

Tatiana JAWORSKA

## WYBRANE ASPEKTY BUDOWY I ZASTOSOWANIA TOPOLOGII W SYSTEMACH INFORMACJI GEOGRAFICZNEJ (GIS)

**Streszczenie.** Aby prowadzić jakąkolwiek analizę przestrzenną, należy mieć odpowiednio wykonaną mapę cyfrową z wypełnioną bazą danych. Odpowiednia mapa to taka, która ma określoną topologię, żeby można było uzyskać na jej podstawie informację o sąsiedztwie obiektów lub ich zawieraniu się w sobie. Topologię mapy buduje się na bazie teorii grafów zakładając, że węzły odpowiadają punktom mapy, połączenia między węzłami liniom na mapie, a poligony to przestrzeń ograniczona we wnętrzu grafu. Dla takiej interpretacji topologii mapy podana jest odpowiednia struktura bazy danych oraz przykłady zastosowań.

## THE ASPECTS OF BUILDING AND APPLICATION OF TOPOLOGY IN GEOGRAPHIC INFORMATION SYSTEMS

**Summary.** Any spatial analysis have to base on property digital map and fulfil data base. The right map is the one which has topology. This topology gives information about objects adjacency or nesting. The map topology is built basing on the graph theory that nodes are treated as points, vertices are treated as arcs and polygons are limited by space inside the graph. The data base structure is presented for such interpretation of map topology and examples of application.

### 1. Wprowadzenie

Systemy informacji geograficznej są to systemy zbierające, gromadzące i przetwarzające informację przestrzenną. W systemach tych wykorzystuje się bardzo wiele dziedzin nauki - od matematyki i informatyki przez geografię, aż po teorię zarządzania.

Podstawę systemu informacji geograficznej stanowi mapa cyfrowa połączona z bazą danych. Pod względem struktury możemy wyróżnić dwa rodzaje map: rastrową i wektorową. Na mapę rastrową składa się zbiór pikseli. Na ekranie można taką mapę powiększać, zmniejszać, dołączać informację do określonego piksela lub analizować informację niesioną przez barwę danego piksela. Mapa wektorowa natomiast jest zbudowana z punktów, linii i poligonów. Do każdego z tych elementów można również podłączyć opis bazodanowy.

Cały trud wkładany w stworzenie mapy komputerowej oraz bazy danych jest opłacalny dopiero wtedy, gdy później można prowadzić na podstawie takiej mapy analizy przestrzenne. Niestety, na podstawie geometrii map nie można jeszcze prowadzić takich analiz. Mapa musi mieć określoną topologię, czyli powiązania, na podstawie których można określić sąsiedztwo elementów, ich zawieranie się i otoczenie. Dzięki temu użytkownik może dowiedzieć się np., jakie są działki w pobliżu autostrady lub jaka jest najkrótsza trasa pomiędzy określonymi punktami. Właśnie zastosowanie topologii jest zaprezentowane w tym artykule.

Budowa topologii mapy polega na określeniu związków pomiędzy elementami składowymi tej mapy, przykładowo ich orientacji w przestrzeni i wzajemnego położenia elementów.

Korzysta się w tym celu z wybranych fragmentów teorii grafów i topologicznego pojęcia obszaru. W relacjach przestrzennych wprowadza się pojęcie sąsiedztwa, łączenia i zawierania się. Przestrzeń może być widziana jako teoretycznie nieskończony zbiór punktów z odległością spełniającą określone aksjomaty. Praktycznie pewne zjawiska jednak nie są definiowane dla wszystkich punktów w ciągłej przestrzeni, bo nie mogą być rozpatrywane jako zbiór nieskończony. Jeśli na przykład rozpatrujemy rzeki lub drogi, to zajmujemy się tylko podzbiorem punktów ograniczonym przez wcześniej określoną lokalizację obiektów o zerowym wymiarze topologicznym. Innymi słowy pozycja węzłów jest elementem dominującym.

Formalnie definiuje się warunki izotropiczności systemu jako identyczność cech we wszystkich kierunkach, natomiast anizotropia oznacza istnienie różnych cech zależnie od kierunku w przestrzeni.

Fizyczne systemy (sieci) naturalne lub stworzone przez człowieka w dwu lub trzech wymiarach są anizotropiczne. Przykładem takich sieci są:

- sieć drogowa,
- sieć połączeń lotniczych,
- wodociągi,
- kanalizacja,
- sieć połączeń morskich,
- hydrologia,
- geomorfologia.

