

MODELOWANIE RZECZYWISTOŚCI GEOGRAFICZNEJ W SYSTEMACH INFORMACJI PRZESTRZENNEJ

MODELLING OF GEOGRAPHICAL REALITY IN THE SPATIAL INFORMATION SYSTEMS

Konrad Eckes

Wydział Geodezji Górniczej i Inżynierii Środowiska, Akademia Górniczo-Hutnicza

Słowa kluczowe: system informacji przestrzennej, GIS, model wektorowy, model rastrowy
Keywords: spatial information system, GIS, vector model, raster model

Wprowadzenie

W niniejszym opracowaniu rzeczywistość geograficzną traktuje się jako powierzchnię topograficzną wraz z obiektami przyrodniczymi i antropogenicznymi, które są z tą powierzchnią powiązane, z uwzględnieniem obiektów podziemnych. Tak rozumiana rzeczywistość geograficzna charakteryzuje się znacznie zróżnicowaną gęstością obiektów i szczegółów terenowych – od ich niewielkiej liczby, w terenach słabo zainwestowanych, aż do skrajnego spiętrzenia obiektów i szczegółów na obszarach wielkich miast i zakładów przemysłowych.

Rozpatrując bogactwo obiektów i szczegółów rzeczywistości geograficznej i budując użyteczny opis tej rzeczywistości w systemach informacji przestrzennej – należy rozwiązać trzy fundamentalne zadania:

- 1) Opanowanie złożoności rzeczywistości geograficznej, tak aby ten opis był logiczny, poglądowy i przejrzysty.
- 2) Ustalenie reprezentacji obiektów i szczegółów rzeczywistości geograficznej, zakładającej pewien poziom uproszczenia, stanowiący kompromis pomiędzy zachowaniem cech istotnych, a przeładowaniem szczegółów.
- 3) Zorganizowanie opisu w sposób sprawny, efektywny i otwarty na modyfikacje, tak aby system mógł dostarczać wszechstronnych informacji użytkownikom.

Problematyka zawarta w zadaniach (1) i (2) występowała w pewnej mierze w budowaniu tradycyjnych zapisów obiektów rzeczywistości geograficznej – w postaci map analogowych. Zmniejszenie liczby wymiarów rzeczywistości geograficznej, z przestrzeni trójwymiarowej do dwuwymiarowego obrazu mapy (mieszczące się w ramach zadania (3)) występowało również w technologii tradycyjnej.

Natomiast zapis rzeczywistości geograficznej w systemach informacji przestrzennej jest skrajnie inny niż podlegający przetwarzaniu ręcznemu obraz tradycyjny. Zapis ten musi być dostosowany do logiki techniki komputerowej. Zatem obiekty rzeczywistości geograficznej

poddane wstępnym uproszczeniom i redukcji wymiarów muszą być uformowane do postaci dostosowanej do metodyki zapisu i przetwarzania komputerowego. Taki proces zwany jest modelowaniem rzeczywistości geograficznej. Modele, jako efekt końcowy etapu formowania danych w systemie, będą traktowane w niniejszej pracy jako pewne wzorce w technologii systemów informacji przestrzennej, wzorce praktyczne, o ukształtowanych zastosowaniach. Na poparcie tej tezy można przytoczyć fakt, że niektóre zapisy cech omawianych modeli nawiązują w swojej strukturze do logiki plików komputerowych. Zadania (1) i (2) wraz ze zmniejszeniem liczby wymiarów z 3-D do 2-D zostaną omówione w następnym rozdziale niniejszej pracy. Natomiast dalsze rozdziały są poświęcone typowym modelom rzeczywistości geograficznej, przedstawionym w ujęciu proponowanym przez autora, które może być w szczególności stosowane do celów dydaktycznych.

Uproszczenia rzeczywistość geograficznej i zmniejszenie liczby wymiarów

Opanowanie złożoności rzeczywistości geograficznej przez grupowanie w klasy

W opanowaniu złożoności rzeczywistości geograficznej wykorzystane zostały zasady, które odegrały dominującą rolę w kształtowaniu się naszej cywilizacji – zasady klasyfikowania obiektów.

Klasyfikacja jest grupowaniem obiektów na podstawie podobieństwa lub różnic, z uwzględnieniem jednej cechy lub ich większej liczby. Klasyfikując zbiór obiektów redukujemy ich różnorodność – grupując je w ustalonych klasach, mimo istnienia różnic pomiędzy obiektami. W takim przypadku może ulegać redukcji pewna liczba cech indywidualnych, natomiast pozostaje zachowana różnorodność właściwa zdefiniowanym klasom.

W przypadku obiektów rzeczywistości geograficznej obiekty pod względem tematycznym zostały usystematyzowane w klasy. Przykładem takiego zbioru klas może być instrukcja (Instrukcja K-1, 1995). Do klasy *Przyziemie budynku ognioodpornego* są zaliczane wszelkie budynki posiadające cechy ognioodporności, niezależnie od zróżnicowania cech indywidualnych, takich jak faktyczny stopień tej ognioodporności lub różnych cech funkcjonalnych.

Reprezentacje i uproszczenia kształtu

Poziom koniecznego uproszczenia obiektów rzeczywistości geograficznej jest kompromisem pomiędzy zachowaniem cech istotnych a przeładowaniem szczegółów i w konsekwencji utratą pogładowości. Pogładowość wymusza eliminację szczegółów drugorzędnych. Trafną ocenę zawiera praca (Demers, 1999): *Mapa nie jest miniaturową wersją rzeczywistości*. Obraz mapy jest modelem, ekstraktem i powinien zawierać elementy istotne z gospodarczego punktu widzenia. Właśnie to kryterium ważności powoduje, że mimo generalizacji kształtów i koniecznej eliminacji szczegółów – zachowujemy w postaci znaków-symboli pewną grupę obiektów, mimo że w danej skali nie mogłyby być przedstawione ze względu na ich wymiary.

Uproszczenie kształtu obiektów ma miejsce w czasie uzyskiwania danych w postaci pomiarów. Różnym klasom obiektów przyporządkowane są tak zwane reprezentacje, które

podlegają pomiarom. Dla budynków są to rzuty przyziemia i obrysy (Instrukcja K-1, 1995), dla większości przewodów podziemnych – osie przewodów.

Uproszczenie kształtu i wybory reprezentacji obiektów podlegają pewnym, niżej wymienionym, zasadom:

- Reprezentację obiektów bryłowych lub powierzchniowych stanowi ich obrys zewnętrzny (kontur).
- Obiekty wydłużone o niewielkiej szerokości w rzucie poziomym, takie jak na przykład przewody podziemne lub ogrodzenia reprezentowane są przez osie geometryczne i traktowane są jako obiekty liniowe.
- Obiekty rzeczywistości geograficznej o małych wymiarach w rzucie na płaszczyznę poziomą, jak na przykład punkty osnowy geodezyjnej, punkty graniczne lub urządzenia na przewodach podziemnych traktowane są jako obiekty punktowe i są przedstawiane na mapach w postaci symboli.

Zmniejszenie liczby wymiarów

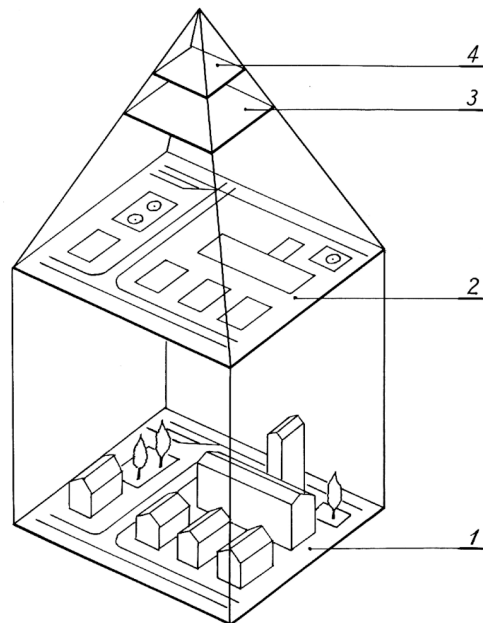
Zmniejszenie liczby wymiarów polega na rzutowaniu, wszystkich szczegółów rzeczywistości geograficznej, w czasie uzyskiwania danych – na lokalną, poziomą płaszczyznę odniesienia. Na skutek tej redukcji wymiarów obiekty bryłowe reprezentowane są przez rzuty konturów lub obrysów, obiekty liniowe i punktowe o zróżnicowanej wysokości reprezentowane są przez ich rzuty poziome.

Redukcja przestrzeni trójwymiarowej (3-D) do postaci dwuwymiarowej (2-D) jest postępowaniem mającym na celu uzyskanie dwuwymiarowego obrazu mapy, a więc postaci praktycznej w użytkowaniu i składowaniu (rys.1). Względy praktyczne użytkowania stworzyły warunki akceptacji tej redukcji, mimo znacznej utraty informacji w odwzorowaniu przestrzeni.

Po zrzutowaniu obiektów przestrzennych obraz terenu 2-D w skali 1:1 podlega zmniejszeniu w skali 1:M w celu ukształtowania obrazu terenu w określonej skali (rys. 1). W konkretnej skali mapa jest modelem 2-D trójwymiarowej rzeczywistości geograficznej.

Na wstępie użyto stwierdzenia, że rzutowaniu podlegają wszystkie szczegóły rzeczywistości geograficznej. Istnieje jednak element rzeczywistości geograficznej, który podlega tej redukcji jednak z zastosowaniem specyficznego sposobu odwzorowania trzeciego wymiaru. Tym elementem jest rzeźba terenu.

Powierzchnia topograficzna wraz z bogactwem jej kształtu jest szczególnym obiektem rzeczywistości geograficznej, jest obiektem o



Rys.1. Rzutowanie obiektów rzeczywistości geograficznej na lokalną, poziomą płaszczyznę odniesienia oraz tworzenie mapy jako modelu terenu. (1) – rzeczywistość geograficzna 3-D; (2) – rzut 2-D na płaszczyznę odniesienia w skali 1:1; (3) i (4) – mapy 2-D w skali 1:M (przykładowe mapy w skali wielkiej i w skali średniej)

podstawowym znaczeniu dla wszelkich celów gospodarczych. Powierzchnia ta podlega rzutowaniu, ale jej kształt reprezentowany jest za pomocą zarówno obrazów graficznych, jak również zapisu w postaci cyfrowej. Metodyka odwzorowania kształtu powierzchni topograficznej zarówno za pomocą środków graficznych jak i cyfrowych, ze względu na swoją specyfikę, wymaga oddzielnego opisu i dyskusji.

Wprowadzenie do technologii tworzenia modeli stosowanych w systemach informacji przestrzennej

W technologii systemów informacji przestrzennej analiza i przetwarzanie obiektów i obrazów są realizowane za pomocą algorytmów. Zapis obrazu mapy musi być dostosowany do logiki techniki komputerowej, to jest do przetwarzania szeregowego, zatem obraz mapy musi być doprowadzony do postaci liniowej. Dotychczasowy wymiar obrazu 2-D musi być przetworzony do 1-D. Zapis w postaci liniowej 1-D musi zapewniać rozróżnianie obiektów oraz identyfikację relacji pomiędzy obiektami.

Doprowadzanie obrazu mapy do postaci liniowej jest powszechnie przedstawiane w literaturze jako budowanie modeli (Bartelme, 2000; Molenaar, 1998). Nie wydaje się to słuszne, ponieważ mapa, jako model 2-D rzeczywistości geograficznej, już istnieje i teraz należy przetworzyć jej obraz do zapisu komputerowego. Jest to raczej metodyka zapisu obrazu ukierunkowana na technologię komputerową, niż poszukiwanie dalszego modelu obrazu mapy. Jednak, ze względu na powszechność używania takiego ujęcia – budowanie modeli będzie traktowane wymiennie z terminem tworzenia zapisu obrazu mapy.

W technologii systemów informacji przestrzennej stosuje się dwa podstawowe sposoby przetworzenia obrazu 2-D do postaci 1-D.

Pierwszy sposób polega na wyróżnianiu w przestrzeni obrazu obiektów, przebieganiu tych obiektów w pewnej kolejności oraz, w ramach poszczególnych obiektów, przebieganiu ich elementów strukturalnych. Taki zapis przestrzeni 2-D, ukierunkowany na obiekty, zwany jest w literaturze modelem wektorowym.

Drugi sposób jest ukierunkowany na elementy składowe obrazu. Regularna siatka pól elementarnych rozwijana jest do postaci liniowej. Z chwilą uformowania siatki pól (zwaną rastrem) każdy obraz może być wyrażony wyłącznie poprzez geometrię elementów siatki. Taki zapis przestrzeni 2-D, ukierunkowany na arbitralnie przyjęte elementy obrazu nazywany jest modelem rastrowym.

Zapis obrazu mapy w systemach informacji przestrzennej oparty na wyróżnianiu obiektów

Zapis obrazu mapy oparty na wyróżnianiu obiektów nazywany jest powszechnie w literaturze modelem wektorowym, ze względu na to, że wektor jest podstawowym obiektem struktury odwzorowania obiektów. Dla naszych celów obydwa określenia: zapis oparty na wyróżnianiu obiektów oraz model wektorowy będą traktowane równorzędnie i stosowanie wymiennie.

