizacja polega głównie na urbanizacji ekonomicznej (rośnie złożoność struktury funkcjonalnej miasta) oraz zainicjowaniu urbanizacji przestrzennej, przejawiającej się przenoszeniem poza miasto (do strefy podmiejskiej) części funkcji, zakładów przemysłowych, obiektów komunalnych oraz ludności,
- dezurbanizacja polega na intensywnym rozwoju przestrzennym procesów urbanizacji przebiegającym poza miastami. Polega on na stałym poszerzaniu strefy zurbanizowanej otaczającej miasto (aglomeracja), prowadzącym w konsekwencji do uformowania się obszaru metropolitalnego (metropolizacja),
- reurbanizacja (kontrurbanizacja) to ponowne ożywienie starych centrów wielkich aglomeracji i obszarów metropolitalnych wskutek podejmowanych przez władze miasta działań na rzecz odnowienia centrum miasta i nadania mu nowych funkcji (rewitalizacja).

Chociaż rozwój miast jest niezbędny dla zrównoważonego rozwoju gospodarki, to niekontrolowany może powodować wiele szkód. „Niekontrolowany”, czyli wynikający z braku planu zagospodarowania przestrzennego dla danego obszaru lub z braku perspektywicznej koncepcji na to, w jakim kierunku ma się obszar rozwinąć, jak również istniejący, ale nieprzemyślany plan zagospodarowania przestrzennego. W pierwszym przypadku szkody widoczne są bardzo szybko i mają przede wszystkim charakter estetyczny, gdyż przeważa bezładna zabudowa miejska (ang. *urbansprawl*), zaś jej szybki rozwój może powodować straty ekonomiczne; utrudniać organizację rozwiązań inwentaryzacyjnych, budowlanych i drogowych, jak i wpływać niekorzystnie na środowisko. W drugim przypadku, konsekwencje niewłaściwych decyzji polityków czy lokalnych władz mogą stać się uciążliwe dla mieszkańców dopiero po wielu latach i być bardzo trudne do naprawienia.

Według Miazgi (2001) niezbędne są multidyscyplinarne studia, odkrywające wzajemne zależności, złożoność zjawisk, uwarunkowania i zmienność w czasie, a na podstawie tak zgromadzonej i uporządkowanej wiedzy powinny być formułowane wariantowe sposoby rozwiązań oraz - w miarę możliwości - prowadzenie badań symulacyjnych. Autor wskazuje, że planowanie przestrzenne nie może się obejść bez:

- uchwycenia dynamiki, tendencji społeczno - gospodarczych i wzajemnych związków pomiędzy zachodzącymi zjawiskami i procesami,
- rozpoznania złożonych struktur: sił społecznych, interesów i dążeń ludzkich,

- świadomości istnienia wielu podmiotów, wzrostu rangi własności, a przede wszystkim zależności od rozstrzygnięć planistycznych jej wartości.

Zatem istotą dobrze podejmowanych decyzji przestrzennych związanych z rozwojem danego obszaru, zarówno w skali lokalnej jak i regionalnej, jest zrozumienie szczególnie takich czynników i ich powiązań, które powodują zmiany w tym obszarze. W tym miejscu można przywołać pierwsze prawo geografii Toblera, które ma zapewne zasadnicze znaczenie dla zrozumienia wielu z tych czynników, choć oczywiście samo twierdzenie Toblera nie wystarczy, by zrozumieć dynamikę miejską. Pomóc zrozumieć dynamikę miejską i otaczającą nas rzeczywistość mogą modele prognostyczne. Jednocześnie istotną rolę w tym procesie szczególnie na etapie opisu (ale nie tylko) przestrzeni, jak również porównań i analiz (w tym wieloczasowych) odgrywają coraz wyraźniej systemy informacyjno-przestrzenne. Aspekt skali, nakładających się na siebie wpływów przestrzennych, integracja wielu rodzajów danych, analizy uwzględniające różne atrybuty i kryteria, potrzeba rozpatrywania trzech wymiarów, nawet w funkcji czasu, czy możliwość udostępniania projektów w portalach mapowych – to jest właśnie domena SIPu.

Niemal każde większe miasto przechodzi, w wymiarze czasowo – przestrzennym, kolejne fazy rozwoju: zaludniania centrum, odpływu ludności na obrzeża, rozbudowy i wchłonięcia strefy podmiejskiej oraz ponownego zaludniania centrum. W tym kontekście warto postawić w szczególności pytanie: jak wpływać na kierunek rozwoju urbanizacji, żeby koszty reorganizacji tkanki miejskiej wynikające z jej naturalnego rozwoju były jak najmniejsze? Jest to pytanie, które dotyczy głównie jakości zarządzania przestrzenią: od umiejętnego przewidywania potencjalnych konfliktów przestrzennych, właściwego rozpoznawania trendów lokalnej społeczności, przy uwzględnieniu ludności napływowej, przez projektowanie właściwych struktur przestrzennych aż po zoptymalizowanie sieci komunikacyjnej pomiędzy strefą zamieszkania, szkołą, pracą, strefą handlową i kulturalną. Te aspekty powinny być odpowiednio uregulowane w studium uwarunkowań i kierunków zagospodarowania przestrzennego (SUiKZP) oraz w miejscowych planach zagospodarowania przestrzennego (MPZP). Obowiązujący akt prawny, tj. Rozporządzenie Ministra Infrastruktury w sprawie zakresu projektu studium uwarunkowań i kierunków zagospodarowania przestrzennego gminy (Dz. U. 2004 nr 118 poz. 1233) określa wymogi dotyczące materiałów planistycznych, skali opracowań kartograficznych, stosowanych oznaczeń, nazewnictwa i standardów oraz sposobu dokumentowania prac planistycznych. O ile regulacje te w pełni określają zakres treści dokumentów i ich źródła, nie uwzględniając postaci ich zapisu, to już na przykład procedury wyłożenia uchwalonego studium i planu w ogóle nie przewidują udziału narzędzi cyfrowych. Dlatego w Polsce pewna część projektów studium nadal wykonywana jest ręcznie, a potem skanowana by móc być udostępnionymi w ramach biuletynu informacji publicznej.