## 2. Grafy w systemach informacji geograficznej

Do opisu topologii mapy używamy grafów. Grafem skończonym nazywamy trójkę uporządkowaną  $G = \langle X, U, P \rangle$ , gdzie  $X$  jest skończonym zbiorem wierzchołków grafu,  $U$  - skończonym zbiorem gałęzi grafu, a  $P$  - relacją trójczłonową  $P \subset X \times U \times X$ , spełniającą następujące warunki:

$$\bigwedge_{u \in U} \bigvee_{\langle x, y \rangle \in X^2} \langle x, u, y \rangle \in P$$

$$\bigwedge_{u \in U} \bigwedge_{x, y, v, z \in X} \{[\langle x, u, y \rangle \in P \wedge \langle v, u, z \rangle \in P] \Rightarrow [(x=v) \wedge (y=z) \vee (x=z) \wedge (y=v)]\}$$

Zbiór gałęzi  $U$  dzielimy na zbiory:

- krawędzi  $\bar{U}$
- luków  $U^-$
- pętli  $\dot{U}$ , przy czym:

$$u \in \bar{U} \Leftrightarrow \bigvee_{\substack{x, y \in X \\ x \neq y}} (\langle x, u, y \rangle \in P \wedge \langle y, u, x \rangle \in P)$$

$$u \in U^- \Leftrightarrow \bigvee_{\substack{x, y \in X \\ x \neq y}} (\langle x, u, y \rangle \in P \wedge \langle y, u, x \rangle \notin P)$$

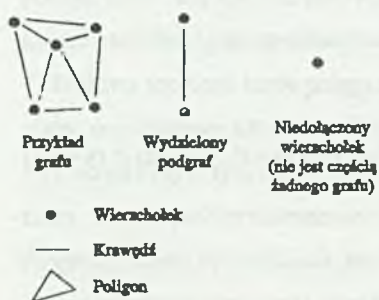
$$u \in \dot{U} \Leftrightarrow \bigvee_{x \in X} \langle x, u, x \rangle \in P$$

Przyjęto następujący sposób graficznego przedstawiania grafu na płaszczyźnie: wierzchołkom  $x \in X$  przyporządkowuje się wzajemnie jednoznacznie punkty płaszczyzny. Krawędź  $u \in \bar{U}$ , taką, że  $\langle x, u, y \rangle \in P$ , przedstawia się jako linię łączącą punkty odpowiadające wierzchołkom  $x, y$ . Łuk  $u \in U^-$ , taki, że  $\langle x, u, y \rangle \in P$ , przedstawia się jako linię skierowaną o początku w punkcie  $x$ , a końcu (grocie) w punkcie  $y$ . Pętlę  $u \in \dot{U}$ , taką, że  $\langle x, u, x \rangle \in P$ , przedstawia się jako linię zamkniętą przechodzącą przez punkt  $x$ .

Fragmenty sieci możemy rozpatrywać jako graf. W znaczeniu geometrycznym wierzchołek jest punktem o niepowtarzalnej pozycji, który nie ma wielkości, a krawędź jest krzywą lub linią prostą (rys.1). Wierzchołki mogą być połączone na wiele różnych sposobów i mogą mieć dołączoną



różną liczbę krzywych, ale nie mniej niż jedną. Grafy mogą być płaskie, jeżeli wszystkie połączenia leżą w jednej płaszczyźnie lub mogą być przestrzenne. Trójwymiarowe grafy są trudne do wizualizacji, a typowym przykładem grafu przestrzennego jest system komunikacyjny z wiadukami, mostami i tunelami, podobnie jak system połączeń lotniczych.



Rys. 1. Składniki grafu  
Fig. 1. Components of graph

Jednym słowem połączenia i sąsiedztwo odpowiadają sobie nawet wtedy, jeśli kształty są całkiem różne (rys. 2).



Rys. 2. Przykład grafu izomorficznego  
Fig. 2. Example of isomorphic graphs

Graf cykliczny ma co najmniej jeden wierzchołek połączony do samego siebie. Autostrady i systemy połączeń lotniczych mają wiele takich pętli, system rzeczny natomiast ma strukturę drzewiastą (rys. 4). Graf cykliczny, jak i acykliczny mogą być skierowane (występują łuki), a kierunek wyznaczają strzałki.