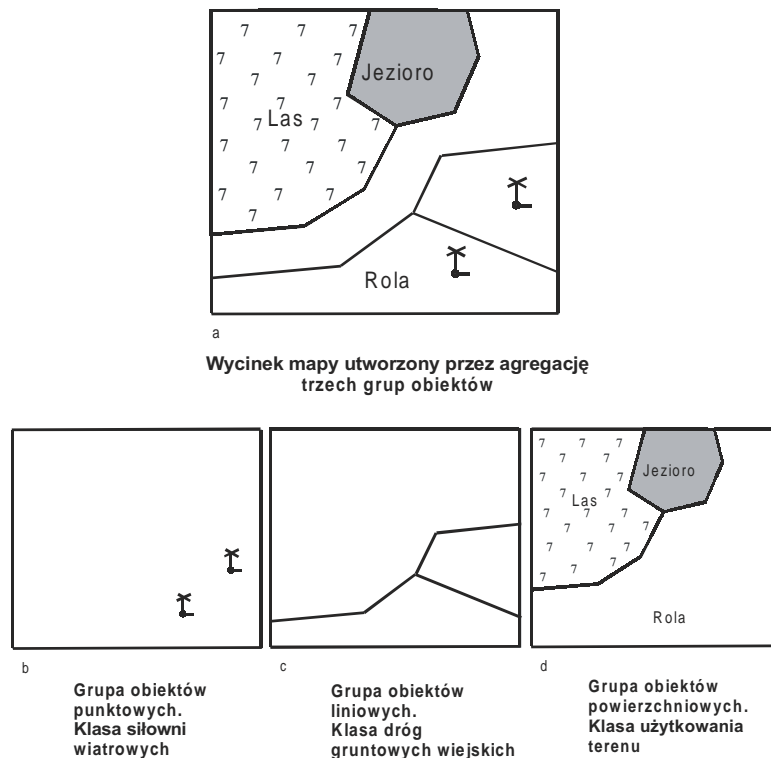
W modelu wektorowym, w przestrzeni obrazu mapy 2-D wyróżnia się obiekty o reprezentacji punktowej, liniowej i powierzchniowej. Obiekty te, ze względu na kształt grupowane są oddzielnie. Obiekty punktowe nie wymagają dalszej redukcji do postaci 1-D. natomiast obiekty liniowe i powierzchniowe podlegają rozwinięciu do tejże postaci 1-D.

Zapis obiektów liniowych i powierzchniowych może polegać na uformowaniu uporządkowanego zbioru par współrzędnych punktów, na których rozpięty jest obiekt lub na zestawieniu listy wektorów, które ten konkretny obiekt tworzą. W tym pierwszym przypadku w zapisie konieczne jest spełnienie trzech warunków:

- zachowanie kolejności zapisu par współrzędnych,
- zapis kompletu współrzędnych punktów, na których rozpięty jest obiekt,
- dodatkowo, dla obiektów powierzchniowych, konieczne jest wykazanie faktu zamknięcia obszaru, na przykład przez powtórzenie współrzędnych punktu początkowego.

W przypadku zastosowania listy wektorów, wystarczające jest spełnienie jednego warunku, aby lista wektorów była kompletna. Jednak spełnienie także warunku kolejności – porządkuje zapis obiektów.

Fundamentalną cechą zapisu obrazu w systemach informacji przestrzennej jest nie tylko zapis obiektów, lecz także zapis relacji pomiędzy obiektami. Ten czynnik uwzględniają modele wektorowe topologiczne. W kolejnych rozdziałach będzie omawianych i dyskutowanych kilka sposobów zapisu obrazu mapy, opartych na identyfikacji obiektów – o różnym poziomie zaawansowania i możliwościach wykorzystania. Sposoby te, zwane modelami wektorowymi, będą w nazwie otrzymywać dodatkowe określenia wynikające z ich cech charakterystycznych. Poszczególne modele będą ilustrowane przykładami zapisu identycznego wycinka mapy (rys. 2), która zawiera elementy punktowe, liniowe i powierzchniowe.



Rys. 2. Przykładowy wycinek mapy zawierający obiekty punktowe, liniowe i powierzchniowe – (a), z rozwarstwieniem na grupy – (b), (c), (d), służący do ilustracji różnych sposobów zapisu obiektów i relacji pomiędzy nimi w modelach wektorowych

Tabela 3. Zapis obiektów punktowych w modelu obiektywnym nietopologicznym

Określenie obiektu punktowego	X	Y
Siłownia wiatrowa 1	x_1	y_1
Siłownia wiatrowa 2	x_2	y_2

Tabela 4. Zapis obiektów liniowych w modelu obiektywnym nietopologicznym zawierający listy wektorów

Określenie obiektu liniowego	Lista wektorów tworzących obiekt
Droga ₃₋₄₋₅	V_{3-4} , V_{4-5}
Droga ₅₋₆₋₇	V_{5-6} , V_{6-7}
Droga ₅₋₈	V_{5-8}

Tabela 5. Zapis obiektów powierzchniowych w modelu obiektywnym nietopologicznym zawierający listy wektorów

Określenie obiektu liniowego	Lista wektorów granicznych obiektu
Las	V_{9-10} , V_{10-11} , V_{11-18} , V_{15-18} , V_{14-15} , V_{13-14} , V_{9-13}
Jezioro	V_{11-12} , V_{12-17} , V_{16-17} , V_{15-16} , V_{15-18} , V_{11-18}
Roła	V_{9-13} , V_{13-14} , V_{14-15} , V_{15-16} , V_{16-17} , V_{12-17} , V_{12-19} , V_{19-20} , V_{20-21} , V_{9-21}

tów liniowych i powierzchniowych.

W drugim sposobie zapisu wektory mogą być zastąpione uporządkowanymi ciągami współrzędnych punktów załamania obiektów lub ich linii granicznych. W takim przypadku nie jest konieczny plik powiązań punktów w wektory (tab. 2). W przypadku obiektów powierzchniowych konieczne jest wykazanie faktu domknięcia obszaru przez powtórzenie współrzędnych punktu wyjściowego.

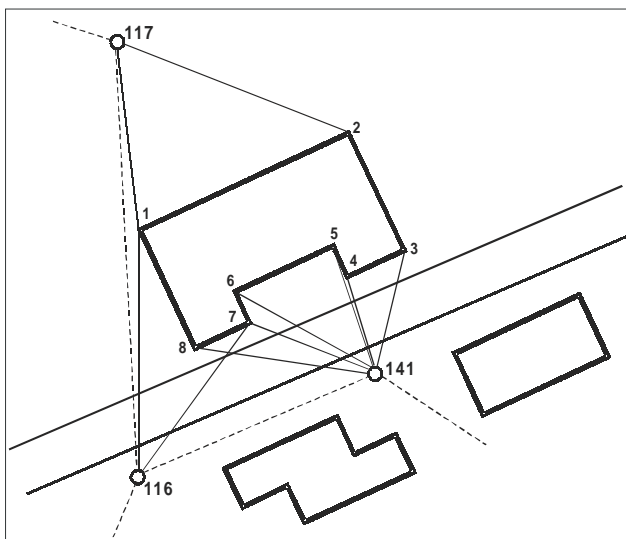
Model obiektywny nietopologiczny polega na wyróżnianiu obiektów i traktowaniu ich jako niezależne jednostki obrazu mapy. Każdy obiekt jest kompletny pod względem geometrycznym. Jest to cecha pozytywna w sensie dążenia do obiektywnego postrzegania elementu rzeczywistości geograficznej. Inną zaletą opisywanego zapisu jest łatwość zapisu, stąd wywodzi się alternatywna nazwa – prosty model wektorowy.

Model obiektywny nietopologiczny ma kilka istotnych wad. Pierwszą z nich jest nieoszczędność zapisu. Ponieważ każdy obiekt jest zapisywany niezależnie, linie graniczne pomiędzy obiektami powierzchniowymi zapisywane są dwukrotnie. Taki zapis tworzy znaczną redundancję. Ponadto występuje niezależność opisu obiektów sąsiadujących. W przypadku zmiany granicy jednego obiektu, nie pociąga to za sobą równoczesnej zmiany granicy drugiego obiektu. Model obiektywny nietopologiczny nie ma zapisanych środków do ustalenia relacji pomiędzy obiektami; na przykład relacji sąsiedztwa czy relacji przynależności do obszaru. Takie relacje są w łatwy sposób rozpoznawane przy zastosowaniu czynnika ludzkiego, lecz w realizacji komputerowej wymagają stosowania trudnych algorytmów geometrii obliczeniowej.

Modele obiektywne nietopologiczne są powszechnie stosowane jako forma przejściowa mapy numerycznej. Takie modele są uzyskiwane na podstawie wektoryzacji obrazów map, przy użyciu oprogramowania znacznie tańszego niż zaawansowane pakiety GIS. W tej przejściowej postaci zapis obrazu mapy uwalnia się od szeregu wad mapy analogowej i tworzy jedno z podstawowych źródeł uzyskiwania danych do systemów informacji przestrzennej.

Zapis źródłowy jako nieuporządkowane listy wektorów (model spaghetti)

Model spaghetti wymieniany jest zazwyczaj w literaturze przy okazji omawiania modelu wektorowego – na początku, jako zapis wektorowy w stadium minimalnej organizacji obrazu mapy. Po tym modelu następują dalsze, coraz bardziej zaawansowane opisy kolejnych modeli.



Rys. 4. Pomiar szczegółów sytuacyjnych, ukierunkowany na racjonalność postępowania w terenie, może dostarczać danych źródłowych o analogii do modelu spaghetti, danych w pełni wartościowych, podlegających uporządkowaniu w procesie dalszego opracowania

wania w czasie pomiarów terenowych. W takich pomiarach nie kierujemy się logiką zachowania ciągłości kolejnych obiektów, lecz dokonujemy pomiaru szczegółów dostępnych z danego stanowiska (rys. 4). Dla kontroli pomiarów pewne szczegóły są mierzone z różnych stanowisk, stąd niektóre czołówki budowli mogą być wyznaczone dwukrotnie. Na podstawie rysunku 4 zestawiono w tabeli 6 elementy budynku pomierzone z różnych stanowisk. Elementy te zostały zapisane jako listy wektorów.

W zapisie w tabeli 6 występuje stan nieuporządkowania ciągłości elementów budynku, a także powtórzenie elementu V_{7-8} . Zachodzi tutaj analogia do modelu spaghetti. Jednak w tym przypadku zapis zawiera dane źródłowe, do uporządkowania w procesie dalszego opracowania wyników i jest wartościowym materiałem z pomiarów terenowych.

Jako podsumowanie należy podkreślić, że model spaghetti nie jest tylko przykładem odwzorowania rysunku mapy o minimalnej organizacji obrazu, lecz jest war-

W zapisie modelu spaghetti podkreślany jest stan nieuporządkowania elementów składających tworzących obiekty, brak ciągłości wektorów tworzących obiekty liniowe lub granice obiektów powierzchniowych, a także powtórzenia segmentów. Zapis spaghetti jest jedynie poprawnym odtworzeniem rysunku mapy, bez możliwości identyfikacji obiektów liniowych i powierzchniowych. Model spaghetti znajduje zastosowanie tylko tam, gdzie istotne jest wyłącznie odwzorowanie rysunku, a więc w kreśleniu obrazu mapy.

Z doświadczeń pomiaru szczegółów sytuacyjnych można wyprowadzić wniosek, że model spaghetti występuje dość często jako zapis źródłowy z pomiaru terenowego. Zapis taki jest konsekwencją racjonalnego postępo-

Tabela 6. Zapis źródłowy budynku z pomiarów szczegółów sytuacyjnych w formie list wektorów wyznaczonych z poszczególnych stanowisk

Stanowiska pomiarowe	Lista wektorów wyznaczonych z poszczególnych stanowisk
116	V_{1-8}, V_{7-8}
117	V_{1-2}
141	$V_{3-4}, V_{4-5}, V_{5-6}, V_{6-7}, V_{7-8}$
117 i 141	V_{2-3}

tościowym zapisem przejściowym uzyskiwanym w czasie pomiarów terenowych, materiałem źródłowym, podlegającym porządkowaniu w procesie opracowywania wyników. Jest to godne podkreślenia tym bardziej, że na podstawie dostępnej literatury nie udało się potwierdzić tej roli modelu spaghetti.

Model topologiczny elementarny

W zastosowaniach związanych z technologią systemów informacji przestrzennej termin topologia stworzony jest do określenia relacji pomiędzy obiektami obrazu mapy. W modelu topologicznym elementarnym wszelkie punkty załamania linii łamanych oraz punkty styku trzech i większej liczby linii oznaczamy jako węzły (rys. 5). Wektory tworzą powiązania pomiędzy węzłami.

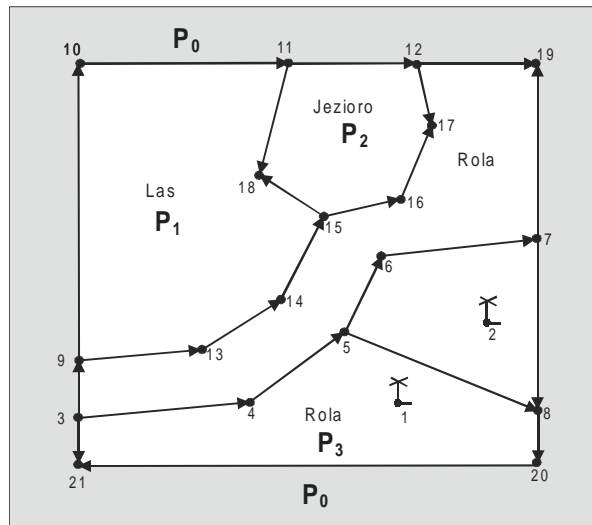
W przypadku obiektów powierzchniowych zapis relacji pomiędzy obszarami obejmuje nie tylko obiekty wycinka mapy. Zapis ten musi również uwzględniać obszar znajdujący się poza ramką wycinka, ponieważ sąsiaduje on z obiektami wewnętrznymi. Obszar zewnętrzny traktowany jest jako nieskończona przestrzeń 2-D, otaczająca granice rysunku (na rys. 5 oznaczona jako obszar P_0). Topologia obszarów zakłada wyróżnianie w nieskończonej przestrzeni obszarów utworzonych z powiązanych ze sobą wektorów. Łańcuchy wektorów muszą tworzyć układy zamknięte.

Obiekty liniowe, reprezentowane przez wektory, posiadają również swoje relacje topologiczne w stosunku do obszarów i węzłów. Węzły posiadają relacje z powiązanimi z nimi wektorami. Obiekty punktowe, które nie stykają się z żadnym z wektorów, traktowane są jako tak zwane węzły izolowane (nr 1 i 2 na rys. 5).

W modelu wektorowym elementarnym występują trzy zapisy: zapis odniesienia przestrzennego i struktur elementarnych, zapis topologii oraz zapis obiektów.

Zapis przestrzennego odniesienia i struktur elementarnych

Zapis przestrzennego odniesienia jest identyczny jak katalog współrzędnych punktów zawarty w tabeli 1, jednak z taką różnicą, że w obecnym modelu wszystkie punkty są traktowane jako węzły, niezależnie od tego czy są powiązane z wektorami, czy też są węzłami izolowanymi. Podobnie jak w modelu wektorowym nietopologicznym także i tutaj dokonuje się zapisu wektorów opartych na dwóch punktach, początkowym i końcowym, analogiczne jak w tabeli 2, jednak w tym przypadku punkty zastąpione są węzłami.



Rys. 5. Struktura obrazu mapy zapisana jako model topologiczny elementarny – załamania i powiązania linii tworzą węzły, pary węzłów wyznaczają jednostki strukturalne obrazu – wektory

Zapis powiązań topologicznych

W modelu topologicznym elementarnym stosowane są trzy zapisy powiązań:

- topologia węzłów,
- topologia wektorów,
- topologia obszarów.

Tabela 7. Zapis topologii węzłów

Oznaczenie węzła	Uporządkowana lista incydenentnych wektorów
3	V_{3-9} , V_{3-4} , V_{3-21}
4	V_{4-5} , V_{3-4}
5	V_{5-6} , V_{5-8} , V_{4-5}
...
21	V_{3-21} , V_{20-21}

Zapis topologii węzłów został przedstawiony w tabeli 7.

Każdemu węzłowi, który nie jest węzłem izolowanym przyporządkowana jest uporządkowana lista wektorów powiązanych z tym węzłem (wektorów incydenentnych). Parametrem porządkującym może być azymut kierunku wektora, przy czym biegunem obrotu jest dany węzeł.

Tabela 8 zawiera zapis topologii wektorów.

Tabela 8. Zapis topologii wektorów

Oznaczenie wektora	Węzeł początkowy wektora	Węzeł końcowy wektora	Obszar po lewej stronie wektora	Obszar po prawej stronie wektora
V_{3-4}	3	4	P_3	P_3
V_{4-5}	4	5	P_3	P_3
...
V_{14-15}	14	15	P_1	P_3
V_{15-16}	15	16	P_2	P_3
...
V_{20-21}	20	21	P_0	P_3

Dla każdego wektora zapisany jest jego węzeł początkowy i węzeł końcowy oraz obszar po lewej i po prawej stronie. Zatem każdy wektor ma swoje oznaczenie, zwrot wyrażony przez kolejność zapisu węzła początkowego i końcowego oraz jedyny obszar po lewej i jedyny obszar po prawej stronie. Oznaczeniami wektorów mogą być przyporządkowane im numery, które ustalają praktyczną kolejność w tabeli. W naszym przypadku, dla celów poglądowych, pozostawione zostały oznaczenia zawierające w funkcji dolnej dwa kolejne węzły tworzące dany wektor.

Zapis topologii obszarów został przedstawiony w tabeli 9.

Tabela 9. Zapis topologii obszarów

Oznaczenie obszaru	Uporządkowana lista wektorów (ze znakiem zwrotu) tworzących obszar znajdujący się po prawej stronie od powiązanego łańcucha wektorów
P_1	$+V_{9-10}$, $+V_{10-11}$, $+V_{11-18}$, $-V_{15-18}$, $-V_{14-15}$, $-V_{13-14}$, $-V_{9-13}$
P_2	$+V_{11-12}$, $+V_{12-17}$, $-V_{16-17}$, $-V_{15-16}$, $+V_{15-18}$, $-V_{11-18}$
...
P_0	$-V_{9-10}$, $-V_{3-9}$, $+V_{3-21}$, $-V_{20-21}$, $-V_{8-20}$, $-V_{7-8}$, $+V_{7-19}$, $-V_{12-19}$, $-V_{11-12}$, $-V_{10-11}$

Dla każdego obszaru wyszczególniona jest uporządkowana lista wektorów granicznych, które należy przebiegać posuwając się wzdłuż granicy obszaru, pozostawiając go zawsze po prawej stronie. Wektory o kierunku zgodnym z kolejnością przebiegania wykazywane są ze znakiem dodatnim, wektory skierowane przeciwnie – ze znakiem ujemnym. Należy zwrócić uwagę na to, że warunek kompletności zapisu topologii obszarów wymaga, aby w tabeli zapisu topologii obszarów znalazł się także zapis nieskończonej przestrzeni (P_0 w tab. 9), stanowiący obszar zewnętrzny względem kompleksu obiektów. Konsekwencją zapisu obszaru P_0 jest to, że w kompletnej tabeli 9 każdy wektor powinien występować dwukrotnie z przeciwnym znakiem.

Zapis topologii stanowi podstawę pracy wewnętrznych narzędzi analiz systemu informacji przestrzennej.

Zapis obiektów w modelu topologicznym elementarnym

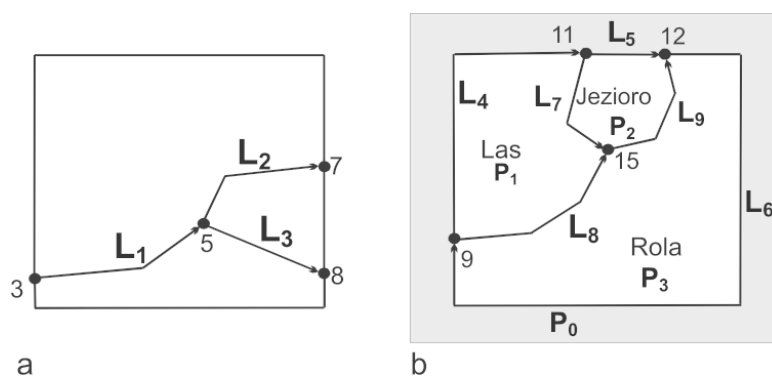
Dla użytkownika, tworzącego bazy danych systemu w procesie wprowadzania danych, istotny jest zapis obiektów zgodnie z reprezentacją punktową, liniową i powierzchniową. Zapis obiektów punktowych został przedstawiony w tabeli 10.

Tabela 10. Zapis obiektów punktowych przedstawionych na mapie na rys. 5

Numer węzła	Oznaczenie obiektu
1	siłownia wiatrowa 1
2	siłownia wiatrowa 2

Każdemu obiektowi punktowemu przyporządkowane jest jego oznaczenie w wersji słownej lub w wersji umownego kodu. Tabela zapisu obiektów punktowych może być w prosty sposób połączona z tabelą współrzędnych węzłów – przez numer węzła. W takim przypadku można obiektom przyporządkować ich przestrzenne położenie. Zapis obiektów liniowych w modelu topologicznym elementarnym jest identyczny jak w modelu obiektowym nietopologicznym (tab. 4).

Zapis obiektów powierzchniowych w modelu topologicznym elementarnym polega na zestawieniu uporządkowanej listy kolejnych wektorów tworzących obrys zewnętrzny obszaru. Zapis ten jest identyczny jak zapis topologii obszarów (tab. 9), jednak w tym przypadku, dla odtworzenia kształtu obrazu nie są konieczne znaki wektorów. Nie podlega także zapisowi nieskończona przestrzeń (obszar P_0 na rys. 6), która nie jest obiektem realnym rysunku mapy.



Rys. 6. Struktura obrazu mapy zapisana jako model topologiczny łańcuchowy. Węzły, posadowione na styku segmentów linii łamanych, ustalają jednostki strukturalne – łańcuchy. Treść mapy została rozłożona na dwie warstwy – reprezentującą obiekty liniowe (a) i obiekty powierzchniowe (b). W pierwszym przypadku łańcuchy tworzą obiekty, w drugim – granice obiektów powierzchniowych

Podsumowanie cech modelu topologicznego elementarnego

Przedstawiony model topologiczny elementarny uwzględnia relacje pomiędzy obiektami w ramach jednej konkretnej mapy (warstwy). Do ustalenia relacji pomiędzy obiektami wykorzystywane są związki topologiczne zapisane jako przykłady w tabelach 7, 8, 9. Zapis topologii umożliwia wykonanie wielu operacji na obrazie mapy: między innymi rozpoznawanie otoczenia obiektów powierzchniowych lub ustalenie faktu znajdowania się obiektu liniowego na konkretnym obszarze lub na granicy obszarów. Klasy obiektów punktowych, zawierające węzły izolowane, nie podlegają związkom topologicznym. Klasy obiektów liniowych podlegają topologii węzłów i mogą podlegać związkom topologii liniowej. Klasy obiektów powierzchniowych podlegają związkom topologii powierzchniowej, także związkom topologii liniowej i topologii węzłów. W takim przypadku topologię liniową można utworzyć dla sieci linii granicznych obszarów.

Model topologiczny elementarny posiada następujące cechy charakterystyczne:

- Jednostką elementarną struktury obrazu jest wektor.
- Wektory spełniają dwie funkcje: pełnią funkcję obiektów lub elementów obiektów oraz drugą funkcję – elementów granicznych obiektów powierzchniowych.
- Granice obszarów są zbudowane z zestawów wektorów i nie są dublowane (jak w modelu wektorowym nietopologicznym).
- Zmiana granicy jednego obszaru jest jednocześnie zmianą granicy obszaru przyległego.
- Zapis w tym modelu charakteryzuje się nadmiarem (redundancją), ponieważ operujemy pojedynczymi wektorami, dublując w powiązanych segmentach zapisy położenia punktów styku wektorów.

W praktyce model topologiczny elementarny jest prosty do utworzenia – po uzyskaniu współrzędnych wszystkich punktów załamania obiektów liniowych lub granic obiektów powierzchniowych – łączy się punkty w wektory.

Omówiony model jest typowym modelem, w którym właśnie wektor stanowi jednostkę strukturalną obrazu mapy. Model wektorowy elementarny ma walory dydaktyczne, jest zapisem przejrzystym, uformowanym z najprostszych elementów geometrycznych i jako taki stanowi pogładową formę przejściową do modelu o wyższej organizacji – do modelu łańcuchowego.

Model topologiczny łańcuchowy

Traktowanie wektora jako jednostki elementarnej obrazu mapy stanowi wprawdzie przejrzystą i pogładową strukturę tego obrazu, jednak taki zapis cechuje się redundancją i znacznym rozczłonkowaniem zapisu obiektów. Elementy liniowe lub granice obiektów powierzchniowych na mapach wielkoskalowych są zazwyczaj liniami łamanymi, w których wektory stanowią segmenty tych linii. Jeżeli grupy kolejnych wektorów (segmentów linii łamanej) graniczą po lewej i po prawej stronie z identycznymi obszarami (jak na przykład V_{9-13} , V_{13-14} , i V_{14-15} na rys. 5) – logiczne jest, aby taką grupę wektorów zapisać w sposób oszczędny jako jednostkę strukturalną obrazu mapy o wyższym poziomie organizacji. Zbiory segmentów możemy traktować jako łańcuchy wektorów i nazwać tę jednostkę w skrócie łańcuchem. Tak utworzona jednostka strukturalna posiada w literaturze także inne nazwy, spośród których najczęściej używany jest termin „łuk” („arc”) (Arc/Info 8.0, 2003). Zapis struktury obrazu oparty na zastosowaniu łańcuchów, będziemy nazywać modelem topologicznym łańcuchowym.

Łańcuch jako jednostka strukturalna modelu, zapis geometrii łańcucha

W modelu topologicznym łańcuchowym węzły występują tam gdzie stykają się trzy łańcuchy lub ich większa liczba. Jednak dla obiektów powierzchniowych zamkniętych, jak na przykład budynków na działkach, zapisanych za pomocą jednego łańcucha – węzeł jest miejscem wyjściowym i jednocześnie końcowym zamkniętego łańcucha, reprezentującego obiekt. Ponieważ każdy łańcuch może być rozłożony na dwa lub większą liczbę łańcuchów – miejsca styku łańcuchów składowych muszą być uznane jako węzły, w tym przypadku jako tak zwane pseudowęzły. Węzły determinują układy łańcuchów, budowanych z segmentów linii łamanych.

Łańcuchy spełniają dwie funkcje: tworzą obiekty liniowe lub ich części oraz stanowią granice obiektów powierzchniowych. Wymienione funkcje zostały pokazane na rysunku 6. Zgodnie z zasadami reprezentacji liniowej i powierzchniowej łańcuchy tworzą obiekty liniowe (drogi) (a) lub stanowią granice obiektów powierzchniowych (użytków) (b). Dla ułatwienia zachowana została numeracja węzłów z rysunku 5.

Łańcuch jako elementarna jednostka strukturalna obrazu mapy posiada następujące cechy:

- ma swoje oznaczenie (L_i na rys. 6),
- rozpoczyna się w węźle i kończy się w węźle,
- posiada swój kierunek wyznaczony przez węzeł początkowy i końcowy,
- pomiędzy węzłem początkowym i końcowym łańcuch ma dowolną liczbę punktów pośrednich, które nadają mu kształt,
- jeżeli łańcuch jest elementem granicy obszaru w warstwie powierzchniowej, to na całej swojej rozciągłości łańcuch posiada jeden niezmienny obszar po lewej stronie i także jeden niezmienny obszar po prawej stronie.

W modelu topologicznym łańcuchowym zapis geometrii jednostki strukturalnej obrazu mapy jest inny niż w przypadku modelu topologicznego elementarnego. W tamtym modelu obraz był utworzony z wektorów, w niniejszym modelu zapis geometrii musi być rozbudowany i stanowi dla każdego łańcucha listę par współrzędnych: węzła początkowego, punktów pośrednich łańcucha i węzła końcowego (tab. 11).

Tabela 11. Zapis geometrii łańcuchów z rysunku 6 jako lista par współrzędnych

Oznaczenie łańcucha	Lista par współrzędnych: węzła początkowego, punktów pośrednich i węzła końcowego
L_1	$x_3, y_3, \dots, x_5, y_5$
L_2	$x_5, y_5, \dots, x_7, y_7$
...
L_8	$x_9, y_9, \dots, x_{15}, y_{15}$
L_9	$x_{15}, y_{15}, \dots, x_{12}, y_{12}$

Jako uzupełnienie zapisu geometrii łańcucha, w modelu topologicznym łańcuchowym, podobnie jak w modelu poprzednim, konieczne jest sporządzenie katalogu węzłów. Jednak w tym przypadku liczba węzłów jest znacznie mniejsza. W oprogramowaniu ESRI (Arc/Info 8.0, 2003) stosowany jest jeszcze drugi katalog – współrzędnych punktów etykietowych. Punkty te mają charakter pomocniczy – reprezentują obiekty i służą do powiązania obiektów powierzchniowych z rekordami opisowej bazy danych.

Relacje topologiczne w modelu łańcuchowym

W modelu topologicznym łańcuchowym stosowane są trzy zapisy powiązań:

- topologia węzłów,
- topologia łańcuchów,
- topologia obszarów.

Tabela 12. Zapis topologii węzłów w modelu topologicznym łańcuchowym (oznaczenia z rys. 6)

Oznaczenie węzła	Uporządkowana lista łańcuchów powiązanych z węzłem
3	L_1
5	L_2, L_3, L_1
...
12	L_6, L_9, L_5
15	L_9, L_8, L_7

Zapis topologii węzłów (tab. 12) polega na tym, że każdemu węzłowi, który nie jest węzłem izolowanym, przypisany jest uporządkowany zestaw łańcuchów powiązanych z tym węzłem. Parametrem porządkującym może być azymut segmentu łańcucha (wektora), bezpośrednio stykającego się z węzłem.

Topologię łańcucha L_i (tab. 13) tworzy zapis węzła początkowego i końcowego oraz zapis jedyne obszaru znajdującego się po lewej stronie oraz także jedyne obszaru znajdującego się po prawej stronie.

Dla łańcuchów reprezentujących obiekty liniowe (warstwa (a) na rys. 6) nie jest uwzględniony obszar przez jaki przechodzą drogi L_1, L_2, L_3 stąd zapis P_l i P_p w tabeli 13 dla L_1 i L_2 jest równy 0. W przypadku nałożenia warstw (a) i (b) z rysunku 6, w powyższych pozycjach wystąpiłoby oznaczenie P_3 . Uniwersalność zapisu topologii łańcucha wymaga, żeby dla łańcuchów reprezentujących obiekty liniowe występowały potencjalne pozycje obszarów stykających się z łańcuchem.

Tabela 13. Zapis topologii łańcuchów w modelu topologicznym łańcuchowym (oznaczenia z rys. 6) dla obiektów liniowych i powierzchniowych

Oznaczenie łańcucha	Węzeł początkowy łańcucha W_p	Węzeł końcowy łańcucha W_k	Obszar po lewej stronie P_l	Obszar po prawej stronie P_p
L_i				
L_1	3	5	0	0
L_2	5	7	0	0
...
L_4	9	11	P_0	P_1
L_5	11	12	P_0	P_2
...
L_9	15	12	P_2	P_3

Dla warstw powierzchniowych występuje komplet pozycji w tabeli 13. Łańcuchy tworzące zewnętrzny obrys rysunku, w zależności od kierunku łańcucha posiadają po lewej lub po prawej stronie zapis nieskończonej przestrzeni otaczającej obraz mapy (obszar P_0).

Zapis topologii obszarów (tab. 14) polega na zestawieniu dla każdego obszaru uporządkowanej listy łańcuchów, które ten obszar tworzą. Zapis łańcuchów uformowany jest w taki sposób, że wymieniane są kolejne łańcuchy, dla których dany obszar znajduje się po prawej stronie; przy czym zapisowi podlega także kierunek łańcucha, zgodność oznaczona jest symbolem plus, a kierunek odwrotny symbolem minus.

Tabela 14 zawiera kompletny zapis czterech obszarów z rysunku 6b. Taki zapis został celowo utworzony, aby pokazać, że każdy łańcuch występuje w tabeli dwukrotnie, z przeciwnym znakiem. Jest to mocna kontrola zapisu topologii obszarów, przy ręcznym tworzeniu związków w najprostszymi pakietach GIS.

Dotychczas rozpatrywane obszary na rysunkach 2, 3, 5 i 6 były obszarami jednospójnymi i nie posiadały wewnątrz innych zamkniętych obszarów, zwanych w literaturze dziurami albo wyspami. Ten ogólny przypadek jest bardzo często spotykany w rzeczywistości geograficznej. Budynki posadowione na działkach są takimi obszarami wyspowymi. Ze względu na powszechność występowania obszarów wielospójnych – ten przypadek wymaga omówienia. Rysunek 7 przedstawia zmodyfikowaną sytuację – we wnętrzu obszaru leśnego P_1 znajduje się obszar wyspowy – łąka P_4 , granicząca od strony zewnętrznej wyłącznie z obszarem P_1 . Zmodyfikowany zapis topologii obszarów zawiera tabela 15.

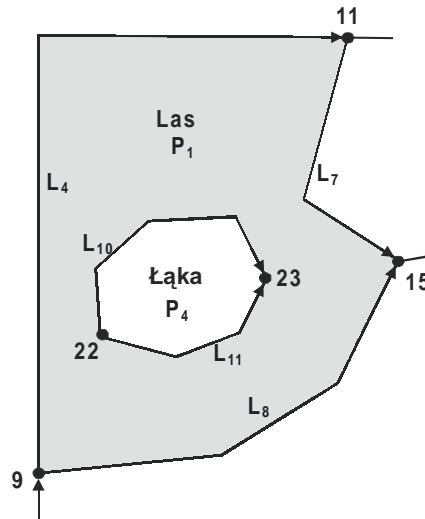
Zapis obszaru P_1 składa się z łańcuchów tworzących jego obrys zewnętrzny ($+L_4, +L_7, -L_8$) oraz z łańcuchów wydzielających w tym obszarze inny niezależny obszar P_4 , nie należący do P_1 ($-L_{10}, +L_{11}$). W tabeli 15 te dwie grupy oznaczeń zostały celowo rozpisane w dwóch wierszach, aby podkreślić przejście pomiędzy zapisem kolejnych obrysów - zewnętrznego i wewnętrznego. W niektórych pakietach GIS kolejne grupy łańcuchów zapisywane są w postaci liniowej, ale przedzielane są wskaźnikiem 0. W tabeli 15 został wykazany niezależny obszar P_4 tworzący wyspę na obszarze P_1 .

Także i w tym rozszerzonym kształcie zapisu mocną kontrolę stanowi fakt dwukrotnego występowania każdego łańcucha z przeciwnym znakiem.

Kompletny zapis topologii rzeczywistości geograficznej, w której występują budynki jako wyspy na działkach, tworzy ogólny związek niezależności obszaru budynku od obszaru działki, chociaż z prawnego punktu widzenia budynek jest nierozłącznie związany z działką. Taka ogólna postać zapisu pozwala na rozróżnienie części skła-

Tabela 14. Zapis topologii obszarów w modelu topologicznym łańcuchowym (oznaczenia z rys. 6b)

Oznaczenie obszaru	Uporządkowana liczba łańcuchów tworzących dany obszar
P_1	$+L_4, +L_7, -L_8$
P_2	$+L_5, -L_9, -L_7$
P_3	$+L_8, +L_9, +L_6$
P_0	$-L_4, -L_6, -L_5$



Rys. 7. Przykładowa modyfikacja fragmentu rysunku 2a ilustrująca zapis topologii obszaru wielospójnego (obszaru z wyspą)

Tabela 15. Zmodyfikowany zapis topologii obszarów po wprowadzeniu dodatkowego obiektu P_4 , na rys. 7 (zapisy obszarów P_2, P_3 i P_0 nie ulegają zmianie w stosunku do tab. 14)

Oznaczenie obszaru	Uporządkowana lista łańcuchów tworzących dany obszar
P_1	$+L_4, +L_7, -L_8, -L_{10}, +L_{11}$
...
P_4	$+L_{10}, -L_{11}$
...

dowych działki – części zabudowanej i niezabudowanej. Tak uformowany zapis posiada duże praktyczne znaczenie, natomiast narzędzia pakietów GIS umożliwiają udzielenie odpowiedzi na dowolnie zadawane pytania związane z relacją budynków i działek.

Jako podsumowanie zestawimy obecnie w tabeli 16 związki topologiczne w modelu łańcuchowym, które występują w warstwach klas o reprezentacji punktowej, liniowej i powierzchniowej.

Jako posumowanie relacji topologicznych można stwierdzić, że:

- topologia węzłów pozwala na ustalenie relacji pomiędzy węzłami i łańcuchami (incydentnymi do danego węzła),
- topologia łańcuchów ustala relacje pomiędzy węzłami dla obiektów liniowych oraz relacje sąsiedztwa dla obiektów powierzchniowych,
- topologia obszarów wiąże łańcuchy w kompletne obiekty powierzchniowe.

Poniższe związki topologiczne rozpatrywane są w modelu łańcuchowym każdorazowo w jednej konkretnej warstwie.

Tabela 16. Związki topologiczne występujące w warstwach klas o reprezentacji punktowej, liniowej i powierzchniowej w modelu łańcuchowym

	Topologia węzłów	Topologia łańcuchów	Topologia obszarów
Obiekty o reprezentacji punktowej (punkty i węzły izolowane)	Nie zawierają zapisu topologii. Relacje pomiędzy obiektami punktowymi i liniowymi oraz punktami i obszarami są ustalane za pomocą narzędzi GIS, opartych na algorytmach geometrii obliczeniowej		
Obiekty liniowe	Stosowany jest zapis topologii węzłów (jako lista łańcuchów incydentnych)	Stosowany jest zapis topologii łańcuchów (bez uwzględnienia relacji do obszarów lub z uwzględnieniem takiej relacji)	–
Obiekty powierzchniowe	Stosowany jest zapis topologii węzłów (jako lista łańcuchów incydentnych)	Stosowany jest pełny zapis topologii łańcuchów	Stosowany jest zapis topologii obszarów

Zapis obiektów w modelu topologicznym łańcuchowym

Obiekty o reprezentacji punktowej (punkty i węzły izolowane) posiadają swoje oznaczenie (funkcję w rzeczywistości geograficznej) oraz swoje położenie. Ich zapis w omawianym modelu jest identyczny jak w modelu topologicznym elementarnym, polega na powiązaniu tabeli oznaczeń (tab. 10) z katalogiem współrzędnych.

Tabela 17. Zapis topologiczny obiektów liniowych w modelu topologicznym łańcuchowym (oznaczenia z rys. 6a)

Określenie obiektu liniowego	Lista łańcuchów tworzących obiekt
Droga 3-5	L_1
Droga 5-7	L_2
Droga 5-8	L_3

Obiekty o reprezentacji liniowej są budowane z łańcuchów i zapisywane jako ich uporządkowane listy (tab. 17).

Dla obiektów liniowych zachodzi ważny warunek, że obiekt musi być reprezentowany przez łańcuch lub ich większą liczbę, nie może być częścią łańcucha. Obiekt tworzy pewną konkretną reprezentację rzeczywistości geograficznej i musi być rozróżnialny w zapisie cyfrowym jako pełna całość. Przy budowaniu zapisu cyfrowego obiektu

tów liniowych – łańcuchy powinny być tak formowane, aby odzwierciedlały kompletne różnialne obiekty. W pewnych przypadkach obiekty liniowe złożone dzielimy pseudowęzłami na odrębne łańcuchy, aby wyróżnić ich części o szczególnych cechach i nadać im status obiektów niezależnych.

Zapis obiektów powierzchniowych w modelu topologicznym łańcuchowym polega na zestawianiu uporządkowanej liczby łańcuchów, tworzących kolejne obszary. Zapis ten jest identyczny jak zapis topologii obszarów – tabela 14. Jednak w tym przypadku, dla odtworzenia kształtu obiektów nie są konieczne znaki łańcuchów. Nie podlega także zapisowi nieskończona przestrzeń P_0 , która nie jest obiektem realnym rysunku mapy.

Podsumowanie cech modelu topologicznego łańcuchowego

Model topologiczny łańcuchowy uwzględnia relacje pomiędzy obiektami w ramach jednej konkretnej mapy (warstwy). Elementarną jednostką strukturalną obrazu mapy jest łańcuch wektorów, określane w skrócie jako łańcuch. W modelu tym występują następujące związki pomiędzy obiektami: topologia węzłów, topologia łańcuchów i topologia obszarów. Związki te zostały jako przykłady zapisane w tabelach 12, 13, 14 i 15.

Obiekty o reprezentacji punktowej nie zawierają zapisu topologii, obiekty liniowe posiadają topologię węzłów i łańcuchów, obiekty powierzchniowe mają topologię węzłów, łańcuchów i obszarów. Zapis topologiczny umożliwia wykonywanie wszechstronnych analiz na obiektach mapy.

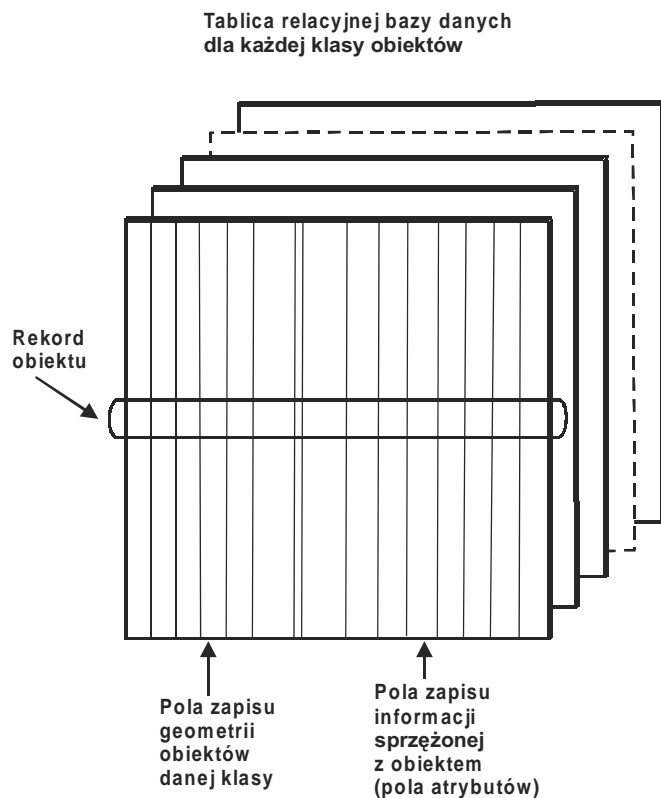
Obiekty punktowe są reprezentowane przez punkty lub węzły izolowane. Łańcuchy spełniają dwie funkcje: reprezentują obiekty lub ich części oraz tworzą granice obiektów powierzchniowych. Zatem granice obszarów nie są dublowane, zmiana granicy jednego obszaru jest jednocześnie zmianą granicy obszaru przyległego.

Warstwy modelu topologicznego łańcuchowego zintegrowane są w zaawansowanych pakietach GIS z tablicami relacyjnej bazy danych, które mogą zawierać dane identyfikacyjne, topologiczne, geometryczne oraz szerokie dane informacyjne o poszczególnych obiektach warstwy (mapy).

Model topologiczny łańcuchowy charakteryzuje się bardziej oszczędnym zapisem niż model elementarny, ponieważ łączy segmenty linii łamanych w jedną całość, stąd posiada wyższą organizację obrazu mapy niż model elementarny. Model topologiczny łańcuchowy jest modelem szeroko stosowanym w praktyce. Jednak należy się spodziewać, że będzie wypierany przez zaawansowane modele obiektowe. W modelu łańcuchowym obiekty nie występują jako zwarta całość, lecz budowane są z elementów strukturalnych. Również zapis przestrzeni (obrazu mapy) nie jest całkowicie zintegrowany z bazą informacyjną, te zapisy przechowywane są w rozdzielonych plikach powiązanych identyfikatorami. Właśnie te cechy dezintegracji zapisu oraz dominacja struktury obrazu dostarczają głównych argumentów za poszukiwaniem obiektowych modeli zapisu przestrzeni i informacji.

Model obiektowy topologiczny

Ideą przewodnią w poszukiwaniach obiektowego zapisu mapy jest doprowadzenie zapisu do takiej postaci, w której użytkownik systemu widzi obiekty całościowo, jako kompletne jednostki rzeczywistości geograficznej. W takim widzeniu obrazu mapy schodzą na dalszy plan elementy strukturalne obiektów, tak bardzo istotne w modelu topologicznym elementarnym i łańcuchowym.



Rys. 8. Schemat zapisu obiektów w modelu obiektowym topologicznym. Podstawowe cechy takiego zapisu to oddzielne tablice relacyjnej bazy danych dla każdej klasy obiektów oraz łączny zapis geometrii i atrybutów

atrybutów obiektów. Gdyby należało uformować zapis obiektów powierzchniowych z rysunku 5 i 7 wtedy baza zawierałaby cztery tablice klas: lasów, jezior, roli i łąk.

Z organizacyjnego punktu widzenia lepszym rozwiązaniem jest zapisywanie geometrii obiektu i sprzężonej z nim informacji łącznie, w tej samej tablicy relacyjnej bazy danych.

Niezmiernie ważnym wyzwaniem dla projektantów systemów GIS stało się żądanie możliwości ustalenia relacji pomiędzy obiektami znajdującymi się nie tylko na jednej warstwie, lecz także obiektami znajdującymi się na różnych warstwach. Przedstawione cechy posiada zaawansowany pakiet *ArcGIS 9* firmy ESRI (*ArcGIS 9, 2004*) zawierający koncepcję geobazy.

Zapis obiektów jest zawarty w zbiorze tablic relacyjnej bazy danych zestawionych dla każdej klasy obiektów oddzielnie (rys. 8). Każdy obiekt zapisany jest w jednym wierszu (rekordzie) tablicy. Dane geometryczne i informacyjne zapisane są w tej samej tablicy – w polach przewidzianych do zapisu geometrii i w polach

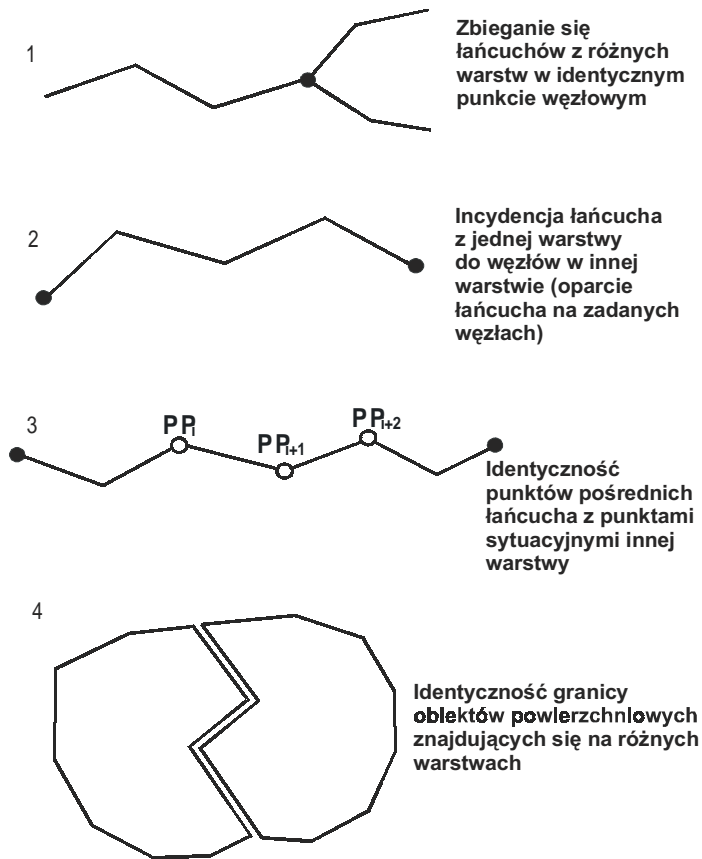
Tabela 18. Porównanie modelu topologicznego łańcuchowego i obiektowego topologicznego

Cechy podlegające porównaniu	Model topologiczny łańcuchowy	Model obiektowy topologiczny
Widzenie obiektów przez operatora systemu	– poprzez strukturę obrazu mapy (węzły i łańcuchy)	– obiekt widziany jako spójna całość
Integracja przestrzeni i informacji	– poprzez identyfikatory i punkty etykietowe, zapis fizyczny przestrzeni i informacji – rozdzielony	– przestrzeń zintegrowana z informacją, łączny zapis fizyczny geometrii obiektu i informacji – w jednej tablicy
Ustalenie relacji pomiędzy obiektami	– w jednej warstwie	– w wielu warstwach
Kontrola nad zbiorami obiektów rzeczywistości geograficznej	– mocna kontrola, ale wyłącznie w ramach jednej warstwy	– globalna kontrola nad pełnym środowiskiem rzeczywistości geograficznej

Pakiet *ArcGIS 9* (ArcGIS 9, 2004) dostarcza bogatej oferty ustalania relacji oraz realizowania postawionych warunków pomiędzy obiektami zapisanymi na różnych warstwach. Wybrane przykładowe relacje zostały zestawione na rysunku 9.

Zalety modelu obiektowego topologicznego uformowanego jako nowa koncepcja ESRI (ArcGIS 9, 2004) można podkreślić na podstawie porównania z modelami topologicznymi łańcuchowymi (tab. 18).

Zapis topologii według nowej koncepcji ESRI (ArcGIS 9, 2004) umożliwia wykonywanie wszechstronnych analiz na obiektach rzeczywistości geograficznej. Istnieje możliwość formułowania zaawansowanych warunków i zarządzania pełnym środowiskiem rzeczywistości geograficznej.



Rys. 9. Przykłady budowania relacji pomiędzy obiektami znajdującymi się na różnych warstwach w modelu obiektowym topologicznym

Zapis treści mapy oparty na liniowym rozwinięciu obrazu

Zapis treści mapy oparty na liniowym rozwinięciu obrazu nazywany jest powszechnie w literaturze modelem rastrowym. W niniejszych rozważaniach obydwa terminy będą traktowane jako równoważne i będą stosowane wymiennie.

Cechy charakterystyczne modelu rastrowego

Model rastrowy reprezentuje ziarniste postrzeganie przestrzeni 2-D. Polega on na arbitralnym podziale obrazu mapy na elementarne figury geometryczne – zwane pikselami. Model rastrowy bywa również nazywany modelem mozaikowym. Z chwilą zdefiniowania siatki pól elementarnych (pikseli) obraz mapy może być wyrażony wyłącznie poprzez umowne pola elementarne.

Wyrażanie obiektów obrazu mapy poprzez sieć regularnych pól elementarnych wprowadza pewne zniekształcenia rzeczywistości. Zniekształcenia te są zależne od wymiarów arbitralnie zdefiniowanego pola elementarnego.

W modelu rastrowym występują powiązane ze sobą trzy czynniki:

- dokładność odzwierciedlenia rzeczywistości poprzez sieć pól elementarnych,
- zapotrzebowanie na określoną pojemność pamięci do zapisywania obrazów,
- czas budowy obrazów na ekranie monitora oraz czas przesyłania obrazów przez łącza telekomunikacyjne.

Jeżeli chcemy budować wierne obrazy o wysokiej rozdzielczości musimy się liczyć z dużym zapotrzebowaniem na pojemność pamięci oraz wydłużonym czasem przesyłania i budowy obrazu na ekranie monitora. Jeżeli chcemy w miarę szybko budować obrazy, wtedy konieczne jest zrezygnowanie z wysokiej rozdzielczości i zarazem wysokiej wierności obrazu.

Problemy rozwijania obrazu – teselacja, formowanie kolejności i hierarchia

W rozwijaniu obrazu 2-D do postaci liniowej występują trzy podstawowe problemy:

- 1) wybór sposobu podziału przestrzeni 2-D na zbiór pól elementarnych (na piksele),
- 2) ustalenie kolejności przebiegania zdefiniowanych pikseli,
- 3) przyjęcie jednorodnego, jednostopniowego poziomego podziału lub wielostopniowego podziału hierarchicznego.

Pierwszy problem dotyczy dziedziny teselacji czyli techniki podziału płaszczyzny na obszary elementarne (Boots, 1999), (Gaździcki, 2002). Ponieważ w odwzorowywaniu obrazu mapy elementy budowy obrazu muszą się cechować regularnością i zwartym przyleganiem – typowym kształtem piksela jest kwadrat.

Kolejność przebiegania pikseli uformowanych w wiersze i kolumny jest czynnikiem nie tylko porządkującym, lecz ma duży wpływ na czas budowania i analizy obrazu mapy, wiąże się także bezpośrednio z jednorodną lub hierarchiczną budową obrazu rastrowego.

Przy założeniu jednorodnego, jednostopniowego poziomego obrazu rastrowego – każdy obraz jest zbudowany ze zdefiniowanych jednostek elementarnych (pikseli). Jednak w przypadkach przeglądania mapy w skalach mniejszych, obrazów zgeneralizowanych lub przybliżonych – nie jest konieczne sięganie do jednostek elementarnych, ponieważ wydłuża to niepotrzebnie czas budowy obrazu. W takim przypadku zupełnie wystarczające jest zbudowanie obrazu z regularnych agregatów pikseli. Hierarchiczne budowanie regularnych agregatów jednostek elementarnych siatki rastra ma podstawowe znaczenie w formowaniu oszczędnych sposobów zapisu obrazu mapy.

Przyjmując jako standard – podział obrazu 2-D na pola elementarne w kształcie kwadratów, zestawimy poniżej szereg sposobów przebiegania pól elementarnych rastra, przy czym poszczególne kolejności determinują, bądź to poziomy jednostopniowe, bądź umożliwiają budowę agregatów i zastosowanie hierarchicznej struktury obrazu rastrowego. Omówienie tej problematyki w szerszym zakresie zawiera praca (Oosterom, 1999).

Przyjęcie określonej kolejności przebiegania wszystkich pikseli obrazu rastrowego jest równoczesne z określeniem sposobu rozwinięcia liniowego obrazu, a także z przyjęciem sposobu transformacji przestrzeni 2-D do 1-D.

Wybrane sposoby liniowego rozwinięcia obrazów 2-D zostały przedstawione na rysunku 10.

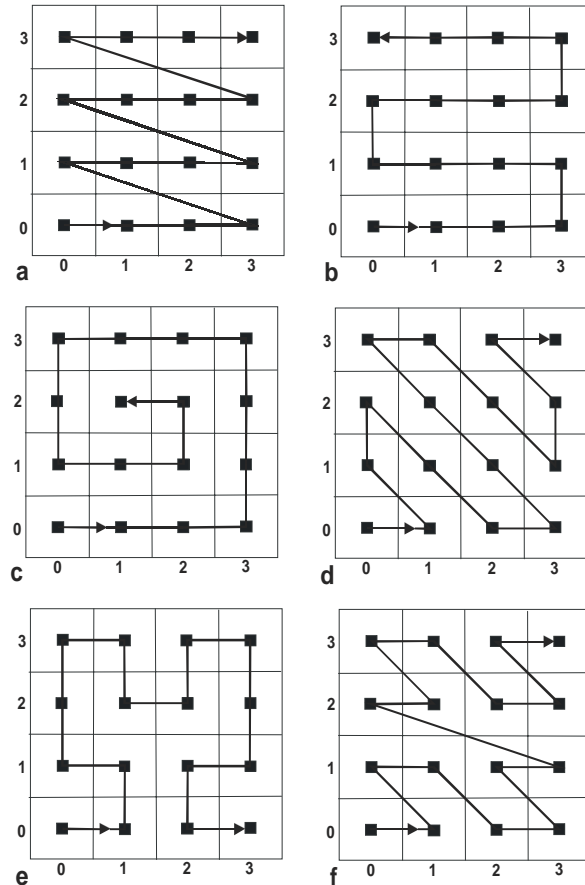
Rozwinięcie wierszowe (rys. 10a) charakteryzuje się dużymi skokami przy przejściu pomiędzy kolejnymi warstwami. Ponadto jeżeli wykonujemy analizy i pracę na fragmencie

obrazu mapy – przebieganie wierszowe obejmuje zawsze cały obraz w jego pełnym zakresie. Zatem czas potrzebny na przebieganie nieistotnych dla danej pracy fragmentów obrazu wydłuża czas oczekiwania na budowę obszaru naszego zainteresowania. Tę samą wadę posiada rozwinięcie serpentynowe (rys. 10b), rozwinięcie diagonalne (rys. 10d) i spiralne (rys. 10c). Jednak to ostatnie rozwinięcie w pewnym stopniu osłabia tę wadę, w miarę zbliżania się do punktu centralnego obrazu. Przebiegi stają się wtedy coraz mniejsze, zatem czasy budowy obrazu w wymiarze lokalnym ulegają skróceniu.

Trzy sposoby przebiegania (serpentynowe – rys. 10b, spiralne – rys. 10c i diagonalne Cantora – rys. 10d) eliminują podstawową wadę przebiegania wierszowego (rys. 10a) – duże skoki pomiędzy wierszami. Przebiegania serpentynowe i diagonalne Cantora wprowadzają pewien element dezorganizujący obraz, ponieważ kolejne odcinki mają przeciwne kierunki przebiegu. Dalszą cechą dezorganizacji obrazu wykazuje przebieganie spiralne (rys. 10c). Zachowany jest wprawdzie tutaj kierunek przebiegu na kolejnych odcinkach równoległych, natomiast nie jest zachowana regularność identyfikacji pól elementarnych w skrajnych rejonach i w rejonie centralnym obrazu. Przebiegi skracają swoją drogę sukcesywnie w miarę zbliżania się do strefy centralnej.

Cztery omówione sposoby rozwinięcia obrazu (rys. 10a, b, c, d) nie umożliwiają budowania związków hierarchicznych w obrazie rastra.

Dwa ostatnie sposoby rozwinięcia obrazu – Hilberta (rys. 10e) i Peano (rys. 10f) umożliwiają budowę związków hierarchicznych w obrazie rastra. Linia fraktalna Peano wykazuje regularność modułową, polegającą na tym, że przy budowaniu kolejnych poziomów agregacji zestawia się moduły w niezmiennym kształcie i w niezminionej orientacji. W przypadku budowania agregatów z modułów schematu Hilberta (rys. 10e), moduły te w niezmiennym kształcie skrócone są o kąty będące wielokrotnością kąta prostego.



Rys. 10. Wybrane sposoby liniowego rozwinięcia obrazu (transformacji przestrzeni rastra 2-D do 1-D): a – wierszowe, b – serpentynowe, c – spiralne, d – diagonalne Cantora, e – Hilberta, f – przebieganie zgodne z linią fraktalną Peano; forma rysunku i terminologia zostały częściowo oparte na pracy Oosterom (1999)

Cechą charakterystyczną dwóch ostatnich sposobów rozwinięcia jest wykonanie niewielkich przebiegów, oscylacja w lokalnym obszarze oraz generalne unikanie dużych skoków. W określonych miejscach takie skoki są oczywiście niezbędne, jednak są nieporównywalnie rzadsze niż w przebieganiu wierszowym. Przedstawiona cecha rozwinięcia Hilberta i Peano pozwala na szybsze budowanie obrazów lokalnych i szybsze analizy tych obrazów.

Struktura zbioru globalnego

Zgodnie z zasadą modelu rastrowego, od chwili gdy na obraz mapy została nałożona siatka pól elementarnych – wszelkie obiekty mapy mogą być wyrażone wyłącznie przez geometrię tych pól oraz przez informację przypisaną do tych elementarnych obszarów rastra (przez atrybuty pikseli). Rysunek 11 przedstawia przykładowy obraz mapy oraz zapis tego obrazu jako model rastrowy.

Zapis obrazu mapy posiada strukturę tablicy. Zbiór wierszy tablicy

$$X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\} \quad (1)$$

jest pełnym zbiorem pikseli siatki rastra nałożonej na mapę. Elementy zbioru X zostały uformowane w kolejności jednego z przedstawionych sposobów rozwinięcia obrazu (rys. 10). Kolumny tablicy tworzą zbiór atrybutów

$$A = \{a_1, a_2, \dots, a_p\} \quad (2)$$

klas występujących na mapie.

Każdej kolumnie atrybutów a_q ze zbioru A przyporządkowana jest dziedzina wartości

$$D_q = \{d_1, d_2, \dots, d_w\}. \quad (3)$$

Zatem każdy element tablicy zapisu globalnego przyjmuje wartość ze zbioru D_q przypisanego do odpowiadającej mu kolumny atrybutu a_q .

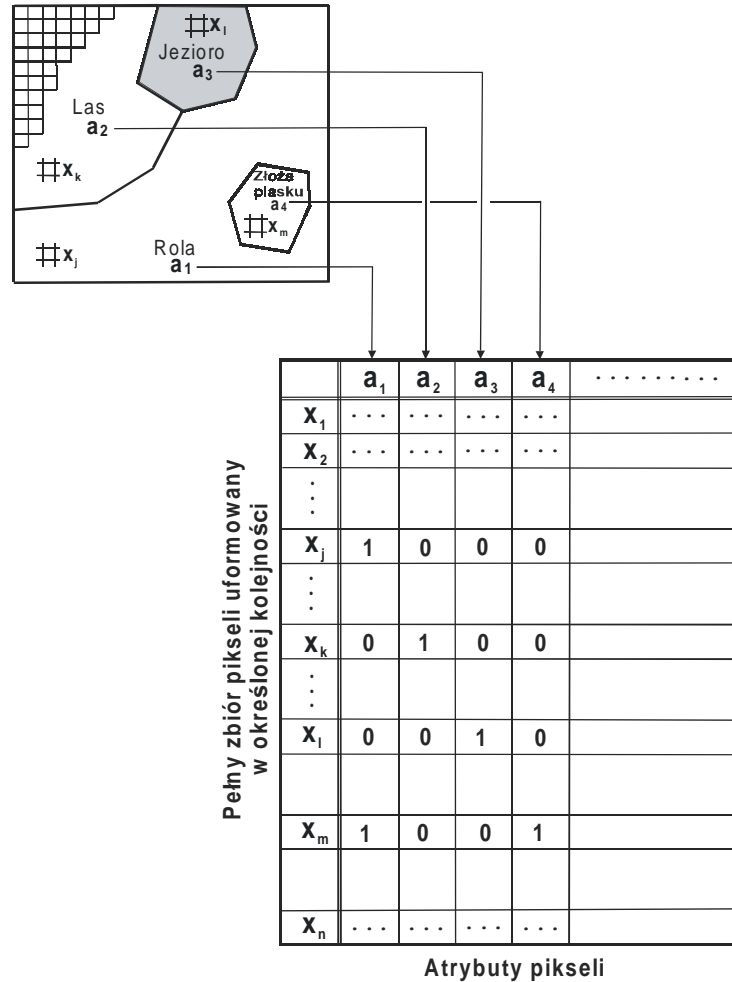
Na rysunku 11 pokazany jest uproszczony zapis obrazu mapy, tablica zawiera dla wszystkich atrybutów wartości binarne. Takie wartości wskazują na fakt znajdowania się kolejnego piksela na obszarze określonym danym atrybutem lub jego brak. Należy zwrócić uwagę na nakładanie się klas i możliwość występowania wartości w różnych pozycjach atrybutów dla danego piksela (x_m na rys. 11).

Binarny zbiór wartości atrybutów jest przypadkiem skrajnym i w praktyce poszczególne atrybuty posiadają rozbudowane dziedziny dopuszczalnych wartości. Można przytoczyć prosty przykład dla atrybutu a_1 z rysunku 11: jedną z możliwych dziedzin wartości może być tutaj obowiązująca obecnie w Polsce 6-klasowa bonitacja gleb, zawierająca w swej rozwiniętej formie faktycznie 8 wartości dziedziny D_1 .

Zapis obrazu mapy w tablicy jest kompletny – zawiera zbiór wszystkich pikseli obrazu mapy oraz odpowiednie pozycje atrybutów dla wszystkich klas, które na tej mapie występują. Z teŹ cechy wywodzi się nazwa zbioru globalnego.

Rysunek 11 w poglądowy sposób przedstawia także zasadę integracji przestrzeni i informacji z nią związanej. Występuje tu wyraźnie inne podejście niż w modelu wektorowym: tam informacja była związana z obiektami, natomiast tutaj – z elementami obrazu, z pikselami.

W tablicy zapisu globalnego klasy obiektów nie są rozróżnialne w sposób bezpośredni. Doprowadzenie do wyróżnienia klas wymaga selekcji zbioru pikseli X , które dla określonego atrybutu a_q przyjmują odpowiedni przedział wartości.

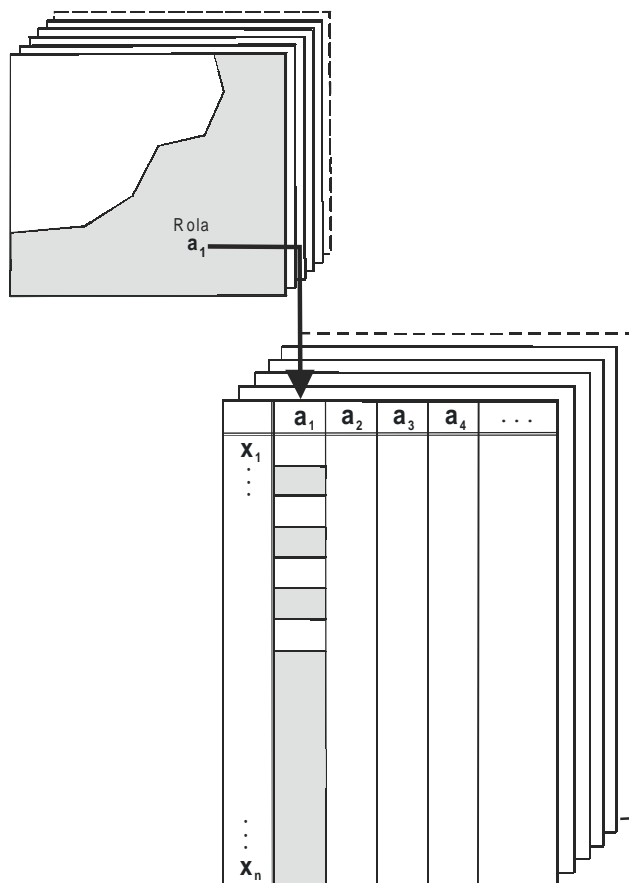


Rys. 11. Obraz mapy oraz jej zapis w tablicy – jako zbiór globalny. Wiersze tablicy odpowiadają pełnemu zbiorowi pikseli, kolumny zawierają atrybuty tych pól elementarnych

Rozwarstwienie klas w tablicy zbioru globalnego

Zapis globalny jest kompletny, jednak jego drugą istotną cechą jest duża nieoszczędność zapisu. Ponieważ położenie poszczególnych klas obiektów obejmuje tylko pewne części obrazu mapy – pozostałe obszary dopełniające mają w pozycji atrybutów wartości 0. Zatem w tablicy zapisu globalnego występuje znaczna liczba pozycji o takiej wartości.

Ponieważ każdorazowa selekcja tablicy wymaga czasu – korzystne byłoby tak zorganizować zasób informacyjny modelu rastrowego, aby oprócz tablicy zapisu globalnego przedstawiać w stanie gotowym do wykorzystania również grupy obiektów należące do tej samej klasy, na przykład klasy terenów rolnych, leśnych, wód stojących i rozpoznanych złóż surowców (rys. 11). Takie rozwiązanie przedstawia rysunek 12.



Rys. 12. Zapis obrazu mapy w postaci rozwarstwionej – jako zbiór obiektów poszczególnych klas, łącznie ze zbiorem tablic, w których wykazywane są wartości wyłącznie dla atrybutu odpowiadającego kolejnej warstwie obrazu

Kompresja jest rozwiązaniem połowicznym, ponieważ dotyczy tylko zapisu i nie uwzględnia związków przestrzennych w obrazie mapy. Dlatego warto rozważyć inne rozwiązanie, polegające na tym, że w budowie obrazu warstw tematycznych można korzystać nie tylko z pojedynczych pikseli, lecz tam gdzie to jest możliwe, z ich modularnych agregatów. Takie możliwości stwarzają metody hierarchicznego rozwijania obrazu.

Zbiór warstw tematycznych oparty na hierarchicznym rozwinięciu obrazu

Jedną z metod budowy hierarchicznych agregatów złożonych z pikseli jest podział przestrzeni obrazu 2-D zgodnie z drzewem czwórkowym (rys. 13) (Gatrell, 1994).

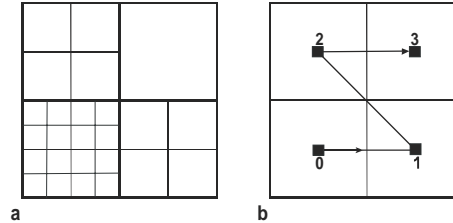
W takim podziale stosowana jest następująca procedura postępowania: na początku budowane są agregaty pikseli o maksymalnej wielkości, a następnie agregaty ulegają sukcesywnemu zmniejszaniu, aż do osiągnięcia granicznej wielkości docelowego piksela. Prze-

Na rysunku 12 jest pokazany zbiór warstw klas wraz z odpowiadającymi tym klasom atrybutami, zapisanymi w kolejnych tablicach wyłącznie w jednej kolumnie.

Z organizacyjnego punktu widzenia otrzymaliśmy w ten sposób obrazy warstw poszczególnych klas, jednak zapis atrybutów dla poszczególnych warstw jest nadal w dużej mierze nieoszczędny. Oczywiście z każdą warstwą obrazu można powiązać, zamiast pełnej tablicy, tylko odpowiednią kolumnę danego atrybutu, ale rozwiązanie to posiada nadal cechę zapisu mało oszczędnego, ponieważ także i w tym przypadku, w wydzielonych kolumnach oznaczaniu obszaru danej klasy obiektów podlegają pojedyncze piksele, których liczba jest zazwyczaj znaczna.

Stosowane są sposoby kompresji zapisu wartości w tablicach, polegające na rejestracji wartości powtarzalnych. W analizie wierszowej tablicy rastrowej jest element początkowy i końcowy wartości nie ulegającej zmianie (lub element początkowy i liczba powtórzeń).

strzeń obrazu dzielona jest wzdłuż linii symetrycznych, pionowej i poziomej – na cztery równe części (rys. 13a). Tę procedurę następnie powtarza się dla kolejnych otrzymanych czterech pól – tak długo, aż pola uzyskane z podziału osiągną założoną wielkość docelowego pola elementarnego. W czasie każdego kolejnego podziału dokonuje się oznaczenia otrzymanych czterech pól przez dodanie cyfr 0, 1, 2 i 3 zgodnie ze schematem przedstawionym na rys. 13b, o kształcie odwróconej litery Z. Każde z otrzymanych pól zachowuje nadany mu poprzednio kod i otrzymuje dodatkowo kolejną cyfrę wynikającą ze schematu z rysunku 13b. Rysunek 13c przedstawia ilustrację narastania kodu dla trzech pierwszych poziomów podziału.



222	223	232	233	322	323		
22		23		32			33
220	221	230	231	320	321		
	2				3		
202	203	212	213				
20		21		30			31
200	201	210	211				
022	023	032	033				
02		03		12			13
020	021	030	031				
	0				1		
002	003	012	013				
00		01		10			11
000	001	010	011				

Rys. 13. Zasada hierarchicznego podziału przestrzeni obrazu 2-D zgodnego z drzewem czwórkowym – (a); schemat dodawania cyfr kodu dla pól otrzymanych jako wynik kolejnego podziału – (b); ilustracja narastania kodu – (c)

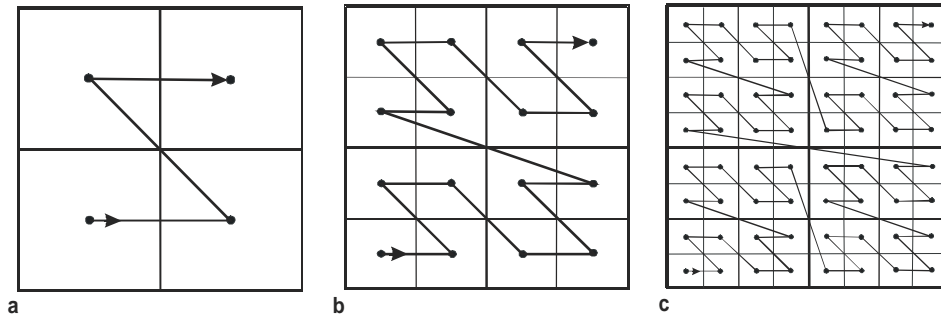
Zaletą takiego sposobu kodowania kolejnych zestawów pól jest możliwość ścisłego ustalenia położenia każdego pola (zamiany kodu na współrzędne), regularność kodu i wielkości pól oraz fakt, że pola będące sąsiadami posiadają kody podobne. Taka zasada kodowania ogranicza do niezbędnego minimum wielkie przeskoki sytuacyjne.

Zasada podziału hierarchicznego pozwala nam na zbudowanie obszaru mapy z pól o dowolnej wielkości – rozpoczynając od największych, a kończąc na polach o wielkości docelowego piksela. Umożliwia to budowanie obrazu w dowolnej skali i o dowolnym poziomie generalizacji obrazu.

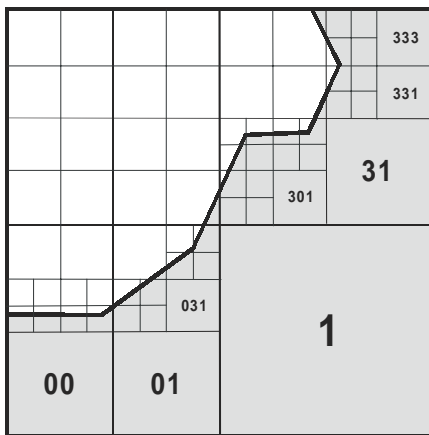
Porównując rysunek 13c, ilustrujący narastanie kodu oraz rysunek 10f, możemy stwierdzić, że kolejność narastania kodu w schemacie drzewa czwórkowego pokrywa się z kierunkiem przebiegania linii fraktalnej Peano. Linia Peano jest konsekwencją podziału zgodnego z drzewem czwórkowym, przy tak założonym sposobie kodowania. Zatem warto prześledzić sposób budowy tej linii i scharakteryzować jej własności.

Zasada budowy linii Peano (rys. 14) jest taka, że schemat każdego kolejnego poziomu linii jest zbudowany z czterech schematów poziomu poprzedniego, przy czym pomiędzy dwoma sąsiednimi polami lewym i prawym, ma miejsce przeskok od pola lewego górnego do pola prawego dolnego, natomiast pomiędzy parą dolną a górną następuje przeskok dłuższy. Jak już wspomniano wcześniej linia Peano wykonuje krótkie przebiegi w lokalnej przestrzeni i oscyluje w ramach niewielkiego obszaru. Pozwala to na szybszą budowę lokalnych obrazów oraz ich analizę.

Największą zaletą podziału przestrzeni 2-D zgodnego z drzewem czwórkowym jest oszczędny zapis warstw tematycznych, zawierających klasy obiektów (rys.12). Klasę obiektów (warstwę jednorodną tematycznie) posiadającą identyczną wartość atrybutu, można zapisać jako listę agregatów pól, zawartych wewnątrz obiektu. Graficzna ilustracja takiego



Rys. 14. Linia łamana Peano jako graficzna interpretacja kolejności przebiegania pól, przy założeniu podziału zgodnego z drzewem czwórkowym. Przebieg linii dla kolejnych stopni podziału: a – I stopień podziału; b – II stopień podziału; c – III stopień podziału



Rys. 15. Zasada zapisu klasy obiektów o jednorodnym atrybucie, polegająca na wypełnieniu obiektu agregatami pikseli o maksymalnej wielkości; lista kolejnych kodów adresowych agregatów (bloków) tworzy oszczędny zapis warstwy tematycznej, stanowiącej klasę obiektów

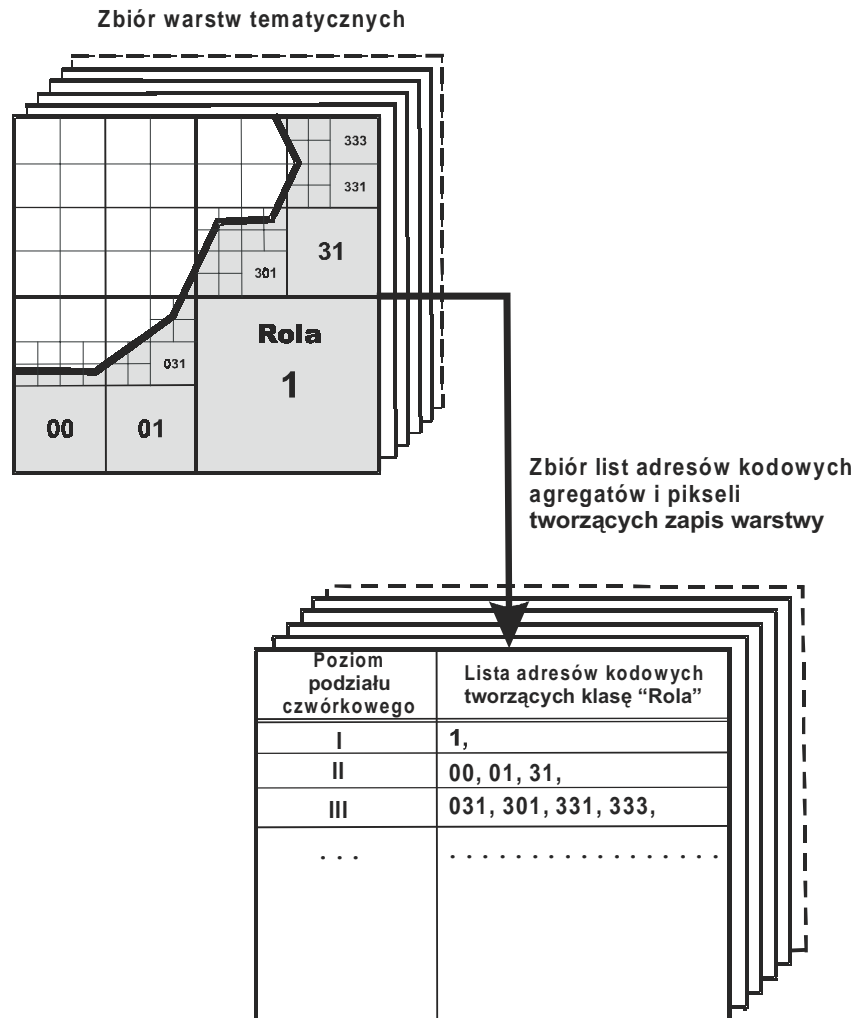
Tabela 19. Zapis klasy obiektów o jednorodnym atrybucie z rysunku 15, jako lista adresów kodowych agregatów o maksymalnej wielkości, powstałych w wyniku podziału czwórkowego obrazu

Poziom podziału czwórkowego	Lista adresów kodowych agregatów o maksymalnej wielkości, tworzących klasę
I	1,
II	00, 01, 31,
III	031, 301, 331, 333,
...

zapisu została przedstawiona na rysunku 15, natomiast przykładowy zapis obiektów z tego rysunku zawiera tabela 19.

Tworzenie listy agregatów wypełniających obiekt, w trakcie podziału czwórkowego, polega na rejestrowaniu adresu kodowego każdego kolejnego agregatu o maksymalnej wielkości, który mieści się całkowicie w konturach obiektów danej klasy (Gatrell, 1994). Zapisane agregaty nie ulegają już dalszemu podziałowi, ponieważ wszystkie kolejne elementy podziału posiadają jeden identyczny atrybut i ich rozróżnianie jest zbędne. Takie postępowanie pozwala na znaczną oszczędność zapisu, ponieważ duże obszary obiektów są reprezentowane przez agregaty o maksymalnej wielkości, zapisane jako jeden adres kodowy. W miarę wypełniania kształtu obiektów klasy kolejnymi mniejszymi polami, wzrasta liczebność adresów kodowych pól, którymi musimy dostosowywać się do grupy obiektów klasy. Wzrasta też długość kodów adresowych, ale i tak zapis ten jest o wiele bardziej oszczędny w stosunku do zapisu warstw uzyskanych z selekcji tablicy zbioru globalnego.

Celem budowy zbioru warstw tematycznych (rys. 16), zawierającego klasy obiektów, jest umożliwienie szybkiego i bezpośredniego dostępu do takich warstw. Szybkość dostępu wynika z zastosowania efektywnej metody zapisu, polegającej na reprezentowaniu obiektów modułowymi blokami pikseli o maksymalnej wielkości i zestawieniu listy tych bloków.



Rys. 16. Zbiór warstw tematycznych oparty na hierarchicznym rozwinięciu obrazu. Zapisy kolejnych warstw tworzą listy agregatów o maksymalnej wielkości, wypełniających daną klasę obiektów

Podsumowanie cech modelu rastrowego

W modelu rastrowym zostały omówione trzy sposoby organizacji zapisu obrazu mapy:

- 1) zapis w tablicy zbioru globalnego,
- 2) rozwarstwienie klas w tablicy zbioru globalnego,
- 3) zbiór warstw tematycznych oparty na hierarchicznym rozwinięciu obrazu.

Przed wszystkim należy wyraźnie podkreślić, że wszystkie trzy wymienione sposoby zapisu tworzą identyczny zapis danej przestrzeni. Są jedynie inaczej zorganizowane.

Zapis w tablicy zbioru globalnego jest zapisem kompletnym i uniwersalnym, natomiast jego wadą jest znaczna nieoszczędność zapisu oraz to, że w tej tablicy ani klasy obiektów, ani pojedyncze obiekty nie są rozróżniane w sposób bezpośredni.

Rozwarstwione klasy w tablicy zapisu globalnego tworzą zbiór warstw pojedynczych klas. Zapisy tych klas są także bardzo nieoszczędne. Zbiory warstw tematycznych opartych na hierarchicznym rozwinięciu obrazu, są zapisane w sposób bardzo oszczędny, a dostęp do takich warstw tematycznych jest szybki. Warstwy tematyczne, zawierające klasy i obiekty, są ważnymi produktami systemu do zastosowań specjalistycznych lub do budowy produktów o wyższym stopniu organizacji – agregacji klas. Jak już wspomniano na wstępie – pełny zbiór warstw tematycznych klas jest równoważny zawartości zbioru globalnego.

Pytania dotyczące określonych wartości atrybutów obiektów, zlokalizowanych na pewnym obszarze – należy kierować do zbioru globalnego. Pytania o lokalizację atrybutów o określonej wartości należy kierować do zbioru warstw tematycznych. Do tego zbioru należy kierować również żądania dotyczące wyprowadzenia kompletnych warstw tematycznych lub agregacji takich warstw.

Przedstawiona organizacja zbioru globalnego i warstw tematycznych pozwala na sprawne działanie systemu informacyjnego o modelu rastrowym.

Model rastrowy posiada następujące cechy:

- struktura zbiorów danych jest prosta,
- cechą modelu rastrowego jest ciągłość zapisu przestrzeni, stąd ma miejsce łatwość ustalania relacji przestrzennych pomiędzy elementami rastra, a także pomiędzy reprezentowanymi przez nie obiektami,
- przejrzysta struktura zbioru globalnego, jak również podziału czwórkowego – umożliwia łatwą manipulację danymi i ich analizę,
- zbiór pól elementarnych rastra jest uformowany arbitralnie i nie jest związany z obiektami obrazu który reprezentuje, stąd obiekty są odwzorowywane zawsze tylko z pewnym przybliżeniem,
- zapis w modelu rastrowym wymaga dużych pojemności pamięci komputera,
- obrazy o znacznej rozdzielczości rastra wykazują mniejsze zniekształcenia, lecz wymagają większej pamięci i czasu pracy komputera na ich zbudowanie.

Analiza porównawcza modelu wektorowego i rastrowego

Podstawową cechą modelu wektorowego jest jego ukierunkowanie na obiekty. W tym modelu dokonuje się przeglądu przestrzeni, wyróżnia się w tej przestrzeni obiekty, przebiega się te obiekty w pewnej kolejności oraz, w ramach każdego obiektu, zapisuje się jego strukturę. Model rastrowy ukierunkowany jest na arbitralnie nałożoną na przestrzeń 2-D siatkę rastra. Po tej czynności wszelka treść odwzorowanej mapy może być wyrażona wyłącznie przez przyjęte elementy siatki rastra. Model rastrowy nie posiada bezpośrednich relacji z klasami i obiektami. Klasy i obiekty są rozróżnialne przez atrybuty pikseli.

Model wektorowy zakreśla granicę obiektów, ale jej nie wypełnia. W modelu rastrowym granica jest wyróżniana na podstawie atrybutów pikseli granicznych. W modelu rastrowym możemy wyróżniać obiekty, przez co zachowana jest ciągłość przestrzeni klas lub obiektów. Model rastrowy lepiej odzwierciedla zjawiska ciągłe, natomiast model wektorowy w sposób jednoznaczny definiuje granice pomiędzy obiektami i zjawiskami na mapie.

Dla przejrzystości porównania – charakterystyki według dalszych kryteriów zostały zestawione w tabeli 20.

Model wektorowy zakreśla granice obiektów powierzchniowych, nie wypełniając ich w środku. Do rozwiązywania zadań uwzględniających relacje przestrzenne wykorzystywane

Tabela 20. Porównanie parametrów modelu wektorowego i rastrowego

Kryteria porównania	Model wektorowy	Model rastrowy
Opis położenia	Opis położenia obiektów za pomocą współrzędnych punktów w kartezjańskim układzie współrzędnych	Opis położenia każdego obszaru elementarnego (piksela) w kartezjańskim układzie współrzędnych
Dokładność odwzorowania obiektów	Jednoznaczność zdefiniowania granic obiektów, wierne odzwierciedlenie kształtu, wysoka dokładność identyfikacji	Odwzorowanie obiektów obarczone błędami niezgodności siatki rastra z granicami obiektów
Zapotrzebowanie na pojemność pamięci komputera	Zapis bardzo oszczędny	Duże zapotrzebowanie
Integracja informacji z przestrzenią	Integracja informacji z obiektem mapy	Integracja informacji z obszarem elementarnym rastra z pikselem lub agregatem pikseli
Typowe skale opracowań, typowe zastosowania	Mapy wielkoskalowe Odwzorowanie obiektów, dla których wymagana jest wysoka dokładność	Mapy średnioskalowe. Zastosowania nie wymagające wysokiej dokładności (typowe odwzorowanie obiektów i zjawisk przyrodniczych)

są zapisy związków topologicznych pomiędzy obiektami lub elementami strukturalnymi obiektów. Do ustalenia innych relacji przestrzennych konieczne są algorytmy geometrii obliczeniowej. Algorytmy takie są skomplikowane, stąd zaawansowane pakiety GIS, bazujące na modelu wektorowym są drogie.

W modelu rastrowym regularność siatki i ciągłości zapisu sprawiają, że związki topologiczne są wpisane w zasady tworzenia takiego modelu. Analizy przestrzenne są łatwe do oprogramowania, dlatego rastrowe pakiety GIS są tańsze od wektorowych.

W przypadku gdyby dla danego obszaru istniały zbudowane obydwa modele, to model wektorowy lepiej odpowiada na pytania związane z obiektami, a model rastrowy na pytania o kompleksowe własności danej lokalnej przestrzeni.

Modele powierzchni topograficznej w systemach informacji przestrzennej

Należy rozważyć jakie cechy posiada powierzchnia topograficzna oraz czy podlega ona wymienionym procedurom w takim samym stopniu jak wszystkie inne obiekty rzeczywistości geograficznej.

W porównaniu z obiektami rzeczywistości geograficznej, które mają swój określony zasięg, powierzchnia topograficzna posiada podstawową cechę ciągłości. Ciągłość ta ulega pozornemu przerwaniu na granicy brzegów wód, jednak istnieje nadal w innej formie – powierzchnia topograficzna przechodzi w powierzchnię batymetryczną.

Na terenach intensywnie zabudowanych powierzchnia topograficzna jest na dużych obszarach nakryta obiektami infrastruktury, jednak takie sztuczne powierzchnie na ogół także nawiązują do realnego kształtu terenu. Można zatem mówić o powszechnej ciągłości powierzchni topograficznej.

Ta szczególna cecha decyduje o tym, że powierzchnię topograficzną traktujemy jako jeden ciągły obiekt rzeczywistości geograficznej. Jako obiekt ciągły składa się z nieskończonej liczby punktów. Z praktycznego punktu widzenia musimy tę ciągłą powierzchnię topograficzną ograniczyć do takiej niezbędnej liczby elementów geometrycznych, które pozwolą wiernie odwzorować rzeźbę terenu w określonej skali. Te elementy geometryczne stanowią reprezentację powierzchni topograficznej.

Ustalenie reprezentacji powierzchni topograficznej jest pierwszym krokiem do zbudowania odtwarzalnego zapisu rzeźby terenu. Reprezentacja jest wyborem elementów geometrycznych powierzchni topograficznej. Natomiast modele uzupełniają tę reprezentację o algorytmy, pozwalające na odtworzenie rzeźby terenu. Reprezentacja jest ekstraktem ciągłej powierzchni topograficznej, ekstraktem wynikającym z ograniczeń praktycznych – modele pozwalają na odtworzenie (z pewnym przybliżeniem) stanu pierwotnego tej powierzchni.

Praca (Eckes, 2006) zawiera przegląd i propozycję klasyfikacji cyfrowych modeli powierzchni topograficznej. W tej klasyfikacji wyróżniono modele o reprezentacji punktowej, liniowej i powierzchniowej z uwzględnieniem:

- ciągłości lub nieciągłości tej reprezentacji,
- nawiązania modelu do kształtu powierzchni topograficznej lub arbitralnym wyborem punktów,
- narzucenia określonych warunków geometrycznych na proces wyboru punktów reprezentujących model (sytuacyjnych lub wysokościowych).

W powyżej pracy zarówno klasyfikacja jak i opis modeli – zostały przedstawione w ścisłym związku z procesem uzyskiwania danych do systemu.

Znajomość rzeźby terenu jest czymś tak ważnym dla celów gospodarczych, że dla tej jednej klasy stosuje w systemach informacji przestrzennej szczególne prawa. Obiekty wszystkich klas podlegają zmniejszeniu liczby wymiarów, natomiast dla tej jednej klasy budowane są modele przestrzenne, które pozwalają na zachowanie wiernego kształtu powierzchni topograficznej. Budowa cyfrowych modeli terenu jest przedmiotem niezmiernie szerokich badań, spośród których pozycje (Hutchinson, Gallant, 1999; Weibel, Heller, 1994), stanowią jedynie przykłady bardzo dużej liczby opracowań. Dlatego modelowanie powierzchni topograficznej, tej szczególnej klasy obiektów w systemach informacji przestrzennej, wymaga szerokiego, oddzielnego potraktowania.

Literatura

- ArcGIS 9, 2004: Users' Manuals. Environmental Systems Research Institute, Redlans, USA.
- Arc/Info 8.0, 2003: Users' Manuals. Environmental Systems Research Institute, Redlans, USA.
- Bartelme N., 2000: Geoinformatik – Modelle, Strukturen, Funktionen. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York.
- Boots B., 1999: Spatial Tessellations. Geographical Information Systems – Volume 1: Principles and Technical Issues, John Wiley & Sons, Inc., New York.
- Demers M.N., 1999: Fundamentals of Geographic Information Systems. John Wiley & Sons, Inc., New York.
- Eckes K., 2006: Modele i analizy w systemach informacji przestrzennej – monografia skierowana do druku w Wydawnictwach AGH w Krakowie.
- Eckes K., 2003: Tendencje rozwojowe systemów informacji przestrzennej. *Geodezja*, Półrocznik Akademii Górniczo-Hutniczej, Tom 9, Zeszyt 2/3, Kraków.
- Gatrell A.C., 1994: Concepts of Space and Geographical Data. Geographical Information Systems – Volume 1: Principles, Longman Scientific and Technical, Longman House, Burnt Mill, Harlow, Essex.

- Gaździcki J., 2002: Leksykon geomatyczny. Polskie Towarzystwo Informacji Przestrzennej, Warszawa.
- Gaździcki J., 1990: Systemy informacji przestrzennej. PPWK Warszawa.
- Hutchinson M.F., Gallant J.C., 1999: Representation of Terrain. Geographical Information Systems – Volume 1: Principles and Technical Issues, John Wiley & Sons, Inc., New York.
- Instrukcja K-1, 1995: System informacji o terenie. Podstawowa mapa kraju. Państwowa Służba Geodezyjna i Kartograficzna, wyd. III, Warszawa.
- Molenaar M., 1998: An Introduction to the Theory of Spatial Object Modelling. Taylor & Francis, London.
- Oosterom P., 1999: Spatial Access Methods. Geographical Information Systems – Volume 1: Principles and Technical Issues, John Wiley & Sons, Inc., New York.
- Weibel R., Heller M., 1994: Digital Terrain Modelling. Geographical Information Systems – Volume 1: Principles, Longman Scientific and Technical, Longman House, Burnt Mill, Harlow, Essex.

Summary

In this paper, geographical reality is treated as topographical surface with natural objects and human-created infrastructure. The natural objects and infrastructure occur on the earth surface and under it. So understood geographical reality is featured by a very big number of objects and large diversity of them.

The projection of geographical reality in the 2-D form in order to create the map image needs the diversity to be reduced by means of object classification, object and details simplification and reduction of three-dimensional space to two-dimensional one.

In order to record an image of the map in the spatial information system it should be adjusted to the logic of computer technology - and transformed to the linear form (1-D). In this paper two different ways of transformation of the map image to spatial information system (two ways of data modeling) are described – building of a vector model and building of a raster model.

The first part of this paper presents the way to take control of the complexity of geographical reality – using objects classification, object shape simplification and projection of three-dimensional space (3-D) to the 2-D dimension.

The second part describes five vector models: an object-oriented non-topological model, a source model as non-arranged list of vectors (model spaghetti), an elementary topological model, a chain topological model and an object-oriented topological model. In descriptions of each models the recordings of geometric structural elements, topology and objects are presented.

The third part describes building of three raster models: a the global (universal) model, a global class-selected model and a set of thematic layers, based on hierarchical image transformation to linear form. The last part is devoted to the digital modeling of topographical surface – to building of digital terrain models. This short chapter contains only an outline of this subject. Modeling of topographical surface is a very broad problem, which needs separate, extensive description.

dr hab. inż. Konrad Eckes prof. n. AGH
keckes@uci.agh.edu.pl