Zapewne każdemu, kto miał do czynienia z systemami informacji przestrzennej (SIP), pojawia się w głowie myśl, że systemy te bazują na danych rastrowych (skanach map, planów, ortofotomapach, zdjęciach, itd.), danych wektorowych (zasięg i powierzchnie obszarów, przebiegi granic, itp.), tabelach (parametry, wskaźniki, zestawienia), możliwościach dowolnego symbolizowania danych, ich opisów, nadawania unikatowych oznaczeń, wzajemnych relacji. Ale przede wszystkim umożliwiają integrację danych z różnymi definicjami układów współrzędnych i w różnych skalach i ich przetwarzanie.

Technologie SIP mogą być niezwykle przydatne w realizacji zwłaszcza tych zadań w obszarze planowania, gdzie należy uwzględniać z góry przyjęte założenia, analizować i porównywać ze sobą różne warianty rozwiązań.

Czynnikiem, który długo zniechęcał do implementacji SIP w gminach był bardzo wysoki koszt pozyskania danych przestrzennych. Tymczasem w ostatnich latach obserwujemy pozytywne zmiany w tym względzie, a istotną rolę w dostępie gmin do zasobów danych przestrzennych odgrywa dyrektywa INSPIRE. Od wejścia w życie ustawy o infrastrukturze informacji przestrzennej przybywa nie tylko dokładnych i aktualnych danych dla objętych nią użytkowników, ale również jest coraz więcej portali (mapowych) zaopatrzonych w odpowiednie narzędzia, aby te dane integrować, przetwarzać i wizualizować. Podstawowe narzędzia przetwarzania i analizy danych służą do prostych analiz przestrzennych, tym samym mogą ułatwiać władzom lokalnym podejmowanie codziennych decyzji, np. administracyjnych. Choć technologie SIP dobrze radzą sobie z rozwiązywaniem zagadnień czysto przestrzennych, to w modelowaniu zagadnień złożonych, takich jak rozwój miast, gdzie silny wpływ mają czynniki socjalne i ekonomiczne, z pomocą przychodzą dodatkowe techniki. Do badania złożonych zjawisk, zależnych od wielu czynników, tworzone są zaawansowane modele prognostyczne. Te, w odróżnieniu od wspomnianych narzędzi analiz, często mają bardziej pomóc zrozumieć zależności sterujące zjawiskami miejskimi, niż dać w odpowiedzi jednoznaczny wynik analiz – oczekiwany model miasta w przyszłości.

W latach 2007 – 2011 realizowany był, w ramach VI programu Komisji Europejskiej, zintegrowany projekt badawczy PLUREL (*Peri Urban Land Use Relationships*). Jego celem było stworzenie m.in. narzędzi ułatwiających analizę przyczyn i skutków przemian w strefie podmiejskiej, a tym samym umożliwiających ocenę strategii i polityki rozwojowej, określenie trendów rozwoju dla obszarów leżących w pierścieniu sąsiadujących gmin, okalających rdzeń aglomeracji. (za Grochowski, 2011) Analizy objęły siedem funkcjonujących obszarów miejskich na terenie Unii Europejskiej, w tym obszar metropolitalny Warszawy. Z badań PLUREL wynika, że dla budowania ładu przestrzennego w obszarach funkcjonalnie zintegrowanych konieczne są wielowymiarowe działania, wychodzące daleko poza tradycyjne działania podejmowane w ramach warsztatu planistycznego czy też prowadzone w rutynowy sposób przez administrację publiczną, odpowiedzialną za rozwój gmin, miast i regionów.

2. POTENCJALNE MOŻLIWOŚCI ZASTOSOWANIA TECHNOLOGII SIP W MODELOWANIU ROZWOJU MIAST

Analizy przestrzenne i modelowanie są nieoderwalną częścią Systemów Informacji Przestrzennej ("są kwintesencją SIPu") - systemu, który gromadzi, integruje, przetwarza i umożliwia analizy oraz daje możliwość wizualizacji danych i informacji. Dane przestrzenne, z których korzysta się w SIPie mogą mieć postać wektorową lub rastrową. Różnym zakresom i celom tematycznym dedykowane są różne zbiory danych przestrzennych (mapy, bazy danych, rejestry, zdjęcia lotnicze i satelitarne). Analizy przestrzenne polegają w ogólności na zastosowaniu w ramach systemu SIP mniej lub bardziej zaawansowanych operacji analitycznych (statystycznych, matematycznych) na

danych przestrzennych różnej postaci, odniesionych do obiektów jednej lub wielu warstw informacyjnych dla uzyskania nowych informacji o charakterze przestrzennym. Modelowanie procesów i zjawisk jest dążeniem do odpowiedzi na pytanie „co się stanie, jeśli...?”, a więc pewien model logiczny przybliża badane zjawisko w oparciu o parametry dobierane tak, żeby generowane były różne scenariusze analizowanego zjawiska, tak, aby można było je ze sobą porównywać i oceniać. W SIPie praktycznie nie ma ograniczeń nałożonych na liczbę przetwarzanych danych (warstw), a wynikiem analizy wielokryterialnej może być w szczególności część wspólna wszystkich przetworzonych warstw.

Z każdym rokiem przybywa w Polsce rozwiązań, które ulepszają w społeczeństwie sposoby komunikacji, ułatwiają dostęp do wiedzy i informacji, promują lokalny rynek w aspekcie gospodarczym, ekonomicznym, kulturowym i turystycznym, a tym samym kształtują charakter naszego społeczeństwa, jako społeczeństwa informacyjnego. Na dzień dzisiejszy możliwość pracy z mapą najczęściej jeszcze ogranicza się do korzystania z podstawowych narzędzi, jak np.: wybór wyświetlanych warstw, informacja o obiekcie, lupa, pomiar liniowy i powierzchniowy, selekcja obiektów, tworzenie hiperłącza, wydruk zadanego obszaru. Ale już istniejące narzędzia do niedawna tylko komercyjne do analizowania danych przestrzennych cały czas popularyzują się w nieodpłatnych programach komputerowych (*Open Source*), tym samym zwiększając pakiet łatwo dostępnych rozwiązań dla serwisów publicznych.

Jeśli chodzi o dostęp do danych, to należy w pierwszej kolejności wymienić rozwiązania oferowane przez czołowy portal krajowy (Geoportal2), utworzony i utrzymywany przez Głównego Geodetę Kraju, wprowadzający innowacyjne rozwiązania w zakresie udostępniania danych przestrzennych. Usługa obejmuje Portal Branżowy (usługi GIK), Geoportal Krajowy (regulowany Ustawą o Infrastrukturze Informacji Przestrzennej) i Geoportal INSPIRE (regulowany Dyrektywą INSPIRE). Bogaty zasób danych geodezyjnych (granice administracyjne, dane ewidencyjne, katastralne, rzeźba terenu, wizualizacja BDO, BDOT, zapis VMAPL2, skany map topograficznych) i tematycznych (infrastruktura transportowa, pomniki historii, Światowe Dziedzictwo UNESCO, zabytki archeologiczne) jest wzbogacony o dane statystyczne i obejmuje całą Polskę. Geoportal, to przykład klasycznego zastosowania technologii SIP z wykorzystaniem profesjonalnych danych przestrzennych do pozyskania różnego rodzaju informacji przestrzennej. Geoportal, co podkreślają jego twórcy, umożliwia niezależny rozwój portali branżowych.

W wielu województwach funkcjonują już serwisy mapowe udostępniające użytkownikom dane administracyjne, infrastrukturalne, katastralne, warstwy hydrograficzne, sozologiczne i tematyczne (m.in. trasy turystyczne, miejsca pamięci narodowej, bazy danych ofert inwestycyjnych itp.), stanowiąc część "wrót" województwa; takie rozwiązania mają m.in. Mazowsze, województwo świętokrzyskie, czy Dolny Śląsk. Małopolska poza „wrotami” posiada także system „Cyfrowa Małopolska”, który ułatwia kontakt mieszkańców z administracją i umożliwia świadczenie usług przez Internet. A do udostępniania informacji na platformie SIP powstał regionalny system Małopolskiej Infrastruktury Informacji Przestrzennej – platforma dla zarządzania i korzystania z danych przestrzennych, w szczególności z obszaru województwa małopolskiego. Niektóre miasta tworzą własne systemy informacji przestrzennej, które charakteryzuje duża interaktywność. Użytkownicy publiczni nie tylko są beneficjentami informacji płynącej z serwisu, lecz

również sami mogą być jej twórcami, np. zaznaczając na mapie w serwisie miejsca wymagające interwencji odpowiednich służb administracyjnych. Tak budowany dostęp do informacji przestrzennej; ze strony jednostek samorządu terytorialnego, w miarę możliwych rozwiązań pełny i otwarty powoduje, że ze strony odbiorców zwiększa się świadomość społeczna i granice postrzegania przez nich gminy, czy regionu, poszerzają się. Rośnie szansa na większe zainteresowanie obywateli sprawami otaczającej ich przestrzeni, a dzięki temu jej poprawy. Idea miast przyjaznych mieszkańcom to jeden z filarów koncepcji „inteligentnych miast” (ang. *Smart Cities*). Nastawiona jest ona na zarządzanie miastem w sposób nowoczesny (wydajna infrastruktura miejska, lokalizowanie wszystkich informacji w przestrzeni), oszczędny i ekologiczny. Oczywiście takie podejście było możliwe zawsze, ale dziś dzięki rozwojowi sposobów komunikacji, innowacyjnym technologiom i ich masowości, stawia się na partycypację obywatelską i efektywność analiz. Projekty miast inteligentnych obejmują już wszystkie polskie metropolie, m.in. Kraków, Poznań, Gdańsk i Warszawę. Idea *Smart Cities* to również duża szansa na rewitalizację terenów poprzemysłowych (np. warszawski Ursus). Rozwijające się miasto to obiekt podlegający wpływom wielu warstw: społeczno – ekonomicznej, gospodarczej, przemysłowej, kulturalnej czy środowiskowej. Niektóre komponenty tych warstw są obiektami fizycznymi (budynki, ulice, lasy), a niektóre mogą odnosić się do pewnych reguł, tendencji i założeń, które można zaaplikować w analizach lub modelowaniu, jako parametry, zmienne, pętle, etc. Choć technologie SIP dobrze radzą sobie z rozwiązywaniem zagadnień czysto przestrzennych, to do modelowania zagadnień złożonych, również złożonych z czynników socjalnych i ekonomicznych, powinny być wsparte przez dodatkowe techniki.

3. PRZEGLĄD WAŻNIEJSZYCH TECHNIKSTOSOWANYCH W MODELOWANIU ROZWOJU MIAST

W zarządzaniu niewielkich miast wystarczą zwykle proste narzędzia analiz, by wspierać decyzje planistów, bowiem zmieniające się otoczenie jest uwarunkowane raczej małą liczbą przewidywalnych czynników. Jednak dla dużych miast i obszarów z większą dynamiką miejską, algorytmy prostych analiz nie wystarczą, by uwzględnić spłot parametrów o różnym nasileniu i różnej randze. Stąd zachodzi potrzeba sięgania po bardziej zaawansowane analizy przestrzenne, tworzenia bardziej wyrafinowanych rozwiązań i kompleksowych modeli dedykowanych, korzystających z zaawansowanych narzędzi i technik. Do takich należą Prognostyczne Modele Rozwoju Miast (ang. *Urban Growth Prediction Models*; UGPM). W literaturze istnieje wiele opracowań dotyczących prognostycznych modeli miejskich, które powstały w ciągu ostatnich kilkunastu lat. W szczególności praca Triantakontantisa i Mountrakisa (2012) stanowi bardzo wartościowy przegląd dokonań w tym zakresie i z tego względu posłużyła do przedstawienia w niniejszym rozdziale wybranych zagadnień z tej tematyki. Prognostyczne Modele Rozwoju Miast mają za zadanie wychwycić rdzenne i złożone związki w przestrzeni i czasie. Złożoność ta oddaje wpływ licznych czynników biofizycznych i socjoekonomicznych, a w wyniku symulacji, pojawiają się różnorodne wzorce dla całego badanego obszaru w zadanej skali i w ten sposób modelowany rozwój miasta ma charakter dynamiczny i nieliniowy. Trudność prognozowania okresów wydłużonych uwidacznia czasową złożoność zjawiska. Rozwój miasta jest często procesem nieodwracalnym, zatem

w zmieniającym się środowisku miejskim bezpieczne są tylko krótkoterminowe prognozy (Triantakontantis i Mountrakis, 2012). Aby rozwiązać niektóre z podstawowych złożoności, w modelach UGPM uwzględniono dwie główne cechy analizy przestrzennej: autokorelację i niejednorodność przestrzenną. Autokorelacja przestrzenna odnosi się do wariacji systematycznej zmiennej, w myśl pierwszego prawa geografii, gdzie rzeczy bliskie są powiązane ze sobą bardziej niż rzeczy odległe. System niejednorodny przestrzennie i czasowo charakteryzowany jest różnymi wartościami w określonych lokalizacjach lub przedziałach czasowych. W środowisku miejskim niejednorodność przestrzenna odnosi się do różnego rozkładu przestrzennego urbanizacji i jego podstawowych czynników napędowych. Autokorelacja przestrzenna może być opisana przy użyciu globalnych i lokalnych statystyk przestrzennych. W ogólnych statystycznych badaniach przestrzennych wykorzystuje się statystyki Morana, Geary'ego "C" i "G" i Lokalnych Wskaźników Powiązań Przestrzennych. W prognostycznych modelach rozwoju miasta statystyki przestrzenne, tj. metryki (wskaźniki) krajobrazu i parametry tekstury (np. wariancja, homogeniczność) są wykorzystywane równie często. Oszacowanie zmiennej zależnej, jako funkcji macierzy zmiennych niezależnych, może być przeprowadzane za pomocą metody najmniejszych kwadratów i globalnej regresji przestrzennej.

Inną charakterystyczną i ważną cechą rozwoju miast jest niejednorodność przestrzenna (za Liu i Taylor, 2002). Modelując cały obszar badawczy można stosować jeden globalny model, jak i kilka lokalnych modeli, które bazują na różnych wzorcach rozwoju miejskiego. Rozważając niejednorodność przestrzenną stosuje się trzy techniki modelowania, regresji przełącznikowej, modeli wielopoziomowych i regresji ważonej geograficznie. Model przedstawionych regresji kwalifikuje zestaw danych, jako pewną liczbę wzajemnie wyłączonych jednorodnych obszarów, gdzie model regresji liniowej jest stosowany w każdym z nich. Model ten wypełnia lukę pomiędzy lokalnym i globalnym podejściem do modelowania przestrzennego. Wielopoziomowe modele, znane również jako modele hierarchiczne, grupują jednostki (np. struktury miejskie) w wyższe poziomy klastrów (np. dzielnice). Uzasadnieniem wykorzystania modeli wielopoziomowych jest to, że mogą one różnicować niejednorodność pomiędzy klastrami i jednostkami zagęszczonymi w ramach klastrów. Wreszcie, regresja ważona geograficznie bazuje na przypisywaniu wag do wszystkich punktów ze zbioru danych w zależności od ich odległości od centralnego punktu. W dalszej części niniejszego rozdziału, na podstawie literatury (w szczególności opracowania Triantakontantis i Mountrakisa, 2012), zostaną jedynie zasygnalizowane ważniejsze techniki (narzędzia) stosowane w modelowaniu rozwoju miast. Dobór opisanych w niniejszym rozdziale algorytmów modelowania wynika z popularności ich stosowania w różnych opracowaniach przestrzennych w skalach lokalnych, regionalnych i międzynarodowych (Triantakontantis i Mountrakis, 2012), jak też z możliwości wykorzystania tych algorytmów w środowisku SIP (Haase i in., 2012).

3.1 Automaty komórkowe

Cieszącym się największą popularnością narzędziem w modelach symulujących dynamikę miejską są automaty komórkowe (ang. *Cellular Automata*; CA); proste, dynamiczne układy przestrzenne, w których stan każdej komórki w czasie t_{n+1} zależy od poprzedniego stanu t_n komórek w sąsiedztwie, zgodnie z przyjętym zbiorem reguł

transformacji. Dzięki swojej strukturze przypominającej raster, bardzo często automaty komórkowe integrowane są z Systemami Informacji Przestrzennej. Wśród opracowań przedstawiających wykorzystanie tego typu narzędzi warto wymienić pracę Drzewieckiego (2006), która pokazuje możliwości zastosowania automatów komórkowych w modelowaniu i symulacji procesów przestrzennych w systemach informacji geograficznej. Dość wymienić, że automaty komórkowe oparte na modelach RIKS (*Research Institute for Knowledge Systems*) zostały zaimplementowane w modelu opracowanym w ramach projektu MOLAND (Barredo *et al*, 2003), finansowanego przez Wspólnotowe Centrum Badawcze Komisji Europejskiej (2000- 2009), który objął swoim zasięgiem ponad 40 europejskich obszarów miejskich, korytarzy transportowych i regionów powiększonych. Celem projektu MOLAND była ocena, monitorowanie i stworzenie modelu prognozującego pokrycie użytkowania terenu dla typowego miasta europejskiego, na podstawie zaktualizowanych, zestandaryzowanych i porównywalnych informacji z przeszłości teraźniejszości. Projekt ten jednak nie objął żadnego miasta ani regionu w Polsce.

3.2 Sztuczna sieć neuronowa

Jak podkreślają Triantakontantisi i Mountrakis (2012), dzięki rosnącym możliwościom modelowania sztucznych sieci neuronowych (ang. *Artificial Neural Network*; ANN), wbudowywane są one w modele UGPM. W przeciwieństwie do większości wieloczynnikowych technik modelowania, ANN nie wpływają znacząco na relacje danych wejściowych, a więc nie ma konieczności zakładania warunków autokorelacji przestrzennej i współliniowości. Dużą popularność zyskała najprostsza sieć ANN - wielowarstwowy perceptron sieci neuronowej (ang. *Multi Layer Perceptron*; MLP) - układ złożony z wielu pojedynczych elementów do przetwarzania, zwanych neuronami. Przed docelowym używaniem, perceptron należy wytrenować, podając przykładowe dane na wejście i modyfikując w odpowiedni sposób wagi wejść i połączenia między warstwami neuronów, tak, aby wartości na wyjściu przybierały pożądane wartości. Wartości wyjściowe sieci obliczane są za pomocą wewnętrznej funkcji transferu i zależą od neuronów wejściowych, którym przypisano wektory wag i połączono ze sobą. ANN „uczy się” z istniejących danych wejściowych i wyjściowych w sposób iteracyjny (np. algorytm wstecznej propagacji). W ostatnich latach popularność ANN znacznie wzrosła dzięki ulepszonej wydolności obliczeniowej stosowanej w wielu dziedzinach naukowych. Ponieważ miasta rosną w sposób kompleksowy, to proces samouczenia przez sieci neuronowe może generować narzędzia zdolne do modelowania złożonej struktury miejskiej. Sztuczne sieci neuronowe, jako technika nieparametryczna, mogą łatwo uchwycić różnorodność przestrzenną. ANN były również wykorzystywane w opracowaniach urbanistycznych do kalibracji i symulacji w modelach CA. Wypracowano np. integrację modeli CA i ANN w celu symulacji zmian użytkowania gruntów miejskich, używając złożonych neuronów wyjściowych. Przedstawiono model symulacji użytkowania gruntów, w którym wykorzystano nadzorowaną propagację wsteczną ANN i w ten sposób wygenerowane dane wykorzystano, jako dane wejściowe dla automatów komórkowych (za Li, Yeh, 2002 i za Mahajan, Venkatachalam, 2009).

3.3 Modelowanie fraktalne

W symulacjach rozrostu miasta korzysta się również z geometrii fraktalnej. Klasyczna geometria euklidesowa została uznana za niewystarczającą do opisywania naturalnych wzorców czasowo-przestrzennych. Geometria fraktalna szybko rozprzestrzeniła się na wielu polach badawczych. Na miasta można patrzeć, jak na obiekty fraktalne, gdzie wzajemne oddziaływanie różnych składowych przestrzennych może być opisane przez związki nieliniowe. Teoria fraktali zajmuje się nieliniowością przestrzenną złożoności strukturalnej, a rozwój miast jest zgodny z procesem samoorganizacji przestrzennej na wielu poziomach. Samoorganizacja jest ważnym procesem w zjawiskach środowiskowych. Opiera się na zdolności systemu doorganizowania swoich komponentów przy wykorzystaniu sił wewnętrznych. W samoorganizujących się systemach, organizacja wzrasta spontanicznie bez udziału zewnętrznego czynnika kontroli, powodowana jest wewnętrznymi procesami zmian, takimi jak wahania lub zakłócenia. Ponieważ na miejski system samoorganizacji składają się wszystkie regiony, to musi być on traktowany całościowo, a nie, jako suma niezależnych części systemu. Separacja pewnych regionów miasta lub ich osobne traktowanie może powodować nieoczekiwaną zmianę w środowisku miejskim. Triantakonstantis i Mountrakis przestrzegają, że chociaż istnieje tendencja do dostrzegania fraktali „wszędzie”, to wiele obiektów nie można uznać za prawdziwe fraktale. Naturalne obiekty i zjawiska niekoniecznie muszą być opisywane procesem samopodobieństwa. Powstało wiele algorytmów zaprogramowanych w celu obliczenia wymiaru fraktalnego. Mierzenie wymiarów fraktalnych ma pewne ograniczenia, np.:

- a) różne techniki pomiarowe do badania wymiarów tego samego obiektu mogą dawać różne wyniki,
- b) obiekty o różnych cechach morfologicznych, mogą mieć ten sam wymiar fraktalny
- c) obiekty z tej samej klasy fraktalnej mogą mieć znacząco różne wymiary.

Dlatego też różne wymiary fraktalne mogą być przypisane do struktury miejskiej przy użyciu różnych pakietów oprogramowania. Co więcej, struktury miejskie o różnej fakturze mogą produkować podobny wymiar fraktalny a struktury miejskie o podobnej fakturze, mogą mieć znacząco różne wymiary fraktalne. Wreszcie, dokładne modelowanie fraktalne jest silnie uzależnione od zadowalającej oceny złożoności miejskiej (Triantakonstantis, Mountrakis, 2012).

3.4 Regresja logistyczna

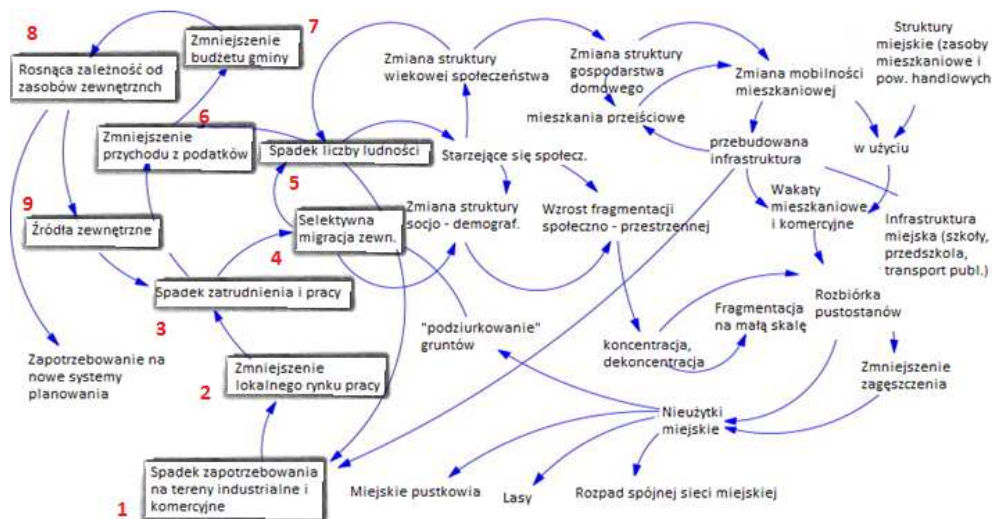
Nadal za Triantakonstantis i Mountrakis (2012): Modele regresji logistycznej (modele logitowe) w modelowaniu miejskim wykorzystywane są do badania relacji między użytkowaniem gruntów miejskich a zmiennymi niezależnymi. Gdy zmienna zależna jest dychotomiczna, to regresja logistyczna może być stosowana do przewidywania obecności lub nieobecności cechy charakterystycznej w oparciu o macierz zmiennych niezależnych. Zmienną zależną dychotomiczną może być zmiana użytkowania terenu, gdzie wartość „1” oznacza zmianę terenu podmiejskiego na miejski, a „0” oznacza brak zmian w użytkowaniu. Zmienne niezależne mogą być ciągłe, skategoryzowane lub dwojakie. Modele regresji liniowej i logistycznej są szeroko wykorzystywane w modelach rozwoju

miejskiego, agregują zmienne niezależne socjo - ekonomiczne i środowiskowe. Przykładem zintegrowanego z SIPem modelu symulacyjnego dla dynamiki użytkowania terenu jest model CLUE (*Conversion of Land Use and their Effects*) symulujący zmiany w użytkowaniu terenu poprzez dwa moduły: nie-przestrzenny moduł żądań (popytu) i przestrzenny moduł określonych alokacji. Dla modułu żądań mogą być stosowane różne podejścia do modelowania, począwszy od ekstrapolacji trendu do bardziej skomplikowanych technik modelowania ekonomicznego. W modelu alokacji przestrzennej, relacje między gruntami i zmiennymi niezależnymi oceniane są za pomocą regresji logistycznej. Procedura wyraźna przestrzennie została wykorzystana w modelu 'Skaner Użytkowania Terenu', w którym zapotrzebowanie na grunty mieszkalne lokowane jest na jednostkach przestrzennych. W modelu tym, regresja logistyczna stosowana jest do empirycznego określania wag w celu przygotowania map przydatności. Mapowy indeks przydatności terenu był tworzony przy użyciu metod: współczynnika częstotliwości, analitycznego procesu hierarchicznego, regresji logistycznej i sztucznych sieci neuronowych w celu oceny działania każdej metody. Wyniki dokładności nie wykazały istotnych różnic między tymi metodami. Analiza regresji w połączeniu z łańcuchami Markowa (proces Markowa to ciąg zdarzeń, w którym prawdopodobieństwo każdego zdarzenia zależy jedynie od wyniku poprzedniego. W ujęciu matematycznym, procesy Markowa to takie procesy stochastyczne, które spełniają własność Markowa; procesy Markowa z czasem dyskretnym) została użyta do badania wpływu miejskiego wzrostu na zmiany krajobrazu, a także wzrost liczby ludności. Niestety regresja liniowa i logistyczna nie dają dużych możliwości modelowania i nie udaje im się uchwycić nieliniowości w relacji pomiędzy zmiennymi zależnymi i niezależnymi i zależności między zmiennymi niezależnymi (Triantakontantis, Mountrakis, 2012).

3.5 Systemy Dynamiczne

Systemy dynamiczne (ang. *System Dynamics*, SD) to podejście stosowane w wielu opracowaniach, ze względu na swoją zdolność do włączenia w symulację czynników społeczno-ekonomicznych i możliwość ich analizowania w trakcie symulacji (Haase i in., 2012). Klasyczny model SD, według cytowanych autorów, składa się z trzech podsystemów (biznesowego, mieszkaniowego i społecznego) oraz z modeli szczegółowych. Modeli SD zaczęto używać także do symulacji zmian krajobrazu i analiz zmian użytkowania terenu, zwłaszcza rozwoju przestrzennego miasta.

Dla jasno sprecyzowanego problemu, dla którego zebrano niezbędne informacje i określono zmienne kluczowe (współzależności, interakcje, zmiany, opóźnienia i odpowiedzi systemów lokalnych), proces modelowania w systemach dynamicznych zaczyna się od utworzenia diagramów pętli przyczynowych (ang. *Casual Loop Diagram*; CLD), czyli odwzorowania zmiennych kluczowych w sposób schematyczny (rysunek 1). Na zebranych danych i ustalonych relacjach pomiędzy zmiennymi tworzone są diagramy 'magazynów' i 'przepływów' (ang. *stocks and flows*). SD może zawierać wzorce zmieniających się zachowań w złożonych systemach, a dzięki temu mogą obsługiwać duże zapasy danych czasowych.



Rys. 1 Konceptyjny model związków przyczynowych pomiędzy zmiennymi w kurczącym się mieście (za Haase *et al.*, 2012).

Fig. 1 A conceptual model that displays the casual relationships between the variables of shrinkage (Haase *et al.*, 2012)

Model dynamiczny opisuje zachowanie złożonego systemu, takiego jak krajobraz miejski, za pomocą równań różniczkowych. Poprzez jego zdolność do włączania pętli sprzężenia zwrotnego podczas symulacji, relacje funkcjonalne mogą zmieniać się dynamicznie. Dlatego systemy dynamiczne można wykorzystywać do symulacji zapotrzebowania na mieszkania jak i tendencji przeciwnej - wyludniania. Jednak SD nie rozwijają wzorców przestrzennych zmian użytkowania terenu, ponieważ nie uwzględniają zmiennych przestrzennych, które wpływają na zmiany użytkowania terenu i nimi sterują. Zatem w przypadku kurczących się miast, tereny poprzemysłowe czy opuszczone domy nie mogą być pokazane w sposób wyraźnie przestrzenny.

3.6 Modele agentowe

Według Haase *et al.*(2012) stosunkowo najświeższym podejściem w modelowaniu miejskim jest integracja GISu z modelami agentowymi (ang. *Agent Based Model*; ABM). Modele bazują na różnych zmiennych (agentach), którym przypisano różne właściwości i strategię dążenia do określonego celu. Mogą wchodzić w interakcje z innymi agentami w ich otoczeniu, a cechy agentów w trakcie symulacji zjawiska przestrzennego mogą być modyfikowane indywidualnie. Agenci mogą być mobilni i przemieszczać się pomiędzy lokalizacjami, wtedy modele odnoszą się do opracowań w różnych skalach; od poziomu ulicy do skali całego regionu. Za Haase (2012) techniki ABM nadają się do symulacji procesów społecznych, takich jak proces zabudowy miejskiej, modelując interakcje między oboma systemami; ludzkim i przestrzennym. W procesie kurczenia się miasta, agenci mogą

symulować odpływ ludności i wakaty mieszkaniowe, poprzez preferencje i decyzje podejmowane indywidualnie. Jednakże zastosowanie podejścia ABM do modelowania procesów miejskich, zwłaszcza kurczenia się miasta, jest wciąż w fazie początkowej, szczególnie z powodu braku empirycznej podstawy do przełożenia złożonych zachowań agentów na reguły sterujące zachowaniem modelu. Dużą popularność w modelowaniu kurczących się miast zyskało zintegrowane podejście SD, CA i ABM. Każde z tych podejść ma swoje silne i słabe strony, ale ich kombinacja daje mocne narzędzie pozwalające ugruntować wiedzę socjo - ekonomiczną w modelowaniu przestrzennym.

4. PODSUMOWANIE

Od końca lat 90. XX wieku modelowanie prognostyczne w urbanistyce jest tematem wielu badań projektowych na całym świecie. Istnieje bogaty zbiór opracowań zagranicznych poświęconych poszczególnym technikom lub ich zestawieniom w konkretnych zastosowaniach, czego wyrazem jest rozdział trzeci tej pracy. W literaturze polskiej trudno jest znaleźć wyniki badań, czy szersze opracowanie dotyczące tej tematyki. Być może jest to odbicie słabej, dopiero rozwijającej się potrzeby stosowania tego typu rozwiązań technologicznych w szerszej rozumianym planowaniu czy zarządzaniu. Wdrażanie technologii SIP do zarządzania przestrzenią to pierwszy krok na drodze do modelowania procesów urbanistycznych. Możliwości i elastyczność systemów informacji przestrzennej są dobrym podłożem do implementacji zaawansowanych technik modelowania (jak CA, SD, ANN). Dokonany w rozdziale 3 przegląd najbardziej popularnych algorytmów modelowania wskazuje na szerokie spektrum możliwości tych rozwiązań w omawianym obszarze zastosowań. Istotnego znaczenia nabierają tu również pozytywne aspekty możliwego ich współdziałania w środowisku SIP.

Nieustanny rozwój dwóch filarów: technologii informacyjnych i baz danych przestrzennych najprawdopodobniej spowoduje, że w polskich regulacjach prawnych dotyczących dokumentów przestrzennych (tj. SUIKZP) obowiązujące będzie wykorzystanie mediów cyfrowych zarówno na etapie tworzenia dokumentów planistycznych, jak i ich upublicznienia. Miasta będą zarządzane optymalnie, jeśli w pełni zostanie wykorzystany potencjał drzemący w technologii informacyjno-komunikacyjnej i w samym społeczeństwie, bo właściwy kierunek rozwoju miast nadają ludzie działający w sposób świadomy, przemyślany i efektywny. Spójne i zharmonizowane dane zawarte w interoperacyjnych zbiorach przestrzennych powinny być także wykorzystywane w modelach prognostycznych, aby w sposób właściwy modelować wizję przyszłego miasta. Być może w niedalekiej przyszłości powstaną *nakładki modelujące* na usługi takie jak Geoport.

LITERATURA

Barredo J., Kasanko M., McCormick N., Lavallo C., 2003. Modelling dynamic spatial processes: simulation of urban future scenarios through cellular automata., *Landscape and urban planning*, 64(3), s. 145-160.

Drzewiecki W., 2008. Monitoring zmian pokrycia i użytkowania terenu na podstawie wieloczasowych obrazów teledetekcyjnych, *Roczniki Geomatyki*, Tom VI, Zeszyt 3.

Dz.U. 2004 nr 118 poz. 1233; Rozporządzenie Ministra Infrastruktury z dnia 28 kwietnia 2004 r. w sprawie zakresu projektu studium uwarunkowań i kierunków zagospodarowania przestrzennego gminy.

Grochowski M., 2011. Metropolizacja a kształtowanie ładu przestrzennego układów zurbanizowanych, *MAZOWSZE Studia Regionalne*, 6, s. 167-172.

Haase D., Hasse A., Kabisch N., Kabisch S., Rink D., 2012. Actors and factors in land-use simulation: The challenge of urban shrinkage, *Environmental Modelling & Software*, 35, s. 92-103.

Li X., Yeh A. G., 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.

Liu J., Taylor W., 2002. Integrating Landscape Ecology into Natural Resource Management. *Cambridge University Press*, Cambridge, str. 480.

Mahajan Y., Venkatachalam P., 2009. Neural Network Based Cellular Automata Model for Dynamic Spatial Modeling in GIS, w: Gervasi O., Taniar D., Murgante B., Lagana A. and Mun Y., Eds., *Computational Science and Its Applications-ICCSA 2009*, Springer, Berlin, Heidelberg, str. 341-352.

Miazga M., *Spoleczne problemy kształtowania przestrzeni*, Warszawa 2001, s. 48.

Słownik Pojęć Geografii Społeczno- Ekonomicznej z encyklopedii internetowej www.edupedia.pl

Triantakostas D, Mountrakis G., 2012. Urban Growth Prediction: A Review of Computational Models and Human Perceptions. *Journal of Geographic Information System*.

WielkaEncyklopedia PWN, Warszawa 2005

THE REVIEW OF SOME CHOSEN APPROACHES TO FORESEE DEVELOPMENT OF URBAN AREAS

KEY WORDS: GIS, urbanization, Urban Growth Prediction Models

Summary

The practical importance of Geographical Information Systems in urban planning and managing of urban areas is becoming much more explicit. Managing small cities usually needs simple GIS spatial analysis tools to support planners' decisions. Otherwise, the urban dynamic is bigger and factors affecting changes in city are combined. These analyses are not sufficient and then a need for more advanced and sophisticated solutions can appear. The aim of this article is to introduce popular techniques for urban modelling and underlying importance of GIS as an environment for creating simple models, which let t easy decisions in creating vision of a city be taken. The Article touches on the following issues related to the planning and management of urban space; from the applicable standards concerning materials planning in Poland, through the possibilities that give us network solutions useful at the municipal and country level, to existing techniques in modelling cities in the world. The background for these questions are the Geographical Information Systems (their role in this respect), that naturally fit into this theme. The ability to analyze multi-source data at different levels of detail, in different variants and ranges, predispose the GIS to environmental urban management. While also taking into account social - economic factors, integrated with GIS predictive modeling techniques, allows us to understand dependencies that navigate complex urban phenomena. City management in an integrated and thoughtful manner and will reduce the costs associated with the expansion of the urban fabric and avoid the chaos of urban development.

Dane autora:

Mgr inż. Małgorzata Radło-Kulisiewicz
e-mail: mradlo@gik.pw.edu.pl
telefon: 22 234 7358

Przesłano 11.10.2015

Zaakceptowano 5.12.2015