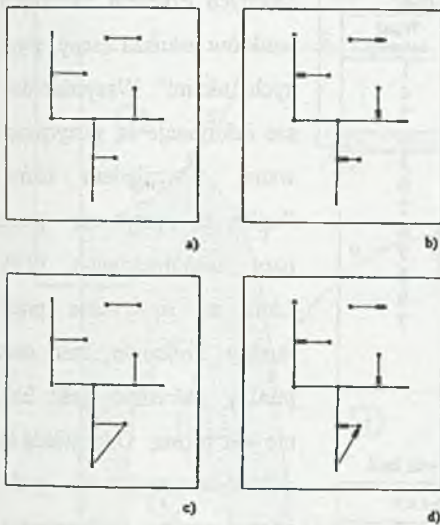
Dla stałych obiektów trójwymiarowych, czasem określanych komórkami, graf składa się z wielu krawędzi ograniczających obszary. Stałe obiekty mogą być wewnątrz lub na zewnątrz grafu, ale nie łączą się z innymi obiektami. W przypadku łączenia takich obiektów muszą być brzegi ograniczające.

Grafy są wykorzystywane do opisu wielu relacji przestrzennych, takich jak: wykazywanie podobieństwa struktury lub podobieństwa połączeń w różnych elementach sieci drogowej lub wzorach połączeń w różnym czasie.

Mówimy, że dwa grafy są izomorficzne, jeżeli ich wierzchołki i krawędzie odpowiadają sobie wzajemnie

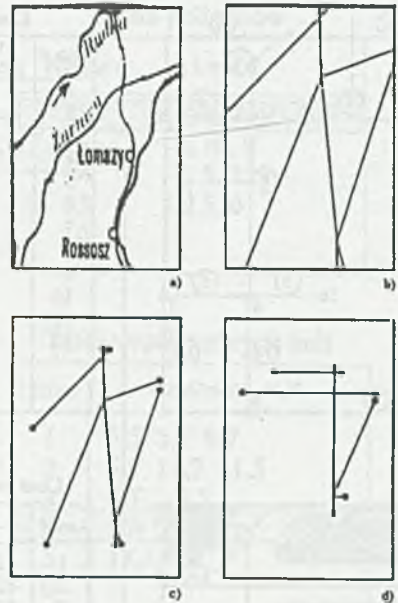
Jeżeli graf nie ma pętli ani łuków, to nazywamy go grafem drzewiastym albo po prostu drzewem. Przykładem może być kształt gwiazdy lokalnej sieci elektrycznej.

Struktura grafu może nie być cykliczna (brak pętli), ale połączenia mogą być skierowane i wtedy jest to skierowany graf acykliczny, a najpopularniejszym przykładem jest sieć wodno-kanalizacyjna (rys. 3).



Rys.3. Przykłady typów grafów: a) niezorientowany, b) zorientowany, c) niezorientowany z pętlą, d) zorientowany z pętlą

Fig.3. Same types of graph patterns: a) unoriented, b) oriented, c) unoriented with loops, d) oriented with loops



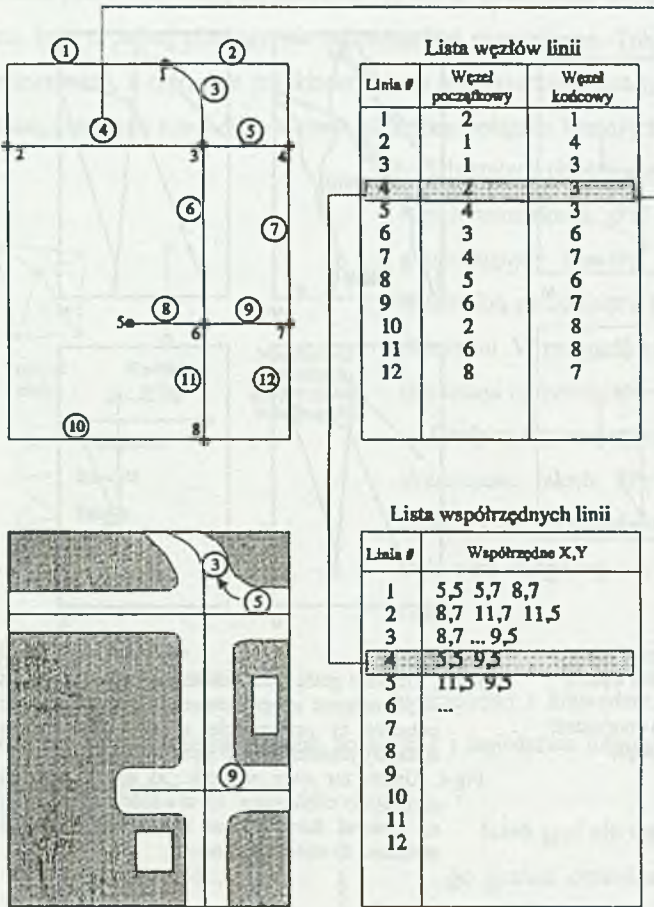
Rys.4. Przykład grafu sieci rzecznej: a) mapa oparta na współrzędnych geograficznych, b) wyprostowanie połączeń c) przesunięcie w celu podkreślenia struktury przestrzennej d) węzły i połączenia

Fig.4. Graph for river network: a) map based on geographic coordinates, b) straightening of links, c) removal from context to emphasize spatial structure, d) vertices and edges

### 3. Metody zapisu struktury mapy wektorowej

Właściwością topologiczną jest styczność i w czasie digitalizacji przestrzeni jest pokrywana zbiorem poligonów bez dziur i nakładania się obszarów. Należy zwrócić w tym miejscu uwagę, iż koncepcja i narzędzia, które opisują przestrzeń przez sieć wierzchołków, połączeń i obszarów mogą być traktowane jako płaska topologia mapy, przy założeniu, że nie ma obszarów nakładających się na siebie i linii krzyżujących się bez węzłów.

Informacje na mapie klasyfikuje się najpierw na warstwy informacyjne, a następnie w obrębie danej warstwy na elementy punktowe, liniowe i obszarowe. Wszystkie te elementy są odpowiednio zapisane w bazie danych, w której jest wyposażone oprogramowanie służące do tworzenia GIS. Umieszczenie informacji w określonym układzie współrzędnych zapewnia się przez okreś-



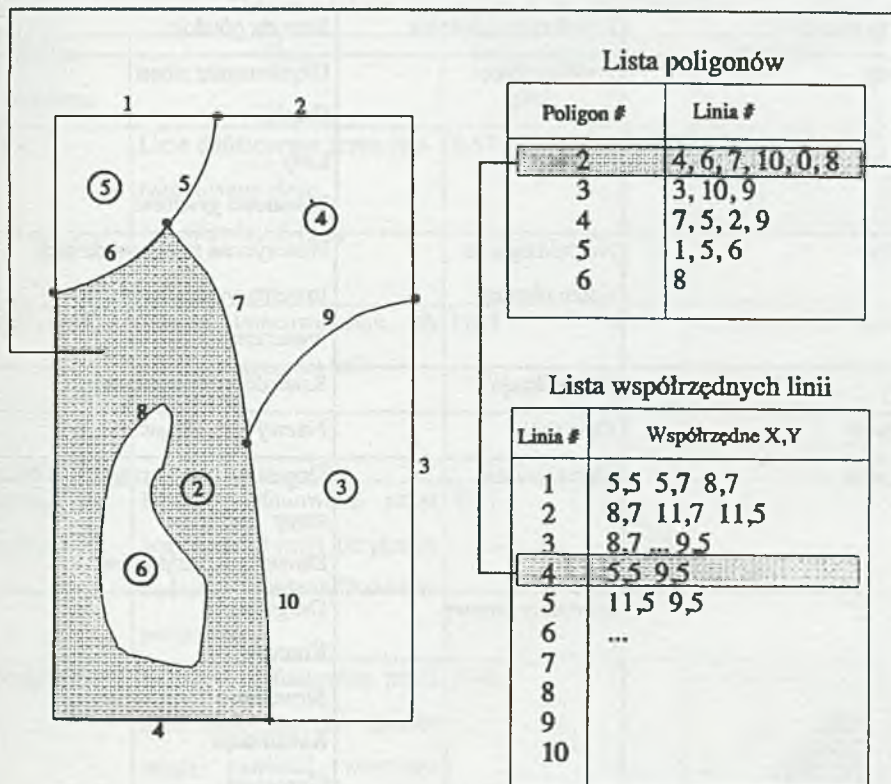
Rys.5. Sposób zapisu topologii linii w bazie danych (Arc/Info)  
 Fig.5. Arc-node topology

lenie w tym układzie współrzędnych czterech narożnych punktów arkusza mapy, zwanych „tikami”. Wszystkie dalsze informacje są pozycjonowane względem tików. Punkty są opisywane przez parę współrzędnych (x,y). Linie są opisywane przez punkty końcowe linii oraz punkty pośrednie, jeśli linia nie jest prostą. Odpowiada to dokładnie strukturze grafu, gdyż punkty odpowiadają węzłom, linie - krawędziom, a trzecim elementem są poligony. Każda linia ma swój identyfikator (rys.5). Informacja jest przechowywana w dwóch tabelach, żeby uniknąć redundancji.

Poligony natomiast są opisane przez numery linii odpowiednio uporządkowane.

Taka organizacja bazy zapewnia, że dane pamiętane są tylko raz w jednym miejscu i że nie nastąpi zachodzenie poligonów na siebie. Poligony również mają swoje identyfikatory.





Rys.6. Sposób zapisu topologii poligonów w bazie danych (Arc/Info)

Fig.6. Polygon-arc topology

Funkcjonalnie można podzielić elementy wchodzące w skład jednej warstwy według następującej tabeli:

Rodzaj elementu	Użycie	Przykład
Linie	Elementy liniowe	Drogi Kontury Strumienie Kanalizacja Linie energetyczne Gazociągi
Węzły	Punkty wzdłuż linii	Zawory na rurociągi Skrzyżowania ulic

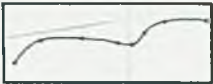
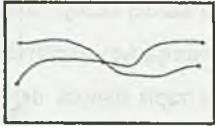

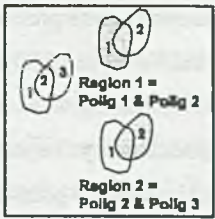

Etykiety punktów	Lokalizacja punktów	Szczyty górskie
Poligony	Powierzchnie	Użytkowanie ziemi Działki Lasy Własności gruntów
Regiony	Nachodzące na siebie obszary	Historyczna struktura działek Inwentaryzacja terytoriów zwierzyny
Tiki	Rektyfikacja	Kontrola przy digitalizacji
Adnotacje	Opis cech	Nazwy ulic, miejsc itp.
Połączenia	Dopadowanie	Dopasowanie krawędzi arkuszy mapy Dowiązanie atrybutów
Trasy	Elementy liniowe	Drogi Kontury Strumienie Kanalizacja Gazociągi
Sekcje	Definiowanie tras	-
Rozszerzenia warstw	Definiowanie rozszerzeń mapy	-

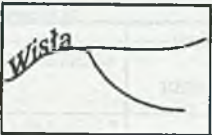
Wszystkie elementy mogą być opisane atrybutami odzwierciedlającymi rzeczywiście istniejące obiekty, np:

- typy dróg -
- 1 = drogi dwujezdniowe główne,
  - 2 = drogi dwujezdniowe drugorzędne,
  - 3 = drogi jednojezdniowe drugorzędne,
  - 4 = drogi jednojezdniowe utwardzone,
  - 5 = drogi gruntowe utrzymane,
  - 6 = drogi gruntowe wiejskie.



Zbiorcza tabela obrazująca elementy warstwy

Rodzaj elementu	Opis	Rozszerzenie tabeli	Przykład
Linie	Linie definiowane przez uporządkowany zbiór współrzędnych (x,y)	AAT	
Węzły	Punkty końcowe linii lub punkty połączenia linii	NAT	
Etykiety punktów	Punkty definiowane przez współrzędne (x,y) lub punkty będące indentyfikatorami poligonów	PAT	+ 23
Poligony	Obszary zdefiniowane przez linie stanowiące ich granice mogą zawierać wewnątrz zagnieźdżenia. Etykieta punktu jest używana jako indentyfikator poligonu	PAT	
Regiony	Obszary składające się z poligonów	PAT, podklasa	
Tiki	Punkty kontroli geograficznej do rejestracji i transformacji współrzędnych warstwy	TIC	

Adnotacje	Ciąg znaków opisujący własności geograficzne	TAT.podklasa	
-----------	--	--------------	---

Połączenie pomiędzy cechą i jej rekordem jest opatrywane unikalnym liczbowym identyfikatorem dla każdej cechy. Ten identyfikator jest fizycznie zapamiętywany w dwu miejscach: w zbiorze zawierającym współrzędne x,y i w odpowiadającym mu zbiorze z opisem atrybutów cech.

Taki zapis danych daje możliwość korekcy danych i analiz przestrzennych. Analiza przestrzenna pozwala na badanie procesów zachodzących w świecie rzeczywistym przez stosowanie i rozwijanie modeli. Takie modele uwypuklają trendy w danych, umożliwiając uzyskanie nowej jakościowo informacji. Rezultatem analiz przestrzennych jest oczywiście mapa (rzadziej raport tabelaryczny).

Aby wykonać analizę przestrzenną należy:

- ustalić kryteria analizy;
- przygotować dane do operacji przestrzennych;
- przygotować operacje przestrzenne;
- zaczerpnąć dane z tabeli;
- przygotować analizę w postaci tabel;
- zaprezentować graficznie rezultaty;
- oszacować i zinterpretować rezultaty.

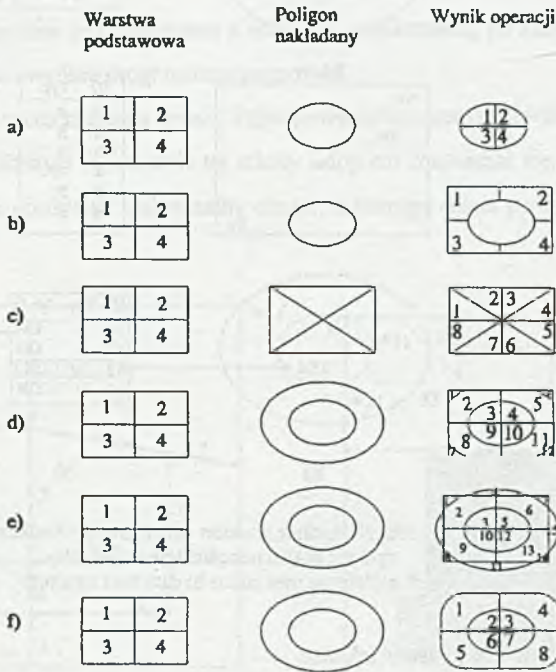
W analizie wykorzystuje się więc operacje na poligonach, liniach i punktach, za którymi idą odpowiednie zapisy w tabelach topologicznej bazy danych.

Do podstawowych operacji na poligonach należą:

- ⇒ - część wspólna - pozwala na wybranie danych z interesującego nas obszaru (rys.7a)
- ⇒ - różnica - pozwala na wyznaczenie zewnątrz interesującego obszaru (rys.7b)
- ⇒ - rozłączenie - pozwala analizować obiekty powstałe po nałożeniu dwóch warstw na siebie (rys.7c)
- ⇒ - wspólny mianownik - pozwala analizować obiekty powstałe po nałożeniu dwóch warstw na siebie na obszarze warstwy podstawowej (rys.7d)

⇒ - suma - uwzględnia wszystkie pola z obu warstw (rys. 7e)

⇒ - przecięcie - pozwala uwzględnić obszary z wnętrza obu warstw (rys. 7f).



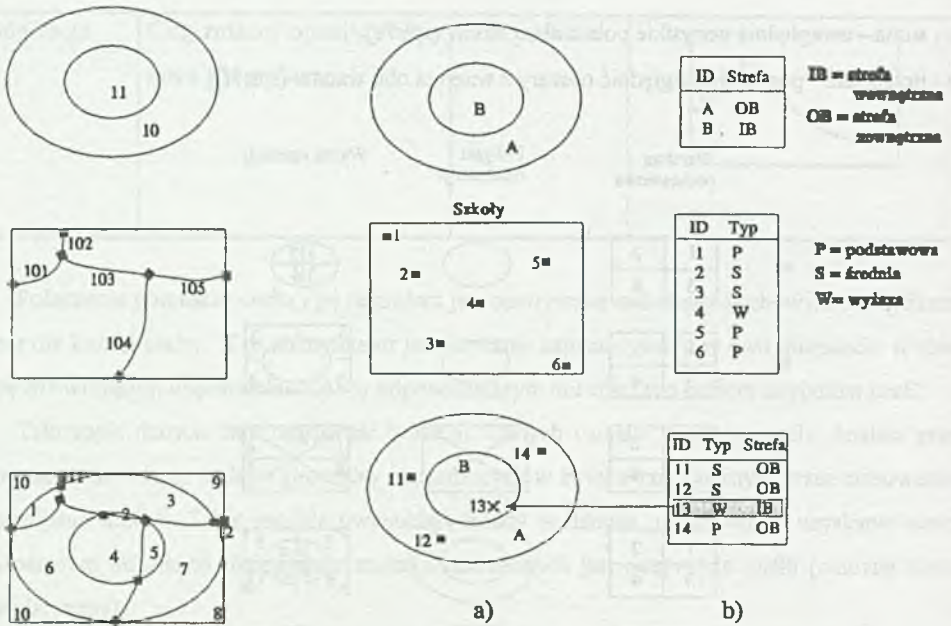
Rys. 7. Podstawowe operacje na poligonach: a) część wspólna, b) różnica, c) rozłączenie, d) wspólny mianownik, e) suma, f) przecięcie

Fig. 7. Base operations on polygons: a) clip, b) erase, c) split, d) identity, e) union, f) intersect

Do następnych podstawowych operacji używanych do analiz przestrzennych należy przecinać się linii z poligonami, co zostało pokazane na rys. 8. Po tej operacji następuje potrzeba wprowadzenia identyfikatorów i atrybutów dla nowo powstałych poligonów. Tak więc poligony oznaczone numerami 10 i 11 zostają podzielone na małe poligony o numerach od 1 do 12. Powstają również nowe węzły w punktach przecięć linii z granicami poligonów.

Kolejnym przypadkiem jest nakładanie się poligonów i punktów (rys. 9a). Obok jest przedstawiona struktura nowej tablicy danych, jaka powstaje po dokonaniu takiej analizy, określająca punkty zawierające się w obszarze A i B. Po przeanalizowaniu danych przestrzennych i stworzeniu nowych danych tabelarycznych wybiera się z tej tabeli dane spełniające określone kryterium, a następnie prezentuje się wynik tej analizy na mapie, np. wybiera się punkty znajdujące się w wewnętrznej strefie (rys. 9b).





Rys. 8. Nakładanie linii na poligony  
Fig. 8. Polygon over line

Rys. 9. a) Nakładanie punktów na poligony, b) Struktura bazy danych do operacji nakładania punktów na poligony  
Fig. 9. a) Polygon over points b) data base structure

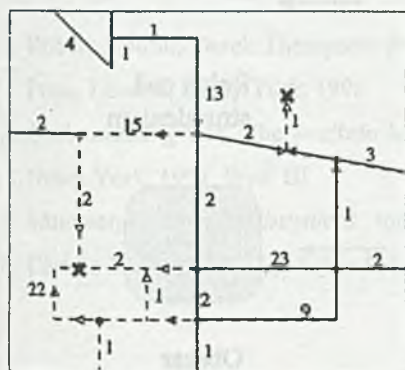
Kolejnym problemem jest zagadnienie lokalizacji. Występuje ono przy wytyczeniu tras, rozdzielaniu obszarów lub lokalizacji potencjalnych klientów przy projektowaniu nowych centrów usługowych. Najpierw należy sobie wyobrazić rozkład ludności w domach wzdłuż ulic, lokalizację szkół w określonych miejscach, informację o czasie podróżowania po ulicach miasta oraz docelową liczbę ludności, która powinna podlegać poszczególnym rejonom sądowiczym. Dane muszą być ułożone według struktury ulic miasta, natomiast liczba ludności jest związana z krawędziami grafu reprezentującymi ulice i możliwe jest rozpoznawanie jako węzły sieci, natomiast jako atrybut krawędzi grafu musi

Rys. 10. Wyznaczanie trasy  
Fig. 10. Routing problem solving

być podany czas podróży. Intuicyjnie procedura wyboru drogi powinna bazować na przechodzeniu (przeszukiwaniu) ulic, sumowaniu czasu przejazdu dla różnych ścieżek, a następnie wybraniu najmniejszego wyniku (rys.10).

Jeśli liczba uczniów jest powiązana z ulicą bez rozróżnienia, po której stronie oni mieszkają, wtedy liczbę dzieci wzdłuż drogi można zsumować.

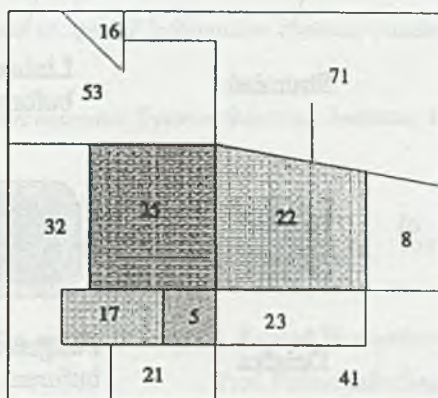
Oczywiście, proces zliczania dzieci, które powinny uczęszczać do danej szkoły, powinien się zaczynać w najbliższym sąsiedztwie tej szkoły i dopiero rozszerzać się, żeby uchwycić liczbę uczniów, a potem porównać maksymalny obszar, z którego dzieci powinny uczęszczać do danej szkoły (rys.11).



- X Lokalizacja szkół
- ← Ulice przyporządkowane do danej szkoły
- Liczba dzieci

Rys.11. Obszary przyporządkowane do określonych źródeł

Fig.11. Allocation problem solving



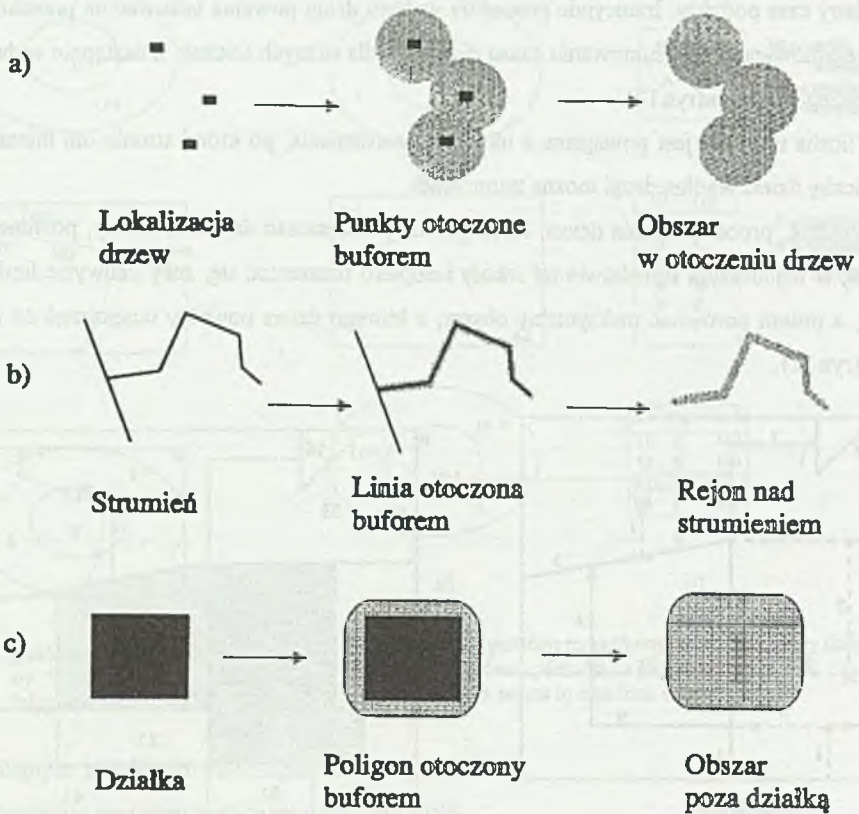
- Rejony
- 25 liczba ludności w danym rejonie

Rys.12. Podział na obszary

Fig.12. Districting problem solving

W sytuacji, gdy tworzy się rejony sądownicze, bloki miasta muszą być połączone i rozłożenie ludności po obu stronach drogi powinno być znane, żeby można było użyć tych danych do agregacji dla danego segmentu liniowego. Najwygodniej wtedy posłużyć się danymi w postaci poligonów (rys.12).

Kolejnym elementem w przygotowaniu operacji przestrzennych do analizy jest tworzenie buforów wokół punktów, linii i poligonów (rys.13).



Rys. 13. Przykład buforów wokół punktów, linii i poligonów  
 Fig. 13. Buffers three type of feature: point, line and polygon

#### 4. Podsumowanie

Właściwie dobrana struktura topologiczna mapy numerycznej pozwala na wygodny i elastyczny zapis danych, jak również stwarza możliwości prowadzenia różnorodnych analiz przestrzennych.

Opis topologicznej struktury mapy wykonanej z wykorzystaniem grafów pozwala na prowadzenie zaawansowanych analiz przestrzennych. Przykład takich analiz można prześledzić w przypadku analizy rynku. Firma, która ma zainwestować swoje pieniądze w nową siedzibę, chce wiedzieć, gdzie znajduje się największa liczba przyszłych klientów. W tym celu na podstawie mapy



analizuje się potencjalny rozkład klientów, porównuje się dane demograficzne, analizuje się przeszłe i przyszłe trendy rynkowe i ocenia się lokalizację z punktu widzenia dalszej ekspansji firmy.

Przykłady zaprezentowane w tym artykule są oczywiście znikomą częścią tego złożonego zagadnienia, jakim jest topologia mapy i późniejsze stosowanie jej do analiz. Należy również zauważyć, że do pełnych analiz przestrzennych wykorzystuje się wszystkie dostępne struktury danych, o których tu nie było mowy, gdyż nie wchodziło to w zakres tego tematu.

## LITERATURA

1. Robert Laurini, Derek Thompson: *Fundamentals of Spatial Information Systems*, Academic Press, Londyn, Nowy York, 1992
2. *Understanding GIS*, The Arc/Info Method, Environmental Systems Research Institute, Inc., Nowy York, 1995, Wyd. III
3. *Matematyka. Poradnik inżyniera.*, tom I, WNT, Warszawa, 1986, Wyd. II
4. Chrisc Huff: *Uncovering Better Business Locations*, Arc News, Vol 17 No. 1 ESRI, 1995

Recenzent: Dr hab. inż. Konrad Wojciechowski  
Prof. Politechniki Śląskiej

Wpłynęło do Redakcji 9.07.1995 r.

## Abstract

Any spatial analysis have to base on property digital map and fulfil data base. The right map is the one which has topology. This topoligy gives information about objects adjacence or nesting. The map topology is built basing on the graph theory that nodes are treated as points, vertices are treated as arcs and polygons are limited by space inside the graph. The data base is constructed that nodes have own ID, lines are determined by start-node and last-node and polygons are determined by numbers of lines. There is capable to overlay points, lines and polygons one on to another and separates new fields. Such interpretation of map topology available solving routing, allocation and districting and make more complicated analysis. At the end of this paper are presented examples of application.