

DOMENA PUBLICZNA

Jacek Urbański

GIS w badaniach przyrodniczych

ebook



wersja 2012

luty

Publikacja ta jest elektroniczną wersją wydanej w 2008 roku książki pod tym samym tytułem. Mam nadzieję, że dzięki jej udostępnieniu nadal będzie przydatna, a przy okazji bardziej dostępna. W tym roku planuję przeprowadzić jej aktualizację, która zostanie udostępniona w sieci. Błędy wydruku we wzorach zostaną wkrótce usunięte.

Jacek Urbański

Centrum GIS, Uniwersytet Gdański

JACEK URBAŃSKI

GIS W BADANIACH PRZYRODNICZYCH

1. WPROWADZENIE	6
2. ZASTOSOWANIE GIS W BADANIACH NAUKOWYCH	18
2.1 Geomorfologia	19
2.2 Meteorologia i klimatologia	20
2.3 Hydrologia	21
2.4 Ekologia	23
2.5 Ochrona środowiska	27
2.6 Geografia krajobrazu	28
3. DANE PRZESTRZENNE	30
3.1 POŁOŻENIE NA POWIERZCHNI ZIEMI	30
3.1.1 Ziemia jako płaszczyzna	30
3.1.2 Ziemia jako kula	30
3.1.3 Ziemia jako elipsoida	31
3.1.4 Układ odniesienia (datum)	34
3.1.5 Odwzorowania kartograficzne	36
3.1.6 UTM – podstawowy układ współrzędnych w pracach naukowych	39
3.1.7 Małoskalowe odwzorowania europejskie	42
3.1.8 Polskie układy współrzędnych	44
3.2 MODELE DANYCH	47
3.2.1 Model danych - cyfrowa reprezentacja i struktura danych	47
3.2.2 Wektorowy model danych	50
3.2.3 Rastrowy model danych	53
3.2.4 Wektorowy model sieci	56
3.2.5 Wektorowy model TIN	58
3.3 POZYSKIWANIE DANYCH	60
3.3.1 Pomiary	60
3.3.2 GPS – Globalny system określania pozycji	62
3.3.3 Cyfrowe dane przestrzenne dla Polski	64
3.3.4 Rejestracja w układzie współrzędnych	78
3.3.5 Digitalizacja ekranowa	83
3.3.6 Niepewność i błędy mapy cyfrowej	86
4. PODSTAWOWE FUNKCJE ANALIZY WEKTOROWEJ	91

4.1 Wizualizacja	91
4.2 Selekcja atrybutowa	96
4.3 Operacje w tablicy atrybutowej	98
4.4 Selekcja na podstawie relacji przestrzennych	105
4.5 Pozyskiwanie danych atrybutowych na podstawie relacji przestrzennych	107
4.6 Buforowanie	112
4.7 Nakładanie	114
4.8 Generalizacja	119
5. PODSTAWOWE FUNKCJE ANALIZY RASTROWEJ	122
5.1 Wizualizacja	123
5.2 FUNKCJE LOKALNE	128
5.2.1 Reklasyfikacja	128
5.2.2 Crosstabulacja	130
5.2.3 Statystyka	131
5.2.4 Obliczenia przy pomocy algebry map	132
5.3 FUNKCJE SĄSIEDZTWA	135
5.3.1 Statystyka	135
5.3.2 Grupowanie	137
5.4 FUNKCJE STREFOWE	138
5.4.1 Statystyka stref	138
5.4.2 Geometria stref	141
5.5 FUNKCJE GLOBALNE	142
5.5.1 Dystans	142
5.5.2 Alokacja	143
5.6 INTERPOLACJA	145
5.7 KONWERSJA WEKTOR-RASTER I RASTER-WEKTOR	148
6. ANALIZA TERENU I MODELOWANIE HYDROLOGICZNE	152
6.1 Tworzenie map DEM	153
6.2 Wizualizacja powierzchni terenu	156
6.3 PODSTAWOWE ATRYBUTY TOPOGRAFICZNE	158
6.3.1 Nachylenie	159
6.3.2 Kierunek nachylenia lub ekspozycja	161

6.3.3 Krzywizna	161
6.4 WTÓRNE ATRYBUTY TOPOGRAFICZNE	165
6.4.1 TWI – Topograficzny indeks wilgotności	165
6.4.2 SPI – Indeks siły spływu	166
6.4.3 LS – Współczynnik zdolności transportowania osadu	167
6.4.4 Promieniowanie słoneczne dochodzące do powierzchni Ziemi	168
6.5 MODELOWANIE HYDROLOGICZNE	169
7. ANALIZA ROZMIESZCZENIA ELEMENTÓW KRAJOBRAZU	182
7.1 Powierzchnia i proporcja klas na mapie	186
7.2 Liczba klas	187
7.3 Różnorodność krajobrazu	188
7.4 Zróżnicowanie kształtu elementów krajobrazu	191
7.5 Strefy centralne	193
7.6 Izolacja elementów krajobrazu	196
7.7 Granice i kontrast pomiędzy elementami krajobrazu	198
7.8 Fragmentacja krajobrazu	200
7.9 Analiza łączności pomiędzy elementami krajobrazu	203
8. MODELOWANIE W GIS	207
8.1 Tworzenie modelu GIS	210
8.2 Modelowanie wskaźnikowe	213
8.3 Modelowanie przestrzenne	217
8.4 Modelowanie regresyjne	221
9. MODELOWANIE GEOSTATYSTYCZNE ROZMIESZCZENIA W PRZESTRZENI	223
9.1 Eksploracyjna analiza danych	227
9.2 Analiza zmienności przestrzennej	230
9.3 Modelowanie wariogramu	237
9.4 Otoczenia punktów estymowanych	241
9.5 ESTYMACJA ZA POMOCĄ KRIGINGU	242
9.5.1 Kriging zwyczajny	244
9.5.2 Kriging blokowy	245
9.5.3 Kriging indykatorowy	246

A. Literatura

B. Spis akronimów

C. Indeks

D. Spis ramek

1. WPROWADZENIE

GIS – Geograficzne systemy informacyjne są jednym z trzech elementów nowej dziedziny naukowej zwanej geotechnologią.

W 2004 roku ukazał się w „Nature” artykuł (Gewin 2004) opisujący dynamiczny rozwój nowej dziedziny naukowej nazwanej geotechnologią i zrównujący jej ówczesne i perspektywiczne znaczenie z biotechnologią i nanotechnologią. Istotą tego nowego kierunku badań jest dostarczanie geoinformacji, czyli informacji o powierzchni Ziemi. Powstał on w rezultacie integracji globalnego systemu określania pozycji (GPS – *Global Positioning System*)¹, teledetekcji (RS – *remote sensing*) i geograficznych systemów informacyjnych (GIS – *geographic(al) information system*). Geoinformację wyróżnia jej element przestrzenny, którego znaczenie obrazowo wyraził Tobler w popularnym i powszechnie znanym tzw. pierwszym prawie geografii: „wszystkie elementy powierzchni Ziemi są ze sobą powiązane, ale leżące bliżej siebie są powiązane mocniej od znajdujących się dalej”. Uwzględnianie wzajemnej lokalizacji elementów powierzchni Ziemi stało się niezbędne przy rozwiązywaniu wielu zagadnień praktycznych i szukaniu odpowiedzi na rozliczne pytania badawcze. W artykule wspomniano o tym, że coraz więcej multidyscyplinarnych projektów badawczych zawiera elementy geoprzestrzenne.

Każda z tworzących tę nową dziedzinę składowych służy do pozyskiwania lub analizy danych przestrzennych (*spatial data*) opisujących powierzchnię Ziemi. GPS pozwala na bezpośredni pomiar pozycji, co umożliwia przypisanie współrzędnych (najczęściej geograficznych) wszelkim pomiarom wykonywanym w terenie. Jest to system okrążających Ziemię satelitów nadających sygnały zawierające bardzo dokładną informację o czasie ich wysłania. Pozycja jest obliczana na podstawie określenia czasu jaki jest potrzebny aby sygnał dotarł do odbiornika pomiarowego z co najmniej czterech satelitów. Koszt pomiaru (odbiornika GPS) jest uzależniony od wymaganej dokładności, która dla najtańszych urządzeń nie jest gorsza od kilkunastu metrów. Najbardziej precyzyjne odbiorniki mają dokładność rzędu centymetrów, a zatem można je porównać do tradycyjnych przyrządów geodezyjnych. Metody teledetekcyjne mają, w porównaniu z GIS i GPS, najdłuższą historię sięgającą czasów wynalezienia fotografii. Pierwsze zdjęcia powierzchni Ziemi z balonu zostały wykonane w 1858 roku i mogą być uważane za początek 150-letniej historii coraz doskonalszych metod ich pozyskiwania,

¹ Wszystkie wyrażenia w języku angielskim są pisane kursywą.

początkowo głównie z samolotów, a następnie z satelitów. Ogromną zaletą tej metody jest uzyskiwanie chwilowego obrazu znacznego obszaru. Obecnie metody te są głównym źródłem informacji o aktualnym stanie powierzchni Ziemi. Tak jak rozwój teledetekcji był logicznym następstwem wynalezienia fotografii, tak geograficzne systemy informacyjne są nierozdzielnie związane z rozwojem techniki komputerowej. Ich obecny kształt jest rezultatem połączenia wielu niezależnych inicjatyw, wywodzących się z bardzo różnych dziedzin takich jak meteorologia, geologia czy leśnictwo, których wspólnym celem było wykorzystanie komputerów do tworzenia map oraz przechowywania i analizowania danych przestrzennych.

GIS jest systemem komputerowym służącym do wszechstronnej analizy danych przestrzennych.

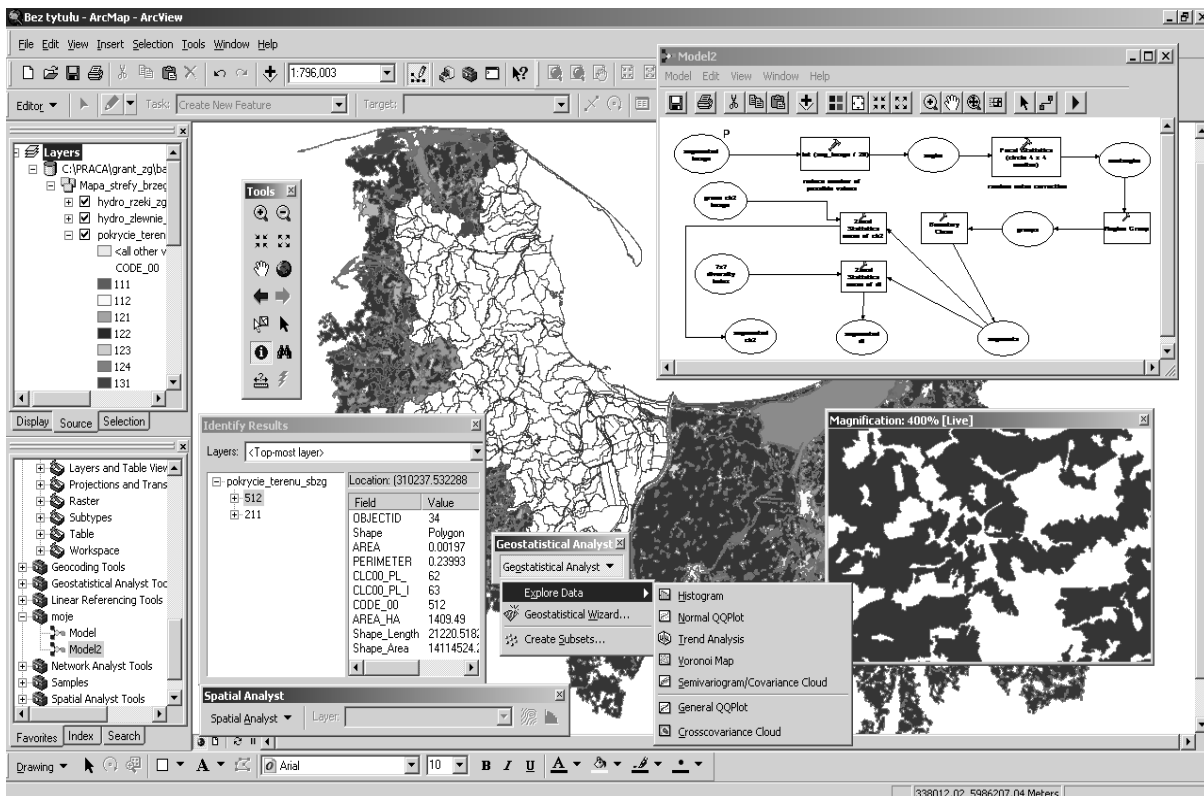
W rezultacie powstał wszechstronny, zintegrowany i otwarty na nowe rozwiązania zestaw narzędzi komputerowych przeznaczony do analizy różnorodnych danych, posiadających lokalizację w przestrzeni. Składa się on najczęściej z czterech podsystemów: (1) wprowadzania danych z różnych źródeł i ich transformacji do postaci umożliwiającej wspólną analizę; (2) organizowania, przechowywania i zarządzania danymi; (3) analizowania danych, estymacji i modelowania; (4) tworzenia produktów w postaci tablic, rysunków i map. Ponieważ modelem przestrzeni geograficznej (powierzchni Ziemi) przez stulecia była mapa, to wpływ kartografii jako sztuki i nauki tworzenia map na obecny kształt tych systemów jest bardzo duży. Istotną różnicą pomiędzy GIS a współczesną kartografią komputerową jest brak w tej drugiej podsystemu analitycznego, zredukowany w porównaniu z GIS podsystem przechowywania danych i mniejsza różnorodność tworzonych produktów.

Ramka 1.1

Oprogramowanie GIS (ArcGIS firmy ESRI)

ArcGIS firmy ESRI to najczęściej obecnie stosowany GIS na świecie (w 2004 roku istniało 160 tysięcy jego licencji i używało go ponad milion osób). Jest on powszechnie wykorzystywany w badaniach naukowych i edukacji. Komisja Europejska, a za nią Europejska Agencja Środowiska (European Environment Agency) zaleciła wykorzystywanie tego oprogramowania w projektach dotyczących zagadnień związanych z ochroną środowiska (EEA 2005). ArcGIS składa się z trzech oddzielnych programów. ArcMap służy do edycji, wizualizacji oraz tworzenia produktów analiz. Zespólny z nim ArcToolbox zawiera narzędzia do analizy danych. ArcCatalog pełni rolę Windows Explorera dla geoinformacji, a wraz z narzędziami ArcToolbox tworzy środowisko zarządzania danymi przestrzennymi. Szereg dodatkowych rozszerzeń programu umożliwia specyficzne rodzaje analizy: Spatial Analyst analizę danych rastrowych; Network Analyst analizę danych sieciowych; Geostatistical Analyst wykorzystywanie metod

geostatystyki do estymacji pól ciągłych (o wartościach określonych w każdym punkcie przestrzeni) z danych punktowych, a 3D Analyst analizę danych w trzech wymiarach. Cały system ArcGIS jest oferowany na trzech poziomach. ArcView jest najtańszą i najuboższą wersją, ArcEditor posiada pełne możliwości edycji danych, a ArcInfo pełne możliwości zarówno edycyjne, jak i analityczne. Program umożliwia tworzenie zintegrowanych z nim aplikacji w rezultacie czego dostępnych jest szereg specjalistycznych narzędzi, tworzonych w różnych ośrodkach naukowych i najczęściej udostępnianych bezpłatnie do celów badawczych. Praktycznie wszystkie programy naukowe z zakresu analizy danych przestrzennych zapewniają eksport i import swoich danych do systemu ArcGIS. Programu można nauczyć się z podręcznika przygotowanego przez ESRI Press, który zawiera 6-miesięczną licencję ArcView z wszystkimi istotnymi rozszerzeniami.



Rys. 1.1 Wygląd interfejsu użytkownika programu ArcMap (9.1). W lewym dolnym rogu zespolony z nim ArcToolbox.

GIS ma 40 letnią historię ściśle związaną z tworzeniem, analizowaniem i wykorzystaniem mapy numerycznej.

Powszechnie uważa się, że idea i nazwa GIS narodziła się w Kanadzie w latach 60-tych ubiegłego wieku jako odpowiedź na zbyt wysokie koszty ręcznego tworzenia wielowarstwowych map pokrycia terenu. Technologicznie podobnym rozwiązaniem był system komputerowy wspomagający przestrzenną agregację danych w amerykańskim spisie powszechnym, który

odbył się kilka lat później. Konsekwencją tych dwóch zakończonych sukcesem przedsięwzięć było zainicjowanie w laboratorium grafiki komputerowej na Uniwersytecie Harvarda projektu, który zaowocował powstaniem pierwszego GIS ogólnego przeznaczenia ODYSSEY GIS. W latach tych wiele narodowych agencji zajmujących się tworzeniem map próbowało wykorzystać rozwijającą się technologię komputerową do celów kartograficznych. Pierwszą serią map wykonanych techniką komputerową były mapy geologiczne wydane w Wielkiej Brytanii w 1973 roku. Podobne zainteresowanie wprowadzaniem nowej technologii wykazywały biura meteorologiczne, wojsko oraz duże firmy zajmujące się poszukiwaniem i wydobywaniem surowców naturalnych. Efektem różnorodnych prac prowadzonych równoległe w wielu miejscach było stworzenie koncepcji mapy numerycznej.

Poprzednikiem i koncepcyjnym wzorcem dla mapy numerycznej była mapa analogowa (papierowa), której podstawowymi cechami są skala, odwzorowanie, symbolizacja i generalizacja.

Mapa papierowa, zwana także analogową — ze względu na to, że może być wykonana na innym niż papier trwałym materiale — przez stulecia była podstawową formą przekazywania informacji geograficznej. Jej najważniejszymi cechami były i są: (1) skala; (2) odwzorowanie, czyli sposób przeniesienia informacji z powierzchni globu na powierzchnię płaską; (3) symbolizacja, czyli sposób przedstawiania elementów i cech powierzchni Ziemi i związana z nią (4) generalizacja, wynikająca z niemożności przedstawienia wszystkich obiektów w ich naturalnym kształcie.

Skala mapy określa stosunek odległości pomiędzy odpowiadającymi sobie elementami na mapie i na powierzchni Ziemi. Może być określana słownie — „jeden centymetr na mapie odpowiada jednemu kilometrowi w terenie”, jako ułamek — „1:100000” lub „1/100000”, bądź graficznie. Ze względu na to, że skalę definiuje ułamek, to wartość skali jest tym mniejsza, im większy jego mianownik. Stąd mapy wielkoskalowe to mapy o małych wartościach w mianowniku. Skala map papierowych — niezależnie od tego, czy zostały wykonane ręcznie, czy wydrukowane po zaprojektowaniu ich za pomocą komputera — jest stała, a z jej wartością związana jest szczegółowość mapy, czyli liczba obiektów na jednostkę powierzchni Ziemi. Im większa skala tym bogatsza w szczegóły może być mapa, jednocześnie obejmując mniejszą powierzchnię. Na mapach wyświetlanych na ekranie monitora skala może być dowolnie kształtowana za pomocą zwiększania lub zmniejszania obrazu. Jej szczegółowość jest natomiast z jednej strony określona liczbą dostępnych elementów mapy, z drugiej możliwościami

wizualizacji. Nie ma możliwości przedstawienia miliona punktów na 100 cm² powierzchni ekranu, ponieważ punkty będą niewidoczne lub utworzą jednolitą płaszczyznę. Skala mapy ma bezpośredni związek z jej dokładnością. Dla map papierowych przyjmuje się, że błąd położenia elementów na mapie wynosi 0,5 mm w skali mapy. Aby obliczyć dokładność danej mapy w metrach należy mianownik skali podzielić przez 2000 (np. dla mapy 1:50000, $50000/2000=25$, czyli błąd położenia dowolnego elementu na mapie nie powinien być większy od 25 m). Z tego też powodu dla map komputerowych, które mogą być wyświetlane w dowolnej skali, podaje się informację jakiej skali odpowiada jej poziom dokładności, aby móc określić spodziewany poziom błędu.

Przy przekształcaniu zakrzywionej powierzchni Ziemi na płaską powierzchnię mapy powstają zniekształcenia. Wynikają one z niemożności jednoczesnego zachowania czterech charakterystyk opisujących wierność odwzorowania elementów przestrzennych: kierunku, odległości, powierzchni i kształtu. Mnogość stosowanych odwzorowań kartograficznych [patrz podroz. 3.1.5] wynika między innymi z potrzeby wykorzystywania takiego, które powoduje jak najmniejsze zniekształcenia charakterystyk istotnych dla danego zastosowania. Sposoby symbolizacji powierzchni Ziemi na mapach papierowych, czyli metody przekazu informacji geograficznej, tworzyły się przez wieki jak efekt wzajemnych oddziaływań sztuki, nauki i techniki [patrz podroz. 4.1].

Mapy stanowią model rzeczywistości. Na mapach numerycznych tworzony on jest z danych przestrzennych zorganizowanych pod względem fizycznym i logicznym w modele danych.

W momencie tworzenia koncepcji mapy numerycznej istniał już symboliczny model rzeczywistości stosowany do jej reprezentowania na mapach papierowych, stąd całkiem naturalną była tendencja do jego wykorzystania. Istotną cechą tego modelu rzeczywistości była jego warstwowość. Wynikała ona zarówno z tematycznego podziału treści mapy, jak i techniki jej projektowania i druku. Warstwy określonej treści były wykorzystywane do tworzenia map tematycznych (np. gleb, osadnictwa czy klimatu). Model uwzględniał warstwy pól ciągłych (z wartością określoną w każdym punkcie), z których najistotniejszą była warstwa opisująca ukształtowanie terenu, oraz warstwy obiektów dyskretnych (posiadających granice) w postaci linii (np. rzeki, drogi), punktów (np. miasta na mapie małooskalowej, punkty pomiarowe), jak również wieloboków (np. lasy, jeziora). Pola ciągle były przedstawiane na mapach w formie linii o jednakowych wartościach (izolinii, poziomic lub warstwic), natomiast do przedstawiania

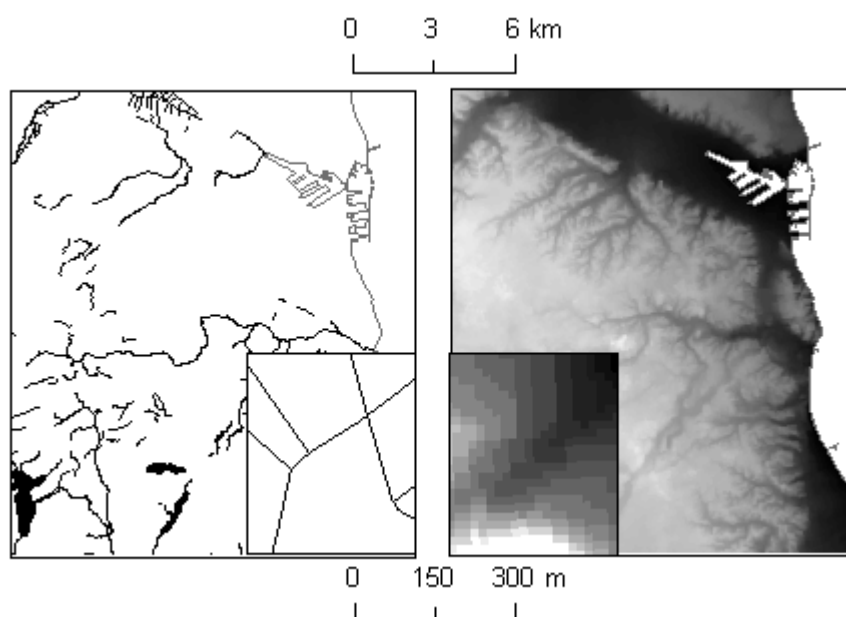
obiektów dyskretnych wykorzystywano różnego rodzaju symbole punktowe, liniowe i powierzchniowe (szraf). Ten wypracowany przez stulecia model rzeczywistości został przekształcony do postaci numerycznej.

Podstawowym składnikiem numerycznego modelu rzeczywistości są dane przestrzenne. Stanowią one specjalny rodzaj danych, w których obok wartości mierzonej zmiennej uwzględnia się położenie w przestrzeni geograficznej, która jest czasem rozszerzana na czasoprzestrzeń. W związku z tym składają się one z dwóch części — pierwszej zawierającej wartość zmiennej (dane atrybutowe) oraz drugiej określającej lokalizację, czyli położenie w przestrzeni (dane graficzne lub geometryczne). Zmienne mogą być różnego typu: (1) jakościowe lub nominalne (*nominal*), np. „żwir”, „23078”, „rezerwat”; (2) porządkowe (*ordinal* lub *rank*), np. „przydatne, obojętne, nieprzydatne”, „0,1,2,3” – klasa czystości; (3) liczbowe o charakterze ilościowym, np. „1.23, 7”). Zmienne liczbowe w zależności od tego, czy posiadają zero absolutne (jak np. temperatura w stopniach Kelwina), czy wyznaczone arbitralnie (jak np. temperatura w stopniach Celsjusza), są dzielone na zmienne ilorazowe (*ratio*) i interwałowe (*interwał*). Zalicza się do nich także zmienne otrzymane w rezultacie policzenia (np. 122 komórki) i zmienne kierunkowe lub cykliczne (*directional, cyclic*), np. 0 – 360 kierunek wiatru, XII – V miesiące. Pod względem położenia w przestrzeni dane mogą mieć charakter dyskretny albo ciągły. Dane dyskretne tworzą obiekty posiadające granice. Stanowią je punkty, linie lub wieloboki (*polygons*). Mogą być one otoczone przez pustą przestrzeń, albo tworzyć zwartą mozaikę obiektów (w przypadku wieloboków). Dane ciągłe są określone dla każdej możliwej lokalizacji, możliwe jest ich zdefiniowanie jako „brak danych” (*no data*), a jedynym ograniczeniem ich występowania jest ramka mapy. Dane dyskretne mogą zostać przekształcone na dane ciągłe za pomocą interpolacji [patrz podroz. 5.6 i 9.5], a dane ciągłe na dyskretne za pomocą ekstrakcji [patrz podroz. 4.5 i ramka 4.5]. Przestrzenna część danych opisuje lokalizację w pewnym układzie współrzędnych. Dla powierzchni Ziemi jest to najczęściej układ współrzędnych geograficznych, w którym lokalizacja jest określana za pomocą szerokości i długości geograficznej.

Kolejnym krokiem w tworzeniu koncepcji mapy numerycznej było określenie logicznej i fizycznej struktury danych, aby mogły być z jednej strony przechowywane, przetwarzane i analizowane za pomocą systemów komputerowych, a z drugiej wykorzystane do reprezentacji świata rzeczywistego. Określono dwa podstawowe modele danych: rastrowy i wektorowy (Rysunek 1.2). Model rastrowy jest przeznaczony głównie dla danych ciągłych i odpowiada z jednej strony mechanizmowi wyświetlania obrazu na ekranie, a z drugiej tablicy dwuwymiarowej będącej podstawową strukturą danych w programowaniu komputerowym i strukturze macierzy.

Model składa się z mozaiki kwadratów zwanych komórkami lub pikselami, o bokach równoległych do osi układu współrzędnych. Parametrami określającymi położenie rastra w przestrzeni jest rozmiar komórki rastra i współrzędne jednego z jego rogów. Każda komórka rastra zawiera jedną wartość zmiennej. Reprezentuje ona jej wartość dokładnie w środku (w punkcie) komórki rastra, albo średnią na powierzchni danej komórki rastrowej. Zmienne mogą być dowolnego typu (z opisanych wyżej). Każdy raster tworzy oddzielną warstwę (*raster layer*) w warstwowym modelu danych. Zdjęcia cyfrowe, skany lub macierze mają charakter danych rastrowych.

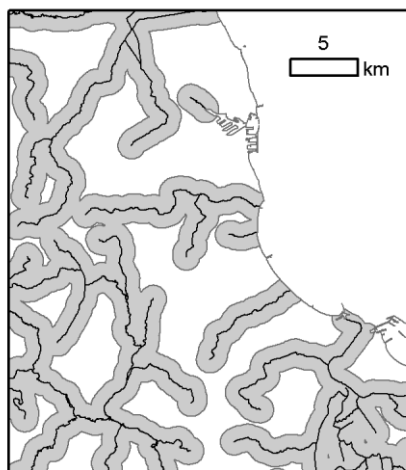
Model wektorowy, przystosowany do reprezentacji danych dyskretnych, bazuje na geometrii analitycznej, a jego podstawowym elementem konstrukcyjnym jest punkt. Analogicznie do modelu mapy papierowej możemy budować trzy typy warstw wektorowych. Ze względu na to, że obiekty geometryczne stanowią tylko graficzną część danych, dołączono do nich identyfikatory łączące dane graficzne ze zmiennymi atrybutowymi znajdującymi się w tablicy relacyjnej bazy danych. Pierwszym typem danych wektorowych jest warstwa punktów (*point layer*). Drugim warstwa polilinii lub linii łamanych (*line layer*), każda opisana zbiorem punktów tworzących łańcuch odcinków. Trzecim warstwa wieloboków lub poligonów (*polygon layer*) mająca analogiczną budowę co polilinia, ale zakończona dodatkowo odcinkiem pomiędzy ostatnim punktem a pierwszym zamykającym polilinię w wielobok.



Rys. 1.2 Reprezentacja rzeczywistości (powierzchni Ziemi) za pomocą modelu wektorowego (z lewej) i rastrowego (z prawej). Model wektorowy jest zbudowany z punktów, linii i wieloboków (można za jego pomocą opisać szczegóły w dowolnej skali). Model rastrowy zbudowany jest z komórek (widocznych na powiększonym fragmencie obrazu), których rozmiar ogranicza skalę możliwych do opisanego szczegółów.

Mapa numeryczna daje całkiem nowe możliwości przetwarzania, wizualizacji, analizy i prezentacji danych przestrzennych w projektach badawczych. Technologia ta znajduje się obecnie w zaawansowanej fazie dynamicznego rozwoju, w której większość podstawowych problemów została już rozwiązana.

Każda warstwa mapy papierowej może być zastąpiona warstwą numeryczną. Z warstw rastrowych można automatycznie wyznaczać izolinie (*contours*), a warstwy wektorowe rysować za pomocą odpowiednich symboli. W rezultacie w pełni zautomatyzowano tworzenie mapy. Każda warstwa mapy może zawierać bardzo wiele elementów. Aby móc nimi sprawnie zarządzać wykorzystano komputerowe bazy danych. Utworzony system pozwala na prostą i ciągłą aktualizację map. Uwzględniając wybrany podzbiór warstw i stosując różne warianty symbolizacji można łatwo tworzyć różnorodne mapy tematyczne. Mapa numeryczna rozwiązała problem wykonywania pomiarów długości, powierzchni i objętości na mapie. Sprowadzenie całej treści mapy do postaci cyfrowej umożliwia przeliczanie współrzędnych z jednego odwzorowania do drugiego i proste kreślenie siatki geograficznej. Powstała wreszcie możliwość wytyczenia całkiem nowych dróg analizy danych przestrzennych. Warstwy ze względu na wspólne położenie w przestrzeni mogą być na siebie nakładane (*overlay*), co daje możliwość tworzenia nowych obiektów dziedziczących atrybuty z kolejnych warstw. Z kolei dowolne obiekty mogą być otaczane buforami (tworzącymi nową warstwę), czyli wielobokami wyznaczającymi obszary leżące nie dalej od obiektu niż zadana wartość graniczna (Rysunek 1.3). Już te dwie operacje będące zautomatyzowaniem procedur manualnych, ze względu na nieporównywalny czas realizacji, dają istotne możliwości analityczne.



Rys. 1.3 Rzeki otoczone buforami o rozmiarze 1 km.

Jednak aby móc korzystać z tych nowych możliwości konieczne było przeniesienie kartograficznej informacji analogowej (z map papierowych) do postaci cyfrowej. Jak ogromnego nakładu pracy wymagało to przedsięwzięcie może świadczyć fakt, że dopiero w 1995 roku Wielka Brytania, jako pierwszy kraj, uporała się z zamianą do postaci cyfrowej 230 tysięcy map wielkoskalowych (w skalach od 1:1250 do 1:10000) pokrywających cały obszar kraju.

Przenoszenie dyskretnych obiektów analogowych do postaci cyfrowej odbywa się za pomocą techniki zwanej digitalizacją. Przez wiele lat do tego celu używane były urządzenia zewnętrzne zwane digityzernami. Składały się one z deski na której rozkładano mapę i urządzenia podobnego do myszy komputerowej wyposażonej dodatkowo w celownik, który można było dokładnie umieścić nad dowolnym punktem mapy. W desce znajdowała się gęsta drucziana siatka, która umożliwiała określenie pozycji celownika na desce i przesłanie jej współrzędnych do komputera. Wszystkie wektorowe elementy mapy: punkty, linie i wieloboki były punkt po punkcie wczytywane do komputera. Wzrost jakości obrazu monitorów komputerowych i pojawienie się skanerów umożliwiło przeniesienie całej procedury na ekran komputera.

Na początku lat 80tych XX wieku gwałtowny rozwój technologii informatycznej zapoczątkował trwały spadek cen systemów komputerowych nadających się do pracy z oprogramowaniem GIS. Powiększyło to znacznie krąg potencjalnych użytkowników, między innymi o naukowców, a w rezultacie liczbę i jakość oferowanych systemów GIS. W okresie tym w ośrodkach naukowych i akademickich często tworzono własne aplikacje realizujące różne zadania związane z analizą danych przestrzennych. Pojawienie się ogólnodostępnej informacji satelitarnej dzięki umieszczeniu na orbicie w 1972 roku satelity LANDSAT 1, dało początek rosnącej z roku na rok ilości informacji pozyskiwanej metodami teledetekcyjnymi [patrz podroz. 3.3.3 i ramka 3.8]. W roku 1986 ukazał się podręcznik akademicki (Burrough 1986) przedstawiający podstawy GIS jako zwartą całość, a w rok później ukazał się pierwszy numer czasopisma naukowego poświęconego GIS – *International Journal of Geographical Information Systems*, noszący obecnie nazwę *International Journal of Geographical Information Science*. W tym samym czasie za sprawą programu MapInfo systemy GIS wkroczyły na poziom komputerów osobistych. Rozwój nauki związanej z tą technologią oraz jej dostępność sprawiły, że zaczęła ona być postrzegana jako narzędzie pracy naukowej w różnych dziedzinach.

Jakkolwiek idea warstwowego modelu powierzchni Ziemi pozostała niezmienną, to wiele początkowych koncepcji uległo znacznym modyfikacjom i rozbudowie. Bazy danych stały się nieodłącznym i istotnym elementem systemów GIS. Wykorzystywanie ogólnie stosowanych relacyjnych baz danych (np. Microsoft Access, Oracl, SQL/Server, dB2)

spowodowało większą elastyczność w operowaniu danymi i możliwość ich wymiany z innymi programami (np. statystycznymi). Pozwala to także na stosowanie standardowego języka zapytań do danych atrybutowych jakim jest SQL (*Structured (Standard) Query Language*). Obecnie istnieją dwie metody organizacji danych przestrzennych. Pierwsza – tradycyjna przechowuje warstwy jako oddzielne zbiory plików, przy czym wektorowe dane atrybutowe są przechowywane w tablicach (np. dBASE). Druga wszystkie dane przechowuje w jednej bazie danych, tego typu bazy noszą nazwę geobaz danych (*geodatabase*). Stosowanie geobaz opartych na powszechnie używanych bazach danych posiada zalety, które uwidaczniają się zwłaszcza w dużych projektach, bądź przy tworzeniu zbiorów danych dla wielu użytkowników.

Modele danych używane w systemach GIS uległy rozbudowie, a samo znaczenie pojęcia modelu danych nabrało szerszego znaczenia. Powstały specjalistyczne modele danych (np. hydrologiczny model danych ArcHydro [patrz ramka 6.3], umiejscowione w relacyjnych bazach danych, które oprócz zestawu warstw zawierają zdefiniowane relacje pomiędzy ich tablicami atrybutowymi. GIS okazał się wyjątkowo przydatny w analizach, których istotnym elementem jest ukształtowanie terenu. Cyfrowy model terenu DEM lub DTM (*digital elevation / terrain model*), w polskiej literaturze występujący czasem jako NMT (numeryczny model terenu), najczęściej jest realizowany jako warstwa rastrowa. Problemy z dokładnym odwzorowaniem nieciągłości w ukształtowaniu terenu, zarówno naturalnych (np. klify) jak i powstałych w rezultacie działalności człowieka (np. wykopy, nasypy) doprowadził do powstania modelu TIN (*triangulated irregular network*) opartego na sieci nieregularnych trójkątów pokrywających cały teren z wartościami wysokości przypisanymi do ich wierzchołków [patrz podroz. 3.2.5]. Pojawiły się modele sieciowe, wykorzystywane np. do analizowania spływu wody w sieci rzecznej oraz modele stosujące dynamiczną segmentację pozwalające na analizowanie różnorodnych i zmieniających położenie w czasie obiektów rozmieszczonych na modelu liniowym [patrz podroz. 3.2.4].

Oddzielnym problemem związanym z bazami jest przechowywanie i zarządzanie olbrzymią ilością danych. Przykładowo globalny DEM o rozmiarze komórki rastra 1 m wymagałby 1 Petabajta (Pb) czyli 1×10^{15} bajtów (milion gigabajtów). W rezultacie opracowano różne metody kompresji danych i indeksowania przestrzennego, dające możliwość szybkiego dostępu do określonego ich podzbioru. Wprowadzono standardowe metody opisu danych — metadane (*metadata*) dostarczające informacji o pochodzeniu, dokładności i sposobie utworzenia danego zbioru danych [patrz ramka 3.12]. Tego typu informacje są niezbędne przy wykorzystaniu danych do pracy naukowej. Obecnie systemy GIS umożliwiają czytanie, tworzenie i edycję metadanych zapisywanych w różnych formatach. Kolejnym problemem

wymagającym rozwiązania przy przejściu do technik cyfrowych był problem tzw. generalizacji. Zarówno w procesie tworzenia mapy, jak i analizie może powstać sytuacja, kiedy warstwa danych zawiera zbyt dużo szczegółów. Szczególnie kłopotliwe może to być przy danych wektorowych. Problem generalizacji może się także wiązać z wymaganą skalą analizowania danego zjawiska. Opracowano szereg metod, które umożliwiają redukcję liczby danych wektorowych z zachowaniem pożądanej informacji [patrz podroz. 4.8 i ramka 4.6]. Potrzeba zwiększenia efektywności przetwarzania i edycji danych wektorowych oraz kontroli poprawności danych graficznych doprowadziła do zastosowania w GIS metod topologicznych. We wprowadzonym w 1981 roku programie ArcInfo, którego następcą jest obecnie ArcGIS, zastosowano topologiczny model danych wektorowych oparty na pojęciu węzła i łuku (*arc-node*). Obecnie rozwiązanie to zostało zastąpione przez stosowanie zasad topologicznych bezpośrednio w procesie edycji i analizy danych. Ze względu na różnorodność rodzajów i formatów danych zawierających informację przestrzenną oraz wielość systemów GIS, niezbędne było także zapewnienie możliwości integracji w procesie analizy różnych rodzajów danych i importu danych o różnych formatach.

Pozyskiwanie danych i wprowadzenie ich do systemu poprzedza wykonywanie analiz. Ze względu na pochodzenie dzielimy dane na pierwotne i wtórne. Dane pierwotne obejmują wszelkie dane pomiarowe, w tym wyniki pomiarów teledetekcyjnych — cyfrowe zdjęcia lotnicze lub satelitarne. Dane wtórne są pozyskiwane przez transformację danych pierwotnych lub przekształcanie danych analogowych do postaci cyfrowej, co obecnie wykonuje się głównie za pomocą skanowania. Przeważająca część pomiarów terenowych oraz wyników modelowania i analiz statystycznych, które są robione w czasie prac badawczych ma charakter punktowy. Aby mogły być analizowane w GIS należy przeprowadzić ich rejestrację czyli powiązanie informacji z lokalizacją w określonym układzie współrzędnych. Rejestracja dotyczy także danych teledetekcyjnych, jednak najczęściej dostarczane produkty do wykorzystania w GIS są już zarejestrowane. W przypadku danych wtórnych, np. zeskanowanych map analogowych lub zdjęć lotniczych, rejestracja musi być przeprowadzona przed ich dalszym wykorzystaniem. GIS jest wyposażony w odpowiednie narzędzia do przeprowadzania zarówno rejestracji danych rastrowych jak i wektorowych [patrz podroz. 3.3.4]. Mierzone dane punktowe (dyskretne) są często przetwarzane do danych ciągłych w formacie rastrowym. Proces estymacji lub prognozowania wartości zmiennej w punktach leżących pomiędzy punktami pomiarowymi nosi nazwę interpolacji. Istnieje wiele metod interpolacji [patrz podroz. 5.6 i 9.5], istotny jest także właściwy dla danego projektu schemat próbkowania, czyli sposób rozmieszczenia w przestrzeni punktów pomiarowych [patrz podroz. 3.3.1 i ramka 3.4].

Efektywna praca w systemie GIS i zapewnienie możliwości wprowadzania danych i prowadzenia wielu analiz danych przestrzennych wymaga, aby program był wyposażony w graficzny interfejs użytkownika (GUI). Są to interfejsy typu WIMP (*windows, icons, menu, pointer*) umożliwiające efektywną wizualizację danych oraz intuicyjne poruszanie się w systemie (przykład ramka 1.1). Istotnym narzędziem eksploracji, analizy, syntezy i prezentacji danych jest wizualizacja danych przestrzennych, zwana geowizualizacją [patrz podrozdział 4.1 i 5.1]. Wykorzystuje się w niej zapytania (*query*) realizowane za pomocą SQL w tablicach danych atrybutowych. W GIS istnieje dodatkowo możliwość definiowania zapytań przestrzennych (*spatial query*), które używają przestrzennych relacji pomiędzy obiektami dwóch różnych warstw. W ten sposób można wyznaczać np. obiekty jednej warstwy, które przecinają, stykają się lub leżą w pobliżu wybranych obiektów innej warstwy.

Metody analizy danych przestrzennych pozwalają na różnorodne wykorzystanie map numerycznych w pracy naukowej, w tym na tworzenie modeli GIS.

Rozwój metod analizy danych przestrzennych miał ogromny wpływ na ewolucję GIS. Najbardziej ogólnie można je podzielić na metody transformacji danych przestrzennych (zarówno wektorowych jak i rastrowych) wywodzące się z rozbudowy analitycznych możliwości GIS i statystykę przestrzenną (geostatystykę, statystykę danych powierzchniowych i punktowych). Powszechnie użyteczne metody statystyki przestrzennej były i są wprowadzane do posiadających szeroki krąg użytkowników programów komercyjnych (np. rozszerzenie geostatystyczne i narzędzia statystyki przestrzennej w ArcGIS). Specjalistyczne techniki badawcze są natomiast dostępne dzięki tworzeniu samoistnych aplikacji (np. programy SAGA [patrz ramka 6.2], Fragstats [patrz ramka 7.1], Garp [patrz podroz. 2.4]), rozszerzeń do już istniejących programów (np. rozszerzenia do ArcGIS takie jak ArcHydro Tools [patrz ramka 6.3] albo Hawth's Analysis Tools [patrz ramki 3.4, 3.10 i 5.3]) lub pakietów funkcji w specyficznym środowisku programowania jakim jest „R” [patrz ramka 8.2] (np. pakiety gstat, spatial) tworzonym w środowisku naukowym.

Istnieją dwa istotne aspekty analizy danych przestrzennych w środowisku GIS. Pierwszy wynika z przestrzennej autokorelacji (*spatial autocorrelation*) danych. Efekt zwiększania się różnicy w „podobieństwie” danych wraz ze wzrostem ich wzajemnej odległości jest kluczem do zrozumienia przestrzennej zmienności danych i wykorzystania jej w interpolacji. Podobnie przydatne mogą być miary wzajemnej zmienności różnych zmiennych (kowariancji). Zrozumienie istotnych skal procesów i dopasowanie do niej właściwego poziomu szczegółów

jest niezbędne do budowy odpowiedniej ich reprezentacji w postaci modelu rzeczywistości. Należy zwrócić uwagę, że istnienie zależności pomiędzy danymi zaprzecza podstawowemu założeniu klasycznych metod statystycznych o niezależności danych. Drugim istotnym aspektem jest pojęcie niepewności (*uncertainty*). Wynika ona z tego, że tworzona reprezentacja rzeczywistości jest niekompletna zarówno pod względem przestrzeni jak i czasu. Istnieją trzy podstawowe źródła pojawiających się błędów. Po pierwsze uproszczenia wprowadzane do koncepcyjnego modelu rzeczywistości. Po drugie błędy pomiarowe i wynikające z interpolacji pomiarów w miejscach niepróbkowanych. Po trzecie błędy powstające w procesie analizy i towarzyszącej jej propagacji istniejących błędów. Podstawą przyjęcia rezultatów analizy jako istotnych musi być przekonanie, że błędy nie mają wpływu na wynikające z analizy konkluzje.

Modelowanie przestrzenne w GIS (tworzenie modeli GIS) [patrz rozdział 8] polega na połączeniu ogólnej wiedzy o zjawiskach przyrodniczych lub społecznych ze szczegółową informacją zapisaną w modelu danych (bazie danych) do symulacji procesów mających odniesienie przestrzenne lub czasowo-przestrzenne. Podstawowym zagadnieniem w procesie modelowania jest znajomość fizyki lub statystyki danego procesu oraz dobór odpowiedniej rozdzielczości (skali) przestrzennej i czasowej danych, jak również zakresu prowadzenia analizy. Wydziela się kilka rodzajów modeli GIS. Najprostszym rodzajem modeli są modele kartograficzne (zwane także algebrą map) polegające na wykorzystaniu sekwencji prostych funkcji i procedur GIS. Najczęściej obecnie stosowanymi modelami GIS są modele statyczne. Ich istotą jest założenie, że analizowany proces nie zmienia się w czasie. Wykorzystują Najczęściej używają one wielu danych wejściowych (w postaci map cyfrowych) i tworzą jedną mapę wyjściową (np. model wydzielenia zlewni, dopływu średniego promieniowania słonecznego czy rozmieszczenia organizmów). Ostatnio coraz częściej wyrażane jest zdanie, że przyszłością GIS są modele dynamiczne symulujące zmiany w czasie.

2. ZASTOSOWANIE GIS W BADANIACH NAUKOWYCH

W roku 1992 Michael Goodchild wprowadził nazwę *Geographic Information Science* dla wszystkich zagadnień naukowych związanych z tworzeniem i wykorzystaniem geograficznych systemów informacyjnych. Naukowe podejście do podstaw GIS jest formułowane przez szereg nowo powstałych specjalności naukowych takich jak: geomatyka (*geomatics*), geoinformatyka (*geoinformatics*) czy geoinformacja (*geoinformation*), które zajmują się podobnymi zagadnieniami, a różnice w nazwie wynikają często głównie z powodów językowych. Dojrzałość i samodzielność tych nowo powstałych dziedzin naukowych potwierdzają znaczące monografie akademickie i liczące się czasopisma naukowe. Obecnie dostępne są zarówno uznane monografie — np. *Geographical Information Systems: Principles, Techniques, Management and Applications*, która ukazała się po raz pierwszy w 1999 roku (Longley i in. 2005), a jej polskie wydanie ukazało się w styczniu 2007 — jak i renomowane czasopisma naukowe, np. *International Journal of Geographical Information Science*, *Cartography and Geographic Information Science* czy *Computers and Geosciences*. Ostatnio zaczęły ukazywać się czasopisma interdyscyplinarne, wiążące zagadnienia geoinformacji z dziedzinami naukowymi, w których GISy są wykorzystywane do rozwiązywania problemów naukowych. Przykładem takiego czasopisma może być ukazujące się od 2005 roku *Ecological Informatics*, wydawane przez Elsevier.

GIS zaoferował badaczom różnych dyscyplin całkiem nowe możliwości dokonywania przestrzennej analizy ilościowej. Dał im narzędzie wspomagające przestrzenny sposób myślenia, co pozwala na testowanie hipotez dotyczących przyczyn i prognoz rozmieszczenia naturalnych, jak również antropogenicznych elementów na powierzchni Ziemi. Pozwolił także na integrację własnych danych ze szczegółowymi danymi pomocniczymi, takimi jak DEM czy zdjęcia satelitarne. Te możliwości zostały dostrzeżone i wykorzystane w takich dziedzinach, jak geologia, geofizyka, oceanografia, nauki rolnicze, biologia, a szczególnie ekologia, biogeografia, ochrona środowiska, geografia, socjologia, antropologia, archeologia czy epidemiologia. Poniżej przedstawiono analizę wykorzystania GIS w próbie ponad 50 artykułów naukowych (pobranych z przeglądarki internetowej za pomocą łączenia słowa GIS ze słowami charakterystycznymi dla różnych dyscyplin naukowych), które ukazały się w różnych czasopismach w latach 2000–2005. Znalezione znaczące zastosowania w następujących dziedzinach: geomorfologii (z geologią i gleboznawstwem), meteorologii i klimatologii, hydrologii i oceanografii, biologii (szczególnie ekologii), ochronie środowiska i geografii (krajobrazu), przy czym powyższy podział należy traktować wyłącznie orientacyjnie i elastycznie. Ze względu na specjalistyczny charakter tych

publikacji oraz rolę języka angielskiego we współczesnej nauce, część terminów w nich użytych pozostawiono w oryginalnej (angielskiej) postaci.

2.1 Geomorfologia

Wykorzystywanie GIS w badaniach geomorfologicznych i gleboznawstwie ma często związek z analizami prowadzonymi na cyfrowym modelu terenu DEM. Przykładami takich badań jest analiza czasowo-przestrzennych zmian wydm (Andrews i in. 2002) lub koryt rzecznych (Reinfields i in. 2004), czy modelowanie procesów erozji rzecznej (Finlayson i Montgomery, 2003). W badaniach związanych z erozją gleb powodowaną przez spływ wód opadowych często wykorzystywany jest model RUSLE (*Revised Universal Soil Loss Equation*). Jest to model statyczny nadający się dobrze do implementacji w GIS [patrz podrozdział 6.4.3]. Tuan i Shibayama (2003) wykorzystali RUSLE do oceny wpływu długookresowych zmian opadów na dopływ osadów do strefy brzegowej dla szeregu wielkich zlewnisk. Ze względu na to, że cyfrowy model powierzchni Ziemi jest kluczowym metodologicznym zagadnieniem współczesnej geomorfologii, wiele prac poświęconych jest zapewnieniu zgodności DEM z istotnymi aspektami rzeczywistości dla zapewnienia udanego rozwiązywania określonych problemów badawczych czy inżynierskich. Przykładowo metoda obliczania zmiennych L i S dla modelu RUSLE w GIS została przedstawiona przez Hickeya (2000).

DEM pozwala na wyznaczanie różnych parametrów opisujących rzeźbę, które następnie mogą być wykorzystane do budowy regresyjnych modeli GIS [patrz podroz. 8.4]. Venteris i Slater (2005) zbudowali model regresyjny (*logistic multiple-least squares regression*) do estymacji stężenia węgla organicznego w glebie, w którym wykorzystano parametry (*aspect, concavity, convexity, cross sectional curvature, CTI — compound topographic index, stream power, slope length factor, longitudinal curvature, mean curvature, plan curvature, profile curvature, RE(r) — relative elevation, slope* [patrz podroz. 6.3, 6.4 i ramka 6.2]) wyznaczone z modelu DEM, otrzymanego z digitalizacji poziomic mapy wielkoskalowej, oraz pomierzone wartości węgla organicznego.

Korzystając z DEM można za pomocą GIS przeprowadzić analizę morfometryczną (rozmiarów, kształtu i przestrzennego rozmieszczenia) różnych form rzeźby. Wykorzystując te możliwości oraz posługując się zdjęciami lotniczymi Federici i Spagnolo (2004) przeprowadzili analizę statystyczną morfometrii ponad 400 alpejskich cyrków lodowcowych stosując szereg parametrów morfometrycznych. Zjawiska powodujące zagrożenia, takie jak lawiny lodowcowe, powodzie spowodowane przez przerwanie naturalnych barier przez jeziora lodowcowe i osuwiska są częstym tematem naukowych prac z zakresu geomorfologii. Huggel i in. (2004) wykorzystali zdjęcia satelitarne Landsata i Ikonosa, model DEM oraz funkcje analityczne

opisujące spływ po terenie [patrz podroz. 6.5] dla wykonania za pomocą GIS mapy zagrożenia powyższymi zjawiskami w dolinach górskich Alp Szwajcarskich. Przy modelowaniu osuwisk i analizie stabilności stoków, ze względu na ogromną pracochłonność stosowanych dotychczas metod, próbuje się wykorzystać modelowanie GIS zarówno na lądzie (Huabin i in. 2005), jak i dnie morskim (Gazioglu i in. 2005).

GIS jest powszechnie wykorzystywany do tworzenia map gleb przy pomocy różnych metod klasyfikacji. Scull i in. (2005) wykorzystali (*classification tree model*) do tworzenia map gleb na podstawie istniejących map w obszarach sąsiednich i cyfrowych map szeregu parametrów opisujących środowisko. Oddzielnym zagadnieniem są prace nad nowymi bazami danych zintegrowanymi z GIS. Przykładem takiego przedsięwzięcia jest cyfrowa mapa ostatniego zlodowacenia Wielkiej Brytanii zintegrowana z GIS (Clark i in. 2004). Została ona wykonana jako kompilacja ponad sześciuset materiałów źródłowych (artykuły naukowe, mapy, prace doktorskie i inne) wybranych z dostępnych ponad dwóch tysięcy prac pochodzących z okresu ostatnich 150 lat, do dwudziestu wektorowych warstw tematycznych takich form geomorfologicznych jak: moreny, ozy, drumliny, *meltwater channels*, *tunnel valleys*, *trimlines*, *limit of key glacial deposits*, *glaciolacustrine deposits*, *ice-dammed lakes*, *erratic dispersal patterns*, *shelf-edge fans*, *limit of the main ice cap*. Dane atrybutowe każdego obiektu zawierają między innymi informacje o źródle pochodzenia, oryginalnej skali kartowania i uwagi co do jego wiarygodności. Poprawność położenia obiektów była weryfikowana za pomocą DEM (o rozdzielczości 50 m). Utworzony i udostępniony środowisku naukowemu system może służyć zdaniem autorów do rekonstrukcji rozmieszczenia pokrywy lodowej na podstawie łącznej analizy z DEM, mapami geologicznymi i zdjęciami satelitarnymi oraz do walidacji modelowania numerycznego procesów związanych ze zlodowaceniami.

2.2 Meteorologia i klimatologia

Podobnie jak w geomorfologii i gleboznawstwie, tak i w meteorologii i klimatologii DEM zajmuje istotne miejsce w różnych projektach badawczych. Generalnie zastosowania GIS w naukach o atmosferze można podzielić na trzy grupy: (1) przetwarzanie danych, a zwłaszcza zamiana danych punktowych na ciągłe; (2) modelowanie procesów meteorologicznych lub klimatycznych; (3) wykorzystanie różnych danych meteorologicznych lub klimatycznych do modelowania procesów biologicznych oraz związanych z zanieczyszczeniem środowiska. Ta ostatnia grupa prac, szczególnie liczna, zawiera szereg pozycji związanych z modelowaniem różnych konsekwencji zmian klimatycznych (np. Dockerty i Lovett 2003). W opisie przykładów zastosowań wykorzystano informacje zawarte w przeglądowym artykule *The use of geographical information systems in climatology and meteorology* (Chapman, Thornes 2003).

Dane meteorologiczne jak i klimatyczne mogą mieć postać danych punktowych (większość obserwacji pochodzących ze stacji meteorologicznych), danych rastrowych (np. z radarów meteorologicznych, czy produktów otrzymywanych ze zdjęć satelitarnych) lub liniowych (izolinie digitalizowane z map). Przetwarzanie danych punktowych do danych ciągłych odbywa się na dwóch poziomach generalizacji. Poziom pierwszy o dużym stopniu uogólnienia (*baseline climatology*) dotyczy tworzenia wielkoskalowych ciągłych map wybranych parametrów meteorologicznych lub klimatycznych na podstawie małej liczby punktowych obserwacji. Zwykle wykorzystuje się do tego celu DEM oraz inne zmienne przestrzenne, jak odległość od morza lub szerokość geograficzna, i na ich podstawie budowany jest model regresji wielorakiej (*multiple regression model*) (Agnew i Palutikof 2000, Ninyerola i in. 2000). Poziom drugi odpowiada tworzeniu map bardziej szczegółowych, najczęściej na podstawie większej liczby punktów pomiarowych niż na poziomie pierwszym. W tym przypadku stosuje się metody interpolacji deterministycznej [patrz podroz. 5.6] lub geostatystycznej [patrz roz. 9], a także regresję wieloraką. Fleming i in. (2000) stosowali do interpolacji deterministyczną technikę splinów *thin plate smoothing splines*, natomiast Antonic i in. (2001) oraz Rigol (2001) metodę sieci neuronowych (*neural network*). GIS jest także wykorzystywany do modelowania możliwości pozyskiwania energii wiatrowej i słonecznej (Broesamle i in. 2000), czy badania kinematyki burz (Tsanis i Gad 2001). Wykorzystując DEM lokalnego obszaru Halley i in. (2003) przeprowadzili modelowanie w GIS powstawania przygruntowych przymrozków za pomocą regresji wielorakiej, w której rolę zmiennych pełniły: wysokość terenu, czas lokalnego zachodu (czas końca bezpośredniego promieniowania słonecznego w danym miejscu) i dochodzące promieniowanie słoneczne. Integracja modelu promieniowania z GIS [patrz podroz. 6.4.4] daje możliwość uwzględnienia ukształtowania terenu (zacienienia topograficznego) oraz lokalnych warunków atmosferycznych przy estymacji dopływu energii słonecznej do powierzchni Ziemi (Suri i Hofierka, 2004). Cole i in. (2004) stworzyli model GIS dopływu soli w postaci aerozolu na obszarze Australii, natomiast Kampanis i Flouri (2003) wykorzystali GIS jako interfejs numerycznego modelu propagacji dźwięku w skomplikowanych warunkach terenowych.

2.3 Hydrologia

GIS jest powszechnie stosowany w hydrologii. Istotnymi obszarami jego zastosowań jest modelowanie spływu wody po terenie, analiza punktowych i nie-punktowych źródeł zanieczyszczeń w zlewniach, określanie sumarycznego dopływu związków azotu, fosforu i bakterii do jezior lub wód przybrzeżnych, analiza procesów eutrofizacji i modelowanie zjawisk powodziowych. We wszystkich powyższych zagadnieniach istotny jest element przestrzenny

(np. rozmieszczenie gleb czy pokrycia terenu) oraz ukształtowanie powierzchni Ziemi opisywane przez DEM. Rola DEM (jako jedyne go cyfrowego obrazu powierzchni Ziemi) jest kluczowa w zagadnieniach hydrologicznych, a jego analiza jest obecnie jedyną uznawaną metodą wydzielenia zlewni [patrz podroz. 6.5], które następnie są często wykorzystywane jako jednorodne obszary w modelowaniu różnych procesów uwzględniających ukształtowanie terenu. GIS posiada także odpowiednie modele danych do analiz sieci rzecznych [patrz podroz. 3.2.4].

Modele opisujące odpływ wody ze zlewni mogą być w bardzo różnym stopniu powiązane z GIS. Istnieją trzy poziomy tego powiązania (Pullar i Springer 2000). Najniższe — luźne powiązanie (*loose coupling*) polega wyłącznie na wymianie informacji pomiędzy modelem a GIS za pomocą plików. Na tym poziomie GIS może być jedynie narzędziem wizualizacji i analizy wyników generowanych przez model. Poziom drugi, określany jako ścisłe powiązanie (*tight coupling*), wykorzystuje GIS jako interfejs modelu, a na poziomie trzecim pełnej integracji (*full integrated*) model jest składową aplikacją GIS. W modelach tych zlewnia może występować jako jednorodna całość, której przypisuje się wartości uśrednione (*lumped model*), albo być pokryta przez regularną siatkę z wartościami w każdej komórce siatki (*distributed model*). Modele mogą być także przeznaczone dla różnych skal czasowych. Istnieją modele opisujące pojedyncze opady i spływ wody, będący ich konsekwencją (*single event models*). Ich przykładem jest model AGNPS (*Agricultural Non-Point Source*). Model ten wymaga 22 parametry dla każdej komórki siatki pokrywającej obszar zlewni. Został on zintegrowany z GIS na poziomie interfejsu (Pullar i Springer 2000). Popularnym modelem pracującym dla odmiany w czasie ciągłym jest SWAT (*Soil Water Assessment Tool*). Jego luźnej i ścisłej integracji z GIS dokonał Luzio i in. (2004). Pełna integracja modelu hydrologicznego z GIS stwarza zupełnie nową jakość analityczną zarówno pod względem możliwości walidacji i kalibracji modelu, jak i jego potencjalnego wykorzystania. Knight i in. (2001) wbudował w środowisko GIS prosty model (*distributed-parameter runoff simulation model*) generujący miesięczne charakterystyki spływu i parametry pokrywy śnieżnej, który może być wykorzystywany przy ograniczonym dostępie do danych. Zhan i Huang (2004) wbudowali w GIS model oparty o CN (*SCS Curve-Number method*). Model wykorzystuje mapę gleb i użytkowania terenu, nadaje się do określania CN i obliczania spływu oraz infiltracji dla danego opadu. Pełna integracja modelu TOPMODEL (*TOPography-based hydrological MODEL*) w GIS została natomiast przeprowadzona przez Huang i Jiang (2002). Jest to fizyczny model zlewni, który symuluje przepływ w rzekach na podstawie DEM oraz danych o opadzie i ewapotranspiracji.

Problem określania dopływu związków azotu, fosforu i bakterii jest często rozwiązywany za pomocą modeli GIS opartych o bilans masy (*mass balance GIS model*). Pieterse i in. (2003)

modelowali w GIS dopływ azotu i fosforu ze źródeł punktowych i rozproszonych. Za pomocą analizy regresji wyznaczyli oni związek pomiędzy dopływem substancji ze źródeł rozproszonych i ich wytwarzaniem (dla zlewni bez źródeł punktowych), a następnie wykorzystali go w modelu. Także model regresji (dla różnych typów pokrycia terenu zgodnego z klasyfikacją CORINE [patrz podroz. 3.3.3 i ramka 3.6]) był wykorzystany w GIS do oceny wielkości dopływu związków fosforu do przybrzeżnych wód Irlandii (Smith i in. 2005). GIS jest także wykorzystywany do oceny eutrofizacji jezior i wód przybrzeżnych. Xu i in. (2001) przeprowadzili w GIS klasyfikację jezior na podstawie sześciu fizycznych, chemicznych i biologicznych indykatorów. GIS był także wykorzystany jako interfejs w modelu eutrofizacyjnym wód estuariowych (Hartnett i Nash 2004).

Kolejnym zagadnieniem hydrologicznym, gdzie pojawiają się rozwiązania wykorzystujące GIS, jest tworzenie modeli powodzi. Liu i in. (2003) zaproponowali osadzony w GIS fizyczny model *diffusive transport approach* zrealizowany w modelu rastrowym do określania spływu i przemieszczania się fali powodziowej w zlewni. Dość różnorodne jest wykorzystanie GIS w badaniach wód gruntowych. Jaiswal i in. (2003) zaproponowali wykorzystanie GIS w planowaniu ich eksploatacji. Wyznaczanie potencjalnych zasobów wód gruntowych zostało przeprowadzone w GIS przy pomocy siedmiu map hydrogeologicznych przez Shahid i in. (2000). Rejonizacja stref zasilania za pomocą modelowania hydrologicznego wykonana została przez Saraf i in. (2004), a Miller (2005) przeprowadził wyznaczanie stref ochronnych ujęć wody. Istnieje jeszcze szereg innych zagadnień hydrologicznych, w których techniki GIS znalazły zastosowanie, np. Foote i Horn (2002) wykorzystali GIS do analizy położenia powierzchni wody, rejestrowanej na wideo w strefie przyboju, a Tappeiner (2001) do badania czasu trwania pokrywy śnieżnej.

2.4 Ekologia

Zastosowanie GIS w biologii, a ściślej ekologii, zaznaczyło się szczególnie wyraźnie w kilku obszarach tematycznych. GIS w sposób oczywisty był podstawowym narzędziem pracy w projektach, których celem było tworzenie map wegetacji lub śledzenie zmian pokrycia roślinnością w czasie na podstawie zdjęć lotniczych, satelitarnych lub archiwalnych map. Przykładami takich prac mogą być: analiza zmian makrowegetacji okolic Balatonu w czasie ostatnich 200 lat (Dömötörfy i in. 2003), przeprowadzona na podstawie starych map, albo analiza zmian w roślinności wodnej rekultywowanego jeziora, wykonana przez Valta-Hulkkonena i in. (2004) na podstawie archiwalnych zdjęć lotniczych.

Tworzenie map przez ekologów obejmuje także mapy indeksów opisujących środowisko przyrodnicze. Brossard i in. (2002) wykorzystali rozmieszczenie roślinności na Spitzbergenie do

stworzenia mapy indeksu opisującego warunki termiczne w czasie lata. Ich zdaniem tego typu indeksy mogą być dobrym wskaźnikiem globalnych zmian klimatycznych. GIS znajduje także szerokie zastosowanie przy tworzeniu dużych baz danych przyrodniczych. Przykładem może być baza danych EcoPlant stworzona we Francji (Gegout i in. 2005).

Kolejnym istotnym obszarem wykorzystania GIS w zagadnieniach biologicznych jest ekologia krajobrazu (*landscape ecology*). U jej podstaw leży założenie, że przestrzenne rozmieszczenie elementów środowiska (*environmental patterns*) ma istotny wpływ na procesy ekologiczne (Turner 1989). Opracowano wiele indeksów opisujących różne aspekty rozmieszczenia w przestrzeni, a GIS stał się istotnym narzędziem w pracach dotyczących tych zagadnień (McGargial i Marks 1995) [patrz rozdział 7].

Wydaje się jednak, że największą rolę odgrywa obecnie GIS w modelowaniu ekologicznym. Istnieją różne podziały i klasyfikacje modeli ekologicznych. Często dzieli się je na: (1) analityczne, w których dokonuje się szczegółowej prognozy w warunkach uproszczonej rzeczywistości za pomocą układu równań; (2) fizjologiczne lub *process model*, w których najważniejsza jest istota procesu, a nie symulacja rozkładu przestrzennego oraz (3) empiryczne lub statystyczne, w których najistotniejszy jest wynik symulacji, a nie dokładny opis procesu (Guisan i Zimmermann 2000). W tej trzeciej grupie mieści się modelowanie przestrzennego występowania organizmów, gatunków, zespołów gatunków oraz habitatów (*predictive distribution models*). Modelowanie to jest wykorzystywane do szczegółowej inwentaryzacji i analizy zasobów biologicznych oraz analizy relacji organizmy środowisko. Znajduje też zastosowanie w ochronie środowiska do identyfikacji i określania priorytetów w zakresie działań ochronnych, monitoringu lub badań zachodzących w nim procesów. Jest przydatne w ilościowych analizach oddziaływania na środowisko i ocenach wpływu zmian klimatycznych lub środowiskowych (antropopresja) na występowanie organizmów. Przykładem takich zastosowań może być tworzenie prognostycznych map przydatności habitatów (*habitat suitability*) dla danego gatunku przy realizacji określonych scenariuszy zarządzania terenem. Gurnell i in. 2002 stworzyli taką mapę dla habitatu wiewiórki na obszarze 2800 ha we wschodniej Anglii przy założeniu, że do roku 2015 rok zostaną utrzymane aktualne metody gospodarki leśnej. Modelowanie przestrzennego występowania bazuje na opisie ilościowym relacji gatunek-środowisko. Modele te wykorzystują różne metody formułowania hipotez o tym, w jakim stopniu warunki środowiskowe wpływają na rozmieszczenie gatunków lub ich zespołów. Założenie stałego charakteru tych relacji umożliwia modelowanie rezultatów zmian zachodzących w środowisku.

Istnieją trzy rodzaje danych, czynników lub gradientów, opisujących środowisko (w pierwszych pracach powstała nazwa „*gradient modelling*” ze względu na założenie, że rozkład gatunków jest związany z gradientami zmiennych środowiskowych). Pierwszym rodzajem danych są zasoby (*resources*) obejmujące substancje odżywcze, wodę, światło i pożywienie. Drugą grupę stanowią czynniki bezpośrednie, które mają istotny wpływ na fizjologię organizmów, np. temperatura. Ostatnią grupę stanowią zmienne lub czynniki pośrednie. Obejmują one najczęściej takie dane, jak położenie topograficzne, nachylenie terenu, geologię czy osady. Dane te, mające charakter przestrzenny, służą jako predykatory (zmienne na podstawie których prognozuje się występowanie organizmów). Muszą one zostać zebrane i przetransformowane do odpowiedniej postaci, aby utworzyć warstwowy model analizowanego obszaru (najczęściej w postaci rastra). Ten etap modelowania odbywa się w systemie GIS. Idea modelowania zakłada, że dla części obszaru mamy informacje o występowaniu analizowanych gatunków lub habitatów. W tych miejscach, podobszarach, przeprowadzamy próbkowanie zmiennych z warstw (predyktorów). Istota problemu polega na znalezieniu relacji pomiędzy parametrem opisującym występowanie gatunków lub habitatu a predyktorami. Kiedy relacja zostanie określona mapy predyktorów mogą za jej pomocą zostać przeliczone do kompletnej mapy występowania gatunków lub habitatów.

Istnieje szereg metod wyznaczania tej relacji. W większości oparte są one o analizę regresji. Jest to metoda statystyczna określająca relacje między zmienną wynikową, a środowiskowymi predyktorami (lub predyktorem) w postaci wyrażenia matematycznego. Często z powodu wzajemnej korelacji (problem kolinearności) pomiędzy zmiennymi środowiskowymi, jako predyktorów używa się nieskorelowanych zmiennych będących rezultatem poddania ich analizie czynnikowej. Klasyczna metoda regresji liniowej jest teoretycznie ważna tylko wtedy, kiedy zmienna wynikowa ma rozkład normalny i stałą wariancję dla każdego przedziału obserwacji. Powoduje to, że jej zastosowanie jest mocno ograniczone, niemniej czasem stosuje się ją przy spełnieniu powyższych warunków (Lechman 2004).

Podstawową techniką stosowaną obecnie jest GLM (*Generalised Linear Model*), który stanowi rodzinę modeli regresji i jest pozbawiona ograniczeń metody poprzedniej. W ostatnich latach była ona powszechnie wykorzystywana w modelowaniu ekologicznym, ukierunkowanym na rozwiązanie różnego rodzaju problemów badawczych. Laidre i in. 2004 stworzyli model habitatu narwali w rejonie Grenlandii. Efekt okrajka w starym i młodym lesie, jak również jego wpływ na rozmieszczenie grzybów nadrzewnych były badane przez przez Siitonen i in. 2004. Projekt określenia amplitudy siedliskowej oraz stworzeniu mapy habitatów rzadkiego gatunku

ptaka w celu utrzymania korytarzy ekologicznych został wykonany w Australii przez Gibsona i in. (2004). Alternatywną techniką do GLM jest GAM (*Generalised Additive Model*) wykorzystany między innymi przez Lehmana (1998).

Inną grupą metod wyznaczania relacji pomiędzy danymi o występowaniu gatunku (czy habitatu) a danymi środowiskowymi są metody klasyfikacji. Popularną metodą klasyfikacji bazującą na powiązaniu ze sobą szeregu zasad lub rezultatów obserwacji jest *classification tree model*. Przykładem jej zastosowania jest identyfikacja habitatu niedźwiedzia brunatnego przeprowadzona przez Koblera i Adamica (2000) oraz wyznaczenie rozmieszczenia sześciu gatunków sosny w Katalonii wykonane przez Mathieu i in. (2001). Stosowana jest także metoda największego prawdopodobieństwa (*maximum likelihood classification*) — Danks i Klein (2002) zastosowali ją do modelowania potencjalnego habitatu woła pizmowego w północnej Alasce, oraz metoda MCE (*Multi-Criteria Evaluation*) wykorzystana do modelowania optimum siedliskowego (*habitat suitability modeling*) przez Store i Jokimäki (2003).

Kolejna grupa metod wykorzystuje techniki ordynacyjne (*ordination techniques*). Najczęściej używaną techniką z tej grupy jest CCA (*Canonical Correspondence Analysis*) zastosowana między innymi przez Dirnböck i in. (2003) do tworzenia map zespołów roślinnych w Alpach. Metoda PCA (*Principal Component Analysis*) wraz z klasteryzacją została zastosowana do tworzenia wielkoobszarowych map wegetacji na podstawie zdjęć satelitarnych przez Nonomura i in. (2003).

„*Environmental envelopes*” są grupą metod, które były wielokrotnie stosowane w przeszłości. Ich podstawową ideą jest tworzenie w wielowymiarowej przestrzeni środowiskowej (klimatycznej) obszaru (*envelope*) optymalnego dla organizmów. Obecnie często stosowany jest algorytm GARP (*Genetic Algorithm for Rule-set Production*), zaimplementowany w programie o tej samej nazwie, który tworzy model ekologicznej niszy dla organizmów przez opisanie warunków środowiskowych, w których populacja danego gatunku jest zdolna do trwania i rozwoju. Jako dane wejściowe GARP używa zbioru punktów, w których organizm występuje, i zbioru rastrowych warstw GIS zawierających ciągłą informację o parametrach środowiska, które mogą ograniczać lub zwiększać możliwości jego przeżycia. Algorytm iteracyjnie poszukuje nielosowych korelacji pomiędzy obecnością i brakiem obecności organizmu oraz parametrami opisującymi środowisko wykorzystując szereg metod budowania modelu prognostycznego, np. *atomic*, *logistic regression* (GLM), *bioclimatic envelope* i *negated bioclimatic envelope* (Stockwell i Peters 1999). Algorytm ten był wykorzystany między innymi przez Stockmana i in. (2006) oraz Andersona i in. (2002).

Oprócz przedstawionych powyżej grup metod stosowane są metody oparte o teorię prawdopodobieństwa Bayesa, które łączą prawdopodobieństwo „*a priori*” występowania określonych organizmów z ich prawdopodobieństwem warunkowym względem danego predykatora środowiska (Wyatt 2003).

Metodą wzbudzającą z jednej strony duże zainteresowanie, z drugiej zaś obiekcje, których wyrazem może być uważanie jej przez niektórych badaczy za rodzaj czarnej magii, są sieci neuronowe (*neural network*). Przykładem jej zastosowania mogą być prace Joy i Death'a (2001) oraz Oldena i in. (2006), obie poświęcone tworzeniu map i badaniu rozmieszczenia ryb w rzekach.

2.5 Ochrona środowiska

Zastosowanie GIS w ochronie środowiska dotyczy głównie zagadnień mających odniesienie przestrzenne bądź tradycyjnie związanych z tworzeniem map. Jest to powszechnie stosowane narzędzie w pracach zajmujących się oceną ekspozycji (*exposure assessment*) na zanieczyszczenia. Ekspozycja, rozumiana jako kontakt ze szkodliwymi substancjami najczęściej dotyczy zanieczyszczeń w powietrzu, ale pojęcia tego używa się także przy analizie oddziaływania niebezpiecznych substancji w glebie oraz wodzie. Do analizy ekspozycji na zanieczyszczenia atmosferyczne wykorzystuje się najczęściej w pracach naukowych dwa modele: (1) stochastyczny model regresji i (2) *Gaussian multisource dispersion model*, który ma charakter fizyczny. Cyrus i in. (2005) w swojej pracy poświęconej ocenie ekspozycji na NO₂ i cząsteczki zawieszone w powietrzu (PM_{2,5}) porównali działanie obu modeli. Przy tworzeniu map ekspozycji na szkodliwe substancje mogą być wykonywane mapy lokalizacji zachorowań na powodowane przez nie choroby. Wspólna analiza tych danych w GIS pozwala wykrywać ewentualne powiązania przyczynowo-skutkowe (Jarup 2004). Taylor i in. (2005) badali przyczyny deformacji kończyn u płazów stawiając hipotezę, że przyczyną jest zanieczyszczenie środowiska. Wykorzystywali oni GIS do otrzymania informacji o pokryciu terenu w 200 m buforach naokoło miejsc pobierania prób. Chow i in. (2005), aby ocenić wpływ zanieczyszczeń na populację szopa pracza, przeprowadzili połączenie modelu występowania (GLM) z modelem ekspozycji na zanieczyszczenia bazującym na metodzie Monte Carlo [patrz podroz. 8.3]. Do tworzenia map przestrzennego rozmieszczenia zanieczyszczeń mogą być także stosowane metody geostatystycznej interpolacji [patrz rozdział 9] (Inserra i in. 2002).

Kolejną grupą zastosowań GIS w ochronie środowiska jest analiza i ocena różnego rodzaju zagrożeń. Speer i Jensen (2003) analizowali zagrożenie pojawienia się określonego gatunku szkodnika drzew iglastych. Wykorzystali oni GIS do wyboru obszarów, spełniających określone

warunki, które są potencjalnie najbardziej narażone na pojawienie się tego typu szkodników. Analizę ryzyka powstania pożaru lasów w Grecji przeprowadzili Bonazountas i in. (2005).

Problematyka ekologiczna jest ściśle związana z zagadnieniami ochrony środowiska. Dotyczy to zarówno problemów związanych z zarządzaniem lub wytyczaniem obszarów chronionych, jak i reintrodukcją określonych gatunków. Crist i in. (2005) przeprowadzili ocenę obszarów niepodlegających ochronie, charakteryzujących się małą gęstością dróg, dla wyznaczenia rezerwy obszarów chronionych. Wykorzystując mapy pokrycia terenu i wybrane parametry opisujące krajobraz [patrz rozdział 7] określili oni wielkości tych parametrów dla obszarów aktualnie chronionych, a następnie wybrali z rejonów niechronionych obszary o podobnych charakterystykach. Opis siedmiu etapów przeprowadzenia reintrodukcji owcy kanadyjskiej (*Ovis canadensis*) w parkach narodowych zachodnich stanów (Stany Zjednoczone) został opisany w pracy Singera i in. (2000). Jednym z etapów jest tworzenie modelu habitatu danego gatunku i wyznaczenie optymalnych obszarów do przeprowadzenia operacji.

Monitoring środowiska jest niezbędny do jego ochrony. Wykorzystanie GIS w programie monitoringu i oceny stanu estuariów północno-zachodniego wybrzeża Stanów Zjednoczonych zostało przedstawione w pracy Paul i in. (2003). Poruszono takie zagadnienia jak wybór punktów pomiarowych, wizualizację danych i ich ilościową analizę oraz upublicznianie rezultatów monitoringu.

2.6 Geografia krajobrazu

Wykorzystanie GIS w geografii krajobrazu jest dość powszechne. Pomijając problemy związane z teoretycznymi rozważaniami nad definicją tej nowej specjalności można przyjąć, że GIS znajduje zastosowanie w trzech grupach zagadnień związanych z krajobrazem: (1) w rekonstrukcji krajobrazu historycznego, (2) w modelowaniu zmian zachodzących w krajobrazie i prognozowaniu jego przyszłego wyglądu oraz (3) w tworzeniu i analizowaniu różnego rodzaju parametrów (*landscape matrices*) [patrz rozdział 7], opisujących przestrzenne aspekty krajobrazu dla potrzeb ekologicznych (*landscape ecology*).

Rekonstrukcją wyglądu krajobrazu w przeszłości zajmowało się szereg autorów. McLure i Griffiths (2002) przeprowadzili rekonstrukcję krajobrazu w średniowiecznej Anglii wykorzystując stare mapy i współczesne zdjęcia lotnicze. Dokonali oni modyfikacji zdjęć korzystając ze starych map i następnie nałożyli je na DEM utworzony z map z 1856 roku, uzyskując perspektywiczny widok krajobrazu w średniowieczu. Simson i Johnson (2005) analizowali wpływ warunków naturalnych na decyzje podejmowane przez osadników w wybranym rejonie Kanady. Whitley i Hicks (2003) wyznaczali potencjalne szlaki prehistorycznych i historycznych podróży we wschodniej części Stanów Zjednoczonych na

podstawie DEM. Modelowanie zmian zachodzących w krajobrazie (*Land Use and Land Cover Change*) jest centralnym tematem w analizach globalnych zmian środowiska naturalnego (Verburg i Veldkamp 2005). Istotnym wyzwaniem w tych modelach jest integracja nauk przyrodniczych, społecznych i ekonomicznych w ramach przestrzeni geograficznej i czasowej. Przykładem wykorzystania takiego modelu jest praca Verburga i in. (2006) prognozująca wpływ zmian w użytkowaniu ziemi na przyszły stan obszarów chronionych na Filipinach.

W ostatnich latach geografia dzięki rozwojowi metod ilościowych (*quantitative geography*) i analizy przestrzennej (*computational spatial analysis*) odzyskała znaczenie, czego dowodem może być jej powrót po 50 latach na Harvard. Obszarem, gdzie nowe ilościowe metody analizy przestrzennej znalazły szczególnie duże zastosowanie jest geografia społeczna i ekonomiczna (Wang 2006), jednak te dziedziny wykraczają poza zakres tej książki.

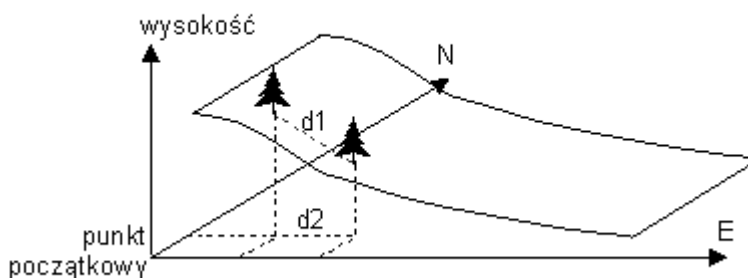
3. DANE PRZESTRZENNE

3.1 POŁOŻENIE NA POWIERZCHNI ZIEMI

Powstanie Geograficznych Systemów Informacyjnych było logicznym następstwem przestrzennego charakteru geoinformacji. Lokalizacja wszelkich danych opisujących powierzchnię Ziemi jest w większości przypadków istotnym elementem ich analizy. Niezbędne staje się zatem zdefiniowanie na początku sposobu określania położenia na powierzchni Ziemi. Istnieją dwa podstawowe układy, które mogą być wykorzystane do tworzenia systemów odniesienia przestrzennego: prostokątny i sferyczny.

3.1.1 Ziemia jako płaszczyzna

Dla obszarów małych, o powierzchniach (nieprzekraczających kilkunastu km²) może być wykorzystany trójwymiarowy układ współrzędnych prostokątnych. Osie poziome będą w nim zgodne z kierunkiem północnym i wschodnim (*northing, easting*), a wyznaczona przez nie płaszczyzna będzie umiejscowiona na wysokości średniego poziomu morza. Położenie obiektów na powierzchni Ziemi będzie określone na podstawie ich prostokątnych rzutów na tę płaszczyznę. W konsekwencji, niezależnie od rodzaju układu, kształty i powierzchnie obiektów znajdujących się na mocno nachylonych stokach będą wyraźnie zniekształcone (Rysunek 3.1).



Rys. 3.1. Układ współrzędnych prostokątnych 3D dla powierzchni Ziemi. Obrazem odcinka d1 w rzucie prostokątnym jest odcinek d2. Z powodu nachylenia terenu długość odcinka nie została zachowana.

3.1.2 Ziemia jako kula

Większość zastosowań wymaga jednak uwzględnienia krzywizny Ziemi. Kształt Ziemi w ciągu ostatnich 2,5 tysiąca lat był kolejno opisywany jako kula (sfera), elipsoida (sferoida) i geoida. Doskonałość kuli jako bryły oraz kulisty kształt Słońca i Księżyca już 2,5 tys. lat temu nasunęły hipotezę (Pitagoras 580–500 p.n.e.), że także Ziemia ma taki kształt. Szereg obserwacji takich jak: ruch gwiazd, inny wygląd nieba w różnych miejscach, zakrzywiony cień Ziemi na powierzchni Księżyca podczas jego zaćmień oraz fakt, że w jakąkolwiek stronę oddala się statek, to najpierw znika jego kadłub, a dopiero potem maszty, spowodowały, że pogląd ten został

w starożytności powszechnie zaakceptowany. Ostatecznie Eratostenes (276–196 p.n.e.) za pomocą spektakularnego i powszechnie znanego eksperymentu wyznaczył promień kuli ziemskiej z dokładnością 2%.

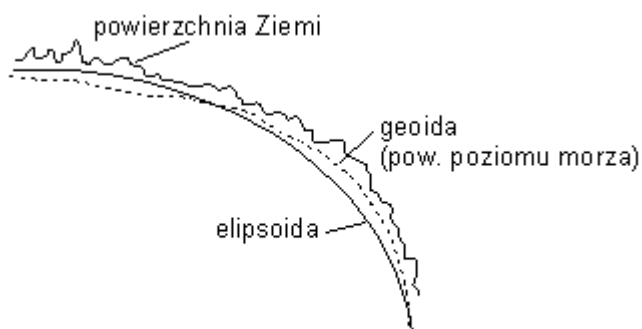
Kolejne odkrycia stały się możliwe dopiero na przełomie XVI i XVII wieku w rezultacie wynaleźnienia narzędzi takich jak teleskop (Galileusz i Kepler), teodolit (Digges z Londynu) czy zegar wahadłowy (Hugens) oraz rozwoju trygonometrii sferycznej i triangulacji. Triangulacja jest metodą wyznaczania współrzędnych na powierzchni Ziemi za pomocą układu trójkątów tworzących sieć. W metodzie tej dokonuje się pomiaru wszystkich kątów i długości wybranego boku (bazy). Pierwszej próby pomiaru rozmiarów Ziemi z wykorzystaniem triangulacji dokonał Holender Snellius (1580–1626) za pomocą sieci 33 trójkątów o łącznej długości 128 kilometrów i pomiarów astronomicznych położenia punktów końcowych. Osiągnięty rezultat był obciążony błędem 3,4%, czyli był gorszy od wyniku Eratostenesa. Wynalezienie tablic logarytmicznych i dopracowanie metody triangulacji pozwoliło Francuzowi Jean Picardowi w 1670 roku wyznaczyć promień Ziemi z dokładnością 0,01%. Na tym odkryciu można zakończyć historię pojmowania powierzchni Ziemi jako sfery, czyli powierzchni kuli.

3.1.3 Ziemia jako elipsoida

Nowe obserwacje, jak również rozwój astronomii i fizyki w XVI oraz XVII wieku doprowadziły do nowego modelu Ziemi jakim jest elipsoida, zwana również sferoidą ze względu na bardzo niewielkie spłaszczenie. W połowie XVII wieku dokonano szeregu znaczących obserwacji astronomicznych. Cassini zaobserwował, że Jowisz jest spłaszczony na biegunach, a Richter prowadząc pomiary za pomocą wahadła stwierdził wzrost siły grawitacji od równika w stronę biegunów. Newton i Huygens wykorzystując nowo odkryte prawa ruchu i grawitacji opracowali teoretyczny model Ziemi spłaszczonej na biegunach. Założyli oni, że na obracającej się Ziemi siła odśrodkowa jest najsilniejsza na równiku i równa zero na biegunach. Wyznaczone przez nich spłaszczenie dla jednorodnej, płynnej Ziemi wyniosło $1/230$. Te założenia zostały ostatecznie potwierdzone w XVIII wieku przez pomiary dwóch odcinków południka podczas ekspedycji do Peru i Laponii, co pozwoliło na wyznaczenie wszystkich parametrów elipsoidy ziemskiej. Parametry opisujące elipsoidę zostały przedstawione na Rysunku 3.3b. Zwykle jej kształt jest opisywany przez małą i wielką półoś, albo wielką półoś i spłaszczenie, względnie jego odwrotność.

W XIX wieku okazało się, na podstawie rezultatów badań prowadzonych przy pomocy coraz dokładniejszych metod badawczych, że Ziemia — choć jej kształt jest zbliżony do elipsoidy — jest bryłą nieregularną. Wynika to z nierównomiernego rozmieszczenia różnych rodzajów skał we wnętrzu Ziemi. Nierównomierna budowa powoduje anomalie w ziemskim

polu grawitacyjnym. Z kolei te anomalie powodują nieregularności w położeniu powierzchni poziomu odpowiadającego średniemu poziomowi morza. Rzeczywisty kształt Ziemi określono nazwą geoidy. Jest to kształt jaki miałaby Ziemia gdyby była całkowicie pokryta przez wody. Średni poziom mórz, odpowiadający powierzchni ekwipotencjalnej, definiuje powierzchnię geoidy, ale pod lądami ma ona przebieg bardziej złożony ze względu na bardzo duże zróżnicowanie gęstości wewnątrz Ziemi na kontynentach. Różnica pomiędzy powierzchniami elipsoidy i geoidy sięga do ± 100 m (Rysunek 3.2).



Rys. 3.2 Wzajemne położenie powierzchni Ziemi i jej dwóch modeli: elipsoidy i geoidy.

Ze względu na nieregularny charakter geoidy, układ współrzędnych geograficznych, opisujących położenie na powierzchni Ziemi w poziomie został oparty o elipsoidę (sferoidę). W ciągu ostatnich stu lat w użyciu było szereg elipsoid, z których najważniejsze zostały zestawione w Tabeli 3.1. Obecnie najczęściej używane są elipsoidy WGS84 (WGS 1984) i uznawana za praktycznie identyczną z nią GRS80.

Tab. 3.1 Podstawowe elipsoidy opisujące kształt Ziemi

Nazwa elipsoidy	Półoś wielka	Splaszczenie
Bessel	6377397 m	1/299,2
Clark	6378248 m	1/293,5
Krassowski	6378245 m	1/298,25
Hayford	6378388 m	1/297,0
WGS 1984 (WGS84)	6378137 m	1/298,257223563
GRS 80	6378137 m	1/298,2572

Ramka 3.1

Konwersja zapisu DD /DMS w kalkulatorze systemu Windows

Wybierz kolejno Start>Programy>Akcesoria>Kalkulator. Z menu Widok wybierz Naukowy.

Zamiana DD na DMS

Wprowadź wartość DD np. 18.56861 i kliknij klawisz **dms**. Podany wynik jest w stopniach, minutach i sekundach, choć jest formatowany jak liczba dziesiętna i ma postać dd.mm.ss. Po wprowadzeniu powyższej wartości otrzymamy 18.3406996 czyli 18 stopni 34 minuty i 6.996 sekund.

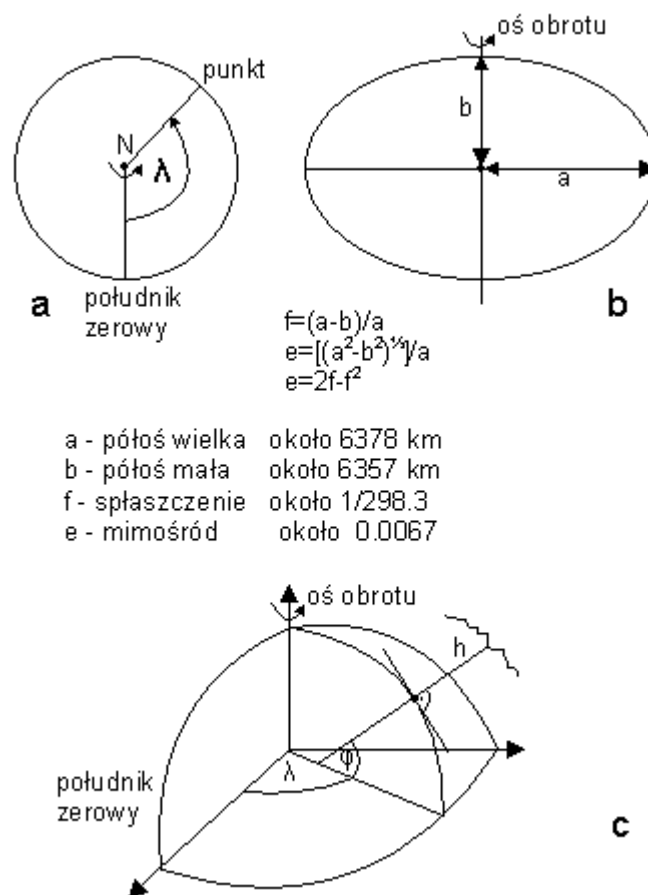
Zamiana DMS na DD

Wprowadź wartość DMS formatowaną jak liczba dziesiętna, np. 18°34'06.996"E wprowadzamy jako 18.3406996. Odznacz **Inv** i kliknij klawisz **dms**. Uzyskany zostanie wynik 18.56861.

Składowa pionowa położenia (wysokość) ma najczęściej związek ze średnim poziomem morza, jest zatem powiązana z geoidą. Obecnie powierzchnię geoidy określa się wykorzystując metody altymetrii satelitarnej oraz techniki grawimetryczne.

Układ współrzędnych geograficznych (GCS — *Geographic Coordination System*) jest układem sferycznym, opisującym położenie punktu na elipsoidzie obrotowej o osi obrotu zgodnej z krótszymi półosiami (Rysunek 3.3), podczas gdy półosie dłuższe leżą na płaszczyźnie równika. Powierzchnia Ziemi jest modelowana przez pełen obrót elipsy wokół osi przebiegającej przez bieguny (północny — N i południowy — S). Kolejne położenia elipsy w trakcie obrotu wyznaczają linie zwane południkami (*meridian*). Jeżeli jeden z południków zostanie wybrany jako zerowy (od 1884 większość krajów przyjmuje za zerowy południk przebiegający przez obserwatorium w Greenwich koło Londynu), to pozostałym można przypisać wartość kąta, jaki z nim tworzą — jest to tzw. długość geograficzna (Rysunek 3.3a). Wyraża się ją w stopniach, minutach i sekundach (oznaczenie DMS, np. 18°34'07"E) albo stopniach z częścią dziesiętną (oznaczenie DD np. 18.56861). Zakres wartości wynosi $\pm 180^\circ$, na wschód od południka zerowego długości przyjmują wartość dodatnią, a na zachód ujemną (przy zapisie DMS dodaje się dużą literę E dla długości wschodniej i W dla zachodniej, natomiast przy zapisie DD rolę tę pełni znak liczby). Ze względu na to, że systemy GIS wymagają wprowadzenia współrzędnych geograficznych w formacie DD, istnieje potrzeba przeliczania formatu DMS na DD za pomocą wzoru: $stopnie [DD] = stopnie + minuty/60 + sekundy/3600 [DMS]$. Do zamiany między dwiema postaciami zapisu można także wykorzystać kalkulator systemu Windows (Ramka 1). Drugą współrzędną układu GCS jest szerokość geograficzna zdefiniowana jako kąt pomiędzy płaszczyzną równika a normalną do powierzchni elipsoidy w danym punkcie (Rysunek 3.3c). Zakres wartości szerokości geograficznej wynosi $\pm 90^\circ$, na północ od równika (0°) szerokości przyjmują wartość dodatnią, a na południe ujemną (przy zapisie DMS zamiast znaku dodaje się

dużą literę N dla szerokości północnej i S dla południowej). Punkty o tej samej szerokości tworzą linie równoleżników (*parallel*). Południki wraz z równoleżnikami tworzą siatkę geograficzną (*graticule*). Długość wszystkich południków jest taka sama, odcinek odpowiadającego 1 minucie na południku definiuje milę morską (1 Nm = 1852m). Natomiast długość równoleżników maleje od równika do bieguna w przybliżeniu zgodnie z wartością cosinusa szerokości geograficznej. Należy zwrócić uwagę, że normalna (czyli prostopadła) do płaszczyzny stycznej do powierzchni elipsoidy nie przebiega przez środek Ziemi. Nie wyznacza też pionu, czyli kierunku działania siły grawitacji ze względu na brak zgodności z powierzchnią geoidy. Powoduje to szereg problemów, których rozwiązywaniem zajmuje się geodezja.



Rys. 3.3 Geograficzny układ współrzędnych na elipsoidzie – modelu Ziemi: a – długość geograficzna λ ; b – parametry opisujące elipsoidę; c – szerokość geograficzna ϕ .

3.1.4 Układ odniesienia (*datum*)

Aby opisany powyżej układ współrzędnych geograficznych mógł być użyty, należy określić rodzaj elipsoidy i jej położenie względem geoidy. Te dwie informacje pozwalają na jednoznaczne zdefiniowanie poziomego układu odniesienia (*datum*). Istnieją dwa rodzaje

układów odniesienia. Układy lokalne są tworzone dla wybranych obszarów Ziemi, a elipsoida jest dopasowywana do geoidy w taki sposób, aby zapewnić jak największą zgodność tylko w pewnym rejonie — przy czym ze względu na przemieszczanie się poszczególnych elementów powierzchni geoidy względem siebie (w procesie dryfu płyt kontynentalnych) stosuje się dowiązanie elipsoidy do sieci stałych punktów danej płyty. Drugim rodzajem układów są układy globalne, które są tworzone dla całego globu (dopasowanie musi zapewniać możliwie najlepszą zgodność dla każdego miejsca kuli ziemskiej). W tabeli 3.2 zestawiono podstawowe układy odniesienia.

Tab. 3.2 Podstawowe układy odniesienia (*datum*)

Nazwa układu odniesienia	Nazwa elipsoidy	Uwagi
WGS84	WGS84	Obecny globalny, wykorzystywany w GPS, poziomy jak i pionowy (wysokość liczona jest względem powierzchni elipsoidy)
ETRS89	GRS 80	Obecny lokalny system dla Europy (różnice z WGS84 nie są większe od 0.5 m)
NAD 83	GRS 80	Obecny system stosowany w Ameryce Północnej (w praktyce identyczny z WGS84)
Pułkowo 42	Krassowskiego	Dawny lokalny dla krajów Europy wschodniej (elipsoida była styczna do geoidy w miejscowości Pułkowo)
NAD 1927	Clarka	Dawny lokalny dla Ameryki Północnej
ED 87	Hayforda	Dawny lokalny system dla Europy

Z punktu widzenia polskiego, a także europejskiego użytkownika GIS najważniejszymi układami odniesienia są WGS84 i ETRS89. Toteż istotne jest zrozumienie podobieństw i różnic pomiędzy tymi dwoma układami. WGS84 (*World Geodetic System of 1984*) został stworzony jako system przeznaczony dla celów nawigacyjnych o dokładności rzędu metra. Odpowiednik WGS84 o dużej dokładności nosi nazwę ITRS (*International Terrestrial Reference System*) i jest wykorzystywany w badaniach geofizycznych. Problem wykorzystywania globalnego systemu ITRS do precyzyjnej geodezji polega na wspomnianym wcześniej ruchu kontynentów. Kontynent Europejski przemieszcza się względem ITRS (oraz WGS84) z prędkością około 2,5 cm na rok. ETRS89 bazuje na ITRS ale jest dowiązany na stałe do Europy za pomocą sieci

punktów i jest używany dla precyzyjnych pomiarów GPS. Obecnie (2006) różnica między układami wynosi około 40 cm.

Składowa pionowa układu współrzędnych może opisywać wysokość nad poziomem morza (pomiar geodezyjne, związek z powierzchnią geoidy) bądź nad powierzchnią elipsoidy (pomiar GPS). W Europie do niedawna istniało ponad 20 systemów pomiaru wysokości, odnoszących się do średniego poziomu morza w różnych miejscach. W rezultacie nie funkcjonował jeden pionowy układ odniesienia (różnice dla większości systemów nie były większe od 1 metra). W Polsce stosowano poziom odniesienia Kronsztadt związany ze średnim poziomem morza na rosyjskiej wyspie Kotlin w Zatoce Fińskiej. Obecnie obowiązuje w Europie pionowy układ odniesienia EVRS (*European Vertical Reference System*). W jego ramach narodowe układy współrzędnej pionowej mają być przetransformowane do holenderskiego układu odniesienia NAP (*Normal Amsterdam Peil*). Polski poziom odniesienia znajduje się około 18 cm wyżej niż poziom NAP. Układy ETRS89 i EVRS tworzą razem Europejski System Referencji Przestrzennej (*European Spatial Reference System*) (EEA, 2005).

3.1.5 Odwzorowania kartograficzne

W GIS układ GCS jest przeliczany najczęściej do układu współrzędnych prostokątnych. Istnieją co najmniej dwa dobre powody, dla których analiza danych i tworzenie map odbywa się w tym układzie. Pierwszym jest to, że zarówno ekran monitora, jak i mapa są płaskie, czyli mają dwuwymiarowy charakter. Drugi powód jest następstwem tego, że długość jednego stopnia na równoleżnikach jest zmienna i zależy od szerokości geograficznej. Prowadzenie analiz i tworzenie map jest znacznie wygodniejsze przy stałej jednostce długości na wszystkich osiach układu współrzędnych, co zapewnia układ współrzędnych prostokątnych. Przekształcenie trójwymiarowego obrazu powierzchni Ziemi opisanego współrzędnymi geograficznymi na dwuwymiarowy (płaski) układ współrzędnych prostokątnych wykonuje się za pomocą odwzorowań kartograficznych (*map projections*). Typowe zobrazowanie tego procesu polega na umieszczeniu przezroczystego globusa z siatką geograficzną i zarysem kontynentów pomiędzy źródłem światła a płaszczyzną, na której powstaje rzut siatki i obrysu lądów. W rzeczywistości wszystkie odwzorowania są realizowane za pomocą wzorów matematycznych. Istnieją setki odwzorowań, ale tylko niewielka ich część jest powszechnie używana. Najbardziej podstawowa metoda ich klasyfikacji polega na podziale względem (1) rodzaju płaszczyzny rzutowania, (2) lokalizacji tej płaszczyzny oraz (3) rodzaju zniekształceń.

Płaszczyzna rzutowania może być płaska lub zakrzywiona, ale w taki sposób, aby można ją było następnie rozprostować. Warunek ten spełniają powierzchnia boczna walca i stożka. Ze względu na rodzaj płaszczyzny rzutowania, odwzorowania dzieli się na płaszczyznowe

(azymutalne), walcowe i stożkowe, a ze względu na położenie powierzchni na biegunowe (płaszczyzna styczna na biegunie), równikowe i ukośne.

Trzecim istotnym elementem używanym w definiowaniu odwzorowania jest rodzaj zniekształceń. Brane są pod uwagę zniekształcenia: (1) kształtu, (2) powierzchni, (3) odległości i (4) kierunku. Nie ma map bez zniekształceń, co oznacza, że zachowanie wierności jednej właściwości (np. kształtu) wyklucza możliwość zachowania co najmniej jednej z pozostałych. Bardzo często brak zniekształceń uzyskuje się tylko dla wybranych punktów lub linii mapy, zwykle są to południki lub równoleżniki (noszą wtedy nazwę standardowych). Zniekształcenia mogą być inne w różnych miejscach mapy. Na mapach przedstawiających niewielkie obszary są one z reguły bardzo małe, na mapach kontynentów lub całego świata są widoczne na pierwszy rzut oka. Zachowanie kształtu (*conformality*) jest osiągnięte przez dokładną transformację kątów naokoło punktów. Na mapach zachowujących kształt równoleżniki i południki przecinają się pod kątem prostym. Mapy zachowujące powierzchnię pozwalają na wyznaczanie powierzchni znajdujących się na nich obiektów (a ściślej ich rzutów). Mapy wiernoodległościowe zachowują odległość, czyli skalę mapy. Żadna mapa nie zachowuje odległości (skali) we wszystkich miejscach. Odstępstwo od prawdziwej skali jest wyznaczone przez współczynnik skali (*scale factor*). Dla prawdziwej skali wynosi on jeden, jeżeli np. przyjmuje wartość 2, to zmierzony na mapie odcinek, który zgodnie z podaną dla całej mapy skalą wynosi 10 km, w rzeczywistości wynosi 5 km. Zazwyczaj odległość jest zachowywana dla pomiarów z jednego lub dwóch punktów lub wzdłuż pewnych linii (najczęściej południków lub równoleżników). Kierunek lub azymut jest kątem liczonym w prawo pomiędzy kierunkiem północnym a innym, wyznaczanym z dowolnego punktu. Odwzorowania azymutalne (płaszczyznowe) zachowują kierunek dla wszystkich prostych wychodzących z jednego punktu.

Przy wyborze danego odwzorowania określa się jego parametry, które pozwalają na umieszczenie siatki geograficznej przekształconej przez dane odwzorowanie w dowolnym miejscu, w pożądanym przez nas sposób. Do podstawowych parametrów opisujących odwzorowania można zaliczyć: południk środkowy (*central meridian*), szerokość punktu początkowego (*latitude of origin*), równoleżnik standardowy (*standard parallel*), szerokość punktu środkowego (*latitude of center*), środkowy równoleżnik (*central parallel*), odcięta punktu głównego (*false easting*), rzędną punktu głównego (*false northing*) oraz współczynnik skali (*scale factor*). Nie wszystkie odwzorowania potrzebują wszystkich parametrów, istnieją także ograniczenia co do możliwości ich zmiany. Każde odwzorowanie posiada południk środkowy, dla większości map przebiega on pionowo przez ich środek i wyznacza położenie ich centrum. Szerokość punktu początkowego wyznacza równoleżnik, którego przecięcie z południkiem

środkowym określa początek układu współrzędnych prostokątnych mapy. Często rolę tę pełni równik. Na równoleżnikach standardowych zachowana jest skala. Odwzorowania stożkowe mają najczęściej dwa równoleżniki standardowe. Szerokość punktu środkowego i środkowy równoleżnik są parametrami, które w niektórych odwzorowaniach służą do określania początku układu. Odcięta i rzędna punktu głównego definiują współrzędne punktu początkowego inne niż (0,0). Wynika to z przyjętej konwencji, aby współrzędne odwzorowań były zawsze liczbami dodatnimi. Współczynnik skali może modyfikować (np. w ArcGIS) położenie płaszczyzny rzutowania w niektórych odwzorowaniach walcowych. Przy wartości 1.0 płaszczyzna jest styczna na południku środkowym, przy innych wartościach przecina powierzchnię Ziemi tworząc po obu stronach południka środkowego dwa południki o prawdziwej skali. Tego typu rozwiązanie jest zastosowane w odwzorowaniu, a właściwie systemie współrzędnych UTM. Systemy współrzędnych nie stanowią często jednorodnego układu, ale szereg pokrywających większy obszar niezależnych układów, które wykorzystują w podobozarach dane odwzorowanie z różnymi parametrami.

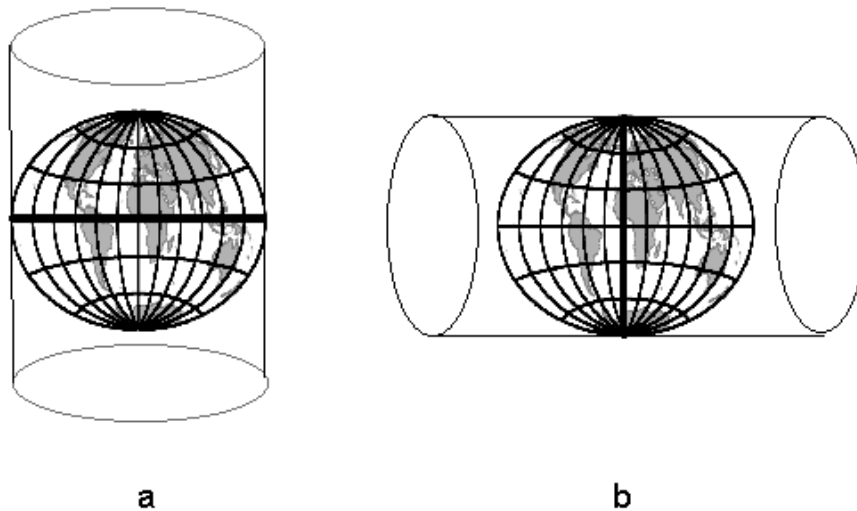
Nie ma praktycznej potrzeby zapoznawania się ze wszystkimi rodzajami odwzorowań. W badaniach naukowych (i w wielu innych zastosowaniach) uniwersalnym systemem współrzędnych dla map obszarów o wymiarach od setek metrów do setek kilometrów jest obecnie *Universal Transverse Mercator* znany jako UTM. Ze względu na to, że nie pokrywa on obszarów polarnych, uzupełniony jest przez odwzorowanie *Universal Polar Stereographic* (UPS) dla okolic obu biegunów. Dla tworzenia map w mniejszych skalach (1:500 000 i mniej) dla Europy zaleca się stosowanie wiernopowierzchniowego azymutalnego odwzorowania Lamberta (*Lambert Azimuthal Equal Area*) lub konformicznego stożkowego odwzorowania Lamberta (*Lambert Conformal Conical*) (EEA, 2005). Te dwa odwzorowania mogą być także po zmianie parametrów stosowane w skali kontynentów i części oceanów dla dowolnych obszarów o rozciągłości nie przekraczającej 90 stopni szerokości geograficznej. Do tworzenia map całego globu może być stosowane odwzorowanie Winkel Tripel używane od 1998 roku przez National Geographic Society. Mapy topograficzne, zarówno analogowe jak i cyfrowe, są obecnie wykonywane w Polsce w dwóch „państwowych” systemach współrzędnych: układzie „1992” i układzie „2000”. Polskie mapy topograficzne w ciągu ostatnich 50 lat były wykonywane w trzech różnych układach: „1942”, „1965” oraz „GUIGiK–1980”.

Wiele projektów wymaga integracji map posiadających różne odwzorowania. Powszechną praktyką jest sprowadzenie ich do jednego wspólnego układu współrzędnych. Jakkolwiek szereg programów GIS potrafi wizualizować jednocześnie warstwy o różnych odwzorowaniach (ale tym samym układzie odniesienia), to w procesie analizy lub edycji danych może to powodować

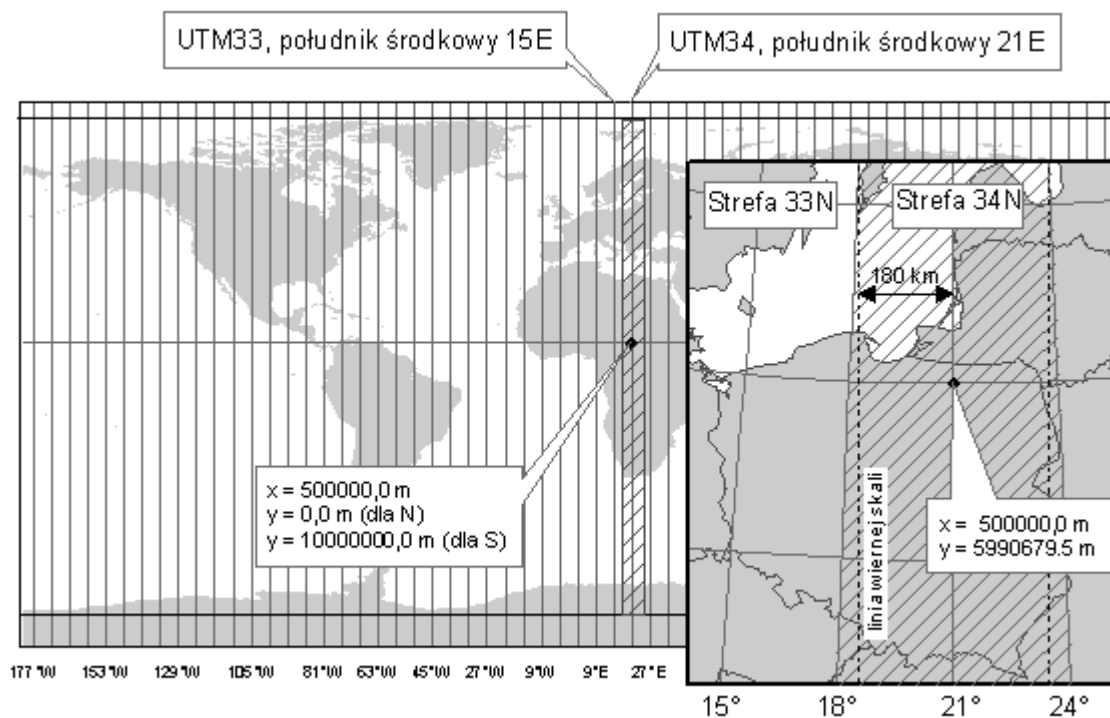
problemy. W praktyce możliwe są dwie sytuacje. Pierwsza — kiedy dane mają wspólny układ odniesienia i różne odwzorowania i druga — kiedy różnią się zarówno układem odniesienia, jak i odwzorowaniem. W pierwszym przypadku dane są transformowane do nowego odwzorowania w dwóch etapach. Najpierw za pomocą odwrotnej funkcji odwzorowawczej (*inverse equation projection*) dane ze współrzędnych prostokątnych są przeliczane z powrotem do współrzędnych geograficznych, następnie zaś do nowego odwzorowania. W przypadku drugim, po przeliczeniu odwzorowania do współrzędnych geograficznych stosuje się dwa rozwiązania. Pierwsze polega na przeliczeniu układu współrzędnych geograficznych do geocentrycznych współrzędnych prostokątnych, wykonaniu transformacji układu do nowego układu odniesienia i powrotu do współrzędnych geograficznych. Drugie wykorzystuje równanie Mołodeńskiego, pozwalające na wyznaczenie relacji między współrzędnymi geograficznymi dwóch elipsoid. Po otrzymaniu przy pomocy jednego z rozwiązań współrzędnych geograficznych stosuje się wymagane odwzorowanie.

3.1.6 UTM — podstawowy układ współrzędnych w pracach naukowych

Odwzorowanie Mercatora jest najbardziej znanym sposobem przeniesienia siatki geograficznej z kuli na płaską powierzchnię, jaką po rozprostowaniu stanowi boczna ściana walca. Choć nie można za pomocą tego odwzorowania przedstawić obszarów polarnych, to jego ogromną zaletą jest to, że każda linia prosta na mapie wyznacza kierunek o stałym azymucie (loksodrome). Z tego też powodu odwzorowanie to powszechnie stosuje się w nawigacji morskiej. Wynalazł je w XVI wieku Gerardus Mercator na fali potrzeb zrodzonych przez wielkie odkrycia geograficzne. W jego odwzorowaniu walec umieszczony był pionowo, a równik był styczny do jego powierzchni (Rysunek 3.4a). Pod koniec XVIII wieku Johann Lambert zmodyfikował to odwzorowanie ustawiając walec poprzecznie (Rysunek 3.4b). Odwzorowanie nosi nazwę Transverse (poprzeczne) Mercator albo Gaussa-Krügera. Liniami prostymi pozostają w nim południk środkowy i równik. Powierzchnia walca może być styczna do powierzchni Ziemi bądź sieczna z dwoma liniami stycznymi naokoło południka środkowego. To ostatnie rozwiązanie zostało zastosowane w latach 40-tych do stworzenia w oparciu o Transverse Mercator systemu współrzędnych pokrywającego całą Ziemię serią oddzielnych pionowych stref. Zostało ono nazwane Universal Transverse Mercator (UTM).



Rys. 3.4 Odwzorowanie Merkatora: a – wynalezione przez Merkatora w XVI wieku; b – Transverse Merkator (poprzeczne walcowe) zaproponowane przez Lamberta w XVIII



Rys. 3.5 System współrzędnych UTM (Universal Transverse Merkator) – Uniwersalne Poprzeczne Merkatora. Na mapie świata pokazano południki środkowe wszystkich stref oraz strefę 34. Mapa Polski została przedstawiona w odwzorowaniu UTM34N.

Podstawowe założenia tego systemu zostały przedstawione na Rysunku 3.5. Ziemia została podzielona na 60 stref północnych i południowych, oznaczanych kolejnym numerem i dużą literą N i S. Każda strefa ma szerokość 6 stopni, z umiejscowionym centralnie południkiem środkowym. Strefy 1N i 1S zaczynają się na 180 W (południk środkowy 177°W). Numeracja stref wzrasta w kierunku wschodnim. Na obszarze Polski znajduje się strefa 33N (z południkiem

środkowym 15°E) i strefa 34N (z południkiem środkowym 21°E). Numer strefy dla danej długości geograficznej może być wyznaczony w następujący sposób:

1. Do długości dodajemy 180 (przy długości zachodniej należy uwzględnić znak minus);

$$\text{np. } 19\text{E} = 19 + 180 = 199$$

$$50\text{W} = -50 + 180 = 130$$

2. Wynik dzielimy przez 6 i zaokrąglamy do większej liczby całkowitej;

$$\text{np. } 199 / 6 = 33.167 \text{ po zaokrągleniu} = \text{strefa } 34$$

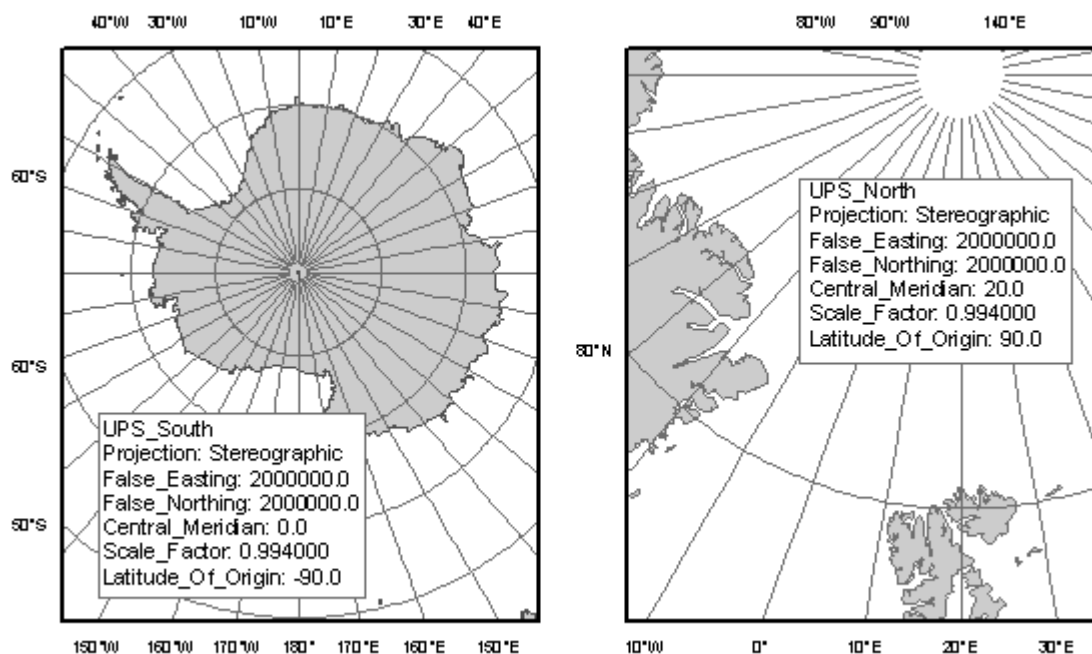
$$130 / 6 = 21.67 \text{ po zaokrągleniu} = \text{strefa } 22.$$

UTM stosuje się dla szerokości od 80° S do 84°N. Przy zastosowaniach wojskowych, dla których został zaprojektowany, używa się także literowego oznaczenia stref. Południk środkowy i równik (jedyne proste linie) tworzą oddzielny układ współrzędnych dla każdej strefy. Południk środkowy ma przypisaną wartość $x = 500000,0$ m dla uniknięcia wartości ujemnych. Z tego samego powodu wartość y na równiku jest inna dla półkuli północnej ($y = 0$) i południowej ($y = 10000000,0$), wartości na osi y rosną zawsze w kierunku północnym. Odwzorowanie UTM zachowuje kształt i kąty przy minimalnej deformacji powierzchni. Południk środkowy danej strefy posiada współczynnik skali 0,9996, a wierna skala jest zachowana w odległości 180 km po obu stronach tego południka. Maksymalny błąd odległości w granicach jednej strefy wynosi 1 metr na 2500 metrów. Jeżeli dany obszar obejmuje więcej niż jedną strefę (taka sytuacja jest w Polsce), można wyjść z układem współrzędnym poza strefę, ale nie powinno się przekraczać stref sąsiednich. Należy mieć także świadomość, że poza strefą błędy szybko rosną. Odwzorowanie UTM z układem odniesienia ETRS89 jest zalecane do stosowania w Europie przy tworzeniu map w skalach od 1:10000 do 1:499999 (EEA, 2005).

Podobnym do UTM jest system współrzędnych Gaussa-Krügera. Dzieli on Ziemię także na strefy 6-stopniowe. Strefa pierwsza ma południk środkowy 3°E. Zastosowano podobne współrzędne dla początku układu, jednak dopuszcza się także dodawanie do współrzędnej x numeru strefy razy milion (początek układu w strefie siódmej będzie posiadał $x = 500\,000 + 7 * 1000000 = 7500000$). Jediną istotną różnicą jest współczynnik skali, który wynosi 1.0 (płaszczyzna rzutowania jest styczna, a nie sieczna).

Dla obszarów polarnych uzupełnieniem UTM jest UPS (*Universal Polar Stereographic*), przedstawione na Rysunku 3.6. Jest to odwzorowanie płaskoizometryczne z płaszczyzną rzutowania, analogicznie jak w UTM, przecinającą Ziemię (sieczną). Wyraz stereograficzne oznacza, że promienie rzutujące wychodzą z naprzeciwległego bieguna. Standardowymi równoleżnikami (o wiernej skali) są 81°06'53,2" N i S, natomiast na biegunie współczynnik skali wynosi 0.994, czyli tyle samo, ile na południku środkowym UTM. Parametry tego odwzorowania zostały

dobrane tak, aby pod względem dokładności miało ono podobny charakter do UTM. Są dwie wersje tego odwzorowania, jedna dla rejonów północnych i druga dla południowych.



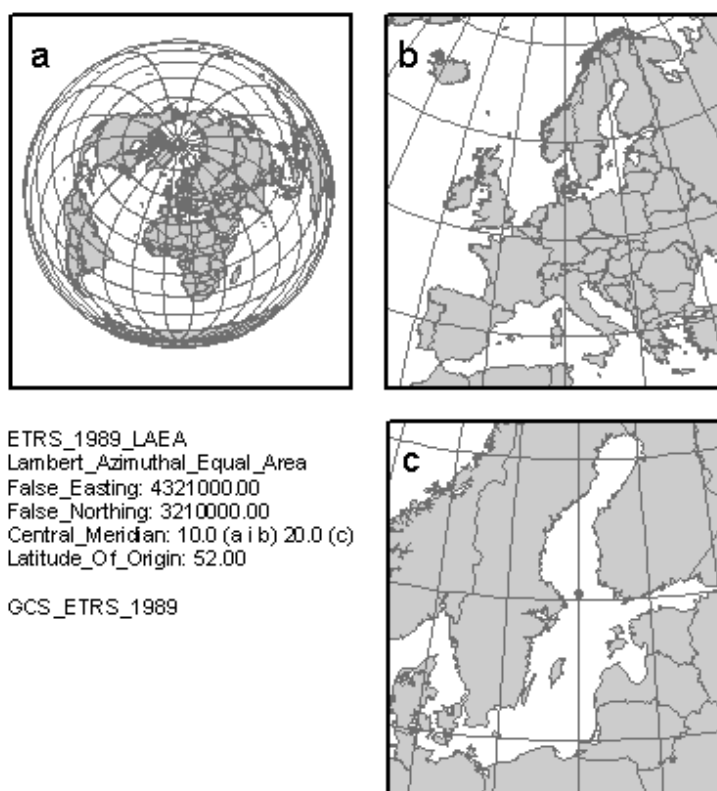
Rys. 3.6 Odwzorowanie UPS (Universal Polar Stereographic) – Uniwersalne Biegunowe Stereograficzne. Jest uzupełnieniem UTM dla obszarów polarnych.

3.1.7 Małoskalowe odwzorowania europejskie

Odwzorowanie *Lambert Azimuthal Equal Area* (LAEA), czyli wiernopowierzchniowe azymutalne odwzorowanie Lamberta, które jest zalecane jako podstawowe odwzorowanie do przedstawiania Europy (EEA, 2005), zostało wynalezione przez Johanna Lamberta w drugiej połowie XVIII wieku (Rysunek 3.7). Jest to odwzorowanie płaskiżynowe z płaskiżyną styczną w dowolnym punkcie Ziemi. Odwzorowanie zachowuje prawdziwą powierżchnię, natomiast kształt ulega minimalnym zniekształceniom (mniej niż 2%) w odległości mniejszej niż 15 stopni od punktu centralnego (stycznosci). Odległość jest zachowywana we wszystkich kierunkach z punktu centralnego. Jest stosowane między innymi do tworzenia tematycznych map oceanów np. geologicznych. Odwzorowanie to jest standardem w takich instytucjach europejskich, jak Eurostat i European Environment Agency (EEA) do przedstawiania map Europy w skalach 1:500000 i mniejszych. W tabeli 3.3 przedstawiono symbole używanych przez instytucje europejskie rodzajów tego odwzorowania, sposób wykorzystania i podstawowe parametry. Pliki definiujące te odwzorowania (typu .prj dla programu ArcGIS) można pobrać ze strony <http://www.eionet.eu.int/gis>.

Tab. 3.3 Odwzorowania Lambert Azimuthal Equal Area (LAEA) stosowane w instytucjach UE

Zastosowanie	Symbol odwzorowania (nazwa pliku)	Podstawowe parametry
Eurostat/GISCO	ETRS-LAEA4809	Środkowy południk 9 E Szerok. punktu początkowego 48 N
Komisja Europejska (EU-15)	ETRS-LAEA5210	Środkowy południk 10 E Szerok. punktu początkowego 52 N
Standard EEA dla obszaru krajów członków EU	ETRS-LAEA5220	Środkowy południk 20 E Szerok. punktu początkowego 52 N
Standard EEA dla Euroazji	ETRS-LAEA5265	Środkowy południk 65 E Szerok. punktu początkowego 48 N



Rys. 3.7 Odwzorowanie LAEA (Lambert Azimuthal Equal Area): a – może być stosowane do tworzenia map obszarów mniejszych od półkuli; b – podstawowa mapa Europy z południkiem środkowym 10°E; c – zgodna z zaleceniami EEA mapa do analiz środowiska przyrodniczego Bałtyku, LAEA z południkiem środkowym 20°E.

Do przedstawiania map małoskalowych Europy (1:500000 i mniejsze), na których istotne jest zachowanie prawdziwego kształtu, rekomendowane jest stosowanie odwzorowania LCC (Lambert Conformal Conical), czyli konformicznego stożkowego odwzorowania Lamberta (EEA, 2005). Przedstawione na Rysunku 3.8 odwzorowanie wraz ze standardowymi parametrami EEA (symbol odwzorowania i nazwa pliku .prj ETRS-LCC) jest uważane za jedno z najlepszych dla średnich szerokości. Posiada dwa standardowe południki, co oznacza, że powierzchnia stożka jest sieczna do powierzchni Ziemi. Skala jest wierna na południkach

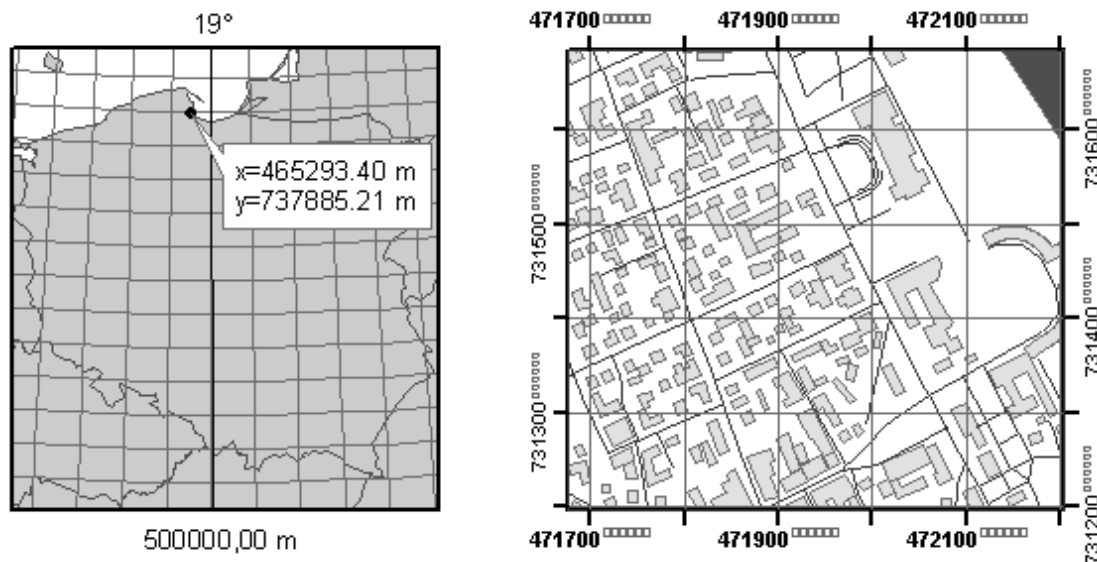
standardowych, pomiędzy nimi ulega redukcji, a na zewnątrz zwiększeniu. Zniekształcenia powierzchni są podobne jak dla skali.



Rys. 3.8 Odwzorowanie LCC (Lambert Conformal Conic): a – podstawowa mapa Europy (ETRS_1989_LCC) z południkiem środkowym 10°E i standardowymi równoleżnikami 35° i 65°N; b – zastosowanie odwzorowania do oddania wiernego kształtu cieśnin łączących Bałtyk z Morzem Północnym.

3.1.8 Polskie układy współrzędnych

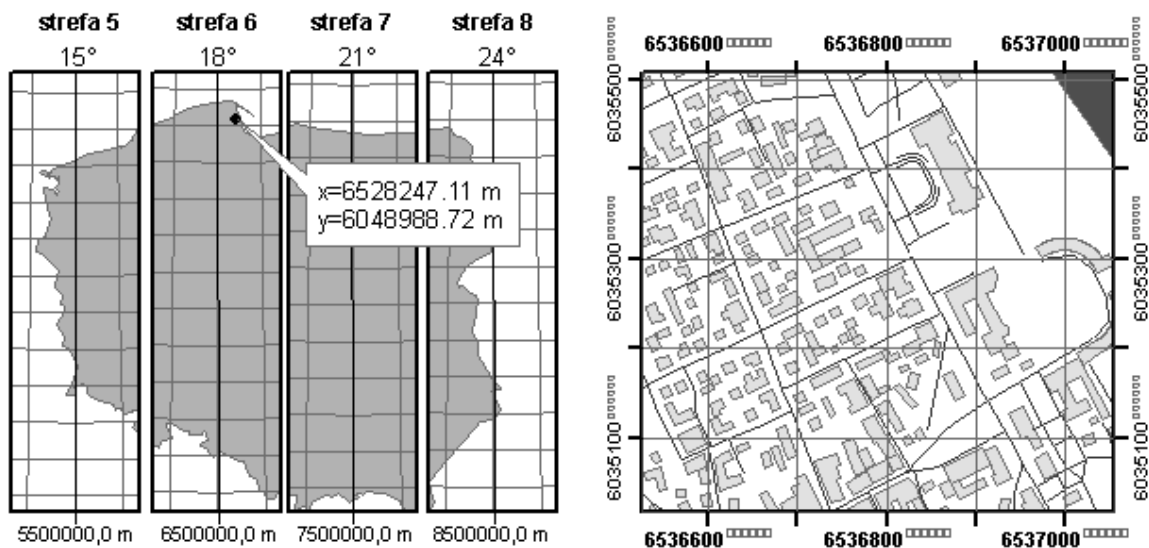
Obecnie w Polsce następuje przejście do dwóch państwowych systemów współrzędnych: układu „1992” i układu „2000”, które od 2010 roku mają być jedynymi obowiązującymi systemami. Oba te systemy wykorzystują układ odniesienia ETRS89. Przedstawiony na Rysunku 3.9 układ „1992” został zaprojektowany dla opracowań topograficznych.



Rys. 3.9 Układ współrzędnych płaskich prostokątnych „1992”. Z prawej strony cyfrowa mapa topograficzna części Sopotu wykonana w tym układzie współrzędnych

Układ oparty jest na odwzorowaniu Gaussa-Krügera z południkiem środkowym 19°E. Jeden układ współrzędnych tworzy pas o szerokości 10 stopni obejmujący cały kraj. Współczynnik skali na południku środkowym wynosi 0,9993, co oznacza, że układ wykorzystuje sieczną płaszczyznę walca. Początkowym równoleżnikiem jest równik z ujemną rzędną punktu

głównego równą - 5300000000,0 m. Zapewnia to dodatnie wartości liczbowe na osi y. Odcięta punktu głównego, podobnie jak w UTM, wynosi 500000,0 m. Należy zapamiętać, że polskie instytucje geodezyjne używają odwrotnego oznaczenia współrzędnych niż jest to stosowane w GIS i geometrii analitycznej, geodezyjna współrzędna x oznacza rzędną, a współrzędna y odciętą.



Rys. 3.10 Układ współrzędnych płaskich prostokątnych „2000”. Z prawej strony cyfrowa mapa topograficzna części Sopotu wykonana w tym układzie współrzędnych.

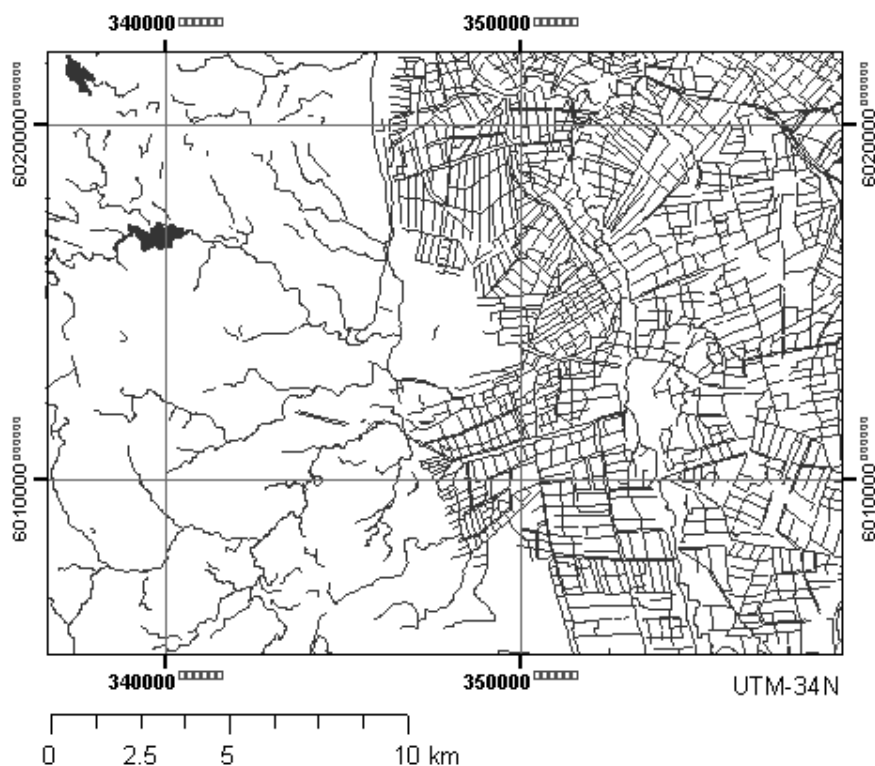
Układ współrzędnych „2000” jest przeznaczony do opracowań wielkoskalowych, takich jak np. ewidencja gruntów. Wykorzystano w nim, podobnie jak w poprzednim układzie, odwzorowanie Gaussa-Krügera. Obszar kraju został podzielony na cztery oddzielne pasy o szerokości 3 stopni z południkami środkowymi: 15° (strefa 5); 18° (strefa 6); 21° (strefa 7); 24° (strefa 8). W każdej strefie południk środkowy posiada odciętą równą numer strefy razy milion plus 500000,0 m, a współczynnik skali ma na nim wartość 0,9993. Początek układu każdej strefy znajduje się na przecięciu południka środkowego i równika i ma rzędną równą 0,0 m.

W latach PRL-u, ze względu na posunięte do absurdu przepisy o ochronie tajemnicy państwowej i służbowej, stosowane układy np. „GUGIK-1980” czy powszechny jeszcze niedawno układ „1965” zostały celowo skażone. Wprowadzono przesunięcia położenia współrzędnych osnowy matematycznej oraz niespójne strefy odwzorowawcze (podział na strefy był związany z województwami) (Podlacha, 1994). W rezultacie przeliczanie współrzędnych z tych układów do układów obecnych wymaga specjalnego oprogramowania. Jedynym układem „nie skażonym” stworzonym w tym okresie był system współrzędnych „1942”. Oparty był on na odwzorowaniu Gaussa-Krügera i układzie odniesienia Pułkowo 42, wykorzystującym elipsoidę Krassowskiego.

3.2 MODELE DANYCH

3.2.1 Model danych - cyfrowa reprezentacja i struktura danych

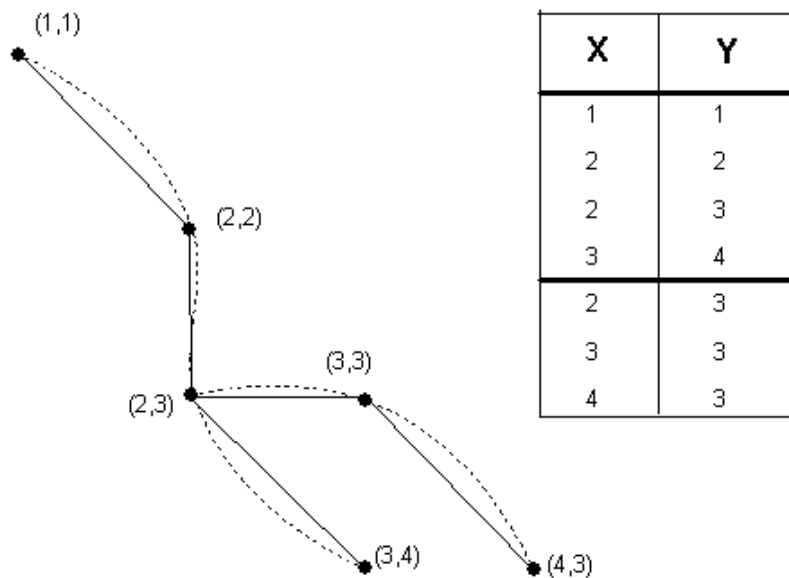
Jeżeli do analizy powierzchni Ziemi chcemy wykorzystać komputer, to musimy najpierw stworzyć w nim numeryczny odpowiednik naszego obiektu badań. Problem, przed którym stoimy, polega na przeniesieniu powierzchni Ziemi do pamięci komputera, aby wykorzystując jego możliwości móc odpowiedzieć na interesujące nas pytania. Powierzchnia Ziemi jest praktycznie nieskończenie złożona, toteż wyjść należy od sformułowania pytań badawczych, które pozwolą na wybranie warstw istotnych dla rozwiązania danego problemu. Przyjmijmy, że zadaniem, które sobie postawiliśmy jest określenie gęstości sieci rzecznej w Polsce (czyli wyznaczenie stosunku długości wszystkich rzek do powierzchni kraju). Można je oczywiście wykonać korzystając z papierowej mapy, na której zaznaczone są granice Polski i jej sieć rzeczna. Gdyby skopiować z mapy Polski w skali 1:50000 wszystkie rzeki otrzymano by mapę podobną do przedstawionego na Rysunku 3.11 wycinka.



Rys. 3.11 Wycinek cyfrowej mapy hydrograficznej Polski w skali 1:50000

Mierzenie długości rzek na mapie papierowej, choć możliwe, byłoby zadaniem żmudnym i wymagającym dużej ilości czasu. Aby przenieść element powierzchni Ziemi (jakim jest w omawianym przykładzie sieć rzeczna) do pamięci komputera, musimy znaleźć jej cyfrowy odpowiednik. Naturalnym wyborem będzie linia. Linia może być zapisana w sposób cyfrowy za

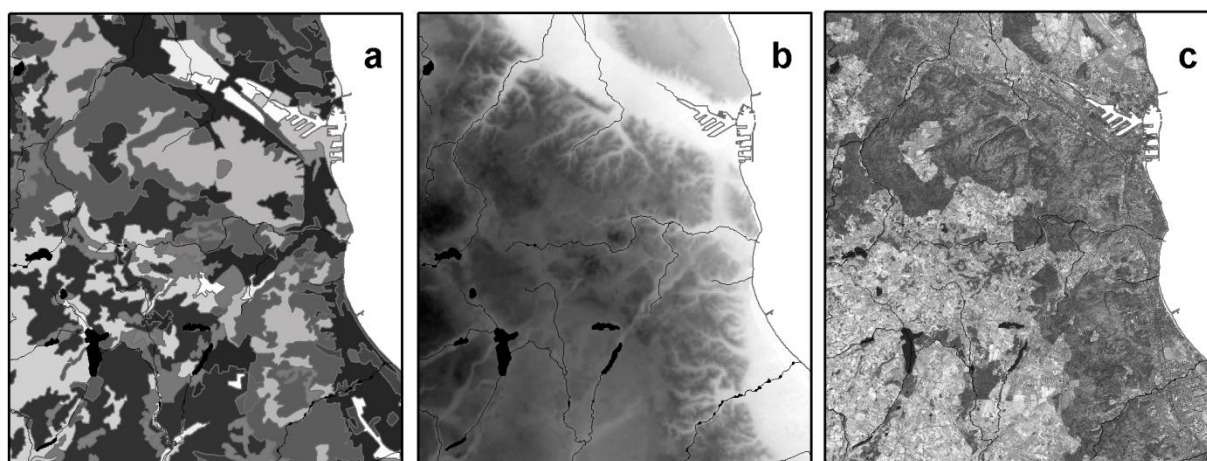
pomocą współrzędnych punktów, które ją tworzą, a długość każdego jej odcinka może być w prosty sposób obliczona, wykorzystując podstawowe zasady geometrii analitycznej. Zsumowanie długości wszystkich odcinków podzielone przez powierzchnię kraju da nam szukaną wartość. Modelem sieci rzecznej będą zatem linie, a strukturą zapisu w pamięci komputera będzie tabela zawierająca współrzędne poszczególnych punktów, z których tworzone są odcinki (Rysunek 3.12). Linia nie odzwierciedla dokładnie przebiegu rzeki, ale stanowi jej przybliżenie. Szczegółowość modelu będzie zależała od celów jakim ma służyć i sposobu pozyskiwania danych. Ma ona bezpośredni związek ze skalą, ale niezależnie od niej model będzie wymagał pewnych uproszczeń w porównaniu z rzeczywistością. Proces redukcji szczegółów nosi nazwę generalizacji [patrz podroz. 4.8].



Rys. 3.12 Rzeki (linia przerywana) są modelowane liniami, które generalizują ich przebieg. Współrzędne punktów każdej linii są zapisywane oddzielnie.

Pojęcie modelu danych ma dwojakie znaczenie. Po pierwsze opisuje struktury danych, które mogą być wykorzystane przy tworzeniu modelu elementów powierzchni Ziemi w cyfrowym środowisku komputera. Po drugie opisuje całościowo sposób cyfrowego zobrazowania rzeczywistości. Istnieją dwa podstawowe podejścia do tworzenia tych modeli. Pierwsza zakłada, że powierzchnię Ziemi możemy przedstawić jako zbiór obiektów wielu klas (warstw). Druga pojmuje ją jako ciągłe powierzchnie lub pola różnych zmiennych. Podstawową cechą obiektu jest przestrzenne ograniczenie jego występowania i wewnętrzna jednorodność, podczas gdy pola charakteryzuje ciągłość w przestrzeni i przestrzenna zmienność. Obiekty określonej klasy istnieją w pustce, tzn. są w przestrzeni miejsca, gdzie obiekty istnieją i takie,

gdzie ich nie ma. Budynki na Rysunku 3.10 mają określone granice. Nie dzielimy ich na mniejsze części, każdy z nich stanowi oddzielną i jednorodną całość. Obiekty mogą się ze sobą łączyć, a nawet zajmować to samo miejsce w przestrzeni. Obszar miasta na Rysunku 3.10 możemy przedstawić jako zbiór obiektów reprezentujących budynki (poligony) i drogi (linie). W ten sposób stworzymy cyfrowy model miasta. Obiektowa koncepcja tworzenia modelu pasuje do wektorowej struktury danych. Ale to samo miasto możemy także przedstawić jako szereg ciągłych warstw zmiennych, opisujących pokrycie terenu. Pierwsza warstwa dzielić będzie cały teren na klasę łądu albo wody, warstwa druga na budynki, drogi i obszar nieokreślony. Naturalną strukturą danych dla tak budowanego modelu będzie raster. Praktycznie każdy obraz powierzchni Ziemi możemy modelować według koncepcji obiektów (wektorowo) lub pól (rastrowo). Wybór metody jest wypadkową co najmniej paru czynników, z których najważniejszymi są rodzaj dostępnych danych, zakres zadawanych pytań i specyfika planowanych analiz. Na Rysunku 3.13 przedstawiono proces budowy modelu danych obszaru przedstawionego na zdjęciu satelitarnym (raster) (Rysunek 3.13c). Jeżeli pytanie dotyczy określenia związku między zanieczyszczeniem rzek a sposobami użytkowania terenu wzdłuż ich biegu, odpowiednim modelem mogą być dwie warstwy wektorowe: poligonów użytkowania terenu i linii rzek (Rysunek 3.13 a). Potrzeba zastosowania metod dostępnych tylko w środowisku rastrowym (np. analizy czynnikowej) wymusiłaby użycie rastrowego modelu zarówno dla warstwy rzek, jak i użytkowania ziemi. Natomiast zagadnienia związane ze sływem wody po terenie wymagają najczęściej numerycznej mapy terenu w postaci rastrowej (Rysunek 3.13b).

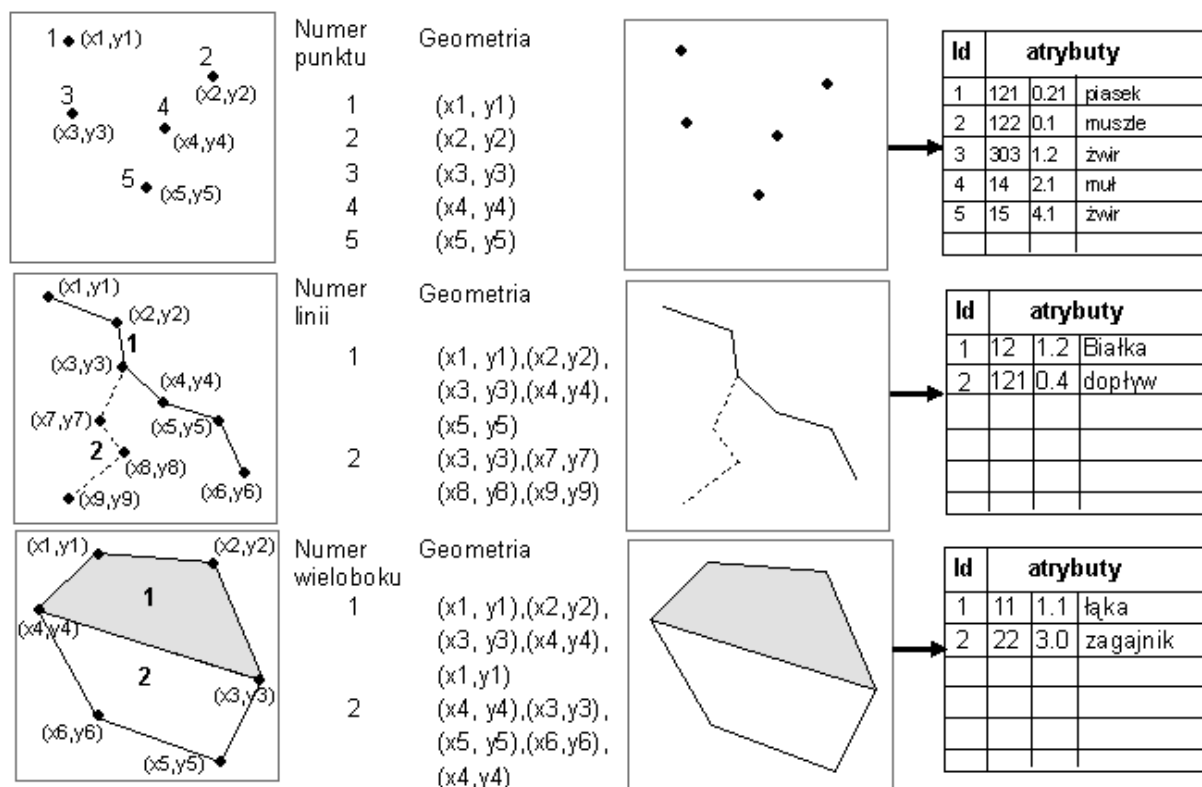


Rys. 3.13 Zdjęcie satelitarne (Landsat) (c) przedstawia modelowany obszar powierzchni Ziemi z nałożoną warstwą rzek. Cyfrowy model tego obszaru, w zależności od potrzeb, może być modelem składającym się tylko z warstw wektorowych (a - przedstawia wektorowe warstwy pokrycia terenu, rzek i jezior) albo mieszanym, składającym się z warstw wektorowych i rastrowych (b - przedstawia rastrową mapę wysokości terenu i wektorowe mapy rzek i jezior).

Ten sam obszar w zależności od potrzeb może być modelowany przy pomocy różnych warstw, ta sama zmienna może być przedstawiana albo jako warstwa wektorowa, albo jako rastrowa. Mapa pokrycia terenu powstaje najczęściej jako warstwa rastrowa w procesie klasyfikacji wielokanałowego zdjęcia satelitarnego, a następnie jest zamieniana na warstwę wektorową. Dowolna warstwa rastrowa może być zamieniona na wektorową w procesie zwanym wektoryzacją, działanie odwrotne nosi nazwę rasteryzacji [patrz podroz. 5.7].

3.2.2 Wektorowy model danych

Istota wektorowego modelu danych została przedstawiona na Rysunku 3.14. Podstawową zaletą tego modelu jest jego prostota. Istnieją trzy typy obiektów w modelu wektorowym: punkty, linie i wieloboki (poligony). Konstrukcja wszystkich obiektów jest oparta o punkty. W zależności od systemu punkt może mieć 2, 3 lub 4 współrzędne. W ArcGIS każdy punkt posiada



Rys. 3.14 Struktura wektorowego modelu danych.

współrzędne x, y , a opcjonalnie może posiadać dodatkowo współrzędne z i m . Współrzędna z daje możliwość lokalizacji punktu w przestrzeni trójwymiarowej, a m pełni różną rolę — może na przykład służyć do określenia czasu. Każdy obiekt posiada swój numer (identyfikator) i geometrię. W rezultacie punkty lub odcinki, które są wspólne dla paru obiektów, są zapisywane kilkakrotnie. Obie linie na Rysunku 3.14 łączą się w punkcie (x_3, y_3) i punkt ten występuje w geometrii obu linii. Oba poligony posiadają także wspólny odcinek $(x_3, y_3), (x_4, y_4)$ i w

geometrii każdego z nich współrzędne jego punktów zostaną zapisane. Powtarzanie się tych samych punktów w zbiorze danych rodzi szereg problemów, z których najbardziej oczywistym jest możliwość zmiany położenia punktu tylko w części jego wystąpień w bazie danych.

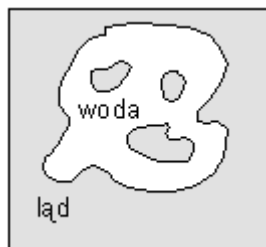
Ramka 3.2

Shape file (SHP) – format wektorowy w ArcGIS

Warstwa wektorowa (punktów, linii lub poligonów) zapisana w tym formacie składa się z szeregu plików (od 3 do 6), różniących się rozszerzeniem (.shp, .shx, .dbf, .sbx, .sbn, .prj), z których niezbędne są pierwsze trzy, np:

```
rzeki.shp  
rzeki.shx  
rzeki.dbf
```

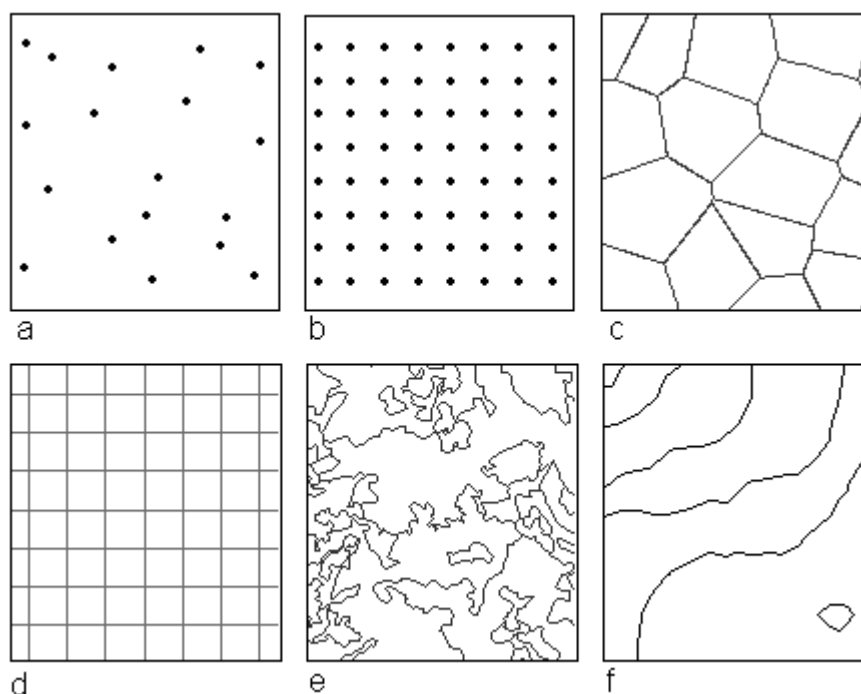
Pierwszy plik zawiera dane o geometrii obiektów, drugi jest plikiem indeksów, a trzeci stanowi tablica bazy danych dBASE zawierająca dane atrybutowe. Plik .prj jest plikiem tekstowym, opisującym rodzaj układu odniesienia i ewentualnie odwzorowanie. W tej strukturze danych można zapisywać obiekty składające się z wielu elementów (rysunek), np. wieloboki z wyspami. Dzięki temu, że struktura tego formatu jest jawna jest on powszechnie stosowany do przenoszenia danych wektorowych między programami.



Numery lub identyfikatory obiektów pełnią istotną rolę połączenia pomiędzy częścią graficzną a atrybutową. Elementem struktury modelu jest tablica atrybutów, w której wiersze (rekordy) odpowiadają poszczególnym obiektom, a kolumny (pola) mogą być dowolnie tworzone dla zmiennych opisujących obiekty. Mogą być one zarówno liczbowe, jak i tekstowe. Przedstawiona struktura danych odpowiada powszechnie znanemu formatowi danych wektorowych w GIS, jakim jest *shape file* (Ramka 3.2). Format ten jest najczęściej używany w badaniach naukowych, a także jest rekomendowany do stosowania w projektach związanych ze środowiskiem przyrodniczym w Europie (EEA, 2005). W początkowym okresie rozwoju oprogramowania GIS starano się umieścić w strukturze danych informacje topologiczne. Topologia jest dziedziną zajmującą się geometrycznymi relacjami między obiektami. Dostarcza przykładowo informacji o sąsiadach danego obiektu. Operowanie tego typu wiedzą ma istotne znaczenie zarówno przy edycji danych, jak i ich analizie. Topologiczny model danych coverage (COV) stworzony przez ESRI na bazie modelu *arc-node* (łuk-węzeł) zawierał informacje topologiczne i pozwalał na niepowtarzanie danych. Obecnie nie jest on już stosowany w nowych

wersjach oprogramowania (w ArcGIS), a topologia jest realizowana praktycznie poza strukturami danych. Wektorowe dane można także napotkać w formatach programu AutoCad (DXF i DWG) oraz w starym formacie wymiany danych wektorowych programu ArcInfo (E00).

Model wektorowy, choć najczęściej jest wykorzystywany do obiektowej reprezentacji rzeczywistości, może być także używany do przedstawiania pól ciągłych. Do tego celu mogą być wykorzystane zarówno punkty, linie, jak i poligony. Na Rysunku 3.15 przedstawiono sześć metod modelowania powierzchni za pomocą danych wektorowych. Powierzchnie te mogą być dwójakiego rodzaju. Pierwszy rodzaj powierzchni, zwany przez niektórych autorów powierzchniami statystycznymi (lub zawierającymi dane geostatystyczne) zawiera zmienne ciągłe pozbawione granic. Przykładami takich powierzchni jest pole temperatury, ciśnienia czy zawartości określonego związku chemicznego w osadzie czy glebie, ale także powierzchnia prawdopodobieństwa występowania określonego gatunku. Drugi rodzaj powierzchni nie zachowuje przestrzennej ciągłości i zmiana wartości ma charakter skokowy, powodujący istnienie granic. Tworzą je zmienne nominalne lub porządkowe, wyrażone najczęściej za pomocą liczb całkowitych. Powierzchniami tego typu są powierzchnie pokrycia terenu, rodzaju osadów lub typu gleby.

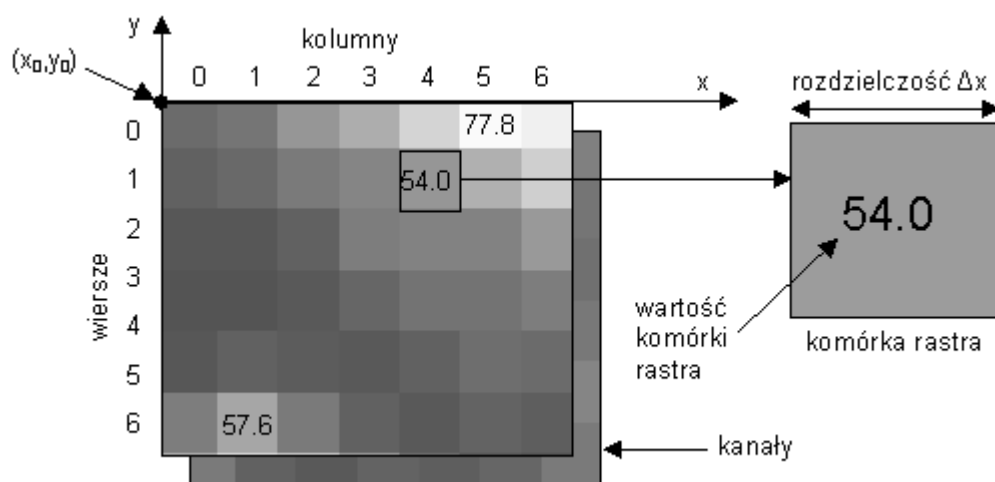


Rys. 3.15 Modelowanie pól za pomocą modelu wektorowego: a – nieregularnie rozmieszczone punkty; b – regularnie rozmieszczone punkty; c – poligony Thiessena; d – siatka wektorowa; e – przystające poligony; f – izolinie.

Najprostszym sposobem modelowania powierzchni jest wykorzystanie danych punktowych. Dokładność modelu będzie zależała od gęstości rozmieszczenia punktów. Należy zwrócić jednak uwagę na to, że tego typu model pozostawia na powierzchni miejsca, do których nie jest przypisana wartość zmiennej. Rozmieszczenie punktów może być nieregularne (Rysunek 3.15a) lub regularne, odpowiadające węzłom lub środkom komórek siatki rastrowej lub wektorowej (Rysunek 3.15b). Regularne rozmieszczenie punktów może być przeprowadzone według różnych schematów. Nieregularnie rozmieszczone punkty mogą być otoczone strefami oddziaływania w formie wieloboków zwanych poligonami Thiessena (Rysunek 3.15c), używa się też nazwy diagramy Dirichleta lub Voronoi. Kolejnym możliwym rozwiązaniem jest siatka wektorowa (*vector grid* lub *pseudogrid*), tworzona jako mozaika poligonów w formie kwadratów (Rysunek 3.15d). Każda komórka tej siatki stanowi oddzielny obiekt. Najczęściej wykorzystywaną metodą modelowania powierzchni zmiennych nominalnych jest jej wypełnienie przystającymi do siebie poligonami o różnych kształtach (Rysunek 3.15e). W ten sposób tworzy się wektorowe warstwy pokrycia terenu, rodzajów osadów, roślinności czy gleb. Ostatnia metoda wykorzystuje do modelowania pól ciągłych izolacje, czyli linie stałych wartości (Rysunek 3.15f). Jest to tradycyjna metoda stosowana na mapach papierowych. Każdej linii przypisany jest atrybut wartości zmiennej.

3.2.3 Rastrowy model danych

Reprezentacja pól, a zwłaszcza pól zmiennych ilościowych, odbywa się przede wszystkim za pomocą modelu rastrowego. Jego strukturę przedstawia Rysunek 3.16.



Rys. 3.16 Struktura rastrowego modelu danych

Raster (grid) tworzy mozaikę prostokątnych komórek (najczęściej kwadratowych). Przykrywa ona cały badany obszar, a do każdej komórki przypisana jest jedna wartość zmiennej

reprezentatywna dla miejsca wyznaczonego w przestrzeni przez położenie komórki. Zmienna ta może mieć bardzo różnorodny charakter. W przypadku zdjęć lotniczych lub satelitarnych będzie ona opisywać barwę lub ilość dochodzącego promieniowania. Dla zdjęcia cyfrowego komórka jest jego najmniejszym elementem i nosi często nazwę piksel (*pixel*) od kombinacji słów angielskich *picture* i *element*. Ilość docierającej energii lub barwa może być traktowana ze względu na sposób pomiaru, jako wartość średnia komórki. Wiele map rastrowych powstaje w rezultacie interpolacji danych punktowych. W procesie tym estymowana jest wartość w środku każdej komórki, na podstawie znanych wartości w otaczających ją punktach. Istnieje specjalny rodzaj interpolacji [patrz podroz. 9.5.2], który estymuje wartość nie w punkcie, ale średnią dla jej całego obszaru. Przy tworzeniu warstw rastrowych pokrycia terenu, które najczęściej powstają na drodze klasyfikacji wielokanałowych zdjęć satelitarnych, do komórki przypisuje się klasę pokrycia terenu. Ze względu na to, że na jej obszarze może występować parę klas, zwykle wybiera się klasę przeważającą, rzadziej centralną (w punkcie jej środka). Wartość komórki może być wyrażona zarówno za pomocą liczby rzeczywistej, jak i całkowitej. Zmienne jakościowe (np. klasy pokrycia terenu) są najczęściej kodowane jako liczby całkowite. Specjalnym rodzajem mapy są tak zwane bitmapy (mapy binarne), których komórki przyjmują wartości 0 albo 1. Istnieje także szereg metod (zależnie od oprogramowania) zaznaczania braku danej w komórce [patrz ramka 5.1]. Wartości całkowite komórek mogą także pełnić rolę identyfikatorów dla tablicy atrybutowej.

Ramka 3.3

Formaty rastrowe w GIS

IMAGINE Image (IMG) jest formatem stosowanym w programie ERDAS. Jest kompatybilny z większością oprogramowania GIS (ArcGIS zarówno czyta go, jak i eksportuje), daje jednocześnie wysoki stopień kompresji bez utraty danych. Można w nim zapisywać liczby różnych typów oraz szereg kanałów. W pliku zawarty jest nagłówek zawierający informacje o położeniu rastra w przestrzeni. Jest to jeden z formatów rekomendowanych przez EEA (EEA, 2005).

Geographic Tag Image File Format (GeoTIFF) jest powszechnym formatem, akceptowanym przez większość programów GIS i analizy obrazu. Zawiera wbudowany nagłówek z informacją o lokalizacji. Podobnie jak poprzedni format umożliwia zapisywanie liczb różnych typów i szeregu kanałów (jest czytany i eksportowany przez ArcGIS). Jest to drugi format rastrowy rekomendowany przez EEA.

MrSID (Multiresolution Seamless Image Data) wykorzystuje metodę analizy falkowej do efektywnej kompresji bardzo dużych zbiorów rastrowych. Technologia opracowana została przez Lizard Tech.

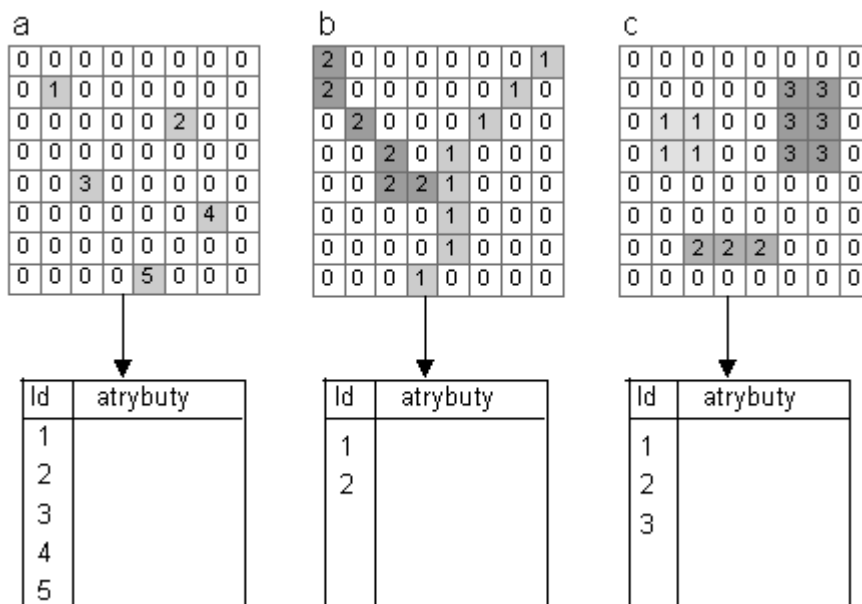
ESRI GRID (GRID) jest wewnętrznym formatem rastrowym w ArcGIS. Może zapisywać liczby różnych typów oraz szereg kanałów. Ma złożoną strukturę. Format składa się z katalogu o nazwie rastra zawierającego szereg plików. Pliki pomocnicze tworzone są na zewnątrz

katalogu. Format nie jest czytany przez inne programy. Do eksportu plików rastrowych ArcGIS używa specjalnego formatu eksportowego.

Podstawowym parametrem każdej struktury rastrowej jest rozdzielczość przestrzenna, określająca rozmiar geometryczny komórki. Opisuje się ją za pomocą długości boku komórki. Zdjęcie satelity Landsat (Rysunek 3.13 z prawej strony) ma rozdzielczość 15 m, co oznacza, że bok komórki (piksela) tego zdjęcia odpowiada 15 m w terenie. Raster jest strukturą płaską, opisaną w prostokątnym układzie współrzędnych, przy czym boki komórek są zwykle równoległe od osi współrzędnych. W rezultacie dla jednoznacznego określenia położenia struktury rastrowej w przestrzeni wystarczy podanie: (1) długości boków komórki lub rozdzielczości, (2) lokalizacji punktu początkowego (x_0, y_0) oraz (3) liczby wierszy i kolumn (Rysunek 3.16). Struktura rastrowa, może mieć charakter wielokanałowy i zawierać wiele warstw. Stosuje się to często przy zdjęciach lotniczych i satelitarnych. Jednym z podstawowych problemów danych rastrowych była zawsze ich duża objętość. Rozwiązaniem stały się różne metody kompresji danych. Istnieje szereg metod kompresji, ale generalnie można je podzielić na dwie podstawowe grupy. Pierwsza zachowuje wszystkie dane oryginalne, natomiast druga stara się zachować tylko najistotniejszą informację. W Ramce 3.3 przedstawiono podstawowe formaty danych rastrowych. Z wyjątkiem MrSID wymienione w niej formaty należą do pierwszej grupy i zachowują pełną informację.

Przedstawiona powyżej struktura rastrowa nosi nazwę rastra pełnego. Istnieją inne modele danych rastrowych. Jednym z nich jest model rastra hierarchicznego, w którym zastosowano zmienne rozmiary komórek, zagęszczając je na obszarach o większej liczbie szczegółów. Jednak to rozwiązanie nie zyskało powszechnej akceptacji i nie zostało zaimplementowane w najważniejszych współcześnie używanych programach.

Podobnie jak dane wektorowe mogą służyć do modelowania pól, tak i dane rastrowe mogą być wykorzystane do reprezentowania obiektów. Wartość komórki rastrowej pełni wtedy rolę

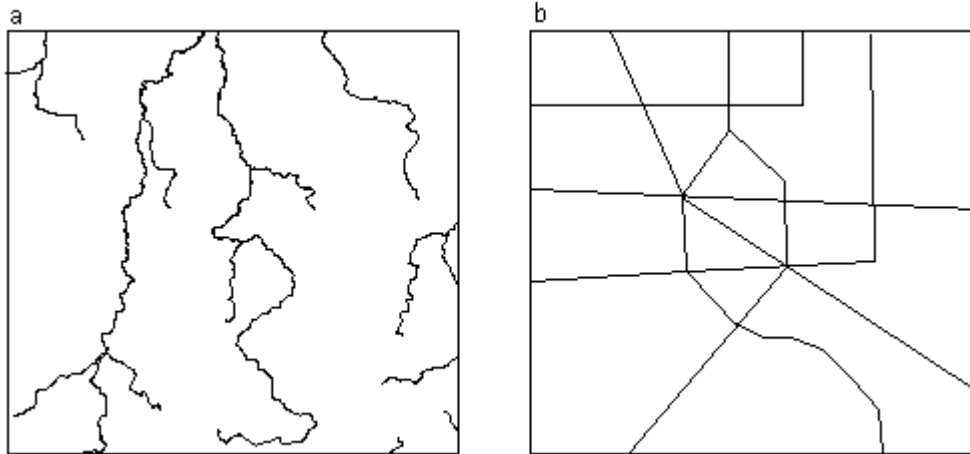


Rys. 3.17 Modelowanie obiektów za pomocą modelu rastrowego: a – punktów; b – linii; c – poligonów.

identyfikatora danego obiektu. Identyfikatorami mogą być wyłącznie liczby całkowite. Na Rysunku 3.17 przedstawiono rastrowy model trzech rodzajów obiektów. Punkty (Rysunek 3.17a) są w modelu rastrowym przedstawiane jako pojedyncze komórki z unikalnymi identyfikatorami (numerami). Każdy punkt jest reprezentowany w tablicy atrybutowej jako oddzielny rekord. W tablicy może być utworzonych szereg pól (dowolnego typu) zawierających atrybuty danego punktu. Linie (Rysunek 3.17b) są zapisywane jako grupy połączonych ze sobą komórek o takim samym identyfikatorze. W tablicy atrybutowej każdy identyfikator jest zapisany w oddzielnym rekordzie, dzięki temu całej grupie pikseli reprezentującej jeden obiekt odpowiada pojedynczy rekord. W podobny sposób tworzy się strukturę rastrową dla wieloboków. (Rysunek 3.17c). Mapy rastrowe obiektów mogą być uzyskane w procesie rasteryzacji danych wektorowych [patrz podroz. 5.7].

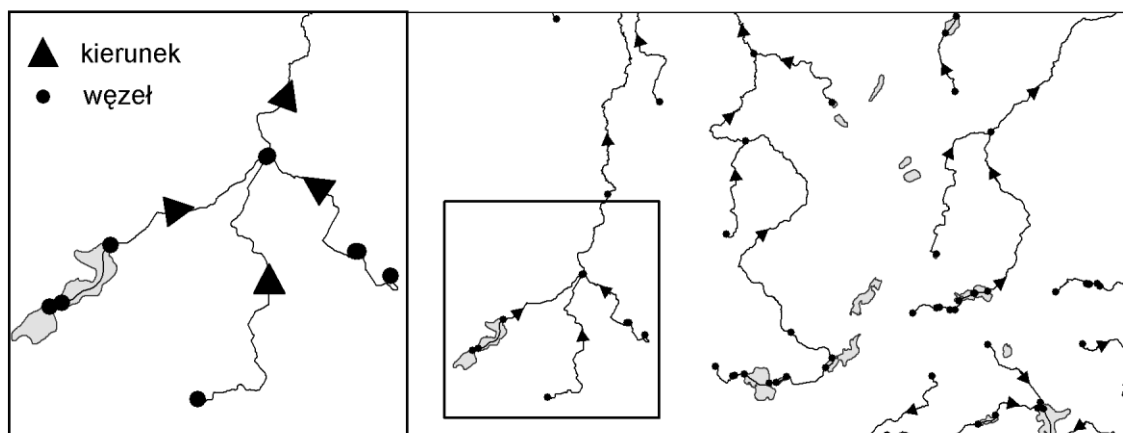
3.2.4 Wektorowy model sieci

Modele sieciowe służą do tworzenia reprezentacji sieci rzecznych, sieci ulic, czy nawet sieci „korytarzy ekologicznych”, którymi przemieszczają się dzikie zwierzęta na obszarach silnie przekształconych przez człowieka. Sieć tworzą połączone ze sobą odcinki linii. Istnieją dwie podstawowe możliwości ich połączenia (Rysunek 3.18). Pierwsze tworzy strukturę drzewiastą (*tree* lub *radial*) przypominającą gałęzie drzewa, system korzeniowy lub sieć rzeczną (Rysunek 3.18a).



Rys. 3.18 Dwie podstawowe formy struktury modelu sieciowego: a – drzewiasta; b – zapętlna

Podobnie jak w tych naturalnych systemach kierunek w takiej strukturze może być określony jako „z prądem” lub „pod prąd”. Brak jest także przecięć i skrzyżowań. Drugi rodzaj struktury (Rysunek 3.18b) ma sztuczny charakter, typowy dla ulic miasta lub sieci wodociągowej z przecięciami i zapętleniami (*loop* lub *circuit*). Model sieci składa się z warstwy linii, warstwy punktów i topologicznych relacji o wzajemnych relacjach tych elementów. W przedstawionym na Rysunku 3.19 modelu sieci rzecznej odcinki sieci, stanowiące oddzielne linie (*edges*) łączą się ze sobą w punktach połączeń lub węzłach (*junctions*). Informacja topologiczna zespala warstwę linii i punktów w jedną spójną strukturę. Relacja między liniowymi elementami sieci rzecznej a punktami określa, który punkt jest początkiem, a który końcem danego odcinka. Należy zwrócić uwagę, że dla zachowania ciągłości rzek w przypadku gdy przepływają przez jezioro, linia rzeki jest kontynuowana na jego obszarze.

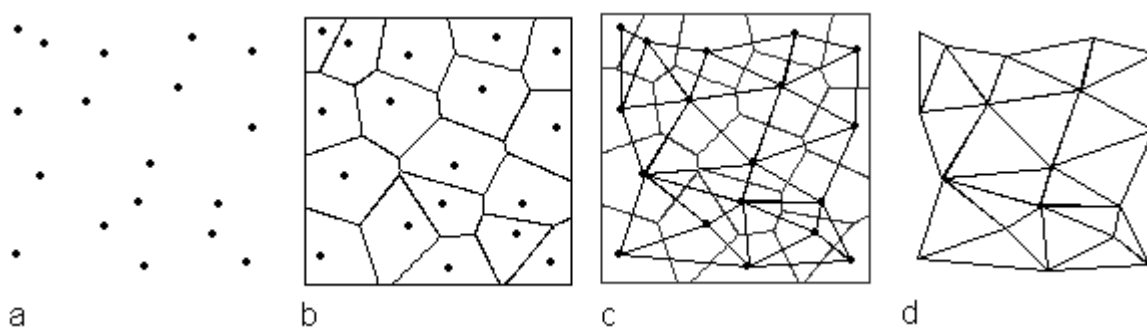


Rys. 3.19 Model sieci rzecznej.

Model sieciowy jest określony w przestrzeni dwuwymiarowej. Istnieje specjalny rodzaj modelu nazwany liniową referencją, który na liniach sieci tworzy jednowymiarowy układ odniesienia. Przykładowo może być on założony w taki sposób, aby wskazywał w każdym miejscu rzeki odległość do ujścia. Umiejscawianie obiektów w takim układzie odniesienia nosi nazwę dynamicznej segmentacji. Modele sieci i liniowej referencji są ściśle związane z danym rodzajem oprogramowania GIS i nie posiadają żadnej uniwersalnej struktury danych.

3.2.5 Wektorowy model TIN

TIN (*Triangulated Irregular Network*) służy głównie do modelowania topografii terenu. Zgodnie z nazwą tworzy go sieć nieregularnych trójkątów z wierzchołkami w punktach o znanej wysokości. Konstrukcja sieci odbywa się za pomocą triangulacji Delanuay (Rysunek 3.20).



Rys. 3.20 Konstrukcja modelu TIN za pomocą triangulacji Delanuay

Przebiega ona w następujący sposób: najpierw punkty z wartościami wysokości (Rysunek 20a) są otaczane poligonami Thiessena (Rysunek 20b), następnie punkty dla których wieloboki Thiessena posiadają wspólne krawędzie są ze sobą łączone (Rysunek 20c), w rezultacie powstaje siatka trójkątów. Model ten jest modelem topologicznym. Każdy trójkąt tej struktury danych posiada swój identyfikator. Topologia modelu polega na powiązaniu trójkątów z numerami jego wierzchołków i identyfikatorami sąsiednich trójkątów. W ten sposób, jeśli znany jest numer trójkąta, znane są numery jego sąsiadów i wierzchołków. Z kolei znając numer wierzchołka znany numer trójkąta. Znajomość tych relacji oraz możliwości zagęszczania sieci trójkątów w miejscach o bogatej rzeźbie jest wykorzystywana w trójwymiarowej wizualizacji terenu. Model ten nie jest jednak powszechnie wykorzystywany w naukowej analizie terenu czy modelowaniu ekologicznym. Podobnie jak model sieci i liniowej referencji sposób jego wykorzystania określa dane oprogramowanie.

3.3 POZYSKIWANIE DANYCH

3.3.1 Pomiary

Podstawą każdego projektu GIS są dane. Ich pozyskanie i przetworzenie do spójnej postaci tworzącej model danych jest często długotrwałym, kosztownym i wymagającym znacznych nakładów pracy procesem. Szacuje się, że w wielu projektach etap ten wymaga do 80% czasu i kosztów. Jednocześnie jest to etap decydujący o jakości końcowych rezultatów. Określenie rodzaju potrzebnych danych jest pierwszym krokiem w realizacji większości projektów. To jakie dane są potrzebne — wynika z celów badawczych projektu. Po pierwsze określają one obszar i skalę badań. Skala odnosi się zarówno do przestrzeni, jak i czasu. Z jednej strony określa ona wymaganą przestrzenną rozdzielczość danych i ich dokładność, z drugiej pożądaną i dopuszczalną czas ich pozyskania. Po drugie określają rodzaj potrzebnych danych przestrzennych. Gdy określony jest obszar, rodzaj danych oraz skala przestrzenna i czasowa następuje etap ewaluacji możliwości zdobycia tych danych. Istnieją trzy podstawowe sposoby pozyskiwania danych. Pierwszy polega na utworzeniu ich we własnym zakresie na drodze pomiarów terenowych. Tego typu dane noszą często nazwę danych pierwotnych. Ich ogromną zaletą jest to, że o ich rodzaju, dokładności i czasie pomiaru decyduje prowadzący badania. Dzięki temu jest on w stanie poznać wszystkie ich słabe i mocne punkty, oraz przeprowadzić ich szczegółową analizę z punktu widzenia stawianych założeń i hipotez, co ma oczywiście bardzo istotne znaczenie w pracy badawczej. Z tego też powodu w projektach badawczych dane podstawowe są często pozyskiwane na drodze pomiarów. Od GIS oczekuje się natomiast możliwości powiązania tych danych z danymi pomocniczymi charakteryzującymi środowisko. Drugą możliwością pozyskania danych jest zakup lub wykorzystanie danych oferowanych bezpłatnie, które zostały specjalnie przystosowane do pracy z GIS (dane wtórne). W jednym z następujących podrozdziałów przedstawione zostaną aktualnie dostępne (2006), bezpłatne dane GIS pokrywające całą Polskę, które mogą być z powodzeniem wykorzystywane jako dane pomocnicze. Wreszcie ostatnią możliwością jest wykorzystanie danych przestrzennych analogowych (np. map papierowych), cyfrowych nie posiadających dowiązania przestrzennego (np. skanów map papierowych) lub danych atrybutowych (analogowych lub cyfrowych), które mogą być odniesione przestrzennie. Aby dostosować te materiały do pracy w GIS niezbędnych jest szereg kroków, które zostaną opisane w kolejnym podrozdziale.

Ramka 3.4

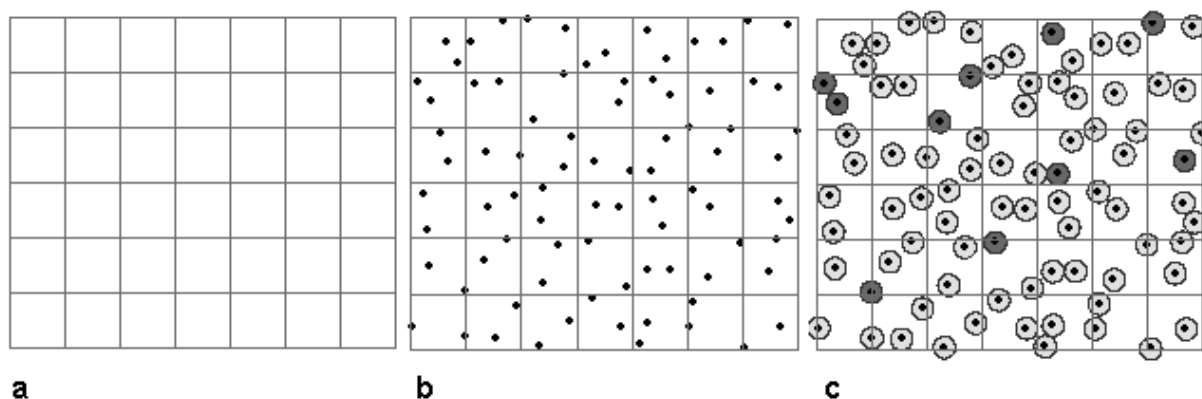
Próbkowanie w ArcGIS z wykorzystaniem Hawth's Analysis Tools

<http://www.spataleecology.com/htools>

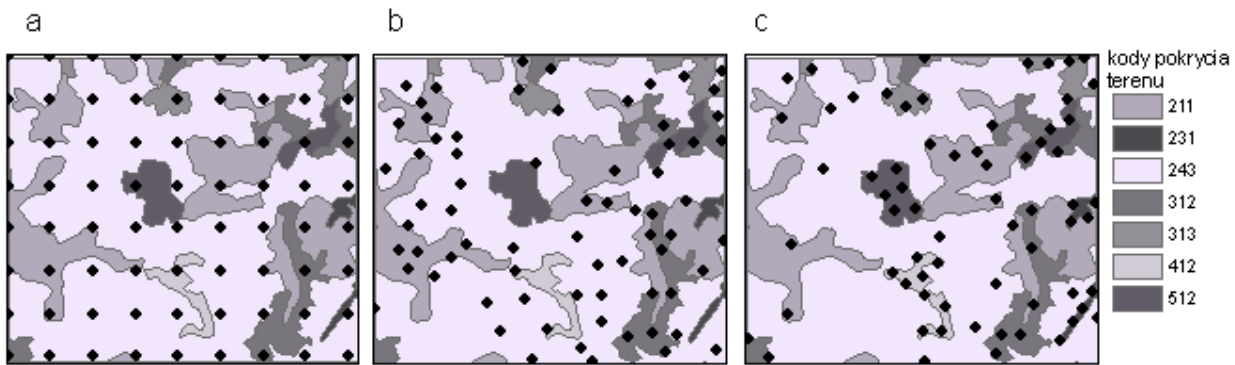
(10.2006) Version 3.26

Hawth's Analysis Tools jest bezpłatnym rozszerzeniem zawierającym szereg narzędzi do ArcGIS stworzonym przez Hawthorne L. Beyera. Powstało ono w celu uzupełnienia funkcjonalności ArcGIS o podstawowe operacje statystyczne i analizy przestrzennej, potrzebne w badaniach ekologicznych. Zawiera ono zbiór narzędzi do próbkowania (**Sampling Tools**), które umożliwiają szereg wariantów tego procesu. Łączenie tych operacji ze sobą daje jeszcze większą swobodę realizacji potrzebnego scenariusza.

Na rysunku poniżej pokazano przykład wykorzystania szeregu narzędzi. Najpierw za pomocą **Create Vector Grid** (Utwórz siatkę wektorową) na obszarze badań została stworzona siatka kwadratów o boku 1 km (a), przy czym każdy kwadrat jest oddzielnym poligonem. Następnie za pomocą **Create Random Points** (Utwórz punkty losowo) z opcją stratyfikacji wylosowano po dwa punkty w każdym kwadracie siatki, z ograniczeniem, że nie leżą one bliżej siebie niż 400 m (b). W kolejnym kroku za pomocą **Create Sample Plots** (Utwórz obszar próbkowania) utworzono koła o promieniu 200 m naokoło każdego z punktów. Dodatkowo wybrano za pomocą **Create Random Selection** (Wybierz losowo) 10 obszarów próbkowania.



W przeważającej liczbie projektów dane pomiarowe mają charakter punktowy. Istnieją dwa podstawowe scenariusze pobierania takich danych w terenie. W pierwszym tworzy się punkt pomiarowy na podstawie obserwacji występowania danego zjawiska w terenie (np. miejsca uderzenia pioruna lub stwierdzenia występowania danego gatunku). Drugi scenariusz polega na próbkowaniu obszaru badań. Wymaga to obiektywnego wyboru punktów pomiarowych przed prowadzeniem badań terenowych. Istnieją trzy podstawowe metody wyboru punktów: regularna, losowa i losowa-stratyfikowana.



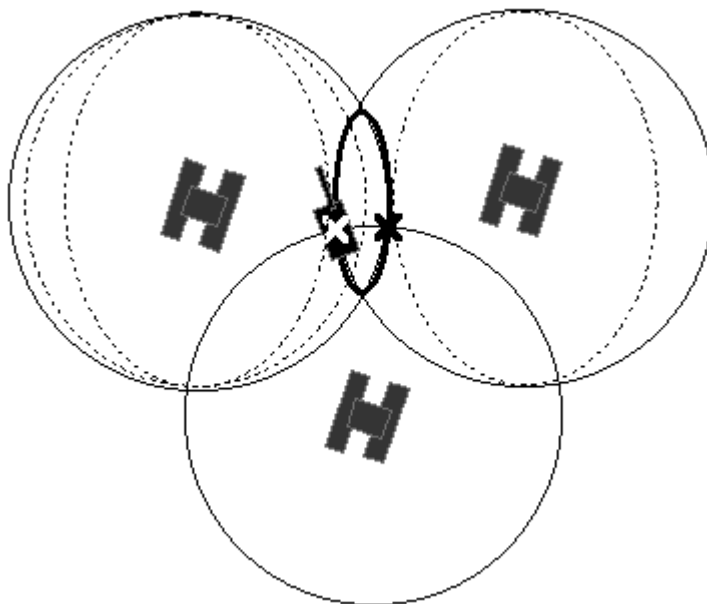
Rys. 3.21 Metody wyboru punktów pomiarowych: a – regularna; b – losowa; c – losowa-stratyfikowana.

W metodzie regularnej (Rysunek 3.21a) na obszarze badań generuje się siatkę punktów o stałym odstępach wzdłuż osi x i y . W dwóch pozostałych metodach położenie punktów jest wyznaczone losowo. W metodzie losowej (Rysunek 3.21b) jedynym ograniczeniem może być wymaganie, aby odległość między punktami była większa od zadanej wartości i punkty nie występowały na obszarze pewnych poligonów (np. na jeziorach). Metoda losowa-stratyfikowana pozwala na umieszczanie równych ilości punktów w różnych strefach o nierównej powierzchni. Na Rysunku 3.21c punkty wyznaczone są na obszarze o siedmiu klasach pokrycia terenu, przy czym poszczególne klasy zajmują różne powierzchnie. Metoda została wykorzystana do losowego wyznaczenia dziesięci punktów w każdej z klas. W rzeczywistości punktów jest nieco mniej, gdyż wprowadzone ograniczenie co do najmniejszej akceptowalnej odległości uniemożliwiło uzyskanie takiej liczby punktów na niektórych obszarach. Metoda stratyfikowana może być także wykorzystana do bardziej regularnego rozmieszczenia punktów losowych niż na Rysunku 3.20b oraz do tworzenia różnej liczby punktów dla każdej z klas pokrycia terenu. Punkty losowe mogą być także wyznaczone na transektach. Niektóre praktyczne aspekty wyznaczania punktów pomiarowych zostały przedstawione w Ramce 3.4.

3.3.2 GPS – Globalny system określania pozycji

Obecnie wykonywanie pomiarów terenowych wiąże się bardzo często z wykorzystaniem do określenia pozycji systemu GPS. W niedalekiej przyszłości jego odpowiednikiem w Europie stanie się system Galileo. GPS, jak mało które urządzenie, zrewolucjonizował pracę terenową w naukach przyrodniczych, pozwalając na szybkie, w miarę dokładne i tanie określenie pozycji. GPS (*Global Positioning System*) składa się z ponad dwudziestu satelitów okrążających Ziemię dwa razy na dobę po odległych orbitach, oddalonych od powierzchni Ziemi o około 20 tys. km. Satelity te wysyłają sygnał radiowy, który jest odbierany przez odbiornik GPS. Wykorzystując ten sygnał, znaną pozycję danego satelity i prędkość światła program zawarty w odbiorniku oblicza odległość do satelity. Po wyznaczeniu odległości do pierwszego satelity, pozycja

odbiornika znajduje się w nieokreślonym miejscu otaczającej go sfery. Wyznaczenie odległości do drugiego satelity daje dwie sfery, których przecięcie daje okrąg, na którym znajduje się odbiornik. Kolejna sfera, powstała w rezultacie pomiaru do trzeciego satelity przecina okrąg w dwóch punktach. Jeden z nich może być odrzucony (leży poza powierzchnią Ziemi), a drugi stanowi poszukiwaną pozycję (Rysunek 3.22). Do wyznaczenia wysokości niezbędny jest czwarty satelita.



Rys. 3.22 Zasada wyznaczania pozycji w systemie GPS w oparciu o pomiar odległości do trzech satelitów.

Aby system mógł działać niezbędny jest bardzo dokładny pomiar czasu jaki upłynął od wysłania sygnału z satelity do momentu jego odbioru. Obecnie proste urządzenia GPS (w cenie kilkuset złotych) posiadają średnią dokładność poziomą rzędu 10 metrów i pionową rzędu kilkudziesięciu metrów. Urządzenia droższe, w zależności od zastosowanych rozwiązań technicznych, posiadają większe dokładności, aż do standardów geodezyjnych. Rozwiązaniem zwiększającym dokładność pomiaru poziomego do rzędu 1 metra jest DGPS (*Differential GPS*), czyli różnicowy GPS. Wykorzystuje on poprawki przysyłane drogą radiową ze stałej stacji, znajdującej się w pobliżu, która odbiera sygnały GPS i określa różnicę pomiędzy wyliczoną z tych sygnałów pozycją, a pozycją prawdziwą. Rzeczywista dokładność określania pozycji zależy także od układu satelitów i obszaru widocznego nieba. Drzewa czy wysokie budynki mogą stanowić przeszkodę w pomiarach, a pod mostami czy we wnętrzu budynku sygnał najczęściej zanika. Jednym ze sposobów wykonywania dokładniejszych pomiarów jest ich powtarzanie i wyliczanie pozycji średniej (średnia powinna być wyznaczana z co najmniej 50 pomiarów). W praktyce pomiary pozycji są wykonywane w układzie odniesienia WGS84 i

współrzędnych geograficznych, które to parametry są opcjonalnymi ustawieniami większości urządzeń.

Pomiary wykonywane za pomocą GPS mogą być integrowane z GIS w dwojaki sposób. Pierwszy polega na zapisaniu współrzędnych i numerów punktów w postaci pliku tekstowego zawierającego każdą pozycję w oddzielnym wierszu, np w postaci: X,Y,Numer_punktu . Należy pamiętać, aby współrzędne były zapisywane w stopniach jako liczby dziesiętne o odpowiedniej dokładności (liczbie cyfr po przecinku). Następnie z tak przygotowanego pliku lub z utworzonej z niego tablicy w bazie danych, tworzymy w GIS wektorowy plik punktowy. W oparciu o plik punktowy można następnie utworzyć linie lub wieloboki za pomocą narzędzi edycji lub innych specjalnie do tego celu przeznaczonych narzędzi (Ramka 3.10). GPS może być także połączony ze specjalnym GIS pracującym na palmtopie (np. ArcPad) i przeznaczonym głównie do zapisywania danych w terenie. Umożliwia to edycję i tworzenie dowolnych warstw wektorowych od razu na miejscu.

W naukowych projektach GIS przyrządy geodezyjne są czasem wykorzystywane przy zbieraniu danych do tworzenia szczegółowych map wysokościowych. Obecnie stosowane teodolity pozwalają na zapisywanie w pamięci dużej liczby pomiarów w dowolnym prostokątnym układzie współrzędnych, w którym przyrząd został zorientowany. Po zakończeniu pomiarów dane są kopiowane np. jako dane tekstowe do pamięci komputera, a następnie eksportowane do GIS, gdzie tworzy się z nich plik punktowy wysokości.

3.3.3 Cyfrowe dane przestrzenne dla Polski

Ilość danych, które można pozyskać do pracy w GIS zwiększa się z roku na rok. Jeszcze dziesięć lat temu większość przedstawionych poniżej zbiorów danych nie istniała w ogóle lub istniała w znacznie uboższej formie. Omówione zostaną dane obejmujące całą Polskę przydatne do prac w skalach przestrzennych odpowiadających skali 1:50000 i mniejszych. Dane te pochodzą ze zbiorów tworzonych dla całego globu, Europy lub tylko Polski i obejmują podstawową informację o środowisku przyrodniczym potrzebną w wielu projektach. Niewątpliwą zaletą tych map jest fakt, że można je otrzymać za darmo lub po bardzo niskich cenach. Dane w większych skalach zostaną omówione bardziej ogólnie. Są one, tak jak zdjęcia satelitarne o wysokiej rozdzielczości, często bardzo kosztowne, natomiast dane dostępne w Wojewódzkich Ośrodkach Dokumentacji Geodezyjnej i Kartograficznej różnią się w zależności od województwa. Dane wtórne gotowe do wykorzystania w GIS mogą mieć charakter zorientowanych w przestrzeni danych wektorowych lub rastrowych, udostępnianych w jednym ze standardowych formatów wymiany danych [patrz ramki 3.2 i 3.3]. Dane rastrowe mogą przedstawiać zarówno zmienne ilościowe (np. wysokość) jak i jakościowe (np. klasy

pokrycia terenu). Ich szczególnym rodzajem są zdjęcia lotnicze i satelitarne. Do danych wtórnych można zaliczyć także dane atrybutowe o charakterze statystycznym lub monitoringowym, odnoszące się do obiektów przestrzennych (np. gmin czy rzek).

Trzy podstawowe rodzaje informacji o środowisku, niezbędne w wielu pracach badawczych, to ukształtowanie terenu (mapa wysokościowa), pokrycie terenu i wody. Komputerowa Mapa Podziału Hydrograficznego Polski (MPHP wykonana przez Ośrodek Zasobów Wodnych Instytutu Meteorologii i Gospodarki Wodnej) zawiera wektorową bazę danych rzek, zbiorników wodnych i elementarnych zlewni (Ramka 3.5). Mapa została wykonana na podstawie map topograficznych w skali 1:50000 oraz różnorodnych materiałów dodatkowych. Jest to jednolita ciągła baza danych hydrograficznych przeznaczona między innymi do realizacji zadań Ramowej Dyrektywy Wodnej. Obejmuje cały obszar kraju łącznie z częściami dorzecza Wisły i Odry położonymi za granicami. Cyfrowa mapa *Corine land cover* 2000 jest wektorową bazą danych pokrycia terenu państw Unii Europejskiej (Ramka 3.6). Główne powody podjęcia tego projektu, który został zrealizowany w latach 1999-2003, zostały przedstawione w tabeli 3.4

Tab. 3.4 Wykorzystanie map pokrycia terenu Corine2000 (zmienione, Nunes de Lima, 2005)

Cele	Informacja związana z pokryciem terenu
Ocena wpływu polityki rolnej na środowisko	Zmiany pokrycia terenu. Wskaźniki krajobrazu (<i>landscape indicators</i>). Analiza zlewni (zużycie wody, spływ nawozów). Ochrona gleb.
Zintegrowane zarządzanie strefą brzegową morza	Zmiany wykorzystania i pokrycia terenu wzdłuż brzegów morskich.
Wprowadzanie różnych form ochrony przyrody	System NATURA2000 Tworzenie map habitatów. Zmiany wykorzystania i pokrycia terenu. Fragmentacja habitatów. Antropopresja na obszary chronione.
Zintegrowana analiza zlewni	Ramowa dyrektywa wodna (wskaźniki zlewni).
Ocena emisji zanieczyszczeń do atmosfery	Bilans CO ₂ (pochłanianie / źródła). Rodzaje pokrycia terenu w rejonach stacji pomiarowych. Powiązanie parametrów jakości powietrza z pokryciem terenu.
Wpływ na środowisko europejskiej sieci drogowej	Fragmentacja habitatów. Presja na obszary chronione.

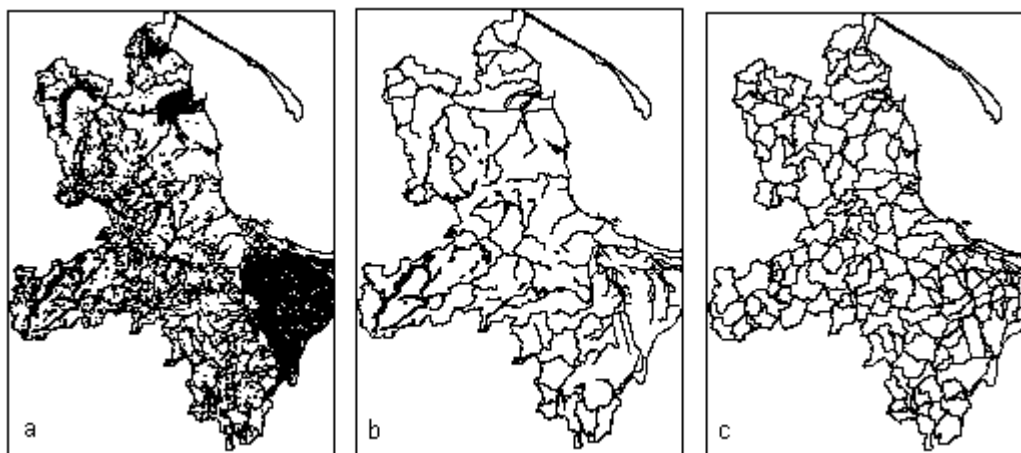
Ramka 3.5

Komputerowa mapa podziału hydrograficznego Polski (MPHP)

http://www.imgw.pl/wl/internet/zz/zz_xpages/hydrografia/zasoby_wodne_pliki/hydrografia.html
(10.2006)

Opracowanie jest udostępniane bezpłatnie w imieniu Ministra Środowiska (Właściciela) przez:
Biuro Gospodarki Wodnej, ul. Dubois 9, 00-182 Warszawa, tel. (22) 635 48 84 w. 262

Komputerowa mapa podziału hydrograficznego Polski (MPHP) jest wektorową bazą danych obejmującą rzeki, zlewnie i zbiorniki. Mapa została wykonana na poziomie dokładności odpowiadającej skali 1:50000. Dane dostępne są dla wybranego obszaru i dostarczane jako warstwy zbiorów obiektów (SHP) w układzie współrzędnych „1992”. Wszystkie dane można podzielić na dwie grupy. W grupie pierwszej tzw. obiektów wyróżnionych zapisana jest informacja topologiczna wiążąca je wzajemnie ze sobą. Drugą grupę stanowią obiekty pozostałe (cieki i zbiorniki mniejszej rangi) nie mające topologicznego odniesienia. Pod względem logicznym mapa dzieli się na warstwy i zbiory obiektów (pliki SHP). W warstwie o nazwie obszarowe jednostki hydrograficzne znajdują się następujące zbiory: zlewnie elementarne (poligony), działki wodne (linie) i węzły na działkach wodnych (punkty). Każdej zlewni elementarnej przypisany jest identyfikator hydrograficzny zlewni (ID_HYD typu double). Drugą warstwę stanowią cieki wyróżnione. Obejmuje ona trzy zbiory: odcinki cieków (linie), do których przypisany jest identyfikator ID_HYD (odcinek cieku jest związany z jedną zlewnią elementarną); cieki (linie) obejmujące całe cieki z przypisanym identyfikatorem (ID_HYD_R typu double); zbiór z węzłami na ciekach (punkty). Kolejną warstwą są zbiorniki wyróżnione. Obejmują one zbiory: zbiorniki wodne (z przypisanym identyfikatorem ID_HYD) oraz szerokie rzeki. Oba zbiory zawierają poligony. Ostatnie dwie warstwy obejmują obiekty pozostałe. Są to zbiory, pozostałe cieki i pozostałe zbiorniki.



Rys. 3.23 Fragment cyfrowej mapy hydrograficznej Polski: a – wszystkie rzeki i jeziora; b – rzeki i jeziora wyróżnione, które tworzą sieć wodną i są związane ze sobą i zlewniami elementarnymi; c – zlewnie elementarne.

Aby móc wykorzystywać ten zbiór danych konieczne jest zrozumienie praktycznego znaczenia identyfikatorów ID_HYD i ID_HYD_R. Identyfikator ID_HYD zlewni elementarnej jest liczbą, której kolejne cyfry tworzone są w następujący sposób. Pierwsza cyfra oznacza numer jednostki hydrograficznej najwyższego rzędu – obszaru (od 1 do 9). Pierwsza plus jedna lub parę kolejnych cyfr dają numer całej zlewni danej rzeki, który odpowiada identyfikatorowi hydrograficznemu danego cieku (ID_HYD_R). Jeżeli nie jest to zlewnia elementarna to kolejne cyfry wprowadzają jej dalszy podział, aż do rzędu zlewni elementarnej.

Aby wydzielić z mapy zlewnię danej rzeki należy połączyć wszystkie zlewnie elementarne o identyfikatorze ID_HYD będącym rozwinięciem identyfikatora ID_HYD_R (np. ID_HYD_R dla Raduni = 4868, to połączyć należy ID_HYD = {4868, 4868□, 4868□□, 486□□□, 486□□□□ itd.}). Jednym z uniwersalnych rozwiązań jest przydzielenie każdej zlewni elementarnej identyfikatorów zlewni wszystkich poziomów do których ona należy. Można to wykonać w ArcGIS za pomocą skryptu wypełniającego nowe kolumny (typu long – I_HYD3, I_HYD4, I_HYD5 itd.) w tablicy atrybutowej pliku zlewni elementarnych.

' Wpisuje w I_HYDn kody o zadanej długości (poziomie zlewni) 3-9 przykład dla I_HYD4

Dim d as long

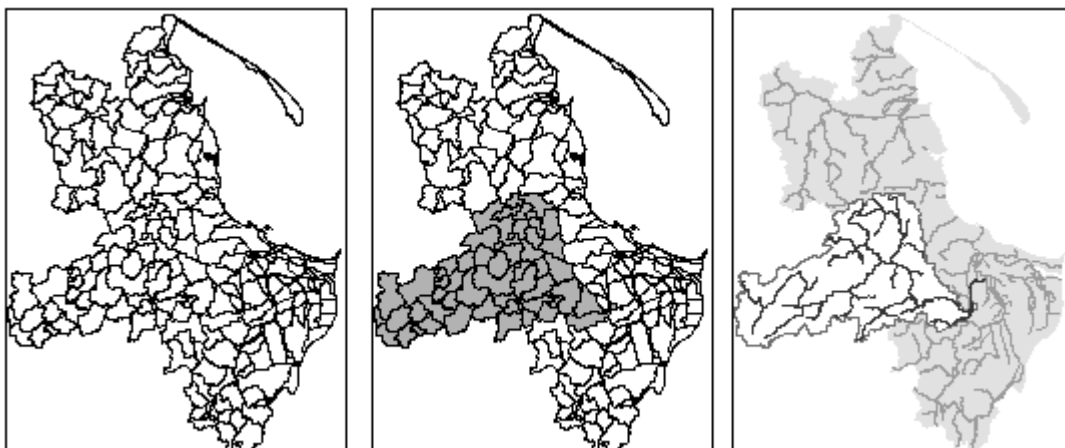
```

Dim cyfr as long
'dla 3 cyfr = 1000000, dla 4 cyfr=100000, dla 5 cyfr=10000,
'dla 6 cyfr = 1000, dla 7 cyfr = 100, dla 8 cyfr =10, dla 9 cyfr = 1
cyfr = 100000 ' Wpisz odpowiednia wartosc zaleznie od poziomu - kolumny !!!!
d=1
if ([ID_HYD] <100000000) then d=10
if ([ID_HYD] <10000000) then d=100
if ([ID_HYD] <1000000) then d=1000
if ([ID_HYD] <100000) then d=10000
if ([ID_HYD] <10000) then d=100000
if ([ID_HYD] <1000) then d=1000000

__esri_field_calculator_splitter__
INT([ID_HYD]*d/cyfr)

```

Wybranie rekordów, które w I_HYD4 będą miały wartość 4868, spowoduje zaznaczenie wszystkich zlewni elementarnych należących do zlewni rzeki Raduni. Połączenie tych zlewni w jeden poligon utworzy zlewnię Raduni i pozwoli na wybranie rzek, które się w niej znajdują (Rysunek 3.24).



Rys. 3.24 Cyfrowa mapa hydrograficzna Polski. Połączenie zlewni elementarnych w jeden poligon określa zlewnię danej rzeki i umożliwia wybranie rzek należących do tej zlewni .

Mapa, odpowiadająca pod względem szczegółowości skali 1:100000, została wykonana na podstawie klasyfikacji zdjęć satelitarnych Landsat 7 ETM+ (do ich korekcji geometrycznej wykorzystano cyfrową mapę terenu o rozdzielczości przestrzennej 90 m). Obszar Polski został pokryty 28 zdjęciami, wykonanymi w latach 1999-2001, przy czym około 60% z nich wykonano latem 2000 roku. Dokładność przestrzenna dla Polski wyniosła od 12 do 20m. Użyto hierarchicznego systemu klasyfikacyjnego (44 klasy na trzecim poziomie hierarchii). Projekt był powiązany z podobnym przedsięwzięciem z 1990 roku i jego celem było między innymi wyznaczenie zmian w pokryciu terenu w ciągu 10 lat.

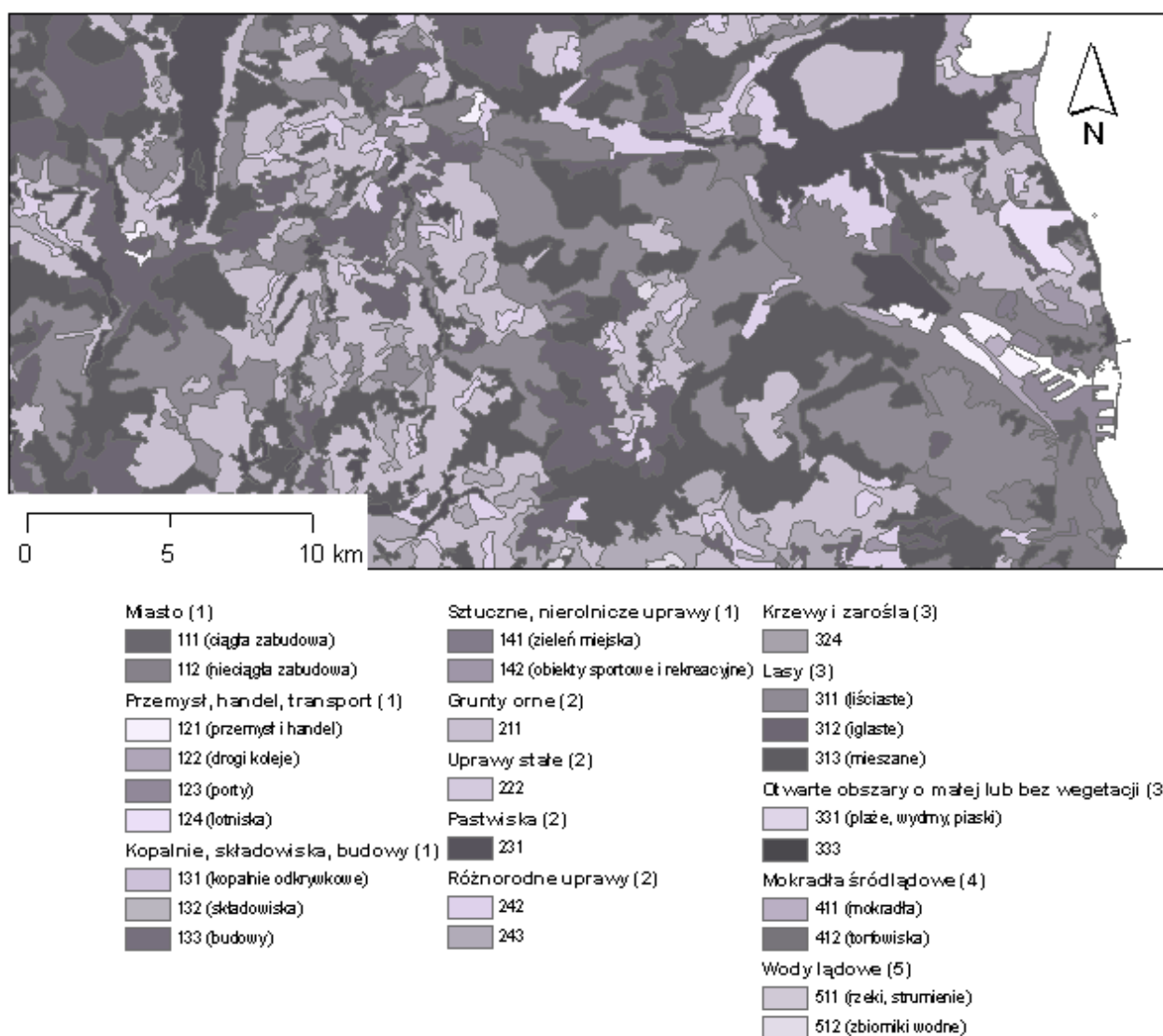
Ramka 3.6

Cyfrowa mapa pokrycia terenu Polski – Corine 2000

<http://dataservice.eea.europa.eu/dataservice/metadetails.asp?id=950>

(10.2006)

Mapa (dla Polski) jest udostępniana bezpłatnie po otrzymaniu zgody ze strony polskiej jako plik (SHP). Zawiera obiekty o powierzchni większej od 25 ha i minimalnej szerokości większej od 100 m. Na Rysunku 3.25 przedstawiono wycinek mapy wraz z legendą obrazującą hierarchię systemu klasyfikacyjnego. Na poziomie pierwszym (globalnym) znajduje się 5 klas: (1) powierzchnie sztuczne, (2) obszary rolnicze, (3) lasy i obszary częściowo naturalne, (4) mokradła i bagna, (5) zbiorniki wodne (liczby w nawiasach przy tytułach grup w legendzie oznaczają numer klasy na pierwszym poziomie). Tytuły grup reprezentują drugi poziom klasyfikacji (15 klas). Poziom trzeci reprezentują klasy wewnątrz grup.



Rys. 3.25 Wektorowa mapa pokrycia powierzchni Polski Corine 2000 (wycinek)

Mapa ukształtowania terenu pełni szczególną rolę w badaniach środowiska przyrodniczego [patrz rozdział 6]. Jest ona tworzona jako mapa rastrowa albo wektorowa za pomocą modelu danych TIN. O jej roli może świadczyć fakt, że była ona wykorzystywana w większości artykułów cytowanych w rozdziale drugim. Obecnie istnieje w Polsce kilka zbiorów danych określanych jako numeryczna mapa terenu. Z punktu widzenia potrzeb nauk przyrodniczych, jak i dostępności danych (pokrycie całego kraju), praktyczne znaczenie mają dwie mapy cyfrowe: DTED Level 2 i SRTM. Prawdopodobnie coraz większe znaczenie będzie zyskiwała także mapa tworzona w ramach opracowania bazy danych Systemu Identyfikacji Działek Rolnych (LPIS) w modelu TIN. Mapy DTED (*Digital Terrain Elevation Data*) są standardem w krajach NATO i dla obszaru Polski zostały wykonane przez służby kartograficzne naszego wojska. Mapy te są przygotowywane na różnych poziomach szczegółowości, który opisywany jest przez ich poziom. Poziom drugi (Level 2) oznacza, że mapa została wykonana na poziomie szczegółów odpowiadających mapie 1:50000. Powstała ona ze skanowania map topograficznych w skali 1:50000 i 1:25000. Dokładność pozioma wynosi ok. 16 m, a pionowa zależy od ukształtowania terenu. Dla obszarów równinnych jest ona rzędu 2 m, dla pagórkowatych i falistych 4 m, a dla górzystych 7 m. Mapa cyfrowa SRTM powstała w rezultacie misji wahadłowca Endeavor zorganizowanej w 2000 roku (11-22 luty) przez NASA (*National Aeronautics and Space Administration*) i NGA (*National Geospatial – Intelligence Agency*). Celem misji było stworzenie trójwymiarowej mapy powierzchni Ziemi o dużej rozdzielczości przestrzennej. Podczas misji zebrano dane o 80% powierzchni Ziemi (60N – 56S). Pomiary były wykonane za pomocą techniki zwanej interferometrią. Polega ona na tworzeniu dwóch obrazów radarowych wykorzystując anteny oddalone od siebie, w przypadku wahadłowca odległość między nimi wynosiła około 60 m, dla otrzymania obrazu trójwymiarowego. Z obrazu takiego można następnie wyznaczyć wysokość. Zebrane surowe dane (12 terabajtów) zostały przetworzone w NASA *Jet Propulsion Laboratory*. Proces tworzenia map cyfrowych z tych danych był dość złożony i w rezultacie stopniowo udostępniano coraz doskonalsze produkty. Najbardziej dokładne mapy o rozdzielczości 1 sekundy zostały przygotowane i udostępnione dla obszaru Stanów Zjednoczonych. Globalne pokrycie zostało wykonane z rozdzielczością 3 sekund (stąd ten produkt nosi często nazwę SRTM 3). W przypadku Polski oznacza to wielkość piksela 60 x 90 m. Początkowe wersje tego produktu zawierały wiele zakłóceń powierzchni (tzw. *spikes and wells*) oraz obszary z brakiem danych. Obecnie udostępniona wersja tego produktu została w znacznym stopniu pozbawiona tego rodzaju błędów, między innymi przez wykorzystanie w jej korekcie innych globalnych map cyfrowych.

Ramka 3.7

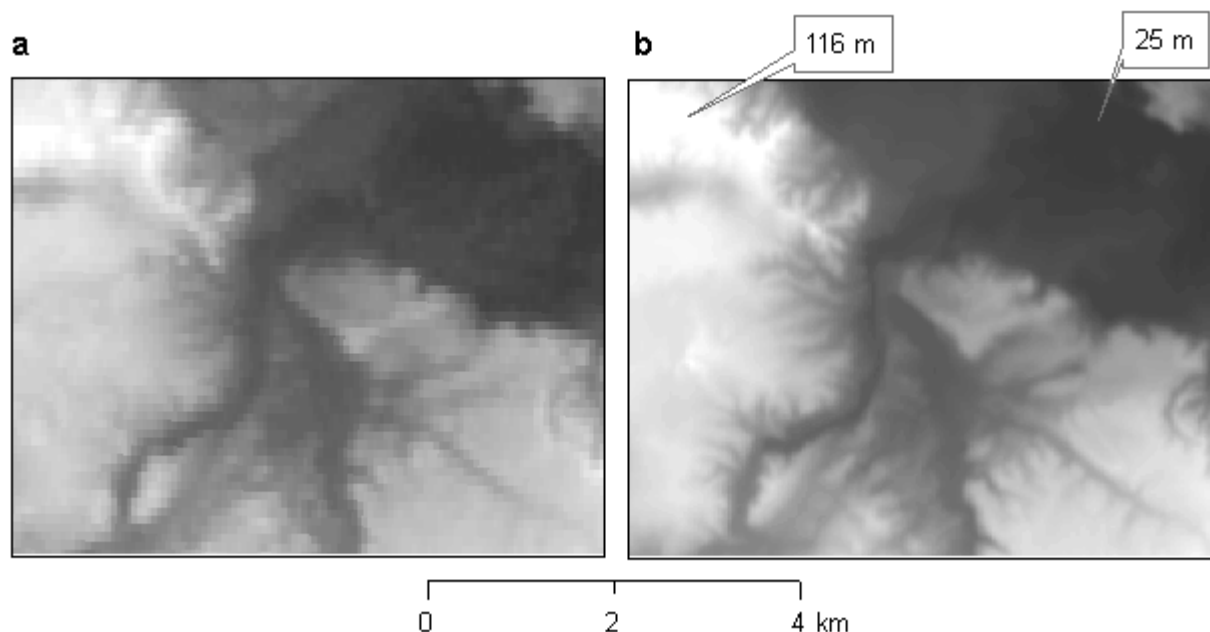
Numeryczne mapy terenu Polski (DTED 2, SRTM)

<http://www.codgik.waw.pl> (DTED 2)
(10.2005)

<http://srtm.csi.cgiar.org> (SRTM)
(10.2006)

Mapa DTED 2 rozprowadzana jest odpłatnie (obszar 50x50 km w 2005 roku dla szkoły wyższej kosztował około 100 zł) przez Centralny Ośrodek Dokumentacji Geodezyjnej i Kartograficznej (CUGIK) ul Olbrachta 94, 01-102 Warszawa. Mapa dostarczana jest w formacie rastrowym (ESRI GRID) w układzie współrzędnych UTM (WGS84) albo 1992. Rozdzielczość przestrzenna wynosi 15 m. Mapa zawiera wartości całkowite.

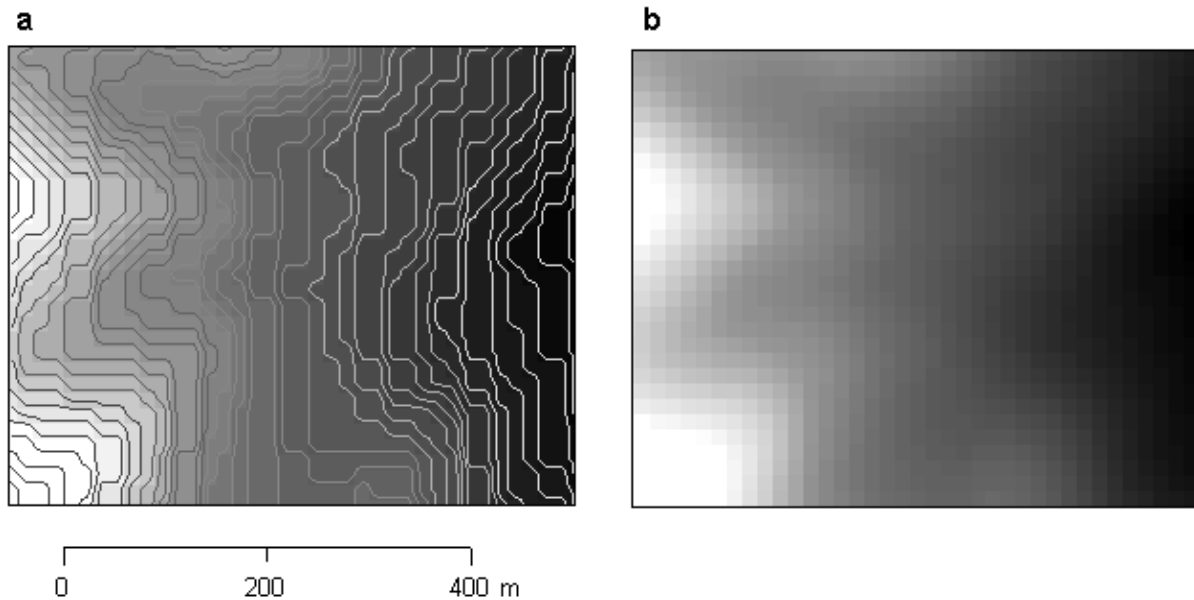
Mapa SRTM 3 (wersja 3) jest udostępniana bezpłatnie z portalu CGIAR-CSI (CGIAR Consortium for Spatial Information) pod pełną nazwą CGIAR-CSI SRTM version 3 (3-arc second product). Oferowany jest format GeoTIFF w układzie odniesienia WGS84. Mapa zawiera wartości całkowite, komórki z brakiem danych posiadają wartość -32768. Na Rysunku 3.25 porównano wycinki mapy SRTM 3 (a) i DTED 2 (b).



Rys. 3.26 Numeryczne mapy terenu Polski: a – SRTM 3 (rozmiar komórki 60 x 90 m); b – DTED 2 (rozmiar komórki 15 m).

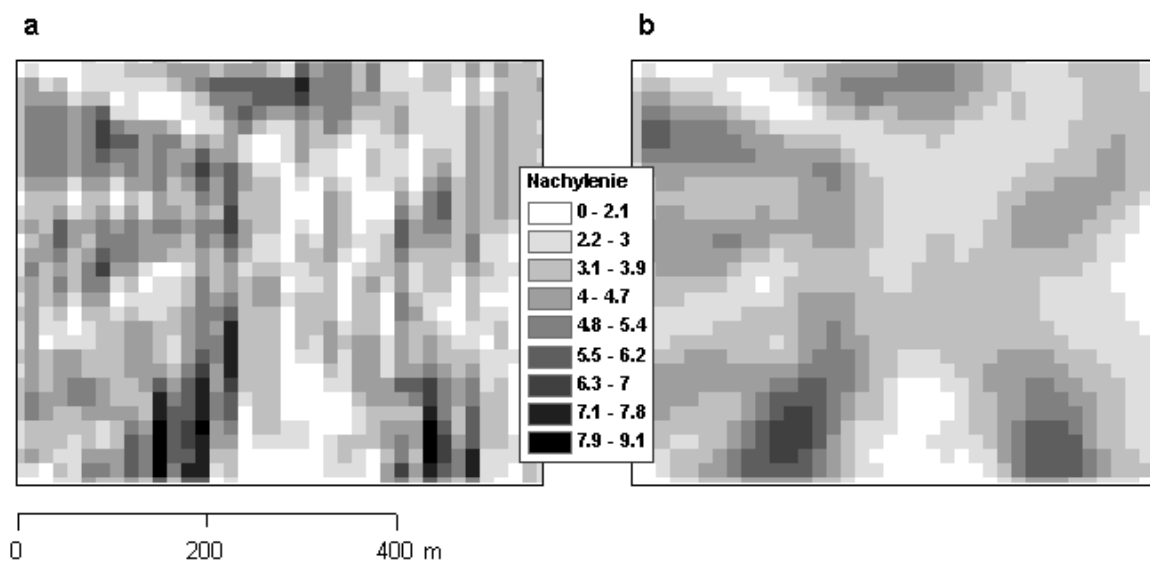
Ze względu na to, że mapy zawierają tylko wartości całkowite (*integer*), a rozmiar komórki na mapie DTED 2 wynosi 15 m, wysokość zmienia się na niej w sposób skokowy (jak schody o szerokich stopniach, widoczne jest to na Rysunku 3.27a). Ze względu na znacznie większe komórki (60 x 90 m) w mniejszym stopniu dotyczy to mapy SRTM. Na mapie DTED 2 obszar pomiędzy poziomą zero (brzeg morski), a jeden metr ma wartość 0, pomiędzy poziomą jeden metr i dwa metry ma wartość 1 itd. W celu zapewnienia ciągłości DTED 2 należy przeprowadzić jej transformację do wartości rzeczywistych (ang. *real* lub *double*). Proponowana procedura polega na dodaniu do każdej komórki mapy DTED 2 wartości 0,5 i następnie z tak

przetworzonej mapy utworzenie poziomice co 1 m. Poziomice zostaną poprowadzone w miejscach skoków wysokości, odtwarzając w pewnym stopniu mapę poziomice z której DTED 2 powstała (Rysunek 3.27a). Następnie przeprowadza się interpolację za pomocą jednej z metod zaprojektowanych do tworzenia hydrologicznie skorygowanych modeli DEM, umożliwiających wykorzystanie poziomice. Zastosowano bazujące na programie ANUDEM [patrz podroz. 6.1] narzędzie ArcGIS Topo to Raster, w rezultacie otrzymano ciągłą powierzchnię terenu (Rysunek 3.27b).



Rys. 3.27 DTED 2 (rozmiar komórki 15 m): a – oryginalny z wartościami całkowitymi, poziomice wyznaczają miejsce skoku wysokości; b – przetworzony do wartości rzeczywistych.

Efekt tej operacji widoczny jest na mapie nachyleń [patrz podroz. 6.3.1]. Dla mapy oryginalnej (Rys. 3.28a) mają one nierównomierny i nienaturalny charakter, dla przetworzonej (Rys. 3.28b) znacznie lepiej oddają naturalne cechy stoków.



Rys. 3.28 Mapa nachyleń z DTED 2: a – utworzona z mapy oryginalnej z wartościami całkowitymi; b – utworzona z mapy przetworzonej z wartościami rzeczywistymi.

Zdjęcia satelitarne są obecnie jednym z najważniejszych źródeł danych dla systemów GIS. Istnieje wiele satelitów wykorzystywanych do pozyskiwania informacji o powierzchni ziemi dla celów cywilnych. W systemach GIS wykorzystuje się najczęściej zdjęcia satelitarne o średniej i dużej rozdzielczości przestrzennej, czyli rozmiarach piksela o zakresie 0.8 – 30 m. Wszystkie aktualnie wykorzystywane satelity wykonują dwa rodzaje zdjęć cyfrowych. Zdjęcia panchromatyczne (jeden kanał), obejmujące większość zakresu światła widzialnego i multispektralne (szereg kanałów) obejmujące wybrane zakresy światła widzialnego lub podczerwieni, będące faktycznie oddzielnymi obrazami. Zdjęcia panchromatyczne mają zawsze większą rozdzielczość i są wykorzystywane do zwiększania jej („wyostrzania obrazu”) na zdjęciach multispektralnych za pomocą techniki zwanej *fusion* lub *pansharpening*. W Tabeli 3.5 przedstawiono najważniejsze z satelitów i podstawowe rozdzielczości przestrzenne wykonywanych przez nie zdjęć panchromatycznych i multispektralnych.

Tab. 3.5 Satelity najczęściej wykorzystywane wspólnie w systemach GIS

Satelita	Rozdzielczość przestrzenna
Landsat 7 ETM+	Panchromatyczne 15 m Multispektralne 30 m (7 kanałów), 60 m (2 kanały)
SPOT 5	Panchromatyczne 5 m Multispektralne 10 m (4 kanały)
IKONOS	Panchromatyczne 1 m Multispektralne 4 m (4 kanały)
Quickbird	Panchromatyczne 0.6 m Multispektralne 2.5 m (4 kanały)

Istotna jest także czułość czujnika, która ma wpływ na zakres mierzonych wartości. Generalnie mogą być one mierzone w zakresie 0-255 jako liczba jedno bajtowa (ośmio bitowa) albo jako liczba typu *integer* o znacznie większym zakresie. Promieniowanie słoneczne docierające do różnych obiektów powierzchni Ziemi odbija się od nich i następnie jest rejestrowane przez czujnik satelity tworzący obraz. W zależności od rodzaju obiektu otrzymywane są różne wartości energii w funkcji długości fali odbitej. Dzięki temu można określać rodzaje lub klasy obiektów na powierzchni Ziemi. Istnieje szereg tzw. metod klasyfikacji służących do zamiany multispektralnej informacji satelitarnej na różne klasy pokrycia powierzchni Ziemi. Choć generalnie koszty pozyskania zdjęć satelitarnych są wysokie (rzędu paru tysięcy euro w przypadku zdjęć o dużej rozdzielczości) istnieje szereg wariantów bezpłatnego korzystania ze zdjęć, i integracji ich z systemami GIS, głównie jako informacji pomocniczej. W ramach projektu GeoCover (Ramka 3.8) udostępniono pełne pokrycie zdjęć powierzchni Ziemi wykonanymi przez satelitę Landsat 7 ETM+.

Ramka 3.8

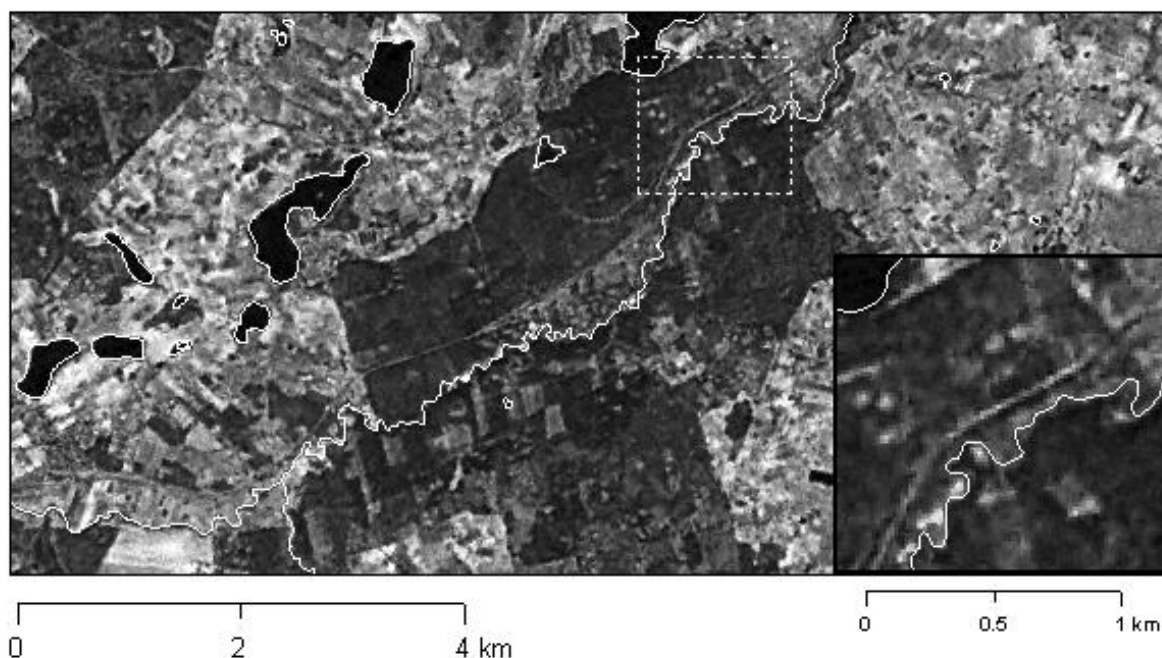
Zdjęcia satelitarne Polski – Landsat (GeoCover)

<http://www.earthsat.com>

Skompresowane kompozyty (3 kanały zdjęcia wyświetlane odpowiednio w kolorze czerwonym, zielonym i niebieskim) zdjęć satelitarnych Landsat 7 ETM+ mogą być bezpłatnie pobrane z portalu GeoCover. Są to następujące kanały zawierające wartości od 0 do 255:

1	czerwony	7 kanał ETM+	2.1 – 2.35 μm (SWIR – short wavelength infrared);
2	zielony	4 kanał ETM+	0.75 -0.9 μm (NIR - near infrared);
3	niebieski	2 kanał ETM+	0.53 – 0.61 μm (zielony).

Zdjęcia mają rozdzielczość 14,25 m i są dostarczane w formacie MrSID (Ramka 3.3). Wykonane zostały w roku 2000 \pm 3 lata. Obszar Polski pokrywają dwa zdjęcia (N-33-50 i N-34-50) w odwzorowaniu UTM33 i 34 (WGS84). Poniżej przedstawiono wycinek zdjęcia (kanał zielony) dla obszaru Polski (Rysunek 3.29).



Rys. 3.29 Landsat (GeoCover) dla Polski (kanał 4 ETM+) – przełom Raduni

Na kolorowej mozaice: drzewa, krzewy, uprawy i bagna przyjmują różne odcienie zieleni; wody są czarne bądź ciemno niebieskie; zabudowania fioletowe a gleby różowe.

Wykorzystując darmowy program Google Earth (Ramka 3.9) można dowolny rejon Polski (także świata) obejrzeć na zdjęciach o średniej rozdzielczości. Dla części obszarów dostępne są zdjęcia satelitarne o wysokiej rozdzielczości, które mogą być oglądane w różnej perspektywie. Istnieje także możliwość umieszczania na tle zdjęć własnych obiektów wektorowych, co może być przydatne w pracy naukowej.

Ramka 3.9

Google Earth (program bezpłatny)

<http://earth.google.com>

Na rysunku poniżej przedstawiony jest obraz wysokiej rozdzielczości przedstawiający ujście Wisły. Za pomocą narzędzi w prawym górnym rogu ekranu można utworzyć widok z różnej perspektywy (także uwzględniający różnice wysokości). Może to być przydane przy wstępnej analizie danego obszaru.

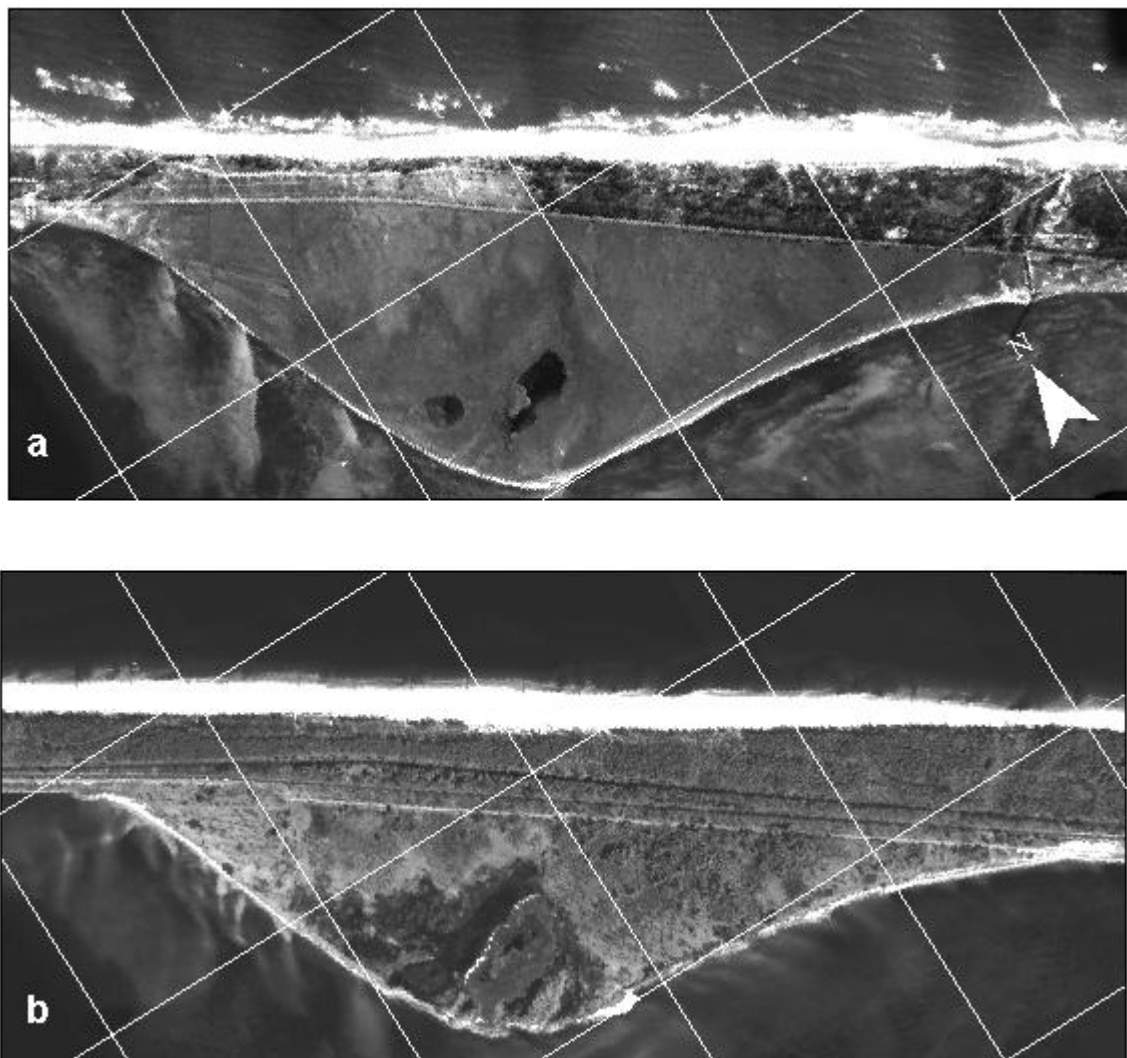


Istotną zaletą pracy w Google Earth jest możliwość wykonywania pomiarów odległości na zdjęciach i wyświetlania własnych plików (SHP) wyeksportowanych do plików KML (*Keyhole Markup Language file*). Na rysunku poniżej z lewej strony widoczny jest obraz wysokiej rozdzielczości dla doliny rzeki Kaczaj. Po prawej stronie widoczny jest ten sam obraz z naniesionymi rzekami mapy MPHP. Daje to znacznie lepsze możliwości analizy danego obszaru.

Rozszerzenie do ArcGIS służące do eksportu plików SHP do KML (Export to KML) można pobrać z <http://arcscripts.esri.com/details.asp?dbid=14273> . Na obu zdjęciach pokazano także narzędzie do pomiaru odległości.



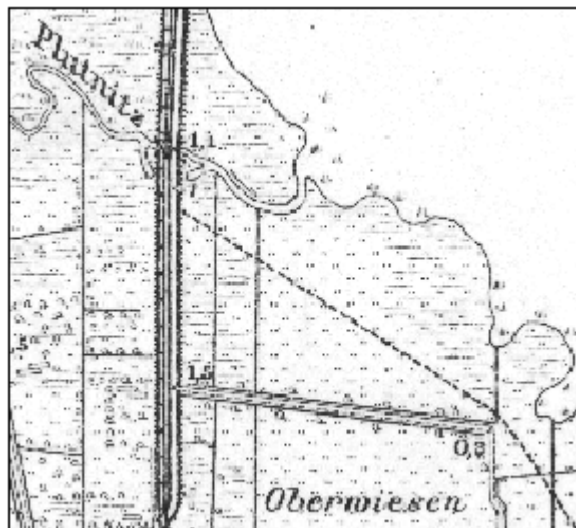
Zdjęcia lotnicze mogą być dobrym uzupełnieniem dla zdjęć satelitarnych w wielu projektach badawczych. Na Rysunku 30 przedstawiono dwa zdjęcia panchromatyczne jedyne uroczyska na Półwyspie Helskim. Zdjęcie lotnicze (a) zostało wykonane w 1947 roku, a zdjęcie satelitarne z satelity Quickbird (b) w 2005. Oba zdjęcia posiadają porównywalną rozdzielczość przestrzenną, choć zostały wykonane zupełnie innymi technikami. Daje to możliwość szczegółowej analizy zmian w czasie na przestrzeni ponad 50 lat.



Rys. 3.30 Panchromatyczne zdjęcia fragmentu Półwyspu Helskiego: a – zdjęcie lotnicze z 1947 roku (skan diapozytywu); b – zdjęcie satelitarne z 2005 roku (Quickbird). Bok siatki kilometrowej wynosi 400 m.

Badając jeszcze bardziej odległe czasy można posłużyć się starymi mapami. Rozwój technik geodezyjnych i kartograficznych w przeszłości pozwala na prowadzenie analiz zmian w zakresie czasowym do 200-300 lat. GIS stanowi bardzo dobre środowisko umożliwiające integrację

różnorodnego materiału przestrzennego. Na Rysunku 31 pokazany jest wycinek mapy w skali 1:25000 brzegu Zatoki Puckiej z początku XX wieku. Stare mapy są praktycznie jedynym źródłem informacji o przebiegu linii brzegowej sto lat temu.

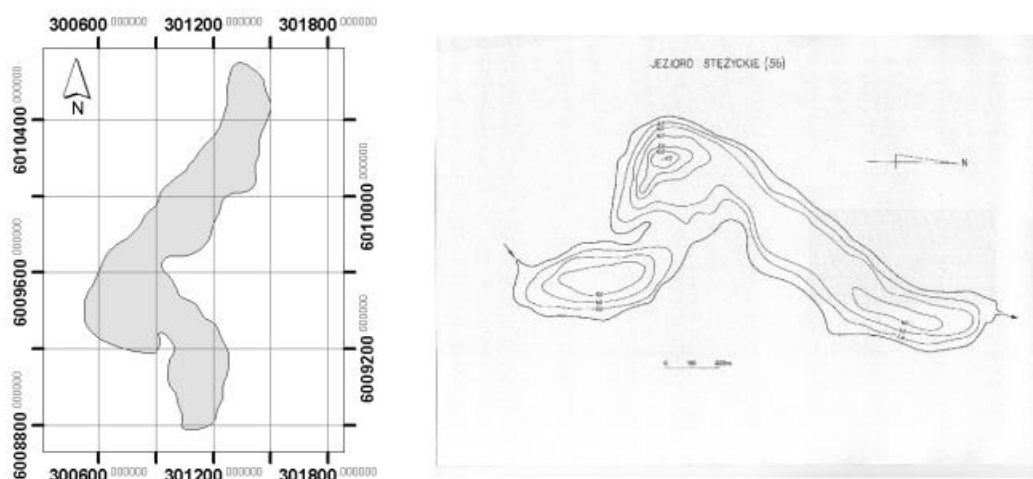


Rys. 3.31 Fragment mapy sztabowej w skali 1:25000 (sytuacja ok. 1908) Preuss Landesaufnahme (zbiory Biblioteki PAN w Gdańsku)

Istnieje szereg źródeł zdjęć lotniczych i starych map: Wojskowy Ośrodek Geodezji i Teledetekcji (stare zdjęcia lotnicze); Ośrodek Dokumentacji Geodezyjnej i Kartograficznej (nowsze zdjęcia lotnicze w tym kolorowe tzw. PHARE z końca lat 90tych XX wieku); biblioteki PAN i uniwersyteckie (stare mapy). Zeskanowane stare mapy są udostępniane bezpłatnie (<http://www.mapywig.org/news.php> lub <http://www.mapy.eksploracja.pl/news.php>) albo sprzedawane (<http://www.topmap.pl>). Zarówno stare zdjęcia, jak i mapy są pozyskiwane w formie skanów. Skaner jest urządzeniem służącym do konwersji obrazu analogowego (np. papierowej mapy czy diapozytywu zdjęcia lotniczego) do obrazu cyfrowego. Urządzenie skanuje linią po linii np. papierową mapę i rejestruje ilość światła (i jego spektralną charakterystykę przy skanach barwnych) odbitą od danego elementu powierzchni. Podstawowymi parametrami skanera jest jego format (rozmiar arkusza jaki może zostać zeskanowany) oraz rozdzielczość skanowania, wyrażona w jednostce dpi (liczba punktów na cal). Przy skanowaniu map lub zdjęć, które mają być wykorzystane wyłącznie jako dodatkowa warstwa informacyjna wystarczy rozdzielczość przestrzenna 400 dpi, przy skanowaniu zdjęć do dalszej obróbki potrzebna jest rozdzielczość rzędu 900 dpi.

3.3.4 Rejestracja w układzie współrzędnych

Zarówno stare zdjęcia lotnicze, stare mapy czy różnego rodzaju plany po zeskanowaniu stanowią obrazy cyfrowe nie mające dowiązania przestrzennego. Aby mogły być używane w systemach GIS muszą zostać dowiązane, czyli zarejestrowane w układzie współrzędnych. Często naszym celem jest wyłącznie wyodrębnienie ze zdjęć cyfrowych pewnych obiektów i nadanie im dowiązania przestrzennego. Na przykład ze skanu przedstawionego na Rysunku 3.31 możemy utworzyć liniową warstwę wektorową brzegu lub warstwę poligonów pokrycia terenu. Sposoby rozwiązania opisanych wyżej problemów zostaną zobrazowane na przykładzie. Na Rysunku 3.32 przedstawiony jest obrys jeziora z mapy MPHP. Jediną informacją o głębokości jest skan planu jeziora z rysunkiem izobat (linii jednakowych głębokości). Naszym celem jest utworzenie warstwy wektorowej izobat jak najlepiej wpasowanych w kształt jeziora. Posiadany przez nas plan oprócz strzałki północnej nie ma żadnego odniesienia przestrzennego. Proces polegający na zorientowaniu w przestrzeni obrazu cyfrowego przedstawiającego elementy powierzchni Ziemi nosi nazwę rejestracji w układzie współrzędnych. Po jej przeprowadzeniu każdy punkt obrazu ma przypisane współrzędne zgodne z ich położeniem na powierzchni Ziemi.



Rys. 3.32 Mapa obrysu jeziora Steżyckiego (Pojezierze Kaszubskie) i jego plan batymetryczny.

Proces rejestracji obrazów cyfrowych w systemach GIS oparty jest o wyznaczenie formuły transformacji na podstawie znajomości współrzędnych pewnej liczby punktów kontrolnych w tych samych miejscach powierzchni Ziemi na skanie (X_S, Y_S) i mapie (X_M, Y_M). Formuły te mają najczęściej postać wielomianów pierwszego, drugiego lub trzeciego stopnia postaci:

$$X_M = X_S + A_1 X_S + A_2 Y_S + A_3 X_S Y_S + A_4 X_S^2 + A_5 Y_S^2 + A_6 X_S^2 Y_S + A_7 X_S Y_S^2 + A_8 X_S^3 \dots \quad (3.1)$$

$$Y_M = Y_S + B_1 Y_S + B_2 X_S + B_3 X_S Y_S + B_4 X_S^2 + B_5 Y_S^2 + B_6 X_S^2 Y_S + B_7 X_S Y_S^2 + B_8 X_S^3 \dots \quad (3.2)$$

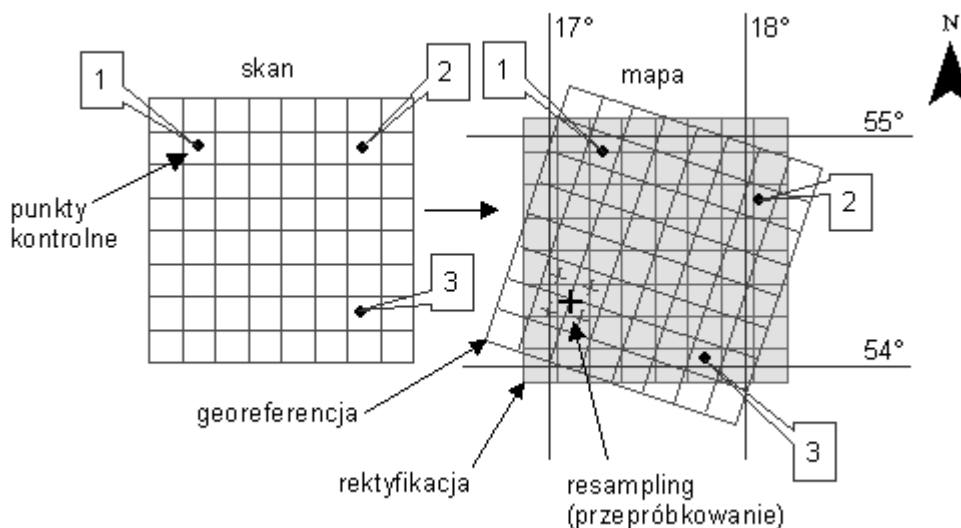
Współczynniki A i B są wyznaczone na podstawie znanych współrzędnych punktów kontrolnych. Liczba punktów kontrolnych niezbędna do ich obliczenia zależy od stopnia wielomianu. Wyznaczona formuła może być użyta do umiejscowienia centrum każdego piksela skanu (skan może być traktowany jako mapa rastrowa o lokalnych współrzędnych) we współrzędnych układu mapy. W przypadku wielomianów drugiego i wyższych stopni linie proste na skanie nie będą zachowane po transformacji. Na Rysunku 3.33 transformacja wielomianem pierwszego stopnia spowodowała przesunięcie i obrót skanu. Nowe współrzędne każdego piksela skanu są określone za pomocą tej samej formuły. Należy się więc spodziewać, że nowe współrzędne punktów kontrolnych skanu (X_{ST}, Y_{ST}) nie będą identyczne ze współrzędnymi na mapie (X_M, Y_M). Ta różnica, równoznaczna z odległością między tymi punktami, nosi nazwę rezydium i może być określona jako:

$$D = ((X_{ST} - X_M)^2 + (Y_{ST} - Y_M)^2)^{1/2} \quad (3.3)$$

Dokładność dopasowania całego skanu określa średni błąd kwadratowy (RMS – *root mean-square error*) określony wyrażeniem (sposób jego obliczania i istota jest porównywalna z odchyleniem standardowym) :

$$RMS = (\sum \{(X_{ST} - X_M)^2 + (Y_{ST} - Y_M)^2\} / n)^{1/2} \quad (3.4)$$

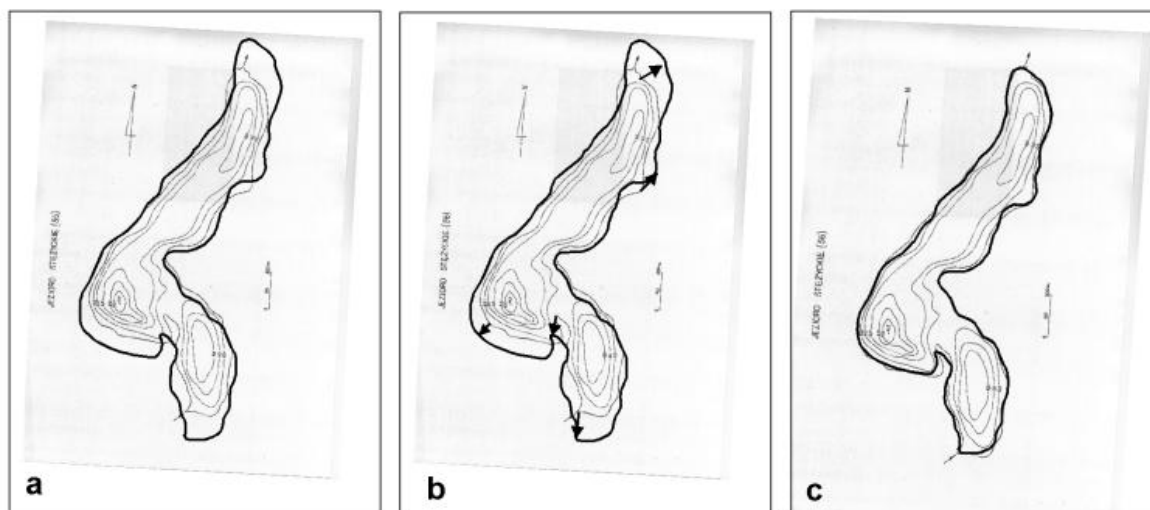
gdzie: n – liczba punktów kontrolnych.



Rys. 3.33 Proces rejestracji obrazu cyfrowego w układzie współrzędnym..

Punkty kontrolne są wybierane najczęściej spośród punktowych elementów widocznych zarówno na skanie, jak i mapie. Są to zwykle skrzyżowania dróg, przecięcia kanałów odwadniających (te elementy są bardzo trwałe w krajobrazie) lub obiekty antropogeniczne (np. róg budynku). Innym rozwiązaniem jest zmierzenie ich pozycji za pomocą GPS i utworzenie z

nich wektorowej warstwy punktów. Przeprowadzenie transformacji rejestrującej skan w układzie współrzędnych powoduje, że położenie boków jego komórek (pikseli) w stosunku do osi układu współrzędnych może nie być równoległe (Rysunek 3.33). Plik zawierający obraz cyfrowy nie ulega zmianie, a tylko dopisana zostaje do niego informacja o jego położeniu w przestrzeni. Ten proces nosi w ArcGIS nazwę nadania georeferencji (informacja o położeniu jest specyficzna dla oprogramowania). Jeżeli chcemy ze skanu utworzyć raster identyczny z mapą, bądź choćby o bokach komórek równoległych do osi układu, należy przeprowadzić operację rektyfikacji (w ArcGIS przy eksporcie skanu z georeferencją do GeoTIFF jest ona wykonywana automatycznie). Polega ona na policzeniu nowych wartości w każdej komórce nowego rastra, o bokach komórek równoległych do osi układu, na podstawie wartości otaczających ich komórek skanu. Na Rysunku 3.33 wartość w nowej komórce, oznaczonej dużym krzyżykiem, będzie policzona na podstawie wartości ze skanu oznaczonych małymi krzyżykami. Proces obliczania wartości komórki rastra na podstawie komórek innego rastra, jeżeli ich położenie bądź wielkość nie są zgodne, nosi nazwę resamplingu (w polskiej literaturze używa się terminu przepróbkowania). Istnieją trzy podstawowe metody określania nowej wartości w komórce rastra: metoda najbliższego sąsiedztwa (*nearest neighbor*), interpolacji bilinearnej (*bilinear interpolation*) i interpolacji sześcienniej (*cubic interpolation*), czasem nazywanej splotem sześciennym. W metodzie najbliższego sąsiedztwa do komórki tworzonego rastra przypisywana jest wartość z najbliższej leżącej komórki skanu. Metoda ta jest stosowana przy rektyfikacji obrazów zawierających dane jakościowe. W metodzie interpolacji bilinearnej wartość w nowej komórce jest średnią ważoną z czterech wartości najbliższych leżących komórek skanu, a w metodzie sześcienniej z szesnastu. Ta ostatnia metoda zalecana jest przy dużych różnicach rozmiarów komórek skanu i nowej mapy rastrowej.



Rys. 3.34 Proces rejestracji planu batymetrycznego jeziora Stężyckiego.

Na Rysunku 3.34 pokazany jest proces rejestracji planu batymetrycznego. Jedynymi wspólnymi elementami obu warstw są punkty linii brzegowej. Co do izobat to możemy wyłącznie założyć, że ich położenie względem linii brzegowej na planie jest prawidłowe. Rejestracja odbywa się przez połączenie identycznych punktów obrysu jeziora i brzegu planu batymetrycznego. Istnieją, w zależności od oprogramowania, różne rozwiązania wspomaganie tego procesu za pomocą odpowiednio zaprojektowanego GUI (graficzny interfejsu użytkownika). W ArcGIS obraz rejestrowany i wykorzystywany do rejestracji (z określonym układem współrzędnych) są jednocześnie wyświetlane na ekranie (Rysunek 3.34a). Dodatkowo proces wyświetlania nałożonych obrazów pozwala na przesuwanie i obrót skanu. Skan planu został obrócony tak, aby oś dłuższej części jeziora na skanie i obrysie były mniej więcej równoległe. Tego typu wstępne kroki ułatwiają dokładność wpasowania. Odpowiadające sobie punkty kontrolne (charakterystyczne miejsca linii brzegowej) są następnie łączone ze sobą. Na Rysunku 3.34b połączenia (*links*) przedstawiają strzałki. W rezultacie tej operacji powstaje tabela współrzędnych punktów kontrolnych (na skanie i mapie) w postaci:

Link	Xskanu	Yskanu	Xmapy	Ymapy
1	1529.55	-300.5123	301306.15	6010689.33
2	1331.91	-3013.363250	301044.46	6008792.08
3	463.28	-2166.908235	300521.08	6009427.85
4	1697.81	-1265.504487	301396.73	6010036.78
5	1168.81	-1723.694948	300992.458	6009686.18

Wyznaczona z tych współrzędnych formuła transformacji zostaje zastosowana do policzenia położenia każdego punktu kontrolnego. Ponieważ jego rzeczywiste współrzędne na mapie są znane, dla każdego zostaje wyznaczone rezydium oraz błąd RMS całej mapy. Jeżeli efekt jest satysfakcjonujący wykonywana jest georeferencja dla całego skanu i ewentualnie rektyfikacja. Rezultat przeprowadzenia georeferencji za pomocą wielomianu pierwszego stopnia został pokazany na Rysunku 3.34c.

Ze względu na to, że linia brzegowa na planie była rysowana w sposób przybliżony, dobrze jest to widoczne przy porównaniu kształtu półwyspu, nie udało się do końca wpasować linii brzegu z mapy wektorowej i skanu. W takiej sytuacji można zastosować wektorowe metody dopasowania.

Metody rejestracji danych wektorowych oparte są na podobnych zasadach co obrazów cyfrowych. Najczęściej stosowane są następujące transformacje: podobieństwa lub Helmerta (*similarity*), afiniczna (*affine*), projekcyjna (*projective*) i elastycznego dopasowania (*rubbersheeting*). Pierwsze trzy transformacje są określone przez formuły, które przeliczają

współrzędne każdego punktu obiektów wektorowych do nowych współrzędnych. Transformacja metodą podobieństwa jest określona przez wyrażenie:

$$X' = AX+BY+C; \quad (3.5)$$

$$Y' = -BX+AY+F; \quad (3.6)$$

gdzie:

$$A=S \cos t,$$

$$B=S \sin t,$$

S – zmiana skali,

t – kąt obrotu (mierzony od osi x w kierunku przeciwnym wskazówkom zegara),

C – przesunięcie w kierunku x,

F – przesunięcie w kierunku y.

Transformacja afiniczna w porównaniu z poprzednią daje dodatkowo możliwość zmiany kształtu obiektów przez możliwość ich nachylania. Określona jest wyrażeniem:

$$X' = AX+BY+C \quad (3.7)$$

$$Y' = DX+EY+F \quad (3.8)$$

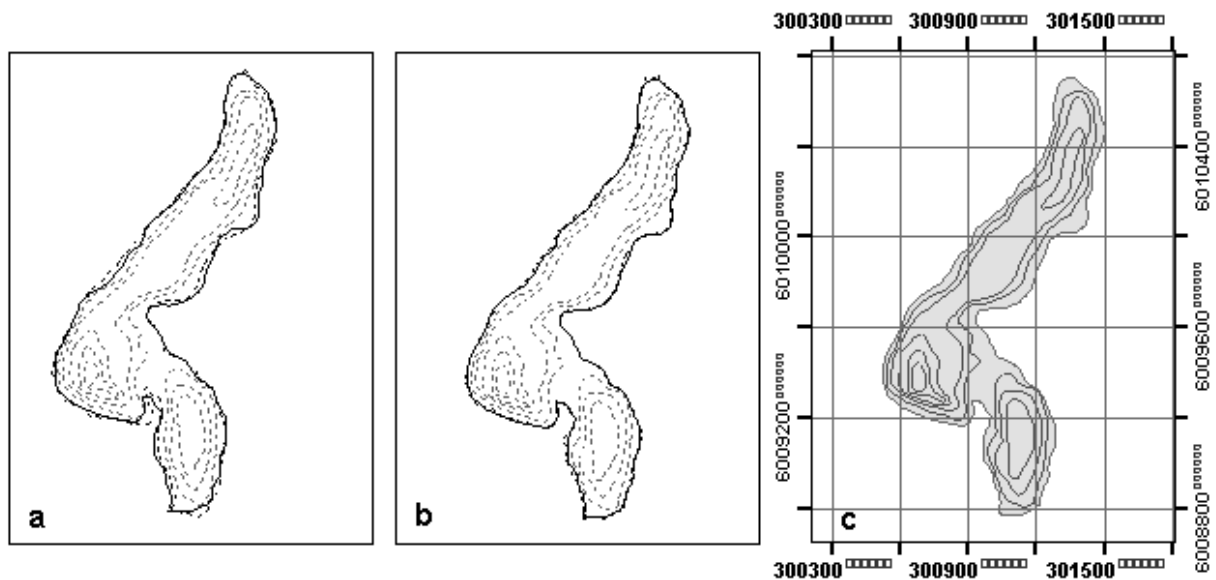
Kolejna transformacja (projekcyjna) wykorzystywana jest do rejestracji obiektów wektorowych pozyskiwanych ze zdjęć lotniczych. Ma ona postać:

$$X' = (AX+BY+C)/(GX+HY+1) \quad (3.9)$$

$$Y' = (DX+EY+F)/(GX+HY+1) \quad (3.10)$$

Ostatnia z transformacji (*rubbersheeting*) nie tworzy uniwersalnej formuły, ale dokonuje przekształceń lokalnie na podstawie przeprowadzonych połączeń punktów kontrolnych.

Zastosowanie tej właśnie transformacji do wektorowych obiektów otrzymanych ze skanu planu jeziora i poddanego powyżej georeferencji przedstawiono na Rysunku 3.35. Linia brzegowa i izobaty zostały przedstawione jako obiekty wektorowe, za pomocą ich wektoryzacji ze skanu po rejestracji rastrowej. Wykorzystując narzędzie ArcGIS do przestrzennego dopasowania danych wektorowych (*Spatial adjustment*) najpierw podobnie jak poprzednio wyświetlono jednocześnie na ekranie obrys jeziora i liniowy plik wektorowy brzegu i izobat z poddanego georeferencji rastrowej planu (Rys. 3.35a). Po wykonaniu szeregu połączeń brzegów wektorowych z mapy MPHP i skanu oraz zastosowaniu transformacji *rubbersheeting* otrzymano prawie dokładne dopasowanie brzegu pochodzącego ze skanu do jego obrazu na mapie (Rysunek 3.35b). Następnie identycznej transformacji zostały poddane izobaty. Było to możliwe dzięki założeniu, że ich położenie na planie względem linii brzegowej jest prawidłowe. Zostały one następnie wyeksportowane do oddzielnego pliku i nałożone na obrys jeziora z mapy MPHP (Rysunek 3.35c).



Rys. 3.35 Proces rejestracji planu batymetrycznego jeziora Stężyckiego za pomocą przestrzennego dopasowania danych wektorowych (opis w tekście).

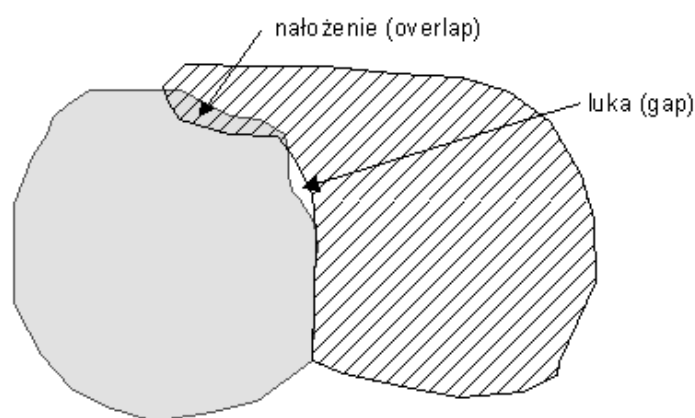
3.3.5 Digitalizacja ekranowa

Pozyskiwanie danych wektorowych z obrazów cyfrowych nosi nazwę digitalizacji ekranowej i jest często stosowaną metodą w badaniach wykorzystujących zdjęcia lotnicze, satelitarne, a także stare mapy i różnego rodzaju plany. Obecnie digitalizacja ekranowa, dzięki metodom komputerowego wspomaganie tego procesu, prawie wyparła swoją starszą siostrę digitalizację za pomocą urządzenia zewnętrznego — digityzera. Polega ona na wyświetleniu na ekranie danego obrazu oraz ewentualnie pomocniczych warstw wektorowych i następnie wprowadzaniu punkt po punkcie, za pomocą kursora i myszy, współrzędnych danego obiektu wektorowego. Wspomaganie digitalizacji ekranowej opiera się z jednej strony na wykorzystaniu



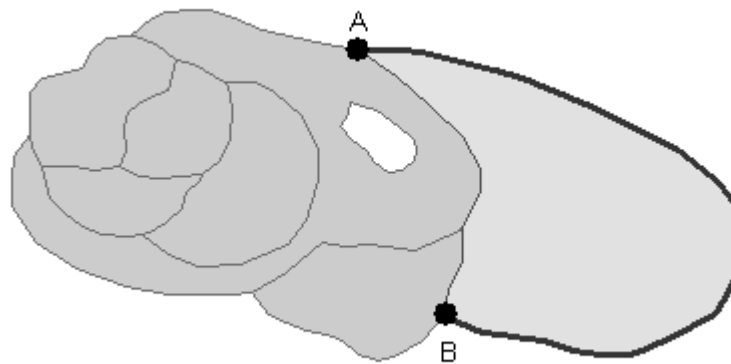
Rys. 3.36 Digitalizacja ekranowa. Za pomocą kursora wprowadza się obiekty warstwy wektorowej punkt po punkcie (wykorzystanie możliwości powiększania obrazu).

możliwości GUI, a z drugiej z zastosowania rozwiązań topologicznych w edycji danych. W procesie tym bardzo istotne jest swobodne operowanie obrazem dla ustawienia optymalnego powiększenia i pola pracy. Tworzenie warstwy punktów z obrazu cyfrowego najczęściej polega na wyborze obiektów, zaznaczaniu w ich miejscu punktów i wprowadzaniu odpowiednich atrybutów. Nowo wprowadzane punkty mogą zachowywać określone relacje topologiczne z innymi już istniejącymi warstwami. Na przykład wprowadzane punkty mogą leżeć na linii brzegowej lub liniach sieci rzecznej, albo posiadać takie samo położenie, jak punkty innej warstwy. Uzyskuje się to za pomocą metody zwanej snappingiem. Polega ona na przechwytywaniu położenia kursora przez punktowe lub liniowe elementy obiektu, co zapewnia że wprowadzane współrzędne będą identyczne ze współrzędnymi obiektu przez które zostały przechwycone. W ArcMap *snapping* może się odbywać do punktowych elementów obiektu (*vertex*), linii obiektu (*edge*) lub końcowego punktu obiektu (*endpoint*). Istotnym elementem „snappingu” jest jego tolerancja, która określa odległość, w jednostce mapy, poniżej której nastąpi przechwytywanie kursora. Wykorzystywanie „snappingu” jest podstawą digitalizacji struktur sieciowych (np. sieci rzecznych), w których wspólne punkty linii muszą mieć identyczne współrzędne. Istotny jest także kierunek digitalizacji, który w przypadku rzeki powinien być zgodny z jej nurtem. Daje to możliwość wykorzystania wprowadzonych danych do analiz z zastosowaniem modelu sieciowego. Jednym z niebezpieczeństw przy wprowadzaniu punktów lub linii jest tworzenie ich duplikatów. Kilkakrotnie wprowadzone linie lub punkty powinny być wykrywane i usuwane. Topologiczne wspomaganie digitalizacji jest praktycznie niezbędne przy wprowadzaniu połączonych ze sobą poligonów.



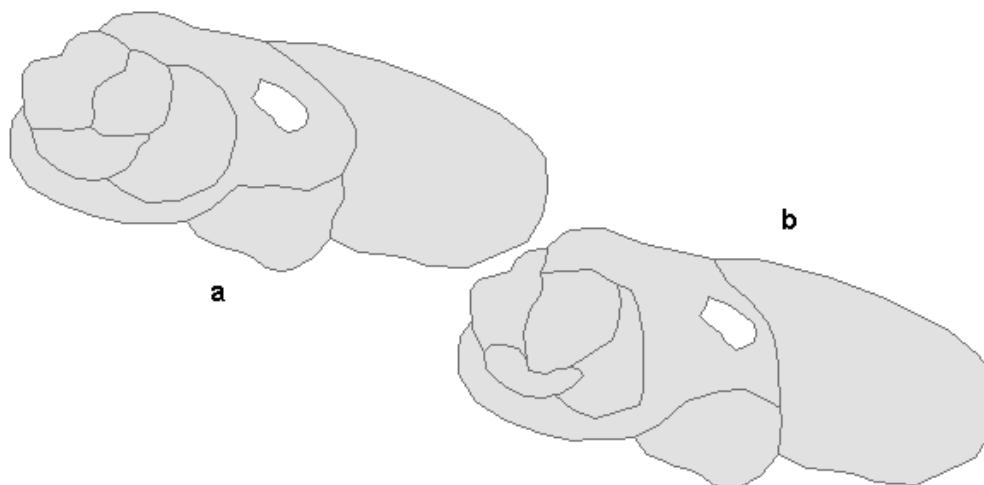
Rys. 3.37 Digitalizacja ekranowa. Oddzielne rysowanie połączonych poligonów prowadzi do powstawania luk i nałożeń.

Na Rysunku 3.37 pokazano dwa podstawowe błędy powstające przy łączeniu dwóch poligonów. Kiedy poligony są wprowadzane oddzielnie praktycznie niemożliwe jest poprowadzenie dwóch identycznych linii tworzących ich wspólny bok. Powstają albo luki, albo nałożenia. Rozwiązaniem jest specjalna technika polegająca na automatycznym domykaniu (*auto-closure* lub *auto-complete*) nowego poligonu.



Rys. 3.38 Digitalizacja ekranowa połączonych poligonów za pomocą automatycznego domykania.

Nowy poligon (jaśniejszy kolor) dołączany jest do już istniejących tylko przez dorysowanie nowej części swoich boków (linia od A do B). Pozostałe boki są tworzone automatycznie przez powielenie już istniejących odcinków (Rysunek 3.38). Połączone ze sobą poligony wymagają także specjalnych narzędzi edycyjnych, aby zmiana boków jednego powodowała automatyczne zmiany boków poligonów sąsiadujących. Tego typu rozwiązanie stosuje techniki edycji z wykorzystaniem relacji topologicznych (Rysunek 3.39).



Rys. 3.39 Edycja połączonych poligonów wymaga uwzględnienia relacji topologicznych (a – warstwa przed edycją; b – warstwa po edycji).

Możliwe jest zarówno przemieszczanie punktu połączenia boków (węzłów), całych boków, jak i poszczególnych punktów boku. Następstwem jest zmiana położenia boków poligonów sąsiednich zapewniająca ciągłość przestrzenną całej struktury (bez luk i nałożeń).

Ramka 3.10

Hawth's Analysis Tools – konwersja punkty – linie (SHP)

<http://www.spataleecology.com/htools>

(10.2006) Version 3.26

Rozszerzenie zawiera dwie przydatne funkcje do digitalizacji linii o tworzenia linii i wieloboków z pomiarów punktowych. Często pojawia się potrzeba konwersji linii do punktów. Ma to miejsce przy tworzeniu map ze zdigitalizowanych izolinii z planów analogowych. Mapy takie tworzone są za pomocą interpolacji, która w większości metod, w tym geostatystycznych, wykorzystuje dane punktowe. Przy zczytywaniu obiektów tworzących sieci (np. sieci rzeczne) często potrzebne jest tworzenie jednocześnie zbioru punktów węzłowych, w miejscach w których rzeki się łączą. Funkcja **Convert Paths to Points** w **Animal Movements** z każdej linii tworzy zbiór punktów o zadeklarowanym odstepie, przy czym pierwszy punkt znajduje się na początku linii. Do punktu przypisany jest wybrany atrybut linii. Druga funkcja **Convert Locations to Paths** (w tym samym miejscu) z punktów tworzy linie. Punkty mogą posiadać identyfikatory oddzielnych linii i identyfikator opisujący ich kolejność na poszczególnych liniach. Umożliwia to tworzenie warstwy liniowych obiektów z punktowych pomiarów terenowych prowadzonych wzdłuż linii. Linie mogą być także obrysami terenowych obiektów o charakterze powierzchniowym (poligonów).

3.3.6 Niepewność i błędy map cyfrowych

W badaniach naukowych, aby udowodnić daną hipotezę, należy przeprowadzić analizę błędów, żeby wykazać, że nasze wnioski nie mają przypadkowego charakteru. Mapy cyfrowe, będące reprezentacją rzeczywistości, ze względu na jej kompleksowość przedstawiają wyłącznie jej uproszczenie, które zawsze będzie się w pewnym stopniu od niej różnić. Te różnice wynikają z błędów pomiarowych (Ramka 3.11), charakteru badanej powierzchni lub obiektu, przyjętej skali pomiarów i analizy, subiektywnych decyzji podejmowanych w procesie pozyskiwania danych i tworzenia schematów klasyfikacji, sposobu przetwarzania danych oraz wykorzystywanych metod analitycznych. Różnice mogą mieć charakter zarówno przestrzenny, jak i atrybutowy. Badana powierzchnia (np. powierzchnia wysokości terenu) charakteryzuje się zmiennością przestrzenną w różnych skalach. Zmienność w skali mniejszej niż skala badań może być opisana jako mikrostruktura i wraz z błędem pomiarowym tworzyć różnicę między wartością zmierzoną a rzeczywistością. Wiele elementów przyrodniczych modelowanych zazwyczaj jako obiekty wektorowe (np. zbiornik wodny) w rzeczywistości nie posiada wyraźnych granic. Ostro określona granica ma w takich przypadkach sztuczny i nienaturalny charakter. Możliwym

rozwiązaniem jest otoczenie linii obrysu obiektu buforem wyznaczającym powierzchnię, gdzie z określonym prawdopodobieństwem znajduje się linia brzegowa.

Ramka 3.11

Błąd pomiarowy

Wynika z braku powtarzalności pomiarów i jest rezultatem zarówno niedokładności przyrządu, jak i istnienia mikrostruktury w danych. Praktycznie można go wyznaczyć wykonując po dwa pomiary w każdym miejscu i obliczając ich różnicę (d_i). Błąd obliczamy z wyrażenia:

$$sw^2 = \frac{1}{2n} \sum_{i=1}^n d_i^2$$

sw^2 – błąd pomiarowy

n – liczba par danych

Odchylenie od wartości prawdziwej spowodowane błędem pomiarowym będzie mniejsze od $1.96 sw$ z prawdopodobieństwem 95%, a różnica między pomiarami będzie mniejsza od $2.77 sw$ z prawdopodobieństwem 95%.

W modelu rastrowym problem ten jest rozwiązywany za pomocą zbiorów rozmytych (*fuzzy sets*). W tym przypadku przejście od wód zbiornika do lądu nie odbywa się skokowo (komórka albo jest lądem, albo wodą), ale stopniowo dzięki przypisaniu komórkom funkcji przynależności do wody, która przyjmuje wartości od 1 (pełna przynależność) do 0 (brak przynależności). Metoda ta jest między innymi wykorzystywana przy tworzeniu map przydatności lub wrażliwości na zagrożenia [patrz podroz. 8.2]. Skala pomiarów i analiz może być także przyczyną szeregu błędów. Odnosi się to zarówno do skali przestrzennej, jak i czasowej. Dokładność położenia w przestrzeni ma bezpośredni związek ze skalą, w której mapa jest wykonywana lub której odpowiada. Ogólnie zakłada się, że dopuszczalny błąd w położeniu obiektów nie powinien być większy od odległości odpowiadającej 0.5 mm na mapie. Daje to następujący dopuszczalny błąd w zależności od skali (Tabela 3.6).

Tab. 3.6 Dopuszczalny błąd położenia w zależności od skali

Skal mapy	Dopuszczalny błąd w metrach
1 : 5000	2,5 m
1 : 10 000	5 m
1 : 25 000	12,5 m
1 : 50 000	25 m

1 : 100 000	50 m
1 : 250 000	125 m
1 : 500 000	250 m

Przy pracy na mapach cyfrowych świadomość błędów jest szczególnie ważna, gdyż mapa może być dowolnie powiększana i zmniejszana. Na powierzchni Ziemi zachodzą nieustanne zmiany, które mogą mieć charakter okresowy lub stały. Dynamika zmian zależy od rodzaju procesów i ich skali. Istotne jest więc brać pod uwagę jaki okres w czasie jest reprezentowany na danej mapie. Może to być kluczowe zagadnienie w procesie integracji danych z różnych źródeł. Integracja danych wykonanych w różnych skalach rodzi z kolei problemy związane z różnym stopniem szczegółowości poszczególnych map. Potrzebne informacje do oceny spójności i przydatności różnych zbiorów danych powinny znajdować się w plikach metadanych (dane o danych- Ramka 3.12), jednak najczęściej ich brak.

Ramka 3.12

Metadane (metadata)

Jest to plik (w ArcGIS jest to plik XML dołączony do danych lub tablica w geobazie danych) zawierający informacje opisujące dane. Część informacji takich jak zakres przestrzenny danych, rodzaj układu odniesienia i odwzorowanie może być generowana automatycznie przy wykorzystaniu odpowiednich edytorów (w ArcGIS taki edytor znajduje się w ArcCatalog). W pliku tym powinny znajdować się następujące informacje:

1. **Opis danych.** Krótki abstrakt zawierający podstawowe informacje o zbiorze danych oraz określenie celów w jakim został on utworzony. Podana powinna zostać informacja o warunkach pozyskania i wykorzystywania zbioru danych.
2. **Cytowanie.** Nazwa organizacji lub nazwisko osoby, która utworzyła dane. Jeżeli dane zostały opublikowane to data publikacji i źródło. Podawana jest także gotowa formuła do cytowania danych.
3. **Status danych.** Stan prac nad danymi (planowane, w trakcie, zakończone) i informacja o tym jak często będą aktualizowane.
4. **Zakres przestrzenny.** Współrzędne zakresu (max. i min. na osiach x i y) oraz ewentualnie zakres i jednostka wysokości.
5. **Słowa kluczowe.** Służą do identyfikacji zbioru danych (umożliwiają znalezienie zbioru danych przez internet).

W procesie pozyskiwania danych, jak i ich przetwarzania, podejmowanych jest szereg decyzji, które mają znaczący wpływ na ich ostateczną postać. Przykładem takiej decyzji może być rodzaj stosowanego schematu klasyfikacyjnego. Przetwarzaniu danych w procesie analizy towarzyszy proces propagacji błędów. Dodanie dwóch rastrowych map cyfrowych o średnich błędach kwadratowych S_1 i S_2 da w rezultacie mapę o błędzie równym pierwiastkowi sumy ich kwadratów. Wykorzystując znajomość błędów poszczególnych map i reguł określających ich

propagację w różnych operacjach można przeanalizować proces ewolucji błędów w sekwencji operacji analitycznych (odnosi się to głównie do danych rastrowych). Ten sposób analizy nosi nazwę analizy niepewności (*unsertainty analysis*). Odmiennym podejściem jest analiza stabilności (*sensitivity analysis*). Bada ona jak zmiany parametrów modelu wpływają na zmiany wyników. Stosuje się w niej metodę Monte Carlo wykorzystującą generowane losowo mapy błędów. Są one następnie dodawane do danych wejściowych i bada się jak losowe perturbacje wpływają na ostateczne wyniki. Istotną charakterystyką opisującą błędy zarówno lokalizacji, jak i atrybutu jest ich rozkład. Generalnie oczekuje się i często zakłada, że błędy mają rozkład normalny. Pozwala to na ocenę prawdopodobieństwa ich wystąpienia w procesie analizy [patrz podroz. 6.5].

Dla map opisujących powierzchnie, zarówno ciągłe, jak i dyskretne, wyznacza się błędy na podstawie porównania wartości na mapie i w rzeczywistości w punktach kontrolnych. Dla map opisujących cechy ilościowe wyznaczany jest średni błąd kwadratowy (*root mean square error – RMS* lub RMSE), a dla map jakościowych błąd proporcji p :

$$RMS = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - t_i)^2}{n}} \quad (3.11)$$

gdzie:

n – liczba punktów kontrolnych,

x - wartości z mapy cyfrowej,

t - wartości zmierzone w punktach kontrolnych.

$$p = 1 - \sum_{i=1}^n \frac{m_{ii}}{n} \quad (3.12)$$

gdzie:

n – liczba punktów kontrolnych,

m_{ii} – liczba pomiarów o tej samej klasie k na mapie i w terenie,

k – liczba klas mapy jakościowej.

Błąd RMS posiada taką samą jednostkę jak wartości mapy ilościowej i opisuje odchylenie standardowe rozkładu błędów. Stąd można stwierdzić, że przy założeniu normalnego rozkładu błędów na mapie, prawdziwa wartość dowolnej komórki mieści się w zakresie ± 1.96 RMS z prawdopodobieństwem 95%. Błąd proporcji ma zakres od 0 do 1, im niższa jego wartość tym

mapa jest dokładniejsza. Przyjmuje się, że błąd map jakościowych nie powinien być większy od 0.15. Podobną miarą co błąd proporcji jest procent klas poprawnych (PCC – *percent correctly classified*), który może być zdefiniowany jako $1 - p$. Bardziej dokładną i zalecaną metodą wykorzystującą tzw. macierz błędów (*misclassification* lub *confusion matrix*) jest indeks lub współczynnik kappa (κ). Macierz błędów ma postać :

Mapa\Test	A1	B2	C3	D4	E5	Suma
A1	C ₁₁	C ₁₂	C ₁₃	C ₁₄	C ₁₅	C _{1.}
B2	C ₂₁	C ₂₂	C ₂₃	C ₂₄	C ₂₅	C _{2.}
C3	C ₃₁	C ₃₂	C ₃₃	C ₃₄	C ₃₅	C _{3.}
D4	C ₄₁	C ₄₂	C ₄₃	C ₄₄	C ₄₅	C _{4.}
E5	C ₅₁	C ₅₂	C ₅₃	C ₅₄	C ₅₅	C _{5.}
Suma	C _{.1}	C _{.2}	C _{.3}	C _{.4}	C _{.5}	C _{..}

Poszczególne wartości w tablicy oznaczają liczbę punktów kontrolnych spełniających dane warunki, np. C₄₂ oznaczają, że w takiej liczbie punktów kontrolnych na mapie obecna jest klasa D4, a test w terenie wykazał, że w rzeczywistości występuje tam klasa B2; C_{..} oznacza całkowitą liczbę punktów kontrolnych, a C_{.4} liczbę punktów kontrolnych w których test w terenie wykazał klasę D4 (suma po kolumnie). Indeks kappa ma postać (k – liczba klas):

$$\kappa = \frac{\left(\sum_{i=1}^k C_{ii} - \sum_{i=1}^k \frac{C_{i.} \cdot C_{.i}}{C_{..}} \right)}{\left(C_{..} - \sum_{i=1}^k \frac{C_{i.} \cdot C_{.i}}{C_{..}} \right)} \quad (3.13)$$

Przyjmuje on wartości od zera do jedności i — w przeciwieństwie do poprzednich metod — wprowadza poprawkę na pozorną zgodność wynikającą z czynnika losowego.

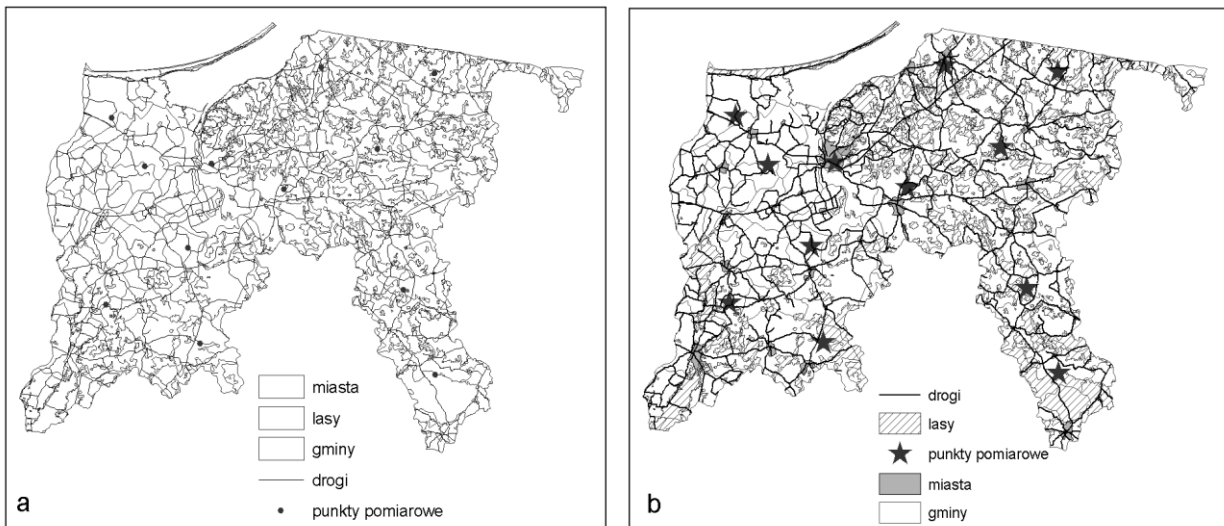
4. PODSTAWOWE FUNKCJE ANALIZY WEKTOROWEJ

4.1 Wizualizacja (symbolizacja i klasyfikacja)

Dane: Punktowe, liniowe i poligony (wykorzystanie danych rastrowych jako podkładu).

Pytania i zadania badawcze: Wstępna analiza danych przestrzennych. Szukanie prawidłowości w rozmieszczeniu danych. Wyznaczanie danych o wartościach wyraźnie różniących się od pozostałych. Identyfikacja prawdopodobnych związków i relacji pomiędzy danymi. Ocena poprawności próbkowania.

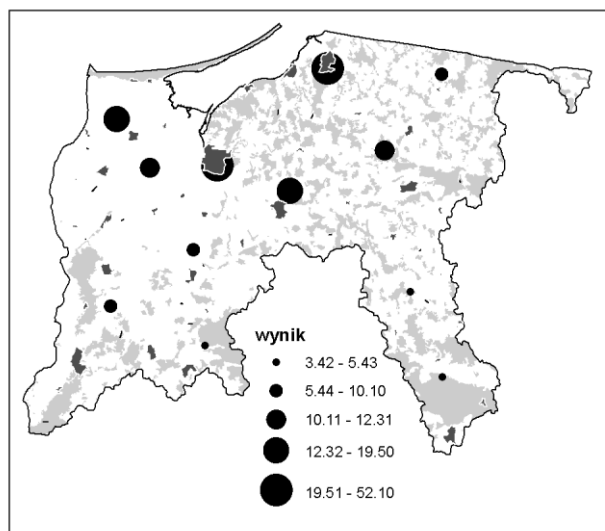
Zbiory danych wektorowych (punktów, linii i poligonów) są wyświetlane na ekranie jako kolejne nakładane na siebie warstwy. Możliwe sposoby wyświetlania obiektów danej warstwy, czyli rodzaj dostępnych symboli, zależy od oprogramowania. Celem procesu wizualizacji jest taki dobór kolejności wyświetlanych warstw i rodzaju użytych symboli, aby uzyskać jak najwięcej pożądaných informacji o analizowanych danych. Najczęściej znamy podstawowe pytania, na które chcemy znaleźć odpowiedź, ale samo przeglądanie danych, bez szukania konkretnych odpowiedzi, może nam wskazać całkiem nowe drogi rozwiązania danego problemu, wydzielić niespodziewane problemy lub zdefiniować nowe pytania. Na Rysunku 4.1a przedstawione jest wyświetlenie pięciu warstw wektorowych za pomocą identycznych symboli.



Rys. 4.1 Wizualizacja danych: a – do wszystkich warstw użyto identyczne symbole ; b – symbolizacja została dobrana do określonego problemu.

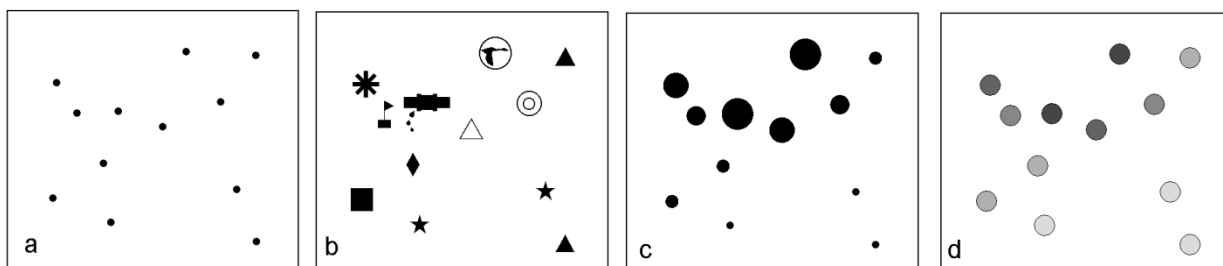
Są to: warstwa punktów pomiarowych, warstwa dróg (linie) oraz trzy warstwy wieloboków przedstawiające gminy, miasta i lasy. Załóżmy, że chcielibyśmy znać odpowiedź na następujące

pytania: (1) czy rozmieszczenie lasów jest równomierne na danym obszarze? (2) które punkty pomiarowe zostały umieszczone w miastach? (3) czy istnieją punkty znajdujące się na obszarach leśnych? (4) jak wygląda położenie punktów pomiarowych względem dróg? Na te wszystkie pytania, które definiujemy tak, jakbyśmy mieli otrzymać mapę papierową z naniesionymi punktami, nie otrzymamy odpowiedzi z mapy na Rysunku 4.1a. Stosując dostępne symbole musimy zbudować z naszych danych mapę dostosowaną do analizy konkretnego zagadnienia. Jest to możliwe, ponieważ kolejność i sposób symbolizacji obiektów poszczególnych warstw zależy od nas. Mapa przedstawiona na Rysunku 4.1b daje możliwość odpowiedzi na większość postawionych pytań. Praca na ekranie daje dodatkowo możliwość operowania kolorami, co zwiększa znacznie czytelność tworzonych map i ułatwia cały proces wizualizacji. Najczęściej ustawia się warstwy tak, aby na samym dole znajdowała się warstwa (lub warstwy poligonów), wyżej linie, a na samej górze punkty. Dzięki temu poligony nie przysłaniają pozostałych warstw. W naszym przypadku warstwę punktów oznaczonych wyraźnym symbolem umieszczono pod warstwą linii i lasów, aby stwierdzić relację położenia punktów względem tych dwóch klas obiektów. Do obrysu gmin i dróg użyto zupełnie innych linii (inny kolor i grubość). Poligony lasów zaznaczono półprzezroczystym szrafem, aby nie zasłaniały całkowicie gmin, miast i punktów (nie jest to dobrze widoczne w wersji czarno-białej). Z Rysunku 4.1b jednoznacznie wynika, że lasy nie są rozmieszczone równomiernie. Łatwo jest zidentyfikować punkty, które zostały zlokalizowane w miastach lub w ich pobliżu i ocenić odległość do głównych dróg. W punktach dokonywane były pomiary pewnej zmiennej. Zmierzone wielkości mogą być wykorzystane do ich symbolizacji.



Rys. 4.2 Wizualizacja danych ilościowych za pomocą symbolizacji.

Na Rysunku 4.2 przedstawiono punkty jako koła o wielkości uzależnionej od wyniku pomiarów. Jednoczesne wyświetlenie lokalizacji lasów i miast pozwala na postawienie roboczej hipotezy o wpływie bliskości miast na wynik pomiarów. Możliwości wizualizacji i symbolizacji wielu systemów GIS są dużo szersze niż tu opisane, obejmują wizualizację w trzech wymiarach i dynamiczne połączenie mapy z wykresami. Jednak korzystając nawet z podstawowych możliwości można przeprowadzić wstępną analizę danych, a także zweryfikować domysły i przypuszczenia. Jest to także znakomity sposób na wykrycie „błędnych danych”.

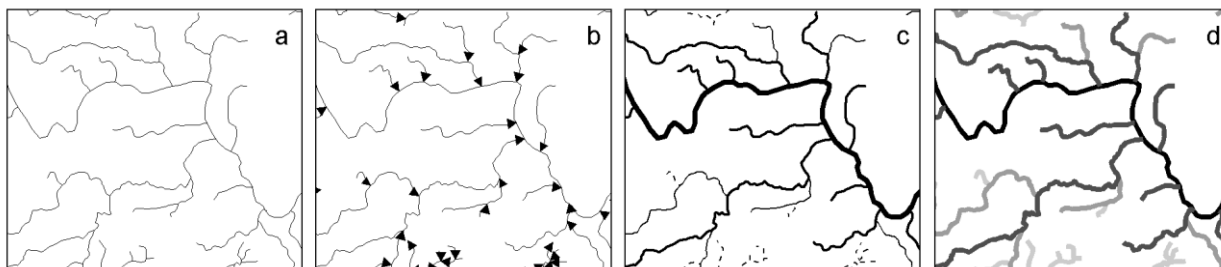


Rys. 4.3 Podstawowe metody symbolizacji danych punktowych: a – wszystkie punkty oznaczone są jednakowym symbolem; b – punkty oznaczone są różnymi symbolami zależnie od wartości w polu atrybutowym (dane jakościowe); c – punkty oznaczone są identycznymi symbolami o rozmiarach związanych z wartością w polu atrybutowym (dane ilościowe); d – punkty oznaczane są identycznymi symbolami o różnych kolorach zależnie od atrybutu (dane ilościowe lub jakościowe).

Punkty wyświetlane są za pomocą symboli. Mogą one mieć różny kształt, kolor i wielkość. Najprostszym sposobem wizualizacji punktów jest przedstawienie ich za pomocą jednakowych symboli (Rysunek 4.3a). Pozostałe metody wykorzystują przy symbolizacji wartości znajdujące się w jednym z pól atrybutowych. Istnieją także metody wykorzystujące wartości z paru pól. Wartości w polu atrybutowym mogą mieć charakter danych ilościowych lub jakościowych. W przypadku danych jakościowych poszczególne punkty lub ich zbiory mogą być przedstawiane za pomocą symboli (Rysunek 4.3b) lub kolorów, bądź odcieni szarości (Rysunek 4.3d). Symbole mogą mieć postać związaną ze znaczeniem danego atrybutu (np. symbol rezerwatu przyrody na Rysunku 4.3b). Kolory dobierane są z jakościowej palety kolorów, która przypisuje każdej wartości jakościowej wyróżniający ją kolor (Rysunek 4.6a). Dane ilościowe mogą być przedstawiane za pomocą symboli różniących się wyłącznie wielkością (Rysunek 4.3c) lub tylko kolorami (Rysunek 4.3d) z palety ilościowej (Rysunek 4.6b). Wielkość symbolu jest proporcjonalna do wartości atrybutu, a kolory lub odcienie szarości stopniowo zmieniają się od wartości najmniejszych do największych.

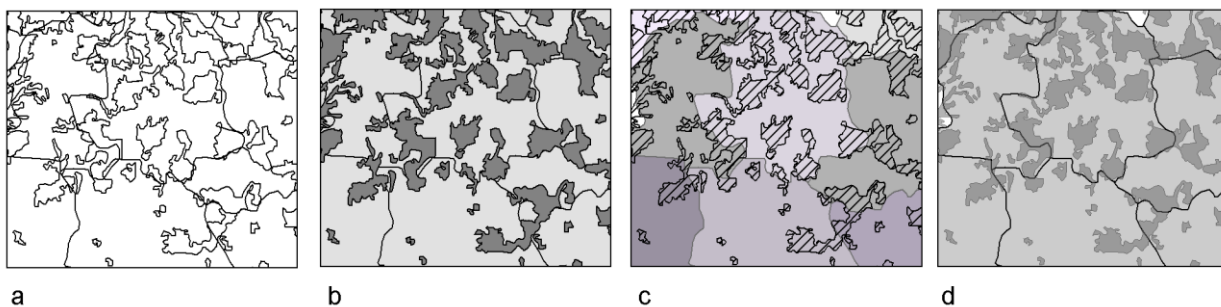
Linie także mogą być przedstawiane w różny sposób (Rysunek 4.4). Podobnie jak w przypadku punktów mogą być one przedstawiane jednym rodzajem linii (Rysunek 4.4a).

Jeżeli na mapie mamy kilka warstw linii, każdą z nich przedstawiamy innym kolorem różnicując obiekty wewnątrz warstwy za pomocą grubości linii lub jej rodzaju. Szczególnym rodzajem wizualizacji linii jest zaznaczenie jej kierunku. Kierunek linii wyznacza kolejność wprowadzania punktów, z których jest zbudowana (punkt wprowadzony jako ostatni oznacza koniec linii). Na Rysunku 4.4b kierunek został przedstawiony za pomocą symbolu strzałki z umieszczeniem jej na końcu linii. Kolor, grubość i rodzaj linii (ciągła lub przerywana) mogą być wykorzystane do uwzględniania zarówno atrybutów jakościowych, jak i ilościowych (Rysunek 4.4 cd).



Rys. 4.4 Podstawowe metody symbolizacji danych liniowych: a – wszystkie linie oznaczone są jednakowym symbolem; b – linie z oznaczonym kierunkiem (kolejność wprowadzanych punktów z których sa zbudowane); c – linie oznaczone są różnymi symbolami (grubość i rodzaj linii); d – linie różnią się wyłącznie kolorem lub odcieniem szarości.

Istnieje szereg możliwości wizualizacji warstw poligonów (Rysunek 4.5). Obraz poligonu składa się z obrysu i wypełnienia. Obrys stanowi linia, która może być rysowana za pomocą dowolnego symbolu liniowego lub być pominięta. Wypełnienie może być: puste (Rysunek 4.5a), ciągle (Rysunek 4.5b), mieć charakter szrafu (Rysunek 4.5c) lub być częściowo przezroczyste (Rysunek 4.5d). Na Rysunku 4.5 przedstawiono cztery warianty jednoczesnej wizualizacji dwóch warstw poligonów, z których jedna całkowicie pokrywa dany obszar (1), a druga ma wyraźnie wyspowy charakter (2).



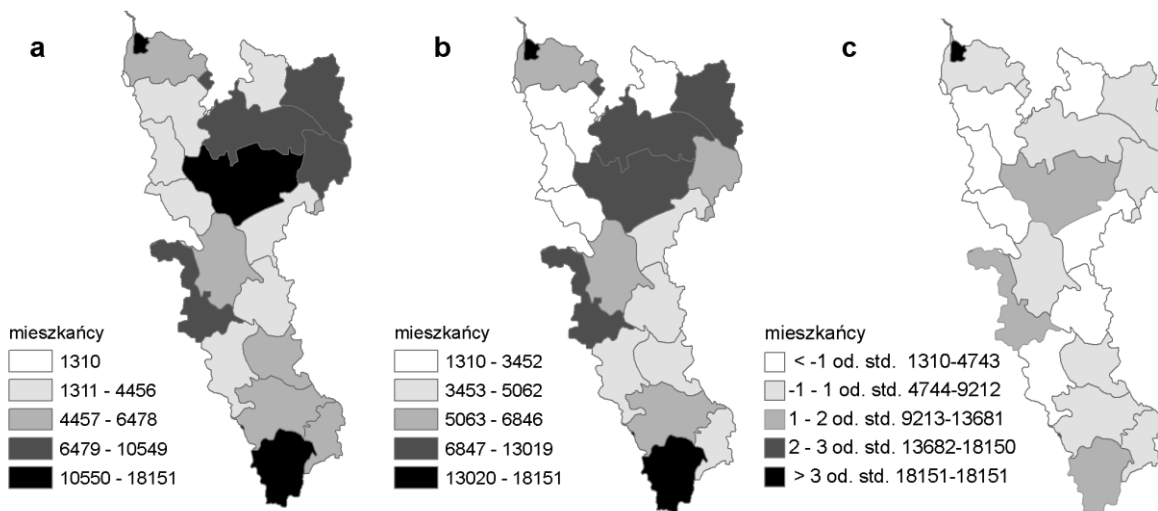
Rys. 4.5 Różne sposoby wizualizacji dwóch warstw poligonów: a – rysowane są wyłącznie obrysy poligonów (wypełnienia pozostają puste); b – warstwa (2) jest rysowana z pełnym wypełnieniem nad warstwą (1); c – zastosowanie szrafu w warstwie (2); d – warstwa (2) jest rysowana jako półprzezroczysta.

Kolory lub odcienie szarości są wybierane z dostępnych lub utworzonych zestawów kolorów zwanych paletami. Istnieją dwa podstawowe rodzaje palet (są one tworzone jako tablice LUT [patrz. Podroz. 5.1]). Pierwszy (Rysunek 4.6a) przeznaczony jest do wizualizacji danych jakościowych. Kolory lub odcienie szarości przypisywane do poszczególnych wartości są dobrane tak, aby jak najbardziej wyróżniały jedne od drugich. Drugi rodzaj przeznaczony jest dla danych ilościowych. Dzielone są one na podzbiory (klasy), którym przypisywane są kolory z palet tworzonych w taki sposób, aby obrazować stopniowe przechodzenie od wartości maksymalnych do minimalnych (Rysunek 4.6b).



Rys. 4.6 Palety kolorów: a – dla danych jakościowych; b – dla danych ilościowych.

Podział danych ilościowych na klasy nosi nazwę klasyfikacji i jest podstawową metodą wizualizacji danych ilościowych. Podziału na klasy dokonuje się przez wyznaczenie szeregu wartości stanowiących bariery (progi) pomiędzy klasami. Mogą być one wyznaczone przez użytkownika lub określone automatycznie wykorzystując jedną z paru metod. Na Rysunku 4.7 przedstawiono podział gmin zlewni Pasłęki na 5 klas, ze względu na liczbę mieszkańców, przeprowadzoną trzema automatycznymi metodami. Wykorzystano metody: „*natural breaks*” (Rysunek 4.7a), kwantyli (Rysunek 4.7b) i odchylenia standardowego (Rysunek 4.7c).



Rys. 4.7 Klasyfikacja gmin zlewni Pasłęki ze względu na liczbę mieszkańców: a – metoda *Natural brakes*; b – metoda kwantyli; c – metoda odchylenia standardowego.

Metoda *natural breakes* oparta jest na optymalizacji podziału danych na grupy ze względu na ich podobieństwo wewnątrz grupy i zróżnicowanie pomiędzy grupami. Metoda kwantyli przypisuje każdej klasie identyczną liczbę danych, natomiast w metodzie odchylenia standardowego stała szerokość przedziału definiowana jest jako wielokrotność lub część odchylenia standardowego. Rysunek 4.7 pokazuje, że stosując dostępne metody klasyfikacji można otrzymać bardzo różne rezultaty (podkreślenie lub zredukowanie znaczenia określonych różnic), co może prowadzić do odmiennych wniosków.

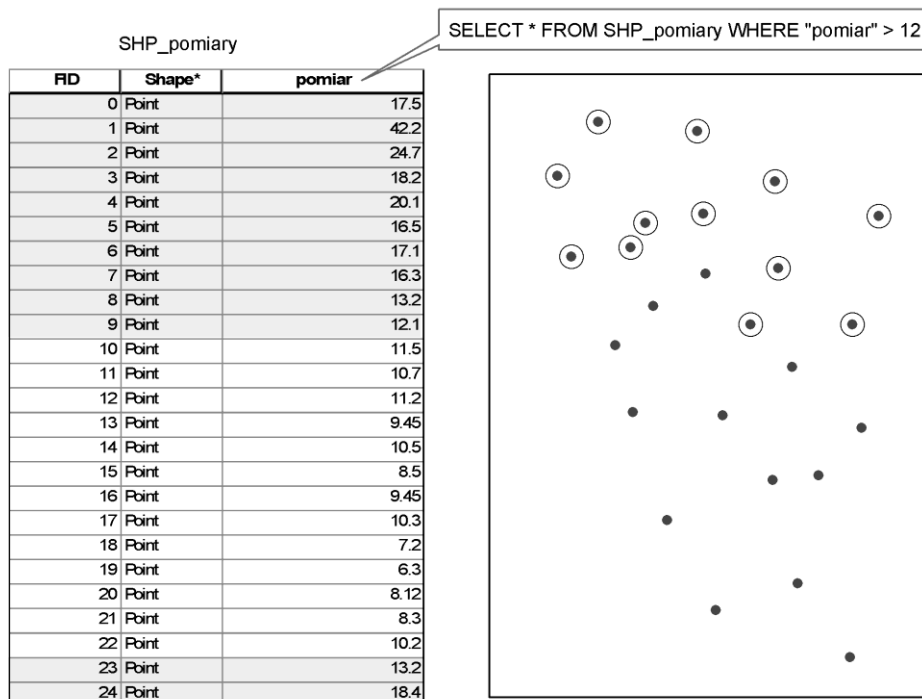
Przedstawione powyżej metody wizualizacji nie są wyłącznie wykorzystywane do wstępnej analizy danych. Służą one zarówno do interpretacji wyników prowadzonych analiz, jak i tworzenia produktów końcowych do raportów, prezentacji lub publikacji.

4.2 Selekcja atrybutowa

Dane: Tablice atrybutowe warstw punktowych, liniowych i poligonów.

Pytania i zadania badawcze: Które obiekty spełniają wymagany zestaw warunków atrybutowych? Utworzenie oddzielnej warstwy, wykonanie obliczeń lub niektórych operacji analitycznych, tylko dla pewnego podzbioru danych zdefiniowanych za pomocą atrybutów.

Zbiory danych wektorowych (punktów, linii i wieloboków) zawierają tablice atrybutowe. Funkcja selekcji atrybutowej (*select by attributes*), polega na wybraniu i zaznaczeniu (wizualnym) obiektów, których wartości atrybutowe spełniają pewien warunek logiczny. Wybrane obiekty nie tylko zostają zaznaczone w sensie wizualnym, ale tworzą zdefiniowany chwilowo podzbiór danych. Podzbiór ten może być zapisany jako oddzielna warstwa (np. SHP), służy także (w ArcGIS) do zaznaczenia obiektów (rekordów), na których mają być wykonywane różnego typu operacje.



Rys. 4.8 Selekcja obiektów na podstawie ich atrybutu za pomocą wyrażenia SQL

Warunki logiczne są definiowane w języku SQL (*Structured Query Language*). Jest to powszechnie używany język zapytań wykorzystywany w relacyjnych bazach danych. Na Rysunku 4.8 za pomocą wyrażenia SQL wybrano (zaznaczono) wszystkie punkty o wartościach atrybutu „pomiar” większych od 12. Ogólne zasady jego stosowania w ArcGIS zostały przedstawione w Ramce 4.1.

Ramka 4.1 SQL w ArcGIS

W ArcGIS obowiązują inne reguły gramatyczne SQL dla tablic geobazy danych (**G**) i pozostałych (np. SHP i dBase – **S**).

Podstawowe wyrażenie SQL stosowane najczęściej ma postać:
 SELECT * FROM nazwa_tablicy WHERE nazwa_pola *warunek*
 czyli
 WYBIERZ rekordy Z tablicy GDZIE w polu spełniony jest *warunek*

Nad polem komend SQL w ArcGIS polecenie do słowa WHERE jest już gotowe, należy wpisać tylko nazwę pola i warunek logiczny. Nazwę pola wpisujemy (może być wybrana z listy) jako: [nazwa] **G** albo "nazwa" **S**. Podstawowymi operatorami arytmetycznymi są znaki: =, >, <, >=, <= . Możemy więc wpisać warunek w postaci: "nazwa" > 12 lub : "nazwa" <= "nazwa2". Warunek może być uzupełniony przez operatory logiczne: AND, OR, NOT. Na przykład: : "nazwa" > 12 OR "nazwa" < 8 . Brak danej jest oznaczany jako NULL (symbol występuje w zestawieniu IS NULL albo IS NOT NULL). Aby wybrać wszystkie rekordy z danymi warunek będzie miał postać: "nazwa" IS NOT NULL . W wyrażeniu mogą pojawiać się obliczenia (operatory *, +, -, /): pola z liczbą lub pola z polem (tylko **G**) np: [nazwa]/[nazwa2] > [nazwa3] .W przypadku danych tekstowych w **G** nie ma różnicy pomiędzy

małymi i dużymi literami natomiast w **S** jest (używa się funkcji UPPER i LOWER np. UPPER ("nazwa") do zamiany na małe lub duże litery). Wprowadzanie tekstu częściowego wykorzystuje operator LIKE zamiast =. Jeden znak jest oznaczany jak '?' w **G** i '_' w **S**. Dowolna liczba znaków '*' w **G** i '%' w **S** np. "nazwa" LIKE 'Re%' będzie powodowała wybranie z pola wszystkich nazw rozpoczynających się od „Re” np. Reda, Rega.

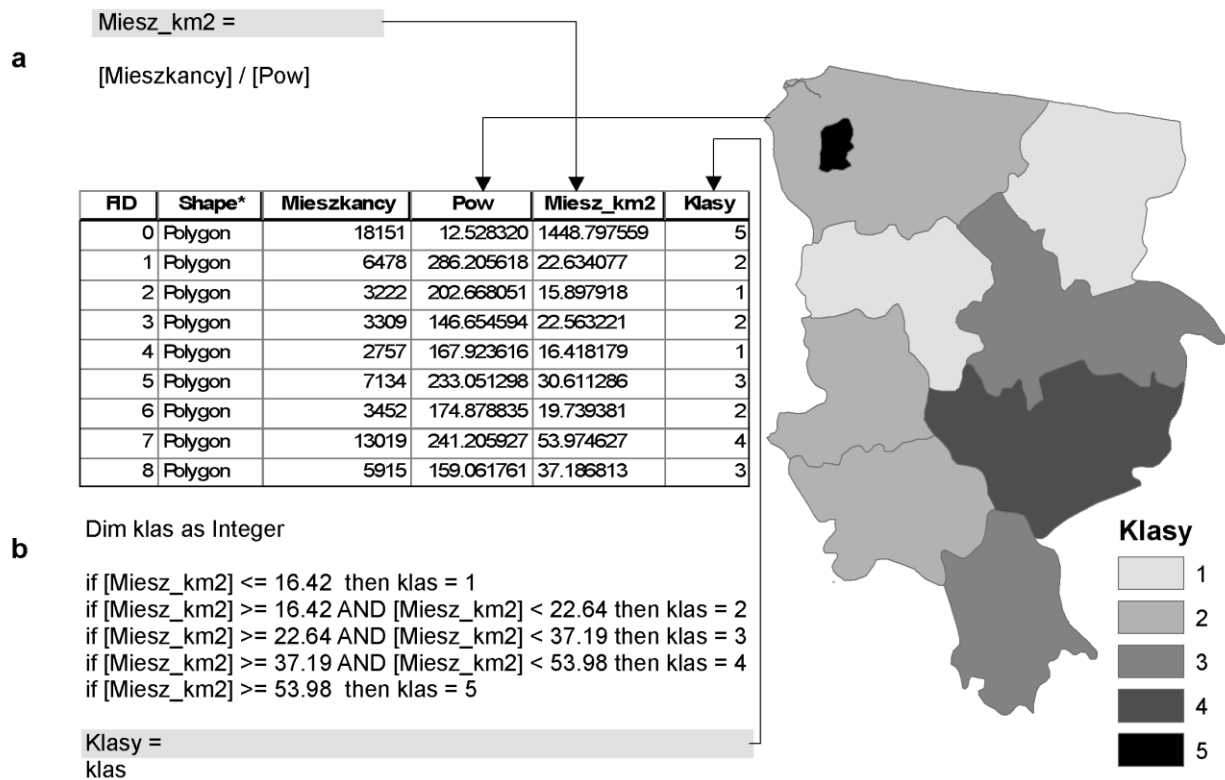
4.3 Operacje w tablicy atrybutowej (obliczenia, sumaryzacja, łączenie tablic, wprowadzanie wyników pomiaru)

Dane: Tablice atrybutowe warstw punktowych, liniowych i poligonów oraz stabilizowane dane nieprzestrzenne.

Pytania i zadania badawcze: Obliczanie nowych wartości atrybutów na podstawie atrybutów już istniejących. Wprowadzanie do pól atrybutowych wyników pomiarów kształtu pojedynczych obiektów: linii — długość, krętość (*sinuosity*), wymiar fraktalny (*fractal dimension*); poligony — obwód, powierzchnia. Przeprowadzanie klasyfikacji obiektów, przez przypisanie identyfikatora klasy, w oparciu o złożone schematy logiczne. Obliczanie z podzbiorów rekordów podstawowych statystyk i wykorzystywanie ich w obliczeniach. Przypisywanie obiektom atrybutów z zewnętrznych zbiorów danych.

Możliwość obliczania nowych wartości atrybutów jest istotnym elementem prowadzenia analiz, a tablica atrybutowa pełni centralną rolę w sekwencji analiz wektorowych. Nowe pola (kolumny) w tablicy atrybutowej mogą być wypełniane rezultatami obliczeń na istniejących polach, wynikami pomiarów kształtu obiektów przypisanych do danego rekordu lub danymi zewnętrznymi, które dzięki wspólnym identyfikatorom mogą być dołączane do tablicy. Wartości w nowych polach mogą być też rezultatem działania różnych funkcji analitycznych, w tym ekstrakcji z warstw rastrowych [patrz podroz. 4.5]. Prosty przykład obliczeń atrybutowych (Rysunek 4.9a) może być wyznaczenie gęstości zaludnienia, wyrażonego jako stosunek liczby osób na jednostkę powierzchni dla obszarów administracyjnych określonych poligonami. Zadanie to wymaga połączenia informacji nieprzestrzennej jaką jest liczba ludności w jednostkach administracyjnych z przestrzenną, czyli powierzchnią tych obszarów. Mapa obszarów administracyjnych posiada tablicę atrybutową z polem, w którym każdemu poligonowi przypisana jest liczba mieszkańców. Za pomocą jednego z narzędzi do wykonywania pomiarów opisanych poniżej zmierzono, a właściwie policzono powierzchnię każdego z poligonów, a rezultaty umieszczono w oddzielnym polu [Pow]. Następnie wykonano operację polegającą na podzieleniu przez siebie dwóch pól. Nazwy pól zostały umieszczone w nawiasach

kwadratowych (zapis w ArcGIS). W rezultacie w uprzednio utworzonym polu [Miesz_km2] każdemu poligonowi została przypisana obliczona wartość.



Rys. 4.9 Obliczanie nowych wartości w polu atrybutowym: a - za pomocą pojedynczego wyrażenia; b - za pomocą kodu Visual Basicu (przypisanie identyfikatorów klas).

Ramka 4.2

Tworzenie wyrażeń obliczeniowych w Visual Basicu

Rolę zmiennych pełni nazwy pól umieszczane w nawiasach kwadratowych. Używa się następujących arytmetycznych operatorów obliczeniowych oraz nawiasów:

potęgowanie	^	np.	[pole]^2.12
mnożenie	*	np.	([pole1]+[pole2])*[pole3]
dzielenie	/	np.	[Mieszkanicy]/[Pow]
dzielenie całkowite	\	np.	[pole]\10
dodawanie	+	np.	([pole1]+[pole2])*[pole3]
odejmowanie	-	np.	[pole1]-[pole2]
dodawanie tekstów	&	np.	[pole_tekst]&"_rzeka".

Można wykorzystywać też funkcje Visual Basicu:

np.		
wartość absolutna	Abs()	np. Abs ([pole1]-1)
wartość całkowita	Int()	np. Int([ID_HYD])

funkcja wykładnicza	Exp ()	np. Exp([a]) = e ^[a]
logarytm naturalny	Log ()	log ₁₀ (x) = Log(x)/Log(10)
pierwiastek kwadratowy	Sqr ()	
funkcje trygonometryczne (ką w radianach)	Atn(), Cos(), Sin(), Tan()	
generator liczby losowej (0-1)	Rnd	Int((6*Rnd)+1) tworzy losowo liczby całkowite 1-6
inicjacja liczb pseudolosowych	Randomize	

W ArcGIS, jeżeli wcześniej część rekordów została wybrana za pomocą selekcji (atrybutowej lub na podstawie relacji przestrzennych), obliczenia są wykonane tylko dla tych rekordów. Daje to możliwość przypisywania obliczonych wartości lub liczby do podzbioru rekordów. Do tworzenia wyrażenia obliczeniowego używa się w ArcGIS zasad i funkcji Visual Basica (Ramka 4.2). Wartość, która zostaje przypisana, może być określona nie za pomocą jednego wyrażenia, ale procesu obliczeniowego mającego postać skryptu w Visual Basic For Applications (VBA) (Ramka 4.3). Przykład przedstawiony na Rysunku 4.9b przypisuje do pola [Klasy] kody klas (od 1 do 5) na podstawie wyznaczonych wartości granicznych w procesie klasyfikacji. Taki sam rezultat można by uzyskać stosując kilkakrotnie sekwencje selekcji i obliczania. Za pomocą wyrażenia SQL należałoby wybrać rekordy przynależne do danej klasy i przypisać im kod klasy (liczbę całkowitą np. Klasy = 1). Operację tę należałoby powtórzyć dla każdej klasy. Proces obliczeniowy za pomocą skryptu daje znacznie szersze możliwości przetwarzania danych. Pozwala na uwzględnienie operatorów porównania i logicznych, na wykonywanie pomiaru kształtu obiektów takich jak długość, obwód i powierzchnia, a także na określanie współrzędnych punktu i punktu centralnego poligonu. Istotnym ograniczeniem procesu obliczeniowego jest jego oddzielne wykonywanie dla każdego rekordu, bez możliwości uwzględnienia innych wartości z danego pola. Częściowym rozwiązaniem jest wykorzystanie funkcji zwanej sumaryzacją i możliwości łączenia pól z różnych tablic.

Ramka 4.3

Obliczenia za pomocą skryptu (programu) w Visual Basic For Applications (VBA)

<http://www.csidata.com/custserv/onlinehelp/VBSdocs/VBSTUTOR.htm>

Skrypt jest rodzajem prostego programu realizowanego dla kolejnych rekordów. Składa się z szeregu linii. Podstawowym elementem programu są zmienne przechowujące wartości w skrypcie oraz udostępniające je funkcjom i ostatecznie wprowadzające do pola. Zmienne mają określony typ:

Boolean	zmienna losowa zawiera dwie wartości True albo False (prawda albo fałsz)
Byte	liczba całkowita od 0 do 255
Integer	liczba całkowita od -32768 do 32767

Long	liczba całkowita od -2147483648 do 2147483647
Single, Double	liczby rzeczywiste
Date(Time)	liczba reprezentująca datę
String	zmienna tekstowa

Dobłą praktyką jest deklaracja wszystkich zmiennych na początku programu za pomocą wyrażenia: np. **Dim X as double**

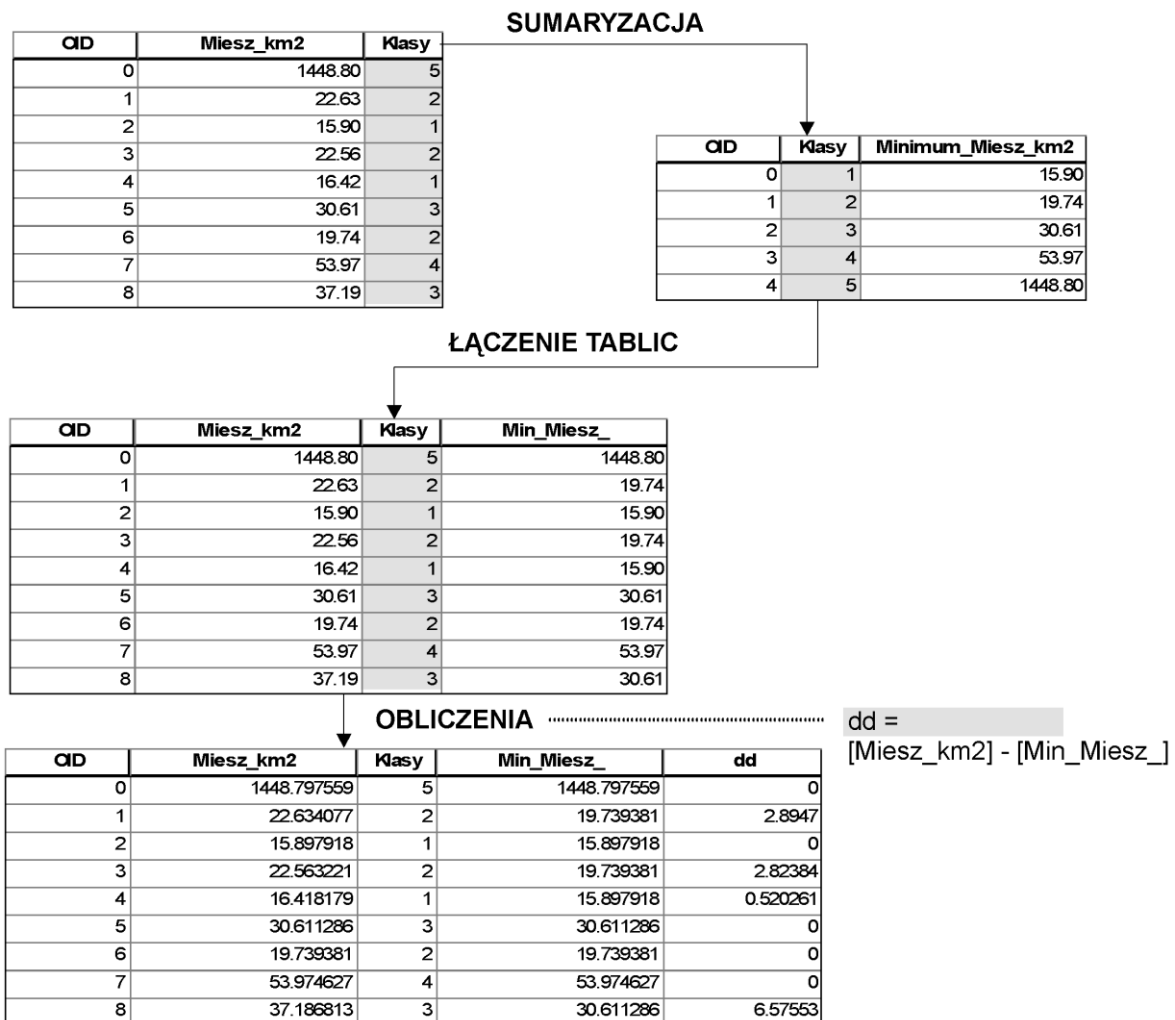
Oprócz operatorów arytmetycznych i funkcji opisanych w Ramce 4.2 wykorzystuje się operatory porównania (=, <> (różne), <, >, >=, <=) i logiczne (Not, And, Or, Xor). Linie w skrypcie tworzy się przede wszystkim za pomocą wyrażen przypisania i warunkowych. Wyrażenie przypisania ma postać: np. **X = 2.21**, natomiast wyrażenia warunkowe mogą mieć mniej lub bardziej złożoną formę: np.

```

if x < 5 then pp = 4.7
if x < 5 then pp = 4.7 else pp = 0
if x < 5 AND y > 2 then pp = 12

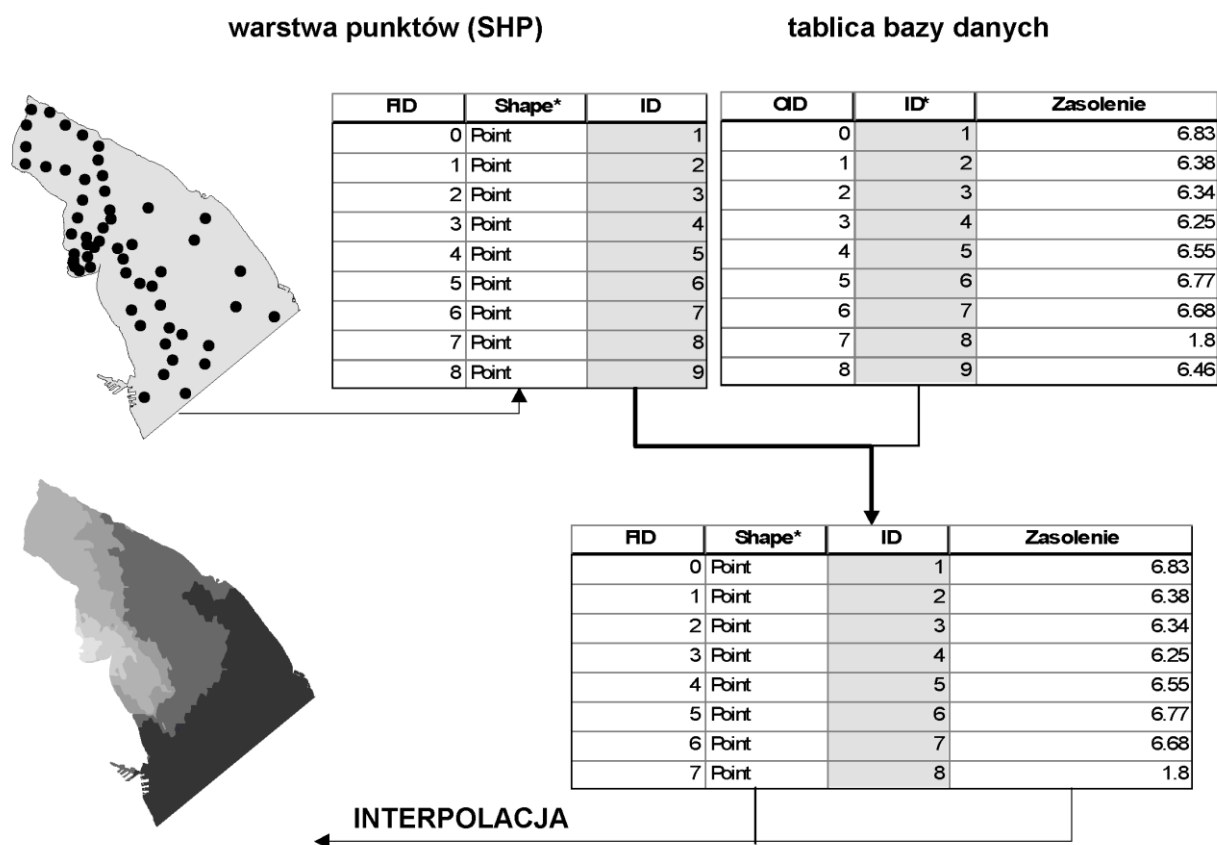
```

Na Rysunku 4.10 zilustrowano te możliwości na przykładzie. Zadanie polega na wyznaczeniu rekordów z najmniejszymi wartościami w danej klasie. W tym celu niezbędne jest wyznaczenie wartości minimalnej w każdej z pięciu klas. Operacja sumaryzacji danej kolumny [Klasy] z wartościami całkowitymi polega na utworzeniu podzbiorów rekordów dla każdej unikalnej wartości z tej kolumny (1,2,3,4,5) i obliczenia wybranych statystyk (minimum, maximum, średnia, odchylenie standardowe, wariancja) lub sumy z danych w poszczególnych polach. W przykładzie obliczono wartości minimalne dla każdej klasy z danych w polu [Miesz_km2]. Wynik jest zestawiony w tabeli, w której jest tyle rekordów, ile unikalnych wartości, dla których zostały wyznaczone statystyki. Kolejnym etapem jest dołączenie obliczonych wartości minimalnych do tabeli początkowej. Aby operacja dołączenia jednej tablicy do drugiej była możliwa, musi istnieć w każdej z nich pole zawierające identyfikator tworzący relacje między tablicami. Obie tablice zawierają pola z identyfikatorami klas ([Klasy] od 1 do 5). Dołączenie na podstawie tej relacji spowoduje dodanie do tablicy początkowej kolumny tablicy utworzonej w procesie sumaryzacji [Min_Miesz_] i wypełnienie jej wartościami odpowiadającymi identyfikatorowi klas. Wartość z identyfikatorem [Klasy] = 1, wynosząca 15.90 zostanie przypisana do wszystkich rekordów tablicy początkowej, które posiadają w polu [Klasy] wartość = 1 (rekordy o OID 2 i 4). W ten sposób każdemu rekordowi zostanie przypisana wartość minimalna dla klasy do której ten rekord należy. Obliczenie różnicy między wartością danego rekordu a wartością minimalną pozwoli na wyznaczenie rekordów o najmniejszej wartości w swojej klasie. Obliczona dla nich różnica będzie wynosić zero.



Rys. 4.10 Wykorzystanie sumaryzacji i łączenia tablic w procesie obliczeniowym prowadzonym przy pomocy tablicy atrybutowej.

Operacja łączenia tablic jest bardzo często wykorzystywana przy łączeniu informacji nieprzestrzennej z przestrzenną. Najbardziej typowym przykładem może być połączenie wektorowej warstwy punktów pomiarowych z tabelą bazy danych, zawierających wyniki pomiarów, w której jedno z pól zawiera numery punktów. Warstwa punktów pomiarowych zawiera także pole z ich numerami. Pola te służą do dołączenia wyników pomiarów do punktów pomiarowych, umożliwiając ich analizę przestrzenną np. przeprowadzenie interpolacji [patrz podroz. 5.6] i utworzenie mapy rozkładu przestrzennego danej zmiennej, jak pokazano to na Rysunku 4.11.



Rys. 4.11 Połączenie wektorowej warstwy punktów pomiarowych z tablicą bazy danych zawierających wyniki pomiarów w celu wykonania mapy rozkładu zmiennej w przestrzeni za pomocą interpolacji.

Dołączać można także tablice atrybutowe innych warstw wektorowych, rastrowych lub powstałe w rezultacie wykonywania różnych funkcji analizy przestrzennej.

Do pól tablicy atrybutowej można wprowadzać wyniki pomiarów kształtu obiektów graficznych związanych z poszczególnymi rekordami. Podstawową miarą kształtu obiektów liniowych jest ich długość. Ponieważ linia jest tworzona jako sekwencja odcinków pomiędzy kolejnymi jej punktami to długość linii będzie sumą tych odcinków. Kolejną miarą opisującą kształt linii jest jej krętość (*sinuosity*) jest ona zdefiniowana jako:

$$SIN = D_L / D_{SK} \tag{4.1}$$

gdzie: D_L – długość linii (suma wszystkich jej odcinków),

D_{SK} – odległość pomiędzy początkiem a końcem linii.

Długość obiektów liniowych wykazuje zależność od skali pomiaru. Ten sam odcinek brzegu morskiego mierzony ze zdjęcia satelitarne o rozdzielczości 30 m i rozdzielczości 0.6 m będzie miał różne długości. Wynika to z uwzględniania większej ilości drobnych nierówności brzegu na

zdjęciu o wyższej rozdzielczości. Miarą tego zjawiska jest wymiar fraktalny (*fractal dimension*) zdefiniowany jako:

$$FD = \log(n) / (\log(n) + \log(D_{SK} / D_L)) \quad (4.2)$$

gdzie: n – liczba segmentów danej linii,

D_L – długość linii (suma wszystkich jej odcinków),

D_{SK} – odległość pomiędzy początkiem a końcem linii.

Wraz ze wzrostem szczegółów wartość tej miary zmienia się od 1 (linia prosta) do 2 (linia całkowicie wypełniająca pewną powierzchnię). Podstawowymi miarami kształtu obiektów powierzchniowych (poligonów) jest ich obwód i powierzchnia. Praktyczne metody obliczania tych wartości w tablicach atrybutowych (w ArcGIS) przedstawiono w Ramce 4.4

Ramka 4.4

Pomiary kształtu obiektów wektorowych w ArcGIS (9.1)

Linie

Długość linii jest umieszczana zawsze w oddzielnym polu tablic geobazy danych. W warstwach SHP musi być obliczana za pomocą skryptu VBA, który może być także wkomponowany w sekwencję innych instrukcji. Ma on postać :

```
Dim DL as double
```

```
Dim pCurve as ICurve
```

```
Set pCurve = [shape]
```

```
DL = pCurve.Length
```

Innym sposobem utworzenia pola z długością linii jest wykorzystanie funkcji **Add LENGTH Field to Table (arcs)** (Dodaj pole długości do tablicy) znajdującej się wśród narzędzi (Table Tools) dostępnych w rozszerzeniu **Hawth's Analysis Tools (HAT)**(<http://www.spataleecology.com/htools>). Funkcja ta tworzy nowe pole, albo wykonuje aktualizację już istniejącego. Dla każdego rekordu wpisywana jest długość linii, przy czym może być ona zapisana w innej jednostce niż jednostki układu współrzędnych mapy. Ze względu na to, że jednostkami mapy są najczęściej metry, wygodniej jest w wielu przypadkach operować kilometrami.

Krętość linii (sinuosity) może być obliczona za pomocą funkcji **Line Metrics** (Miary linii) znajdującej się w (Analysis Tools) rozszerzenia **HAT**. Funkcja ta tworzy dwa pola pierwsze [Sinuosity] z wartościami krętości dla każdej linii (rekordu) i drugie [LineSegs] z liczbą odcinków danej linii.

Wymiar fraktalny (fractal dimension) może być także obliczony za pomocą funkcji **Line Metrics** (Miary linii) znajdującej się w (Analysis Tools) rozszerzenia **HAT**. Funkcja tworzy dwa pola pierwsze [FracDim] z wartościami wymiaru fraktalnego dla każdej linii (rekordu) i drugie [LineSegs] z liczbą odcinków danej linii.

Poligony

Obwód poligonu jest umieszczany zawsze w oddzielnym polu tablic geobazy danych. W warstwach SHP musi być obliczana za pomocą skryptu VBA, który może być także wkomponowany w sekwencję innych instrukcji. Ma on postać :

```
Dim O as double
```

```
Dim pCurve as ICurve
```

```
Set pCurve = [shape]
```

```
O = pCurve.Length
```

Innym sposobem utworzenia pola z obwodem jest wykorzystanie funkcji **Add AREA/PERIMETER Fields To Table (polygons)** (Dodaj pole powierzchni/obwodu znajdującej się w (Analysis Tools) rozszerzenia **HAT**. Obwód może być zapisany w innej jednostce niż jednostki układu współrzędnych mapy.

Powierzchnia poligonu jest umieszczana zawsze w oddzielnym polu tablic geobazy danych. W warstwach SHP może być obliczona za pomocą funkcji ArcGIS **Calculate Area** (Spatial Statistics Tools > Utilites) bądź za pomocą skryptu VBA, który może być także wkomponowany w sekwencję innych instrukcji, o postaci :

```
Dim P as double
```

```
Dim pArea as Iarea
```

```
Set pArea = [shape]
```

```
P = pArea.area
```

Innym sposobem utworzenia pola z wartością powierzchni jest wykorzystanie funkcji **Add AREA/PERIMETER Fields To Table (polygons)** znajdującej się w (Analysis Tools) rozszerzenia **HAT**. Powierzchnia może być ona zapisana w innej jednostce niż jednostki układu współrzędnych mapy, co prawie zawsze jest bardzo wygodne. W ArcGIS 9.2 obliczanie długości linii, obwodu i powierzchni poligonu jest wykonywane za pomocą opcji Calculate Geometry.

4.4 Selekcja na podstawie relacji przestrzennych

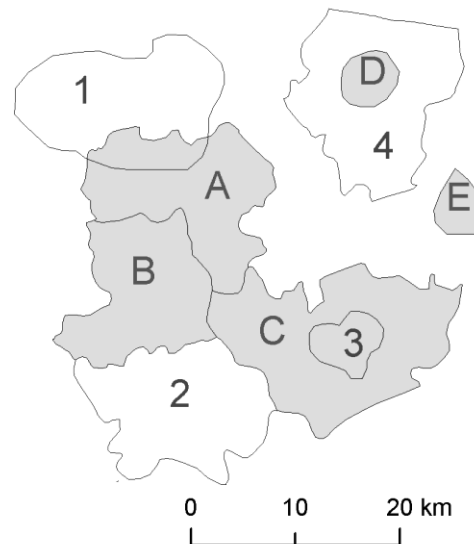
Dane: Wektorowe warstwy punktów, linii i poligonów.

Pytania i zadania badawcze: Znajdowanie obiektów, które spełniają wymagane warunki atrybutowe oraz pozostają w określonych relacjach przestrzennych z obiektami innych warstw. Utworzenie oddzielnych warstw ze znalezionych w ten sposób obiektów.

Obiekt przestrzenny: punkt, linia lub poligon warstwy wektorowej ma określone relacje przestrzenne z obiektami innych warstw. Podstawowe relacje poligonu jednej warstwy z poligonami drugiej warstwy zostały przedstawione na Rysunku 4.12. Obiekty pierwszej warstwy są oznaczone przez litery (warstwa LITER), zaś obiekty drugiej przez cyfry (warstwa

CYFR). Każdy obiekt pierwszej warstwy może być scharakteryzowany pod względem jego położenia względem obiektów drugiej warstwy. Obiekty obu warstw mogą mieć wspólną lokalizację, czyli zajmować to samo miejsce w przestrzeni. Obiekt powierzchniowy (poligon) ma dwa elementy: obrys lub granicę oraz wnętrze lub wypełnienie. Jeżeli wnętrze obiektu z warstwy LITER częściowo pokrywa się z wnętrzem któregoś z obiektów warstwy CYFR lub posiadają one choć niewielki odcinek wspólnej granicy, to możemy powiedzieć, że mają wspólny element. Relacja tego typu w programie ArcGIS nosi nazwę *intersect*. Obiekty A, C i D posiadają wspólną część wnętrza (położoną w tym samym miejscu), a obiekt B posiada wspólną granicę z obiektem numer 2. Kolejnym przykładem relacji przestrzennej jest odległość danego obiektu do najbliższego obiektu innej warstwy. Można sprawdzić, że wszystkie obiekty warstwy LITER leżą nie dalej niż 3 kilometry od obiektów warstwy CYFR. Gdyby deklarowaną odległość zmniejszyć do 2 km, warunkiem tego nie spełniałby obiekt E. Obiekty mogą zawierać obiekty innej warstwy lub być przez nie zawierane. Różnica pomiędzy całkowitym zawieraniem i zawieraniem, znajdująca się w opisie rysunku, polega na tym, że całkowite zawieranie wymaga, aby obrys poligonu zawieranego nie miał punktów wspólnych z obrysem poligonu, który go zawiera. W procesie selekcji obiektów ze względu na ich lokalizację, opcjonalnie może brać udział tylko pewien ich podzbiór wybrany wcześniej za pomocą selekcji atrybutowej. Każdy podzbiór może być zapisany jako oddzielna warstwa, co w rezultacie umożliwia badanie ich wzajemnych relacji. Jednocześnie w wybranym polu atrybutowym można przypisać identyfikator dla dowolnego podzbioru wybranych obiektów. Daje to ogromne możliwości różnorodnego przekształcania danych z jednoczesnym uwzględnieniem warunków wynikających z wartości atrybutów, a także relacji przestrzennych zarówno wewnątrz danej warstwy, jak i pomiędzy warstwami. Relacje przestrzenne mogą być analizowane we wszystkich możliwych kombinacjach rodzajów warstw. Ich praktyczne znaczenie może być bardzo różnorodne. Relacja *intersection* może być wykorzystana do wybrania podzbiorów obiektów z różnych warstw znajdujących się na obszarze zainteresowania (zdefiniowanym w oddzielnej warstwie). Na Rysunku 3.24 przedstawiono selekcję rzek dla danej zlewni za pomocą operacji wybrania rzek, który mają wspólny element (*intersection*) z warstwą zawierającą poligon przedstawiający zlewnię.

obiekty A, B, C, D mają wspólny element z obiektami CYFR
 obiekty A, B, C, D, E są w zasięgu 3 km od obiektów CYFR
 obiekt C całkowicie zawiera obiekt(y) CYFR
 obiekt D jest całkowicie zawarty w obiekcie CYFR
 obiekty C, D mają swój środek wewnątrz obiektów CYFR
 obiekty B, C mają wspólny odcinek (linii obrysu) z obiektami CYFR
 obiekty B, C stykają się z granicą obiektów CYFR
 obiekt A jest przecinany przez obrys obiektu(ów) CYFR
 obiekt C zawiera obiekt(y) CYFR
 obiekt D jest zawarty w obiekcie CYFR



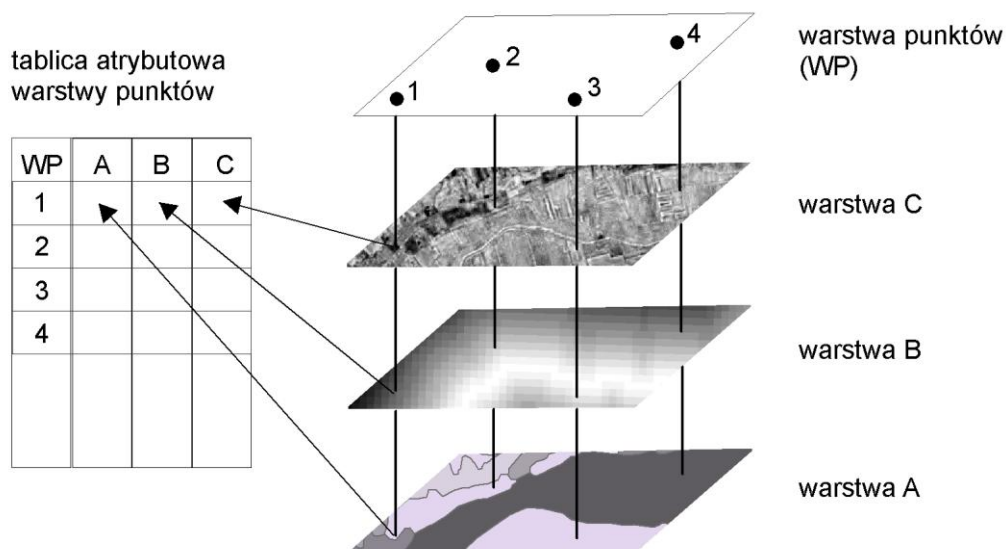
Rys. 4.12 Wybrane relacje poligonów jednej warstwy z poligonami drugiej warstwy. Obiekty pierwszej warstwy są oznaczone przez litery (warstwa LITER), zaś obiekty drugiej przez cyfry (warstwa CYFR).

4.5 Pozyskiwanie danych atrybutowych na podstawie relacji przestrzennych

Dane: Wektorowe warstwy punktów, linii i poligonów oraz warstwy rastrowe (jako źródło danych)

Pytania i zadania badawcze: Przypisywanie obiektom danej warstwy wektorowej nowych atrybutów pochodzących od obiektów innych warstw, które pozostają z obiektami danej warstwy w pewnej relacji przestrzennej. Dodanie do warstwy punktów atrybutów z różnych warstw wektorowych i rastrowych (z miejsc odpowiadających tym punktom)

W badaniach przyrodniczych częstym działaniem jest uzupełnienie atrybutów warstwy punktów pomiarowych o dane zawarte w innych warstwach wektorowych i rastrowych. Problem polega na pozyskaniu wartości z miejsca w którym znajduje się punkt pomiarowy i przypisaniu jej jako kolejnego atrybutu do danego punktu. Proces ten pokazany na Rysunku 4.13 jest czasami nazywany ekstrakcją. Jest to najbardziej efektywna metoda wzbogacenia danych pomiarowych o dodatkowe (uzupełniające) dane.



Rys. 4.13 Ekstrakcja danych z warstw wektorowych i rastrowych do warstwy punktów pomiarowych jest podstawą modelowania regresyjnego w GIS.

Jeżeli pomiędzy danymi pomiarowymi a wartościami pobranymi z warstw istnieje istotna zależność, to można ją wykorzystać do estymacji mierzonej wartości we wszystkich punktach na podstawie istniejących warstw. Metoda ta nosi nazwę modelowania regresyjnego [patrz podroz. 8.4] i jest jednym z podstawowych sposobów wykorzystania GIS w badaniach naukowych. Ekstrakcja danych punktowych z danych wektorowych może polegać na przypisaniu atrybutów z najbliższego obiektu, jeżeli w miejscu punktu pomiarowego na warstwie z której pobierane są atrybuty nie ma obiektu. W takiej sytuacji oprócz atrybutów podaje się informację o odległości do danego obiektu. W przypadku pobierania atrybutów z warstwy punktowej mogą być to statystyki atrybutów podzbioru punktów, dla których punkt warstwy przyjmującej atrybut jest najbliższy. Podobnie dla warstwy liniowej podzbiór do obliczenia statystyk mogą tworzyć tylko linie przecinające dany punkt. Przy ekstrakcji wartości punktowych z mapy rastrowej najczęściej do punktu przypisuje się wartość z centrum komórki rastrowej, w której zlokalizowany jest punkt. Istnieje także możliwość interpolowania nowej wartości na podstawie wartości w komórkach sąsiednich. Przy ekstrakcji wartości z mapy rastrowej do linii używa się średniej ważonej, gdzie jako wagi służą długości odcinków linii w komórkach z daną wartością (LWM – *Length Weighted Mean*). Wielkość ta jest określona wyrażeniem w postaci:

$$\bar{x} = \sum_{i=1}^n \frac{l_i * v_i}{L} \quad (4.3)$$

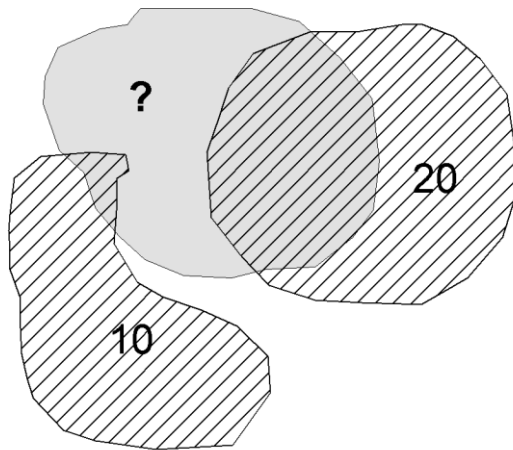
gdzie: v_i – wartość w komórce rastra o wartości i

l_i – długość odcinków linii w komórkach rastra i

L – całkowita długość linii

n – liczba wartości rastra wzdłuż linii

Przy pobieraniu atrybutów do warstw poligonów stosuje się następujące rozwiązania. W przypadku warstwy punktów może to być liczba punktów znajdujących się wewnątrz danego poligonu lub statystyki z ich atrybutów. W przypadku linii przydatnym rozwiązaniem jest możliwość przypisania łącznej długości odcinków linii zawartych w poligonie. Istotnym zagadnieniem jest przypisanie poligonom atrybutów z innej warstwy poligonów.



Rys. 4.14 Problem przypisywania atrybutów w relacji poligon – poligon.

Możliwe są dwa podstawowe rozwiązania: (1) obliczenie wartości średniej z atrybutu poligonów przecinających dany poligon (przypisanie wartości 15), (2) obliczenie średniej ważonej uwzględniającej wspólne powierzchnie obu poligonów (przypisanie wartości zbliżonej do 20). Praktyczne metody przypisywania atrybutów w ArcGIS zostały przedstawione w ramce 4.5.

Ramka 4.5

Sposoby przypisywania atrybutów za pomocą relacji przestrzennych w ArcGIS (9.1)

Istnieją trzy grupy metod służących do ekstrakcji atrybutów lub wartości (w przypadku danych rastrowych) i przypisywania ich obiektom warstwy punktów, linii lub poligonów. Pierwsza grupa metod jest związana z operacją dołączania pól z tablicy atrybutowej na podstawie relacji przestrzennych. drugą grupę stanowią specjalne funkcje ArcGIS, a trzecią funkcje rozszerzeń w tym przypadku **Hawth's Analysis Tools (HAT)**(<http://www.spataleecology.com/htools>).

Przypisanie atrybutów do **PUNKTU** (warstwa A)

Przypisanie atrybutów (lub wartości rastra) do warstwy danych punktowych jest najczęściej stosowaną operacją tego typu. Opcje dołączania pól z tablic atrybutowych różnych typów obiektów zostały zestawione w tabeli poniżej;

Od obiektu (warstwa B)	Opcja	Opis
PUNKT	Podzbiór punktów warstwy B dla których dany punkt warstwy A jest najbliższy (ze wszystkich punktów warstwy A)	Liczba punktów i statystyki (średnia, suma, minimum, maksimum, odchylenie standardowe, wariancja) ze wszystkich atrybutów.
	Najbliższy punkt z warstwy B	Wszystkie atrybuty i odległość
LINIA	Wszystkie linie warstwy B przecinające dany punkt warstwy A	Liczba linii i statystyki (średnia, suma, minimum, maksimum, odchylenie standardowe, wariancja) ze wszystkich atrybutów.
	Najbliższa linia z warstwy B	Wszystkie atrybuty i odległość
POLIGON	Poligon warstwy B, który zawiera dany punkt z warstwy A	Wszystkie atrybuty
	Najbliższy poligon z warstwy B	Wszystkie atrybuty i odległość

ArcGIS posiada także funkcję **Extract Values to Points** (Spatial Analyst>Extraction), która umożliwia ekstrakcję wartości z pojedynczej warstwy rastrowej do wektorowej warstwy punktów. Jeżeli w warstwie znajduje się parę kanałów, pobranie wartości nastąpi z kanału pierwszego. Opcjonalnie pobierane wartości mogą być interpolowane z wartości otaczających. Znacznie wygodniejsza w stosowaniu jest funkcja **HAT Intersect Point Tool** (Analysis Tools). Umożliwia ona jednoczesne uzupełnianie warstwy wektorowej punktów o nowe pola i wartości z szeregu warstw wektorowych i rastrowych. Z warstw rastrowych wielo-kanałowych pobierane są wartości dla każdego kanału. Wszystkie wartości pobierane są z centrum komórki rastrowej.

Przypisanie atrybutów do **LINII** (warstwa A)

Opcje dołączania pól z tablic atrybutowych różnych typów obiektów do tablicy warstwy wektorowej linii zostały zestawione w tabeli poniżej;

Od obiektu (warstwa B)	Opcja	Opis
PUNKT	Podzbiór punktów warstwy B dla których dana linia warstwy A jest najbliższa (ze wszystkich linii warstwy A)	Liczba punktów i statystyki (średnia, suma, minimum, maksimum, odchylenie standardowe, wariancja) ze wszystkich atrybutów.
	Podzbiór punktów warstwy B które przecina dana linia warstwy A	Liczba punktów i statystyki (średnia, suma, minimum, maksimum, odchylenie standardowe, wariancja) ze wszystkich atrybutów.
	Najbliższy punkt z warstwy B	Wszystkie atrybuty i odległość
LINIA	Wszystkie linie warstwy B przecinające daną linię warstwy A	Liczba linii i statystyki (średnia, suma, minimum, maksimum, odchylenie standardowe, wariancja) ze wszystkich atrybutów.
	Linia warstwy B która jest częścią linii warstwy A	Wszystkie atrybuty

POLIGON	Poligony warstwy B, które przecina linia z warstwy A	Liczba poligonów i statystyki (średnia, suma, minimum, maksimum, odchylenie standardowe, wariancja) ze wszystkich atrybutów.
	Najbliższy poligon z warstwy B	Wszystkie atrybuty i odległość
	Poligon z warstwy B w którym mieści się linia	Wszystkie atrybuty

HAT posiada funkcję przypisującą atrybuty do linii na podstawie wartości komórek rastra znajdujących się na jej torze. Funkcja **Line Raster Intersection Statistics** (*Analysis Tools*) przypisuje każdej linii wartość LWM (średnią ważoną) i LWSD (*length weighted standard deviation* – ważne odchylenie standardowe).

Przypisanie atrybutów do **POLIGONÓW** (warstwa A)

Poniżej zestawiono opcje dołączania pól z tablic atrybutowych różnych typów obiektów do tablicy warstwy wektorowej poligonów;

Od obiektu (warstwa B)	Opcja	Opis
PUNKT	Podzbiór punktów warstwy B które zawiera dany poligon warstwy A	Liczba punktów i statystyki (średnia, suma, minimum, maksimum, odchylenie standardowe, wariancja) ze wszystkich atrybutów.
	Punkt warstwy B który jest najbliższym danemu poligonu warstwy A	Wszystkie atrybuty i odległość
LINIA	Wszystkie linie warstwy B przecinające dany poligon warstwy A	Liczba linii i statystyki (średnia, suma, minimum, maksimum, odchylenie standardowe, wariancja) ze wszystkich atrybutów.
	Linia warstwy B która jest najbliższym danemu poligonu warstwy A	Wszystkie atrybuty i odległość
POLIGON	Poligony warstwy B, które przecinają dany poligon z warstwy A	Liczba poligonów i statystyki (średnia, suma, minimum, maksimum, odchylenie standardowe, wariancja) ze wszystkich atrybutów.
	Poligon z warstwy B który jest zawarty w danym poligonie warstwy A	Wszystkie atrybuty

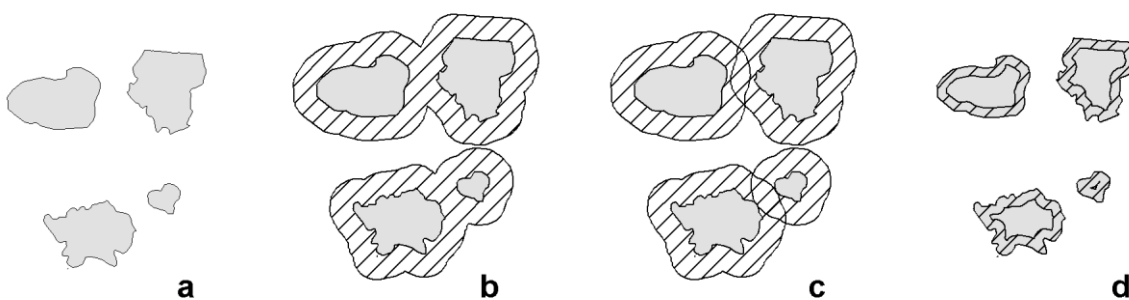
HAT posiada dwie funkcje przypisujące atrybuty do poligonów. Pierwsza **Sum Line Lengths In Polygons** (*Analysis Tools*) przypisuje łączną długość wszystkich linii zawartych w danym poligonie. Funkcja ta wykorzystuje operację wycinania [patrz podroz. 4.7], dzięki czemu liczone są tylko odcinki faktycznie znajdujące się wewnątrz poligonu. Druga funkcja **Polygon in Polygon Analysis** (*Analysis Tools*) oblicza statystyki w postaci średniej ważonej uwzględniającej powierzchnie przecinających poligonów, wartości minimalnej i maksymalnej oraz sumę atrybutów i liczbę przecinających poligonów.

4.6 Buforowanie

Dane: Wektorowe warstwy punktów, linii i poligonów.

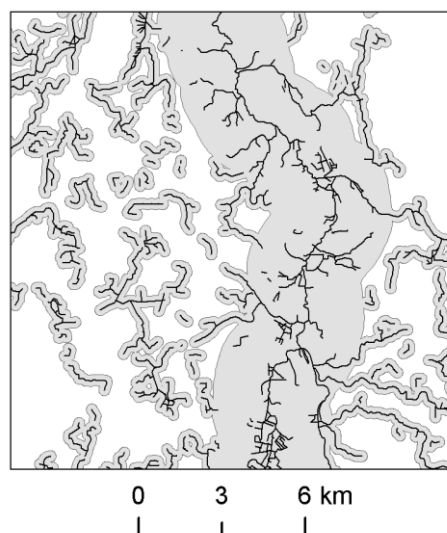
Pytania i zadania badawcze: Wyznaczanie stref w oparciu o odległość do obiektów określonego typu.

Buforem w analizie przestrzennej określamy najczęściej wielobok (poligon) otaczający dany obiekt lub grupę obiektów. Definiuje się go przez podanie odległości (wartości granicznej) jego obrysu od obrysu obiektów. Każdy punkt wewnątrz bufora jest położony bliżej obrysu obiektu niż wartość graniczna. Istnieje szereg podstawowych możliwości tworzenia buforów (Rysunek 4.15).



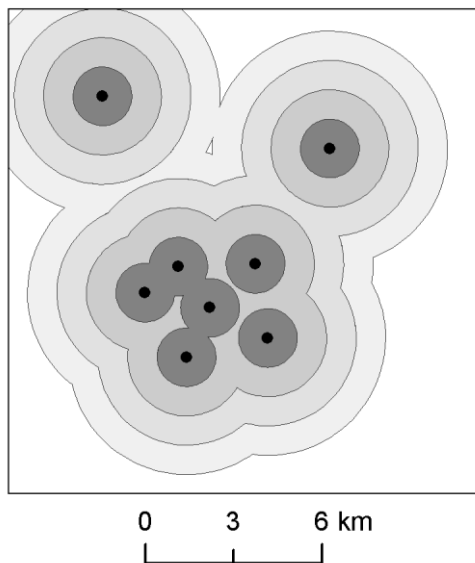
Rys. 4.15 Buforowanie poligonów: a – poligony; b – bufory zewnętrzne połączone; c – bufory zewnętrzne oddzielne; d – bufory wewnętrzne.

Obiekty punktowe i liniowe mogą być buforowane od zewnątrz, natomiast bufory poligonów mogą być tworzone zarówno od strony zewnętrznej, jak i wewnętrznej (Rysunek 4.15d). Bufory utworzone dla poszczególnych obiektów mogą na siebie zachodzić (Rysunek 4.15c). Można łączyć je ze sobą tworząc strefy buforowe (Rysunek 4.15b). Przy ich tworzeniu mogą powstawać luki (wyspy) w ich ciągłości.



Rys. 4.16 Buforowanie linii, zastosowano różny rozmiar bufora w zależności od klasy obiektu liniowego.

W funkcjach buforowania istnieje szereg opcji ich tworzenia (ArcGIS). Jedną z nich jest tworzenie buforów o rozmiarach (wartości granicznej odległości) różnej dla różnych obiektów (Rysunek 4.16). Rozmiar bufora jest deklarowany w polu atrybutowym. Inną możliwością jest tworzenie pierścieni buforów o stałym kroku powiększania ich rozmiaru (Rysunek 4.17).



Rys. 4.17 Buforowanie punktów, pierścienie buforów o kroku 1 km.

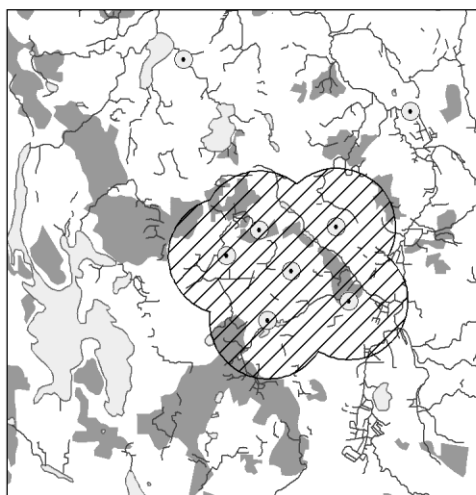
Utworzone bufory mogą zachowywać atrybuty obiektów, z których powstały. Takie rozwiązanie oferuje funkcja **Buffer Features** (*Vector Editing Tools*) z **Hawth's Analysis Tools (HAT)** (<http://www.spatial ecology.com/htools>).

4.7 Nakładanie

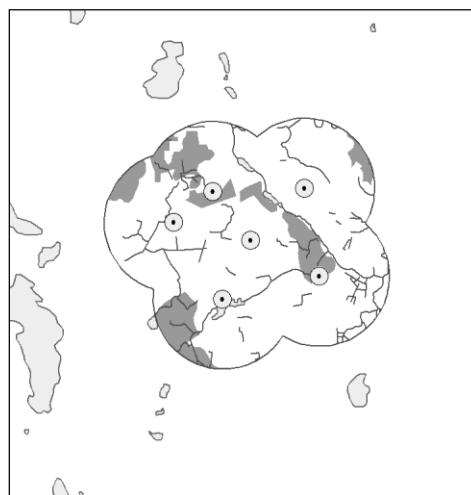
Dane: Wektorowe warstwy punktów, linii i poligonów.

Pytania i zadania badawcze: Stworzenie warstw dla danego projektu obejmujących wyłącznie rejon badań (z warstw obejmujących większe obszary). Utworzenie warstwy obiektów, które mają identyczną lokalizację co obiekty innej warstwy i przypisanie im atrybutów tych obiektów. Na przykład: z warstwy rzek danej zlewni i warstwy pokrycia terenu utworzyć warstwę odcinków rzek płynących przez las z atrybutem rodzaju lasu. Testowanie połączeń segmentów linii w sieciach i tworzenie warstw punktów węzłowych. Utworzenie i znalezienie nowych obiektów spełniających dowolną kombinację warunków z wielu warstw. Na przykład: znalezienie obszarów lasów (warstwa pokrycia terenu), które są nie dalej od rzeki niż 200 m (warstwa bufora rzeki).

Nazwa tej grupy funkcji odzwierciedla podstawowy mechanizm ich działania, polegający na nałożeniu warstw jedna na drugą, zespoleniu ich geometrii i atrybutów oraz utworzeniu nowej warstwy. Zespolenie geometrii, czyli graficznej części danych, może przebiegać według trzech różnych scenariuszy. W pierwszym warstwa poligonów działa jak metalowa foremka na ciasto, które odpowiada warstwie dowolnego typu, wycinając z niego obiekty lub ich części i umieszczając w nowej warstwie. Tylko punkty, linie i poligony, które znajdują się wewnątrz obrysu poligonów wycinających zostaną włączone do nowej warstwy. Jeżeli jakaś linia lub poligon są przecinane przez obrys obiektu wycinającego, to zostaną przez obrys podzielone na części wewnętrzne i zewnętrzne. Następnie tylko części znajdujące się wewnątrz obrysu zostaną dołączone jako oddzielne obiekty do nowej warstwy. Wszystkie wycinane obiekty zachowują swoje atrybuty, nie otrzymując żadnych atrybutów od obiektów wycinających. Na Rysunku 4.18a przedstawiono szereg warstw różnych typów: warstwę punktów, warstwę linii – rzeki, oraz trzy warstwy poligonów – lasy, jeziora i obszar zainteresowania odpowiadający buforowi grupy punktów (zakreskowany szrafem). Zakreskowany poligon bufora jest jedynym obiektem warstwy wycinającej. Wycinaniu podlegają warstwa punktów, rzek i lasów. W rezultacie w nowych warstwach znajdują się wyłącznie obiekty, które są wewnątrz poligonu wycinającego. Te obiekty jak np. niektóre lasy (znajdujące się częściowo wewnątrz) zostają podzielone na dwie części i tylko część wewnętrzna znajdzie się w nowej warstwie. W ArcGIS funkcja działająca w ten sposób nazywa się CLIP. Funkcja ta jest powszechnie używana do tworzenia warstw obejmujących wyłącznie rejon badań (obszar zainteresowania, AOI – *area of interest*) z warstw znacznie większych obszarów. Powoduje to zmniejszenie liczby obiektów w warstwach, co zapewnia bardziej efektywną pracę.



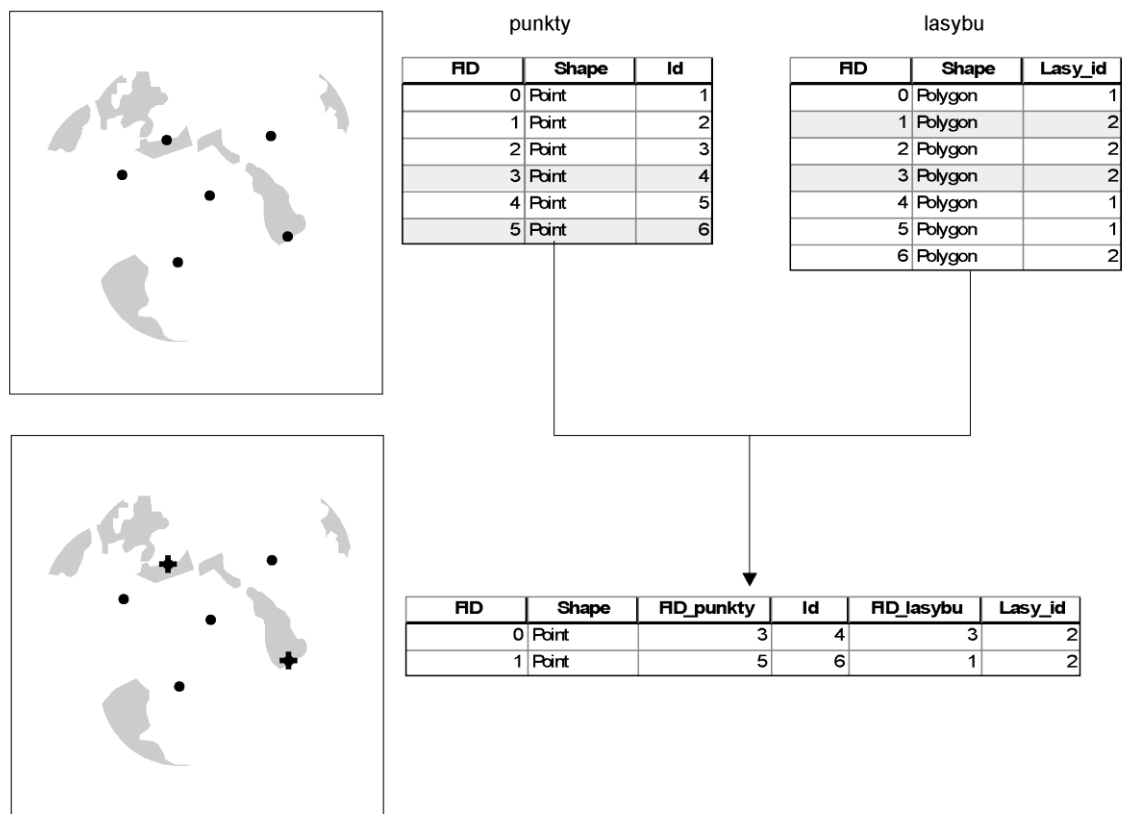
a



b

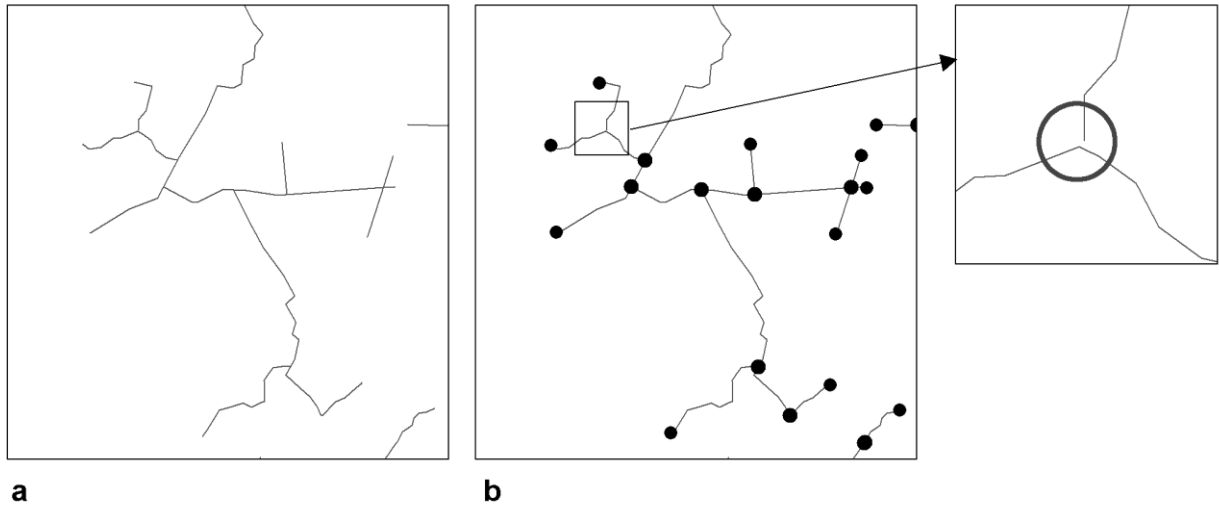
Rys. 4.18 Działanie funkcja wycinania (CLIP): z warstw punktów, rzek (linie) i lasów (ciemniejsze poligony) na mapie (a) utworzono wycinając warstwą poligonów (obszar zakresowany – jeden poligon) nowe warstwy pokazane na mapie (b) wraz ze starą warstwą jezior (jasne poligony).

Drugim scenariuszem działania funkcji nakładania jest tworzenie nowej warstwy wszystkich wspólnych elementów określonego typu (wspólnych punktów, linii lub obszarów). W ArcGIS realizuje go funkcja przecinania INTERSECT. Podstawowa idea działania funkcji została przedstawiona na Rysunku 4.19. Funkcja działa na dowolnych warstwach wektorowych (punktów, linii i poligonów). Na rysunku funkcję INTERSECT zastosowano do warstwy punktów (punkty) i poligonów (lasybu). W warstwie punktów znajduje się pięć obiektów, którym w tablicy atrybutowej w polu [Id] przypisano numery od 1 do 6. Punkty posiadają też identyfikatory obiektów (FID) tworzone przez system. W warstwie lasybu jest siedem poligonów posiadających atrybut [Lasy_id], któremu przypisano wartość 1 albo 2, oraz pole FID. W zależności od wyboru, funkcja utworzyć może warstwę punktów lub poligonów. W przedstawionym na rysunku przykładzie utworzono warstwę punktów. Znajdują się w niej dwa obiekty, które mają lokalizacje wewnątrz poligonów warstwy lasów. Tablica atrybutowa utworzonej warstwy zawiera pole [Id] punktów i pole [Lasy_id] z wartością poligonu, z którym dany punkt miał wspólne położenie, oraz pola zawierające identyfikatory FID z obu warstw. Gdyby podobną operację wykonano za pomocą funkcji CLIP otrzymano by identyczne obiekty graficzne (dwa punkty), ale w tablicy atrybutowej brak byłoby pól z tablicy poligonów.



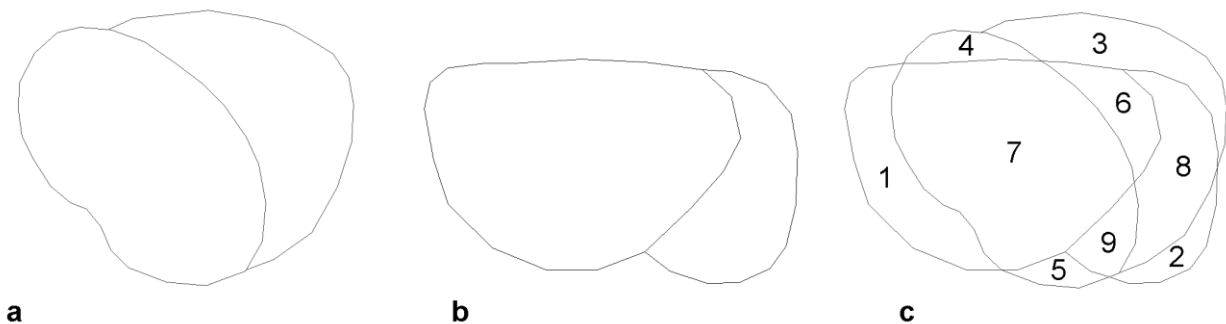
Rys. 4.19 Działanie funkcji wspólnych elementów (INTERSECT).

Funkcja INTERSECT pozwala na tworzenie warstw dowolnego typu, ale nie wyższego rzędu niż najwyższy użyty w funkcji. Najniższego rzędu jest warstwa punktów, wyższego od niej warstwa linii, a najwyższego warstwa poligonów. Oznacza to, że jeżeli użyjemy tej funkcji do dwóch warstw liniowych, to jako warstwę wynikową możemy otrzymać warstwę punktów albo linii. Można także użyć funkcji INTERSECT dla pojedynczej warstwy. Na Rysunku 4.20 pokazano rezultat tego typu operacji. Za jej pomocą utworzono warstwę punktów z warstwy linii (Rysunek 4.20a). Stara i nowa warstwa przedstawione na Rysunku 4.20b pokazują, że punkty odpowiadają początkom i końcom linii. Zaznaczone kwadratem miejsce w którym brak jest punktu, przy dużym powiększeniu wykazuje brak połączenia linii (punkty końcowe linii nie pokrywają się). Funkcja w tym wariacie może być zatem wykorzystana w procesie testowania połączeń w sieciach i tworzenia warstw punktów węzłowych.



Rys. 4.20 Działanie funkcji przecinania (INTERSECT) do testowania połączeń w warstwie liniowej i tworzenia warstwy punktów węzłowych.

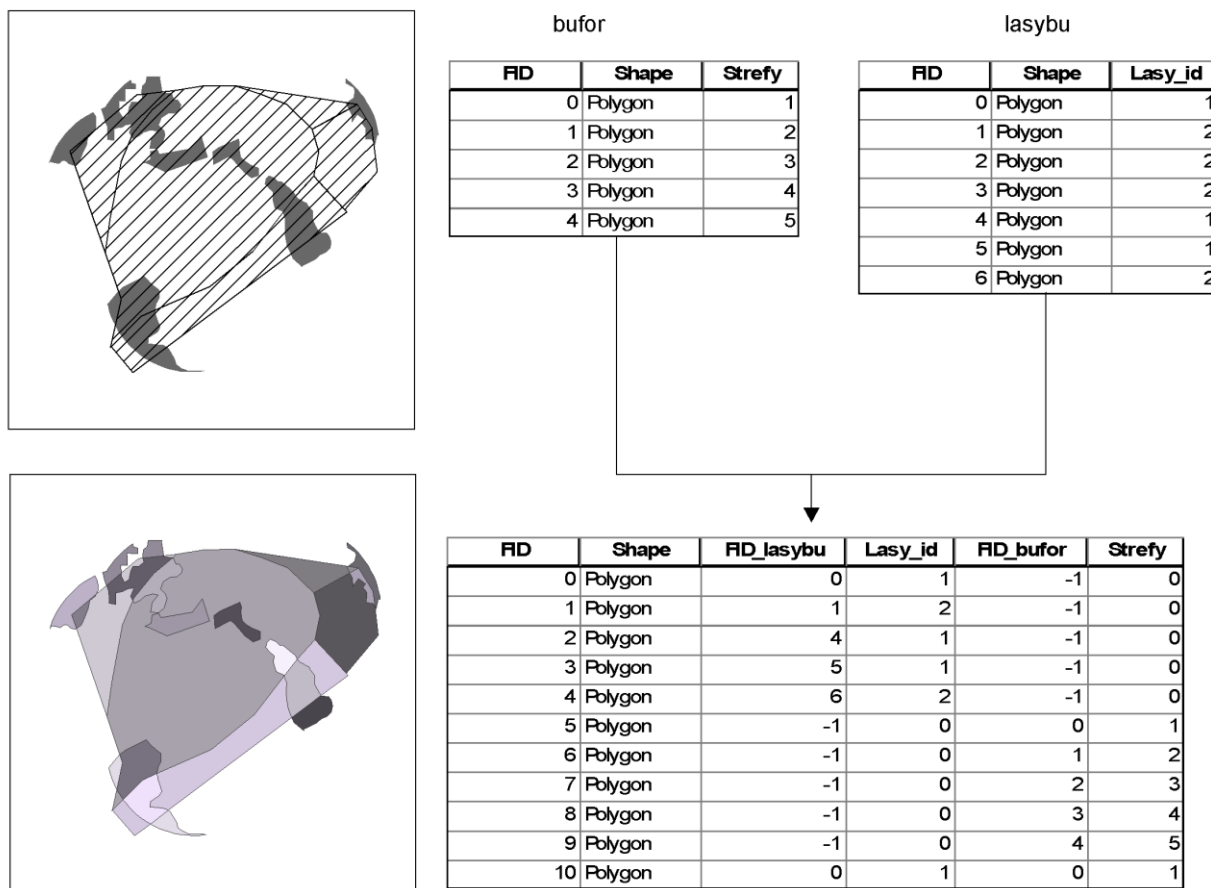
Trzecim scenariuszem działania funkcji nakładania jest zachowanie wszystkich elementów obu warstw. Funkcja ta, działająca wyłącznie dla warstw poligonów, jest jedną z najczęściej używanych funkcji analizy wektorowej i jest zwykle utożsamiana z nałożeniem dwóch warstw. W zależności od programu może ona mieć różne nazwy (w programie ArcGIS nosi nazwę UNION, w innych np. *overlay*). Istotę jej działania można zobrazować w następujący sposób. Jeżeli na dwóch kalkach mamy wyrysowane warstwy poligonów, np. składające się z dwóch obiektów każda (Rysunek 4.21ab), to po nałożeniu kalek na siebie otrzymamy nowy, bardziej złożony rysunek (Rysunek 4.21c), który zawiera dziewięć poligonów.



Rys. 4.21 Wynik Operacji nakładania (c) dwóch warstw (a i b) poligonów (UNION).

Każdy z tych poligonów stanie się samodzielnym obiektem nowej warstwy. Wynikowe poligony mogą pochodzić tylko z jednej warstwy (np. 1,4,3,2), czyli w miejscu ich położenia na drugiej warstwie nie było obiektu, lub z dwóch warstw (np. 7,6,9) wyznaczając obszary występowania obiektów na jednej i drugiej warstwie. Na Rysunku 4.22 pokazano bardziej szczegółowo, jak

wygląda tworzenie tablicy atrybutowej w operacji UNION. Przeprowadzono ją na dwóch warstwach *bufor* i *lasybu*. Warstwa *bufor* posiada atrybut [Strefy], natomiast *lasybu* atrybut [Lasy_id]. W wynikowej tablicy zostaną umieszczone oba te pola. Jeżeli w miejscu poligonu warstwy wynikowej na obu warstwach istniały poligony w obu polach znajdują się ich atrybuty. Nowy poligon ma przypisane atrybuty od obydwóch swoich „rodziców”. Jeżeli pochodzi tylko z jednej warstwy to „odziedziczy” wartość tylko w jednym polu atrybutowym, w drugim zostanie przypisana wartość zero, a w dziedziczonym polu [FID_n] wartość -1.



Rys. 4.22 Działanie funkcji nakładania UNION (pokazano tylko część tablicy wynikowej).

Operacja UNION może być prowadzona jednocześnie na wielu warstwach (tylko w ArcInfo i ArcEditor), albo jako sekwencja operacji nakładania szeregu warstw. Pierwsza na drugą, wynik na trzecią i tak dalej. Należy zwrócić uwagę na to, że w jej rezultacie powstają obiekty o nowym kształcie i zestawie atrybutów. Umożliwia to utworzenie i znalezienie obiektów spełniających dowolną kombinację warunków z wielu warstw. Na przykład znalezienie obszarów lasów (warstwa pokrycia terenu), które są nie dalej od rzeki niż 200 m (warstwa bufora rzeki).

4.8 Generalizacja

Dane: Wektorowe warstwy linii i poligonów.

Pytania i zadania badawcze: Integracja danych do jednej skali, przetworzenie warstw do danych o dokładności odpowiadającej określonej skali. Zmniejszenie liczby punktów i odcinków w danej warstwie, przy jak najmniejszej stracie informacji. Wykonanie nowej warstwy poligonów łącząc obiekty o tej samej klasie.

Proces generalizacji najogólniej polega na przekształcaniu danych w taki sposób, aby zawierały zredukowaną liczbę szczegółów. W rezultacie zmniejsza się liczba punktów i odcinków, z których zbudowane są linie i poligony. Istnieje szereg przyczyn przeprowadzania generalizacji danych. Jedną z podstawowych jest prowadzenie analiz w zredukowanej skali, czyli skali znacznie mniejszej niż odpowiadająca aktualnej dokładności danych. Czas i ilość pamięci potrzebna do wykonania różnego rodzaju operacji zależy od ilości danych (liczby punktów z których się składają). Czasem aby możliwe było przeprowadzenie analiz, wymagających skomplikowanych obliczeń, objętość danych musi zostać zredukowana. Idealna metoda redukowałaby dane bez istotnych zmian w poziomie szczegółów. Jest to oczywiście niemożliwe, ale opracowano szereg sposobów, które powodują możliwie jak najmniejsze odchylenia od stanu przed generalizacją. Tworzenie map w zredukowanych skalach na nośnikach niecyfrowych wymaga także metod generalizacji odpowiednich do stosowanych technik kartograficznych. Metody generalizacji można podzielić na: (1) liniowe, upraszczające kształt obiektów liniowych i obrisy poligonów, oraz (2) powierzchniowe, redukujące liczbę poligonów przez ich łączenie. Łączy się poligony podobne (np. posiadające identyczne wartości w polu atrybutowym) oraz przyłącza się do większych poligony o zbyt małych powierzchniach.

Istnieje szereg metod generalizacji linii. Najprostszą i praktycznie nieużywaną jest mechaniczne odrzucenie, np. co drugiego punktu linii. Trochę bardziej skuteczną jest metoda polegająca na tworzeniu linii za pomocą równoodległych punktów pobieranych z oryginalnej linii. Klasyczną i do niedawna powszechnie stosowaną metodą jest metoda Douglasa-Poikera, która zachowuje charakterystyczne cechy przebiegu linii przy jednoczesnej redukcji liczby jej punktów. ArcGIS (9.1) umożliwia generalizację linii tylko na poziomie ArcInfo i ArcEditor. W przypadku ArcView można wykorzystać narzędzia dostępne w Hawth's Analysis Tools (Ramka 4.6).

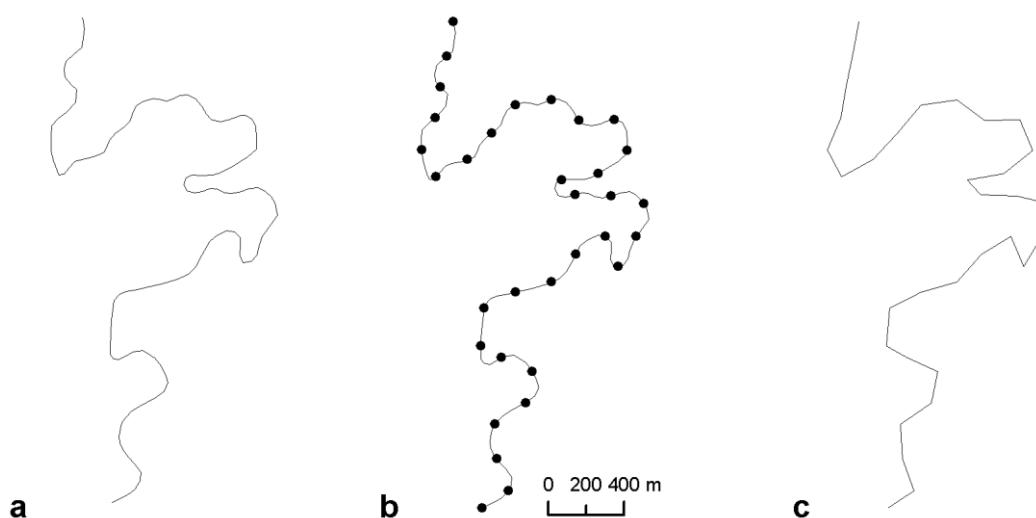
Ramka 4.6

Hawth's Analysis Tools – generalizacja linii

<http://www.spataleecology.com/htools>

(10.2006) Version 3.26

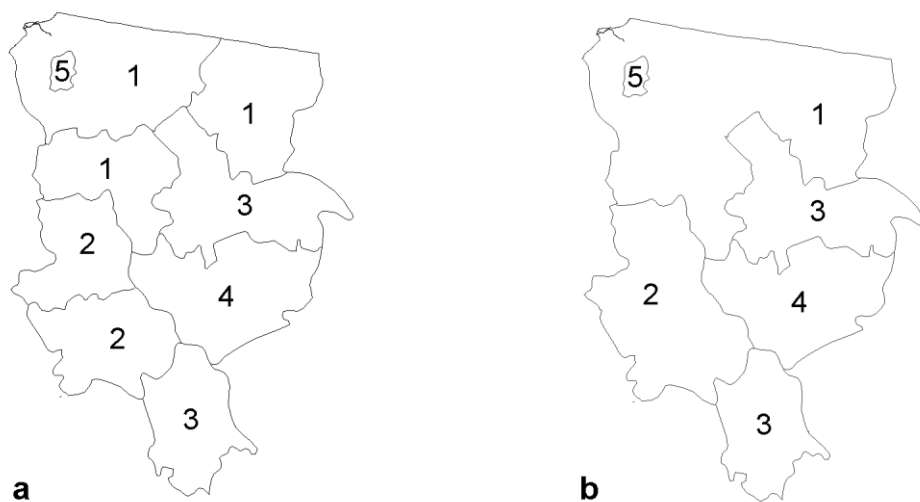
Prosta metoda generalizacji linii tworzy nową linię za pomocą równoodległych punktów pobieranych z linii oryginalnej (Rysunek 4.21). Wykorzystując funkcję **Convert Paths to Points** w (**Animal Movements**) z oryginalnej linii tworzy się zbiór punktów o zadeklarowanym odstępnie. Druga funkcja **Convert Locations to Paths** (w tym samym miejscu) jest wykorzystana do tworzenia z punktów nowej linii. Linia przedstawiona na Rysunku 4.23a jest zbudowana ze 126 punktów. W pierwszym etapie pobrano z niej punkty co 200 m uzyskując zbiór 32 punktów (Rysunek 4.23b). Dodano w trybie edycyjnym punkt ostatni na końcu linii, aby obie linie zaczynały się i kończyły w tym samym punkcie. Wpisano także w polu atrybutowym odpowiedni indeks dla tego punktu, aby był potraktowany jako ostatni. Drugi etap polegał na utworzeniu z 33 punktów nowej linii (Rysunek 4.23c).



Rys. 4.23 Generalizacja linii za pomocą funkcji dostępnych w HAT.

Podstawową metodą generalizacji obiektów powierzchniowych jest redukcja ich liczby przez agregację (łączenie) obiektów posiadających ten sam atrybut. Działanie funkcji pełniącej tą rolę w ArcGIS (DISSOLVE) zostało przedstawione na Rysunku 4.24. Funkcja ta łączy graniczące ze sobą obiekty o tym samym atrybucie w określonym polu. Na mapie (Rysunek 4.24a) opisano każdy obiekt wartością atrybutu. Trzy poligony o atrybucie równym 1 graniczą ze sobą. W rezultacie działania funkcji DISSOLVE zostaną połączone w jeden poligon (Rysunek 4.24b). W analogiczny sposób zostaną połączone obiekty o atrybucie równym 2. Łączenie obiektów o tym samym atrybucie jest wykorzystywane przy generalizacji warstw, które poddano

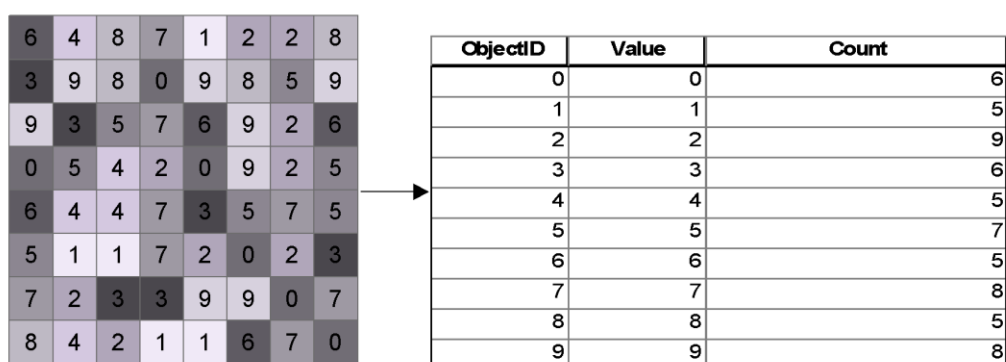
klasyfikacji wprowadzając identyfikatory nowych klas do wybranego pola ich tablicy atrybutowej.



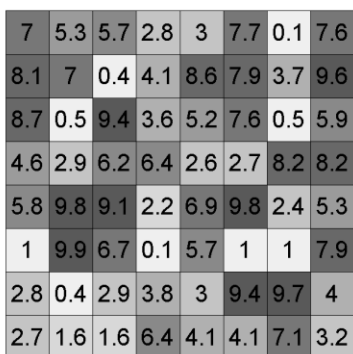
Rys. 4.24 Działanie funkcji agregacji (DISSOLVE).

5. PODSTAWOWE FUNKCJE ANALIZY RASTROWEJ

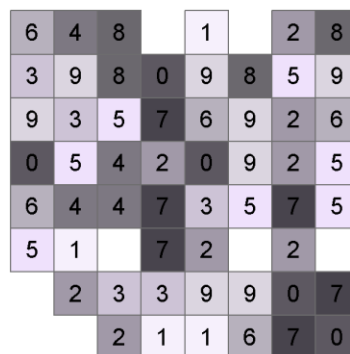
Mapy rastrowe składają się z prostokątnych komórek (najczęściej kwadratowych) zorganizowanych w wiersze i kolumny. Wyższym poziomem organizacji przy zdjęciach satelitarnych mogą być kanały tworzące oddzielne mapy rastrowe. W przypadku zdjęć cyfrowych (lotniczych, satelitarnych) używa się często określenia piksel, tożsamego z pojęciem komórki. Rozmiar komórki, liczba wierszy i kolumn definiuje kształt mapy rastrowej. Położenie rastra na powierzchni Ziemi w danym układzie współrzędnych jest zdefiniowane przez określenie współrzędnych jednego z jego punktów (boki komórek rastrowych są równoległe do osi układu).



a



b



c

Rys. 5.1 Dane rastrowe w ArcGIS: a – raster z wartościami całkowitymi ma przypisaną tablicę VAT; b – raster zawierający wartości rzeczywiste; c – raster zawierający komórki bez danych (NoData).

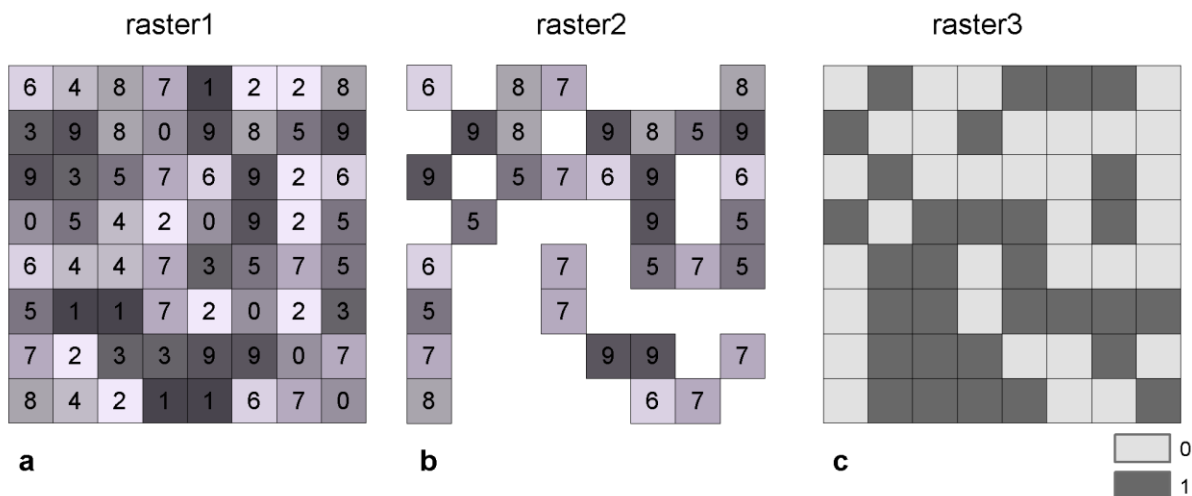
Mapy rastrowe mogą zawierać wartości całkowite lub rzeczywiste (Rysunek 5.1 ab). W ArcGIS mapy rastrowe z wartościami całkowitymi mają zawsze przypisaną tablicę atrybutową (*Value Attribute Table* — VAT) z dwoma polami [Value] i [Count]. W pierwszym polu zestawione są wszystkie wartości występujące na danym rastrze, w drugim ich liczebność. Komórki rastrowe

mogą także zawierać informację o braku danych „NoData”. Takie komórki (Rysunek 5.1c) nie są wyświetlane na ekranie. Jeżeli przeprowadzana jest na nich operacja obliczeniowa, to przeważnie wynik ma także wartość „NoData”. Zasady tworzenia i zamiany komórek z wartością „NoData” w ArcGIS przedstawiono w Ramce 5.1.

Ramka 5.1

Wartość „NoData” na mapach rastrowych w ArcGIS

W ArcGIS wartość „NoData” może być przypisana komórce mapy rastrowej za pomocą funkcji **SetNull**. Wykorzystuje się do tego celu dowolną mapę rastrową (warunkową), która jest traktowana jako mapa typu logicznego (prawda albo fałsz). Wszystkim wartościom prawdziwym (różnym od zera) zostanie przypisany „brak danych”, a wszystkim zerom (oznaczającym fałsz) wartość z rastrowej mapy alternatywnej lub określona stała. Do analizowanej mapy może być także zastosowany warunek (zapisany w SQL), którego wynik służy do przypisania „braku danych”(prawda) lub wartości alternatywnej (fałsz). Funkcja **IsNull** może posłużyć do przypisania komórkom oznaczonym jako „NoData” dowolnej wartości. Proces zilustrowano na Rysunku 5.2.



Rys. 5.2 Funkcje przypisujące i testujące wartość „NoData” na mapach rastrowych w ArcGIS: a — działanie funkcji SetNull; b i c — działanie funkcji IsNull.

Mapa *raster1* (Rysunek 5.2a) wraz z warunkiem $[Value] < 5$ została poddana operacji **SetNull**. Jako mapy alternatywnej użyto tej samej mapy *raster1*. W rezultacie powstała mapa *raster2* (Rysunek 5.2b), której komórki zawierają identyczne wartości co mapa *raster1*, jeżeli są one większe lub równe 5 (warunek nie został spełniony). Pozostałe komórki mają wartość „NoData” (warunek został spełniony). W kolejnym kroku (Rysunek 5.2c) za pomocą funkcji **IsNull** z mapy *raster2* utworzono mapę *raster3*. Na mapie tej komórkom „NoData” została przypisana wartość jeden, a pozostałym komórkom wartość zero. Zastosowanie tych funkcji w operacjach zwanych algebrą map [patrz podroz. 5.2.4 i ramka 5.2] umożliwia bardziej elastyczne tworzenie sekwencji operacji.

5.1 Wizualizacja

Dane: Mapy rastrowe, zdjęcia cyfrowe i skany.

Pytania i zadania badawcze: Wstępna wizualna analiza danych przestrzennych. Szukanie prawidłowości w rozmieszczeniu zmiennych. Wyznaczanie pikseli o wartościach wyraźnie

różniących się od pozostałych. Identyfikacja prawdopodobnych związków i relacji pomiędzy danymi.

Mapy rastrowe i zdjęcia cyfrowe są traktowane przez system GIS w identyczny sposób. Ich wizualizacja polega na wyświetleniu poszczególnych komórek czy pikseli jako jednorodnych obszarów o danym kolorze lub odcieniu szarości. W zależności od skali wyświetlania rastra poszczególne komórki mogą mieć rozmiar wielu lub pojedynczego piksela ekranu. Przy znacznym zmniejszeniu skali, wyświetlaniu mogą podlegać nie wszystkie komórki, ale na przykład co druga lub trzecia. Kolor lub odcień szarości wyświetlanej komórki, może być związany z ilością promieniowania dochodzącego od odpowiadającemu jej wycinkowi powierzchni Ziemi. Taką sytuację mamy przy wyświetlaniu zdjęć satelitarnych czy lotniczych składających się z jednego lub wielu kanałów. W przypadku pojedynczego kanału odcień szarości jest proporcjonalny do ilości dopływającej do czujnika energii. Kolor czarny odpowiada jej minimalnemu poziomowi, a biały maksymalnemu. Przy wielu kanałach możliwe jest otrzymywanie obrazu w barwach zbliżonych do widzianych przez ludzkie oko lub w innym ich zestawieniu dla bardziej wyrazistego przedstawienia interesujących nas szczegółów. Kolor może być także wyłącznie środkiem wizualizacji różnic pomiędzy wartościami cyfrowymi komórek rastra. Na cyfrowej mapie wysokości poszczególnym komórkom można przypisać odpowiedni kolor aby uwidocznić kształty form terenowych. Takie kolory powiązane z odpowiednimi wartościami cyfrowymi noszą nazwę pseudokolorów (*false colours*).

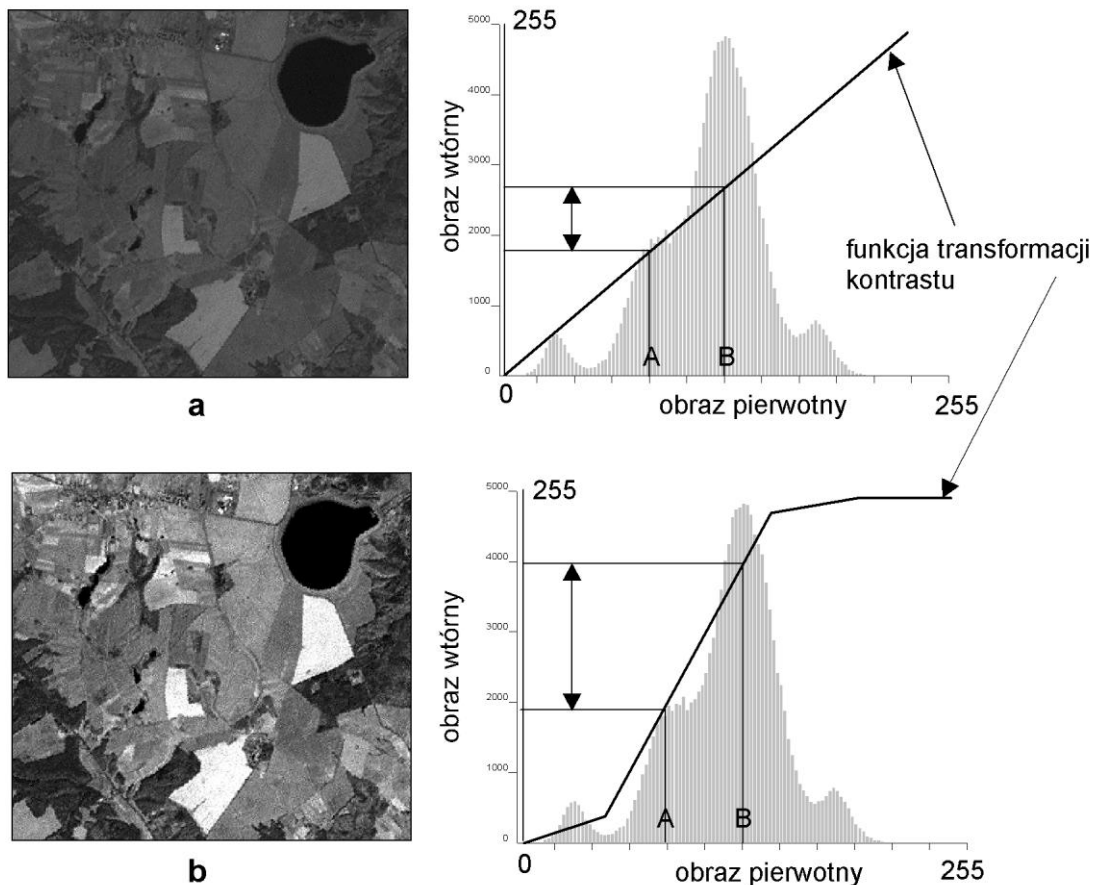
4	8	7	1	2	2	8			Red	Green	Blue
9	8	0	9	8	5	9	0	↔	248	252	207
3	5	7	6	9	2	6	1	↔	252	182	245
5	4	2	0	9	2	5	2	↔	182	218	252
4	4	7	3	5	7	5	3	↔	252	188	182
1	1	7	2	0	2	3	4	↔	184	252	240
2	3	3	9	9	0	7	5	↔	179	252	188
4	2	1	1	6	7	0	6	↔	213	199	252
							7	↔	252	216	184

Rys. 5.3 Przypisanie pseudokolorów do rastra w oparciu o tablicę LUT (czarnobiała wersja rysunku kolorowego)

Na Rysunku 5.3 przedstawiono sposób przypisywania tych kolorów do wartości na mapie cyfrowej. Kolor tworzony jest na obrazie lub wydruku przy pomocy modeli kolorów (modeli

barw). Podstawowe modele kolorów (używane w ArcGIS) to: RGB, CMYK i HSV. Do tworzenia obrazu na ekranie najczęściej używany jest model RGB od (*Red Green Blue*). Jego istota wykorzystuje fakt, że światło białe można otrzymać przez odpowiednie połączenie barw czerwonej, zielonej i niebieskiej. Dobierając ilości tych barw można otrzymać wszystkie kolory spektrum. Zestawy takich barw tworzą palety [patrz podroz. 4.1]. Jak pokazano na Rysunku 3.5 przypisanie polega na stworzeniu tablicy, w której wielkościom występującym na mapie rastrowej przypisuje się odpowiednie wartości dla pól R, G i B, które są wykorzystywane do tworzenia koloru. Tego typu tablica nosi nazwę LUT (*look-up-table*). Paleta jest tablicą LUT w której kolory zostały przypisane do ciągu liczb naturalnych. W praktyce kolor w jakim zostanie wyświetlony dany piksel określa funkcja, która wartościom zdjęcia przypisuje liczby naturalne, którym odpowiada określony kolor danej palety (z tablicy LUT).

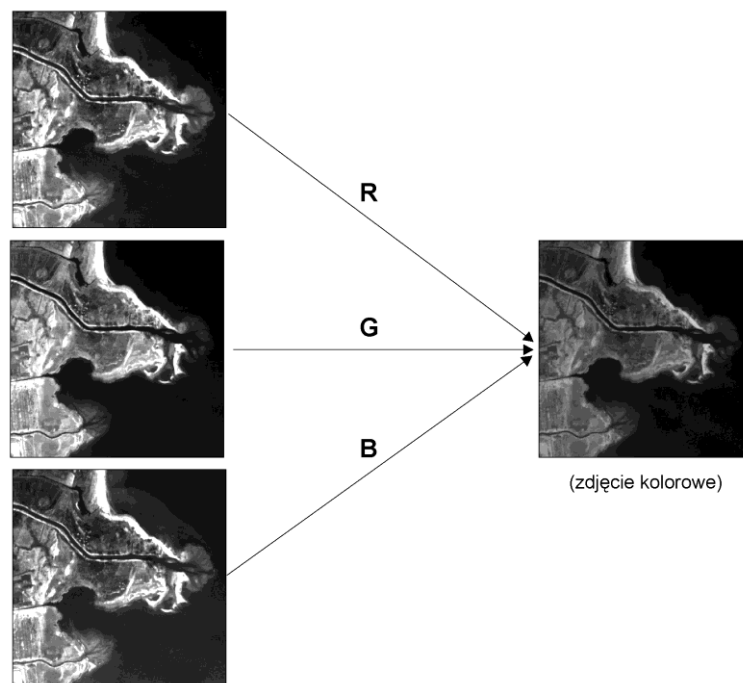
Istnieją trzy możliwe scenariusze wyświetlania pojedynczej (jedno kanałowej) mapy rastrowej. Pierwszy polega na zastosowaniu innego koloru dla każdej występującej na mapie wartości. Stosuje się go dla map jakościowych.



Rys. 5.4 Zwiększenie kontrastu zdjęcia cyfrowego za pomocą technik rozciągania histogramu określanych nazwą *stretch*

Drugi sposób, mający zastosowanie do rastrowych map ilościowych polega na przeprowadzeniu klasyfikacji i następnie przypisaniu skali kolorów w analogiczny sposób jak przy danych wektorowych [patrz podroz. 4.1]. Ostatni trzeci sposób polega na zwiększeniu kontrastu zdjęcia przez „rozciągnięcie” jego histogramu (*stretch*). Na Rysunku 5.4 pokazane jest zdjęcie, które zostało wyświetlone przez przypisanie jego wartościom (0-255) odcieni szarości (**a**). Dla wartości (0) przypisano czern, dla (255) biel, a wartości pośrednie zostały liniowo rozmieszczone między 0 i 255. W praktyce wykorzystano tablicę LUT z identycznymi jak na zdjęciu wartościami dla R,G i B w każdym wierszu. Po prawej stronie zdjęcia przedstawiono jego histogram. Na osi X zaznaczone są wszystkie wartości występujące na zdjęciu, na zewnętrznej osi Y zaś ich liczebność. Różnica pomiędzy wartościami oznaczonymi jako A i B wynosi dwa odcinki podziału na skali X. Różnica na zdjęciu w odcieniach szarości dla tych wartości będzie odpowiadała tym dwóm odcinkom. Ze względu na to, że większość wartości na zdjęciu mieści się w wąskim przedziale, a nie jest równomiernie rozmieszczona na osi X, na zdjęciu nie wykorzystuje się całego zakresu możliwych odcieni szarości. Wyraźnie zaznacza się brak odcieni jasnych, co wynika z widocznego na histogramie braku dużych wartości. Metoda „rozciągnięcia” histogramu polega na zastosowaniu funkcji transformacji, która ze względu na to, że odcienie szarości mają skalę od 0 do 255, a wartości zdjęcia przykładowo od 0 do 25, przeliczy wartości obrazu pierwotnego na wartości obrazu wtórnego (wewnętrzna oś Y) aby były w zakresie od 0 do 255. W omawianym przykładzie działanie funkcji polegałoby na pomnożeniu wartości pierwotnych przez 10. W rezultacie działania wprowadzonej funkcji transformacji na Rys. 5.4, na obrazie wtórnym (**b**) różnica między wartościami A i B zwiększyła się dwukrotnie, co spowodowało znaczący wzrost kontrastu. Funkcja transformacji może być projektowana interaktywnie korzystając z histogramu. Stosuje się także logarytmiczne lub wykładnicze transformacje dla podkreślenia zróżnicowań w zakresie małych wartości kosztem zmniejszenia kontrastów w zakresie dużych lub odwrotnie. Innym rozwiązaniem jest metoda odchylenia standardowego, która rozciąga histogram tak aby początkowi skali kolorów odpowiadała wartość równa (średnia — (n) odchyłeń standardowych), a końcu skali wartość równa (średnia + (n) odchyłeń standardowych). Kolejną metodą jest wyrównywanie histogramu (*histogram equalization*), polega ona na takim przekształceniu obrazu, aby każdy odcień szarości występował na mapie w przybliżeniu z takim samym prawdopodobieństwem. Przeliczanie obrazów pierwotnych na wtórne odnosi się wyłącznie do procesu wizualizacji i nie zmienia wartości danych rastrowych. Przedstawiona metoda może być stosowana z każdą paletą kolorów.

W przypadku zdjęć wielokanałowych powszechnie stosowaną metodą jest wizualizacja za pomocą trzech kanałów, których wartości są wprowadzane do trzech kolumn tablicy LUT. Jeżeli dane zdjęcie jest wykonywane w kanałach odpowiadających zakresowi barw czerwonej, zielonej i niebieskiej i ich wartości zostaną odpowiednio przypisane do kanałów RGB otrzymany zostanie tzw. kompozyt w barwach naturalnych (Rysunek 5.5). Tworzenie kompozytów niekoniecznie musi prowadzić do powstawania obrazów w kolorach naturalnych [Ramka 3.8].

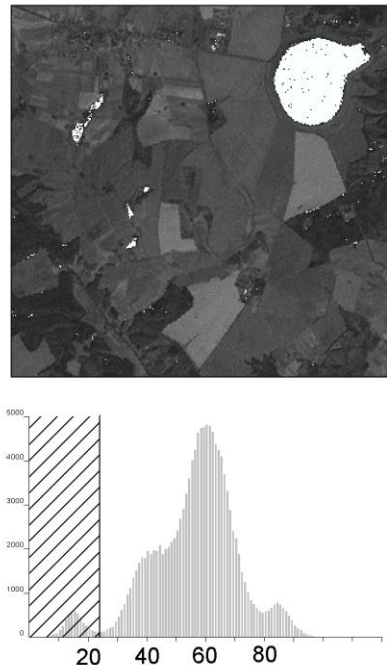


Rys. 5.5 Tworzenie barwnego kompozytu na podstawie zdjęć w trzech kanałach.

Metody wizualizacji pozwalają także na przeprowadzanie wstępnej analizy danych rastrowych za pomocą narzędzi selekcji, jeżeli rastry mają przypisane tablice atrybutowe (VAT). Wybranie rekordów w tablicy atrybutowej, która zawiera pola wartości [Value] i liczebności [Count] powoduje zaznaczenie na mapie wszystkich pikseli o tych wartościach. Dodatkowe wykorzystanie histogramu daje możliwość zaznaczenia interesującego zakresu wartości i przeprowadzenia ich interpretacji. Może to być pierwszy krok w procesie klasyfikacji zdjęć satelitarnych co jest podstawową metodą tworzenia map tematycznych. Pozwala także na wydzielenie pikseli o ekstremalnych wartościach i podjęcia decyzji o ich pozostawieniu lub usunięciu. Metody te wkraczają w zakres funkcji analizy obrazu i specyfiki oprogramowania służącego do przetwarzania i analizy zdjęć satelitarnych. Na Rysunku 5.6 przedstawiono przykład analizy zdjęcia cyfrowego, wykorzystującej możliwość wyboru (selekcji) części

rekordów tablicy VAT. Histogram tego zdjęcia ma bimodalny charakter, czyli posiada dwa lokalne maksima. W celu identyfikacji rodzaju pokrycia terenu odpowiedzialnego za pierwsze maksimum zaznaczono za pomocą komendy SQL rekordy tablicy o wartości [Value] < 25. Piksele zdjęcia spełniające ten warunek zostały wyświetlone na białą. Przeprowadzona analiza pozwoliła ustalić, że są to prawie wyłącznie obszary pokryte wodą — jeziora, stawy i oczka wodne.

ObjectID	Value	Count
10	12	174
11	13	259
12	14	400
13	15	510
14	16	578
15	17	591
16	18	536
17	19	451
18	20	325
19	21	266
20	22	188
21	23	157
22	24	124
23	25	113
24	26	118
25	27	130
26	28	179
27	29	218
28	30	236
29	31	354
30	32	461



Rys. 5.6 Analiza zdjęcia cyfrowego wykorzystująca selekcję rekordów tablicy VAT.

5.2 FUNKCJE LOKALNE

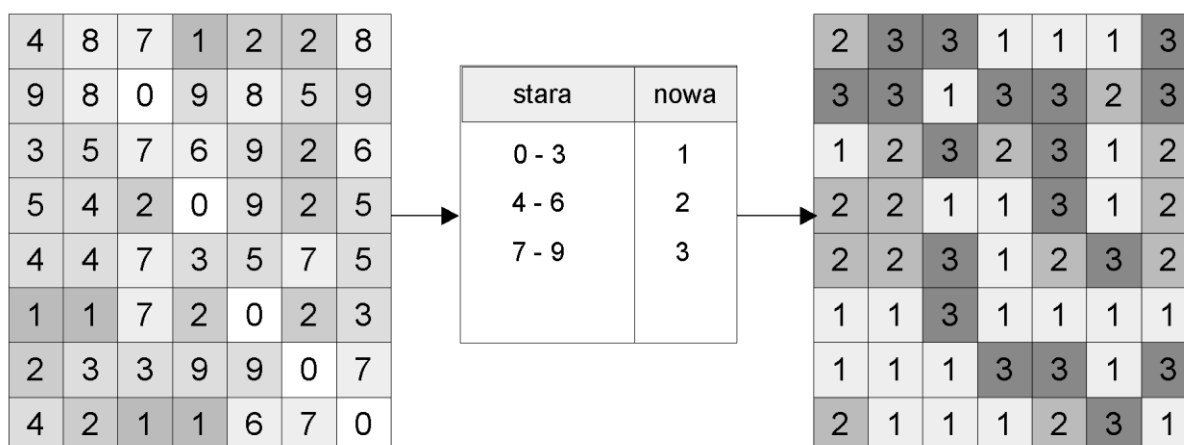
Funkcje lokalne są najczęściej używaną grupą metod analizy rastrowej. Ich podstawową cechą jest to, że każda komórka jest traktowana oddzielnie i jeżeli występuje w operacjach wspólnie z inną komórką, to wyłącznie z odpowiadającą jej komórką innego rastra. W funkcjach tych brak jest zależności od pozostałych komórek tego samego rastra. Najważniejszymi funkcjami tej grupy są reklasyfikacja (RECLASSIFY), crosstabulacja (COMBINE) oraz statystyka (CELL STATISTICS). Dodatkowo w grupie tej omówiono sposób prowadzenia obliczeń za pomocą algebry map (MAP ALGEBRA), gdyż najczęściej mają one charakter funkcji lokalnych. W nawiasach podano nazwy odpowiednich funkcji w ArcGIS Spatial Analyst.

5.2.1 Reklasyfikacja (*Reclassify*)

Dane: Mapy rastrowe ilościowe i jakościowe.

Pytania i zadania badawcze: Tworzenie mapy tematycznej z mapy ilościowej, przy wykorzystaniu określonego schematu klasyfikacyjnego. Transformacja mapy tematycznej, zawierającej klasy, do innego schematu klasyfikacyjnego. Wyznaczenie stref na mapie rastrowej do dalszej analizy.

Reklasyfikacja polega na przypisaniu komórkom mapy rastrowej nowych wartości (na nowej mapie). Przy czym w większości programów (np. w ArcGIS) mogą to być wyłącznie wartości całkowite. Typowym zastosowaniem tej funkcji jest tworzenie map tematycznych (jakościowych) przez przypisanie przedziałom (z map ilościowych) lub podzbiorem (z map jakościowych) wartości komórek ze starej mapy identyfikatorów klas reprezentujących pewien schemat klasyfikacji. Na przykład na podstawie cyfrowej mapy głębokości można stworzyć mapę podziału dna na klasę płytkowodną (oznaczoną wartością całkowitą 1) i głębokowodną (oznaczoną wartością całkowitą 2). Operacja będzie polegała na przypisaniu wszystkim komórkom o głębokości np. mniejszej od 20 metrów wartości 1, a pozostałym wartości 2. Istotną cechą tej funkcji jest to, że zasada zmiany wartości obowiązuje na całej mapie rastrowej. Na Rysunku 5.7 przedstawiono sposób wprowadzania nowych wartości.



Rys. 5.7 Zasada działania funkcji reklasyfikacji.

Odbywa się on za pomocą tablicy z dwiema kolumnami. W kolejnych wierszach umieszczone są przedziały wartości starej mapy (pierwsza kolumna) i przypisywane im nowe wartości (druga kolumna). W rezultacie przeprowadzenia reklasyfikacji stara mapa na której występowało dziesięć wartości została zamieniona (zreklasyfikowana) na mapę z trzema wartościami. Gdyby pierwsza mapa była mapą gleb, a jej wartości oznaczały dziesięć klas, cały proces polegałby na zamianie jej do mapy wykonanej według nowego schematu klasyfikacyjnego, zawierającego

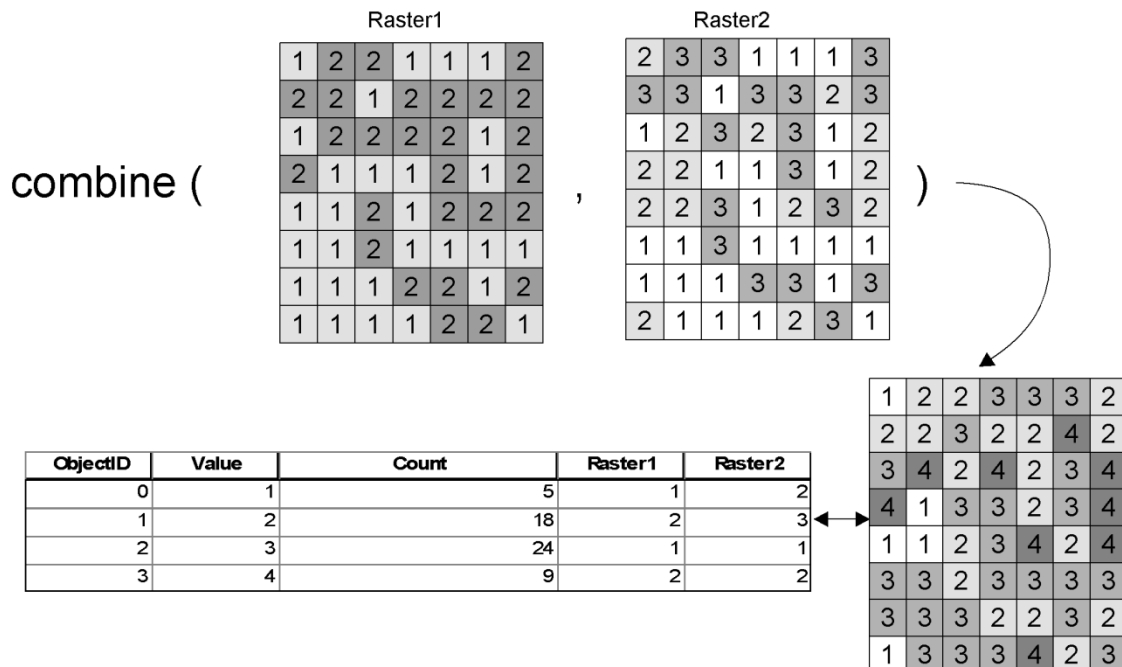
tylko trzy klasy. Jednak niewątpliwie najważniejszą rolą tej funkcji jest łączenie komórek w podzbiory, na których będą wykonywane kolejne operacje analityczne. Na Rysunku 5.7 po przeprowadzeniu operacji rekლasyfikacji otrzymano mapę, na której komórki tworzą trzy podzbiory komórek oznaczone identyfikatorami 1, 2 i 3. Tego typu podzbiory komórek noszą nazwę stref (*zone*). Należy zwrócić uwagę, że komórki należące do danej strefy nie muszą graniczyć ze sobą. Tworzenie stref jest podstawową metodą łączenia komórek w obiekty. Drugim istotnym pojęciem w procesie ich łączenia jest grupa (*region*) [patrz podroz. 5.3.2], którą stanowią komórki dodatkowo spełniające warunek posiadania wspólnego boku lub rogu. Wydzielenie stref umożliwi nam przykładowo obliczenie powierzchni lub średniej głębokości strefy płytkowodnej wspomnianej mapy batymetrycznej przy wykorzystaniu omówionych dalej funkcji strefowych [patrz podroz. 5.4].

5.2.2 Crosstabulacja (*Combine*)

Dane: Mapy rastrowe o wartościach całkowitych.

Pytania i zadania badawcze: Identyfikacja obszarów spełniających pożądaną kombinację wartości (jakościowych) przedstawionych na kilku mapach.

Funkcja ta na podstawie dwóch lub większej liczby map rastrowych z wartościami całkowitymi tworzy nowy raster, w którym każdej komórce przypisany jest niepowtarzalny identyfikator odpowiadający kombinacji wartości na użytych w funkcji mapach. Na Rysunku 5.8 przedstawiono działanie tej funkcji w przypadku dwóch map *Raster1* i *Raster2*.



Rys. 5.8 Zasada działania funkcji crosstabulacji.

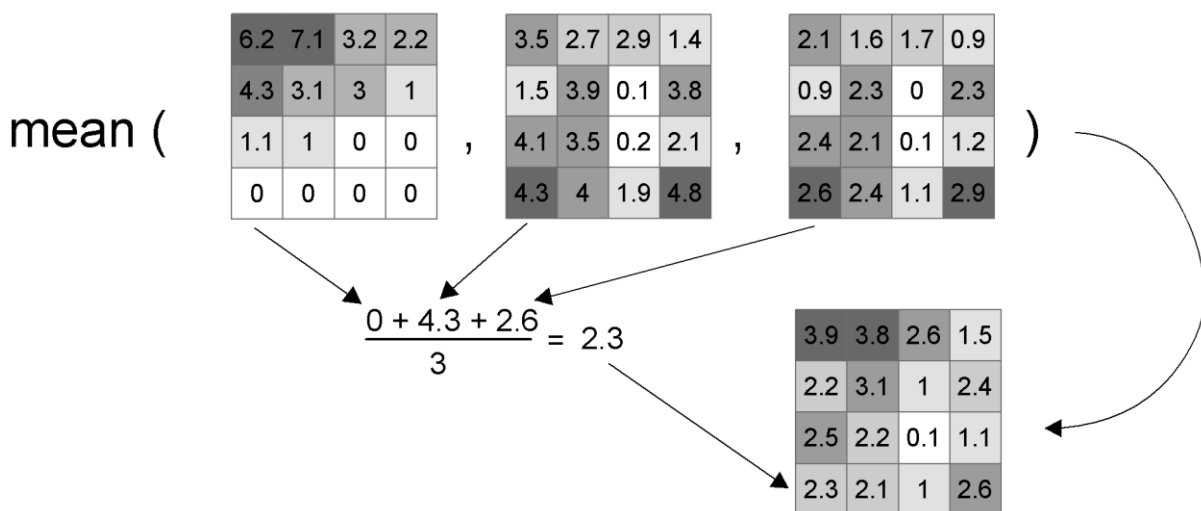
Mapa *Raster1* zawiera dwie klasy, a mapa *Raster2* trzy klasy. W rezultacie działania funkcji utworzona została mapa rastrowa z czterema klasami. W tablicy atrybutowej tej mapy znajdują się dwie dodatkowe kolumny pokazujące kombinację wartości, której została przypisana nowa wartość na tej mapie [Value]. Wartość 1 na tej mapie jest przypisana komórkom, które na mapie pierwszej mają wartość 1, a na mapie drugiej wartość 2. Tego typu operacja, która może być prowadzona od razu dla kilku map, pozwala na identyfikację komórek spełniających pożądaną kombinację wartości. Na przykład na podstawie map stref głębokości, stref odległości od ujścia rzecznej i mapy tematycznej pokrycia dna można wyznaczyć obszary o konkretnym rodzaju pokrycia znajdujące się w strefie płytkowodnej w pobliżu ujścia rzeki. Po przeprowadzeniu crosstabulacji mapę często poddaje się reklasyfikacji, aby pozostawić tylko istotne klasy i przypisać im właściwe identyfikatory.

5.2.3 Statystyka (*Cell Statistics*)

Dane: Mapy rastrowe (operacja jest wykonywana dla szeregu map).

Pytania i zadania badawcze: Tworzenie map wybranych statystyk z szeregów czasowych map rastrowych.

Funkcja ta oblicza wybraną statystykę z zbioru wartości znajdujących się w odpowiadających sobie komórkach map rastrowych. W rezultacie powstaje nowa mapa, na której każda komórka zawiera policzoną statystykę. Na Rysunku 5.9 przedstawiono tworzenie mapy wartości średniej z trzech map.



Rys. 5.9 Zasada działania funkcji obliczającej statystyki z wartości odpowiadających sobie komórek map rastrowych.

Funkcja ta pozwala przykładowo na tworzenie map średnich, minimalnych i maksymalnych temperatur miesięcznych z map dobowych. Rodzaj liczonych statystyk zależy od oprogramowania. Poniżej (Tabela 5.1) przedstawiono statystyki, które mogą być obliczone za pomocą tej funkcji w ArcGIS.

Tab. 5.1 Statystyki obliczane w ArcGIS przez funkcję Cell Statistics

Nazwa funkcji	Nazwa angielska (algebra map)	Opis
średnia	MEAN (mean)	średnia arytmetyczna
mediana	MEDIAN (med)	mediana
odchylenie standardowe	STD (std)	odchylenie standardowe
zakres	RANGE (range)	maksimum minus minimum
maksimum	MAXIMUM (max)	maximum
minimum	MINIMUM (min)	minimum
suma	SUM (sum)	suma wartości
najczęstsza wartość	MAJORITY (majority)	najczęściej występująca wartość (jeśli brak to NoData)
najrzadsza wartość	MINORITY (minority)	najrzadziej występująca wartość (jeśli brak to NoData)
różnorodność	VARIETY (variety)	liczba występujących wartości

5.2.4 Obliczenia przy pomocy algebry map (*Map Algebra*)

Dane: Mapy rastrowe.

Pytania i zadania badawcze: Wykonywanie obliczeń na mapach.

Algebra map jest jedną z metod tworzenia modeli GIS. Model GIS jest to sekwencja funkcji tworzona w celu rozwiązania problemu przestrzennego lub symulacji procesów zachodzących w przestrzeni geograficznej [patrz roz. 8]. Istotnym elementem wielu modeli jest wykonywanie obliczeń na mapach. Wyobraźmy sobie, że dana jest cyfrowa mapa batymetryczna jeziora. Każda komórka tej mapy ma przypisaną wartość głębokości w metrach. Komórki znajdujące się na brzegu mają przypisaną wartość zero. Jeżeli naszym celem byłoby obliczenie objętości tego jeziora to pierwszym krokiem byłoby obliczenie objętości wody w każdej komórce. W tym celu dla każdej komórki wartość głębokości w metrach należy pomnożyć przez powierzchnię komórki w metrach kwadratowych. Przyjmijmy, że powierzchnia komórki wynosi 4 m^2 . Nasze wyrażenie przyjmie wtedy postać: $\text{nowy_raster} = \text{raster_głębokości} * 4$ i będzie oznaczało, że

każda komórka nowego rastra będzie zawierać iloczyn wartości głębokości odpowiadającej jej komórki i wartości 4. Tak zapisane wyrażenie może być wykonane w GIS jako wyrażenie algebry map (Rysunek 5.10a). Ma ono postać zwykłego wyrażenia arytmetycznego, w którym w miejscu zmiennej znajduje się nazwa mapy. Operacja jest wykonywana oddzielnie dla każdej komórki, której zostanie przypisana objętość wody w m³. Przyjmijmy także, że istnieje mapa *raster_stężenia* zawierający wyniki pomiarów stężenia pewnej substancji w kg m⁻³. Możemy teraz utworzyć mapę (Rys. 5.10b), która w każdej komórce będzie zawierała masę badanej substancji. W tym celu pomnożymy mapę objętości wody *nowy_raster* przez mapę stężenia.

a

0	0	0	0	0	0	0
0	0	4	4	4	4	0
0	0	4	8	8	4	0
0	0	4	8	8	4	0
0	4	8	12	8	4	4
0	4	4	8	4	0	0
0	0	0	4	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0

=

0	0	0	0	0	0	0
0	0	1	1	1	1	0
0	0	1	2	2	1	0
0	0	1	2	2	1	0
0	1	2	3	2	1	1
0	1	1	2	1	0	0
0	0	0	1	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0

* 4

nowy_raster = raster_głębokości * 4

b

0	0	0	0	0	0	0
0	0	2	2	2	4	0
0	0	2	4	4	4	0
0	0	2	8	8	4	0
0	4	8	12	12	6	6
0	6	6	12	6	0	0
0	0	0	8	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0

=

0	0	0	0	0	0	0
0	0	4	4	4	4	0
0	0	4	8	8	4	0
0	0	4	8	8	4	0
0	4	8	12	8	4	4
0	4	4	8	4	0	0
0	0	0	4	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0

*

0	0	0	0	0	0	0
0	0	0.5	0.5	0.5	1	0
0	0	0.5	0.5	0.5	1	0
0	0	0.5	1	1	1	0
0	1	1	1	1.5	1.5	1.5
0	1.5	1.5	1.5	1.5	0	0
0	0	0	2	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0

nowy_raster2 = nowy_raster * raster_stężenia

Rys. 5.10 Obliczenia przy pomocy algebry map: a — pomnożenie mapy przez liczbę; b – pomnożenie dwóch map przez siebie.

Sekwencja tych dwóch operacji tworzy prosty model GIS, zapisany za pomocą algebry map. W wyrażeniach obliczeniowych, mających prawie zawsze charakter funkcji lokalnych, oprócz operatorów arytmetycznych i logicznych mogą być wykorzystywane funkcje arytmetyczne, logarymiczne oraz trygonometryczne (Ramka 5.2). Wyrażenia obliczeniowe mogą być łączone za pomocą algebry map z innymi funkcjami analizy przestrzennej, co pozwala na budowanie złożonych modeli GIS.

Ramka 5.2

Wyrażenia obliczeniowe algebry map w ArcGIS

Podstawowe arytmetyczne operatory (+, -, /, *) i logiczne (=, <>, <, >, >=, <=) mogą być używane w wyrażeniach z liczbami, funkcjami i mapami rastrowymi np:

```
Raster1 + Raster2
sin(Raster1) / (1 - Raster2)
Raster1 * max( Raster2, Raster3, Raster4)
```

Najczęściej używane funkcje arytmetyczne to: wartość bezwzględna

```
abs ( Raster1),
```

funkcje dokonujące konwersji do wartości całkowitej przez odcięcie wartości niecałkowitych (int(2.5)=2.5, int(-2.5)=-2),

```
int (Raster1 + 0.78),
```

```
int ( rand() * 10 + 0.5)      (rand() jest funkcją generującą liczbę losową od 0 do 1)
```

oraz konwersji do wartości rzeczywistych,

```
float (Raster2).
```

Istnieją także dwie funkcje zaokrąglania do najbliższej wartości całkowitej: floor (niższej) np.

```
floor(-2.5)=-3) i ceil (wyższej),
```

```
floor (Raster2)
```

```
ceil (Raster2).
```

Kolejną grupą są funkcje logarytmiczne i wykładnicze:

```
exp (Raster1 + Raster2),
```

```
exp2 (Raster1),      (2 do potęgi określonej przez raster)
```

```
exp10 (Raster1),     (10 do potęgi określonej przez raster)
```

```
ln (Raster1),        (logarytm naturalny)
```

```
log10 (Raster1) ,    (logarytm dziesiętny).
```

Dostępne są podstawowe funkcje trygonometryczne łącznie z odwrotnymi i hiperbolicznymi. Funkcje trygonometryczne wymagają argumentów w radianach. W celu przeliczenia stopni na radiany należy wartość w stopniach podzielić przez stałą DEG (deg) = 180/π,

```
sin (Raster1 / deg).
```

Istnieje także zestaw funkcji służących do podnoszenia do potęgi,

```
pow (Raster1, 3.21),  (podnoszenie do dowolnej potęgi)
```

```
sqrt (Raster2),      (pierwiastek kwadratowy)
```

```
sqr (Raster1),       (kwadrat).
```

Na koniec należy wspomnieć o przydatnej funkcji warunkowej con. Zawiera ona trzy argumenty: warunek, wartość (raster) przypisywaną jeśli warunek zostanie spełniony, wartość (raster) przypisywaną jeśli warunek nie zostanie spełniony,

```
con (Raster1 > 2, 1, Raster1)  (jeśli wartość w Raster1 jest większa od 2 zostanie jej przypisana wartość 1, jeśli nie, to wartość z Raster1, czyli nie ulegnie zmianie)
```

```
con (IsNull (Raster1), 0, 1)   (jeśli komórka ma wartość NoData to zostanie jej przypisane 0, jeśli nie to 1).
```

Należy pamiętać o tym, że operatorem przypisania jest =, a równości == np.

```
maska = con (IsNull (Raster1), 0, 1)
```

```
Raster2 = SetNull (maska= =1, maska).
```

5.3 FUNKCJE SĄSIEDZTWA

Podstawową cechą funkcji sąsiedztwa jest to, że wartość komórki na mapie wynikowej zależy wyłącznie od sąsiednich komórek tej samej warstwy. Istnieją dwie podstawowe funkcje

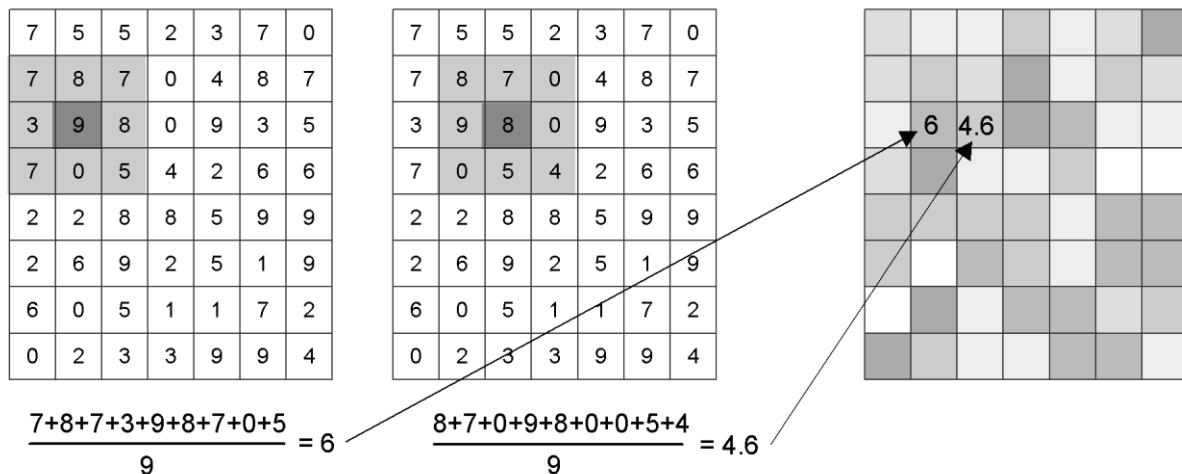
sąsiedztwa. Pierwsza służy do obliczania statystyk za pomocą dwóch różnych metod: ruchomego okna (FOCAL STATISTICS) i bloków (BLOCK STATISTICS). Drugą jest funkcja grupowania, która służy do łączenia pikseli w podzbiory zwane grupami lub regionami (REGION GROUP). Wszystkie omawiane w tym podrozdziale funkcje jako argumentu używają pojedynczej mapy rastrowej.

5.3.1 Statystyka (*Focal Statistics* i *Block Statistics*)

Dane: Mapy rastrowe (pojedyncze).

Pytania i zadania badawcze: Tworzenie map wybranych statystyk z pojedynczych map rastrowych. Przeprowadzanie filtracji map (wygładzanie mapy — filtracja niskoczęstotliwościowa, usuwanie wartości odbiegających – filtr mediany).

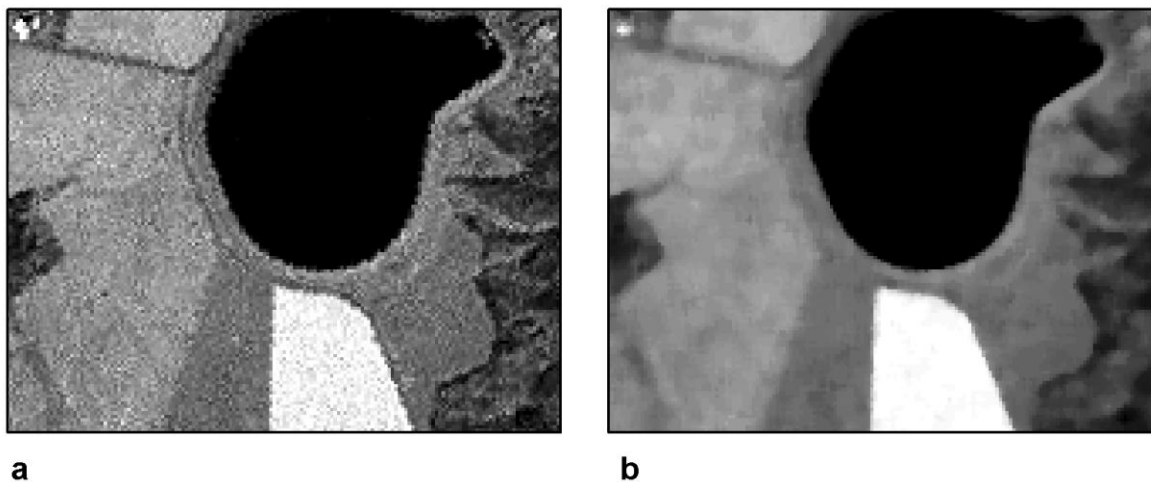
Funkcja *Focal Statistics* wykorzystuje technikę zwaną ruchomym oknem. Podstawowa zasada działania tej metody została przedstawiona na Rysunku 5.11. Wykorzystane jest okno kwadratowe o rozmiarze 3 x 3 piksele (komórki). Dla każdej komórki rastra wynikowego (mapa z prawej strony) oblicza się wartość statystyki, w tym przypadku średnią z okna, którego centrum stanowi odpowiadająca jej komórka (dla komórek krańcowych statystyki są liczone z mniejszej liczby komórek). Następnie okno przesuwa się tak, aby centrum znalazło się w kolejnej komórce (stąd ruchome okno).



Rys. 5.11 Zasada działania funkcji *Focal Statistics* wykorzystującej ruchome okno.

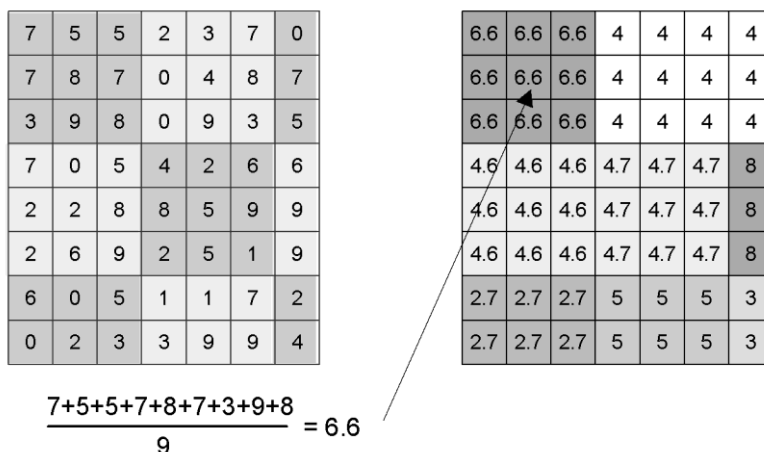
Za pomocą tej funkcji mogą być liczone następujące statystyki: średnia, mediana, odchylenie standardowe, zakres, minimum, maksimum, suma, najczęstsza wartość, najrzadsza wartość i różnorodność. Okno najczęściej ma kształt kwadratu (prostokąta), ale może być także kołem,

pierścieniem lub wycinkiem koła. Rozmiar okna może być dowolnie kształtowany. Funkcja ta, przy obliczaniu wartości średniej może być wykorzystywana do wygładzania map (filtr dolnoprzepustowy), przy czym stopień wygładzenia będzie zależał od rozmiarów okna. Przy obliczaniu wartości mediany otrzymujemy filtr usuwający wartości odbiegające od przeciętnych. Metodę tą stosuje się do zdjęć satelitarnych w celu usunięcia pikseli, których wartości mogły zostać w istotny sposób zakłócone tworząc tzw. „artefakty”, oraz do usunięcia wpływu obiektów o wielkości piksela lub kilku pikseli (Rysunek 5.12).



Rys. 5.12 Filtracja zdjęć satelitarnych przy pomocy filtru mediany (5x5); a – fragment zdjęcia przed filtracją; b – fragment zdjęcia po filtracji.

Funkcja *Block Statistics* oblicza analogiczne statystyki dla komórek znajdujących się w podobnie zdefiniowanych „oknach” (prostokąt, koło, pierścień i wycinek koła). Jednak w tej metodzie „okna” tworzą przystające do siebie bloki pokrywające mapę, a obliczona statystyka jest przypisywana do każdej komórki danego bloku. Działanie funkcji zostało przedstawione na Rysunku 5.13. Mapa została podzielona na kwadratowe bloki o rozmiarze 3x3 komórki. Statystyka (wartość średnia) została policzona z dziewięciu wartości w bloku i przypisana na mapie wynikowej do każdej komórki tego bloku. W blokach niepełnych, podobnie jak w brzegowych komórkach przy metodzie ruchomego okna, dana statystyka jest liczona z dostępnej próby danych.



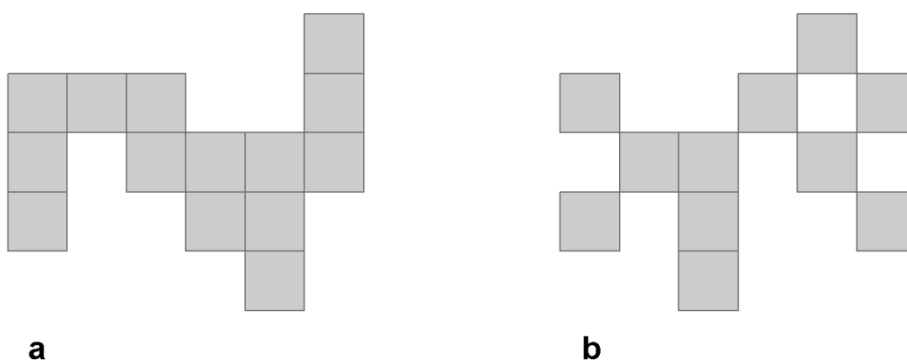
Rys. 5.13 Zasada działania funkcji *Block Statistics*, wykorzystującej kwadratowe bloki.

5.3.2 Grupowanie (*Region Group*)

Dane: Mapy rastrowe (pojedyncza mapa z wartościami całkowitymi)

Pytania i zadania badawcze: Połączenie komórek mapy rastrowej w obiekty o unikalnych identyfikatorach.

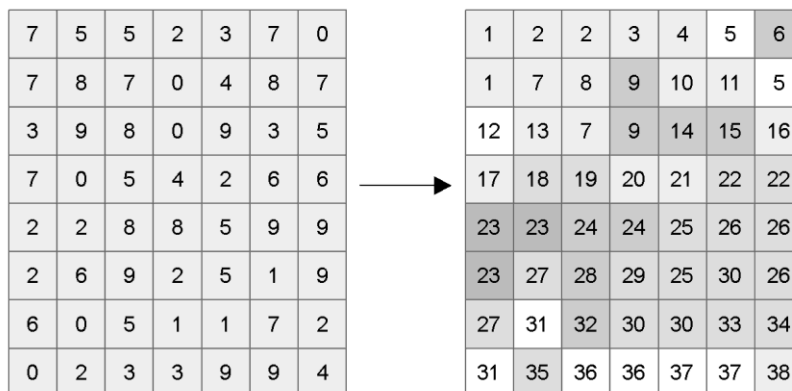
Grupę komórek (*region*) można zdefiniować jako podzbiór komórek, które posiadają taką samą wartość i tworzą wspólną całość (są ze sobą połączone). Istnieją dwie możliwości połączeń (Rysunek 5.14).



Rys. 5.14 Dwa typy grup komórek: a – połączone wyłącznie bokami (max. czterech sąsiadów); b – połączone bokami lub rogami (max. ośmiu sąsiadów).

Mogą być one połączone wyłącznie bokami (Rysunek 5.14a) albo zarówno bokami, jak i rogami (Rysunek 5.14b). W pierwszym przypadku komórka może mieć maksymalnie czterech sąsiadów, w drugim ośmiu. Dozwolony sposób połączeń jest definiowany w trakcie tworzenia grup. Grupy

komórek w ArcGIS są nazywane regionami i stanowią podstawową metodę reprezentowania obiektów w analizie rastrowej.



Rys. 5.15 Zasada działania funkcji grupowania.

Regiony są tworzone z map rastrowych wartości całkowitych. Mapa jest skanowana od lewego górnego rogu wiersz po wierszu. W trakcie skanowania identyfikowane są kolejne grupy, następnie przypisywane są im identyfikatory w postaci liczb całkowitych. Każda grupa otrzymuje unikalny identyfikator, który jest przypisany do każdej jej komórki.

5.4 FUNKCJE STREFOWE

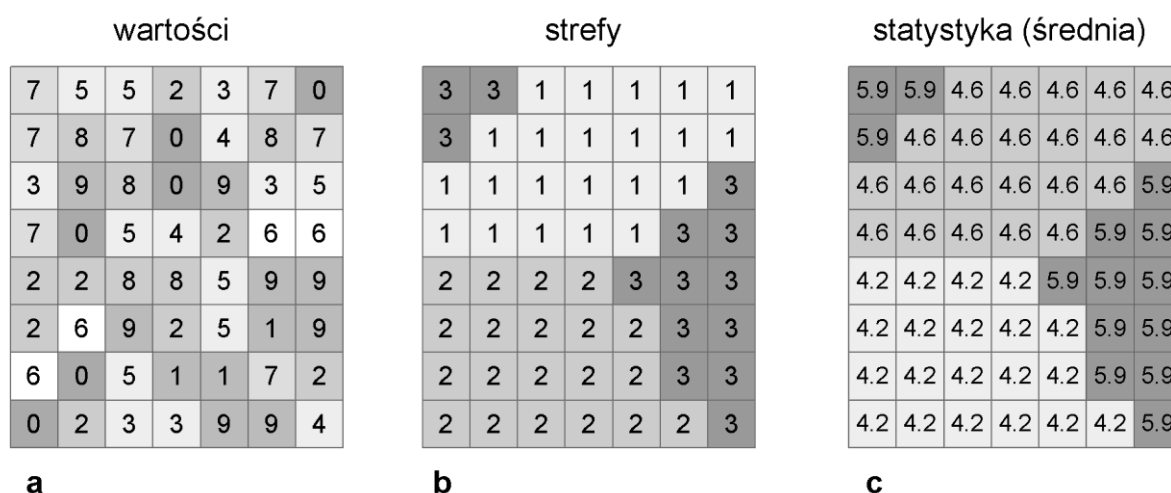
Podstawową cechą funkcji strefowych jest charakteryzowanie stref (*zones*) wyznaczonych na obszarze badań. Strefy stanowią podzbiory komórek o wspólnym identyfikatorze. Nie jest wymagane, aby komórki danej strefy były ze sobą połączone. Jednak należy zauważyć, że grupy stanowią szczególny rodzaj stref, składających się wyłącznie z połączonych komórek i funkcje strefowe mogą być do nich stosowane. Funkcje te wymagają istnienia mapy stref, którą jest mapa rastrowa zawierająca wartości całkowite (numery poszczególnych stref). Jest ona najczęściej tworzona za pomocą reklasyfikacji. Dwie podstawowe funkcje strefowe to funkcja obliczająca statystyki dla każdej ze stref ze zmiennych dowolnej mapy (ZONAL STATISTICS) oraz funkcja charakteryzująca geometrię stref jako obiektów (ZONAL GEOMETRY).

5.4.1 Statystyka stref (*Zonal Statistics*)

Dane: Mapy rastrowe (analiza dwóch map, w tym jedna wartości całkowitych — stref).

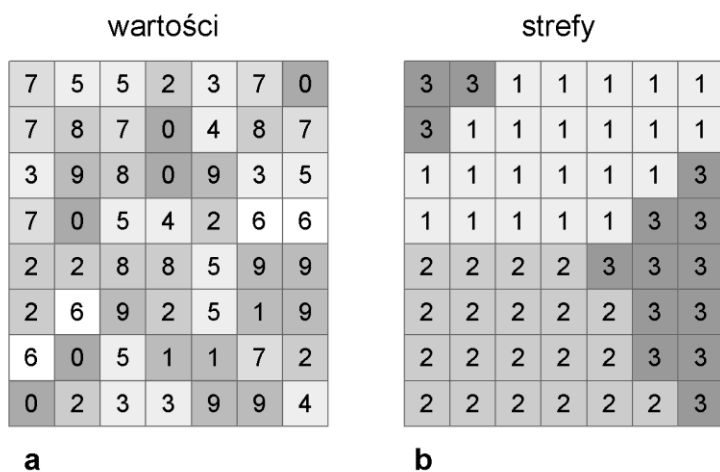
Pytania i zadania badawcze: Statystyczna analiza wartości z mapy rastrowej dla podzbiorów komórek mapy odpowiadającej pewnym strefom (rodzajowi obiektów) lub grupom (obiektom).

Funkcja ta służy do określenia statystyk: średniej, mediany, odchylenia standardowego, zakresu, minimum, maksimum, sumy, najczęstszej wartości, najrzadszej wartości i różnorodności dla podzbiorów komórek dowolnej mapy rastrowej (tzw. mapie wartości lub zmiennych). W zależności od rodzaju mapy (wartości rzeczywiste albo całkowite), nie wszystkie statystyki mogą być obliczane. Dla wartości rzeczywistych nie jest liczona wartość najczęstsza i najrzadsza oraz różnorodność. Podzbiory pikseli są definiowane za pomocą stref znajdujących się na oddzielnej niezależnej mapie (nazywanej mapą stref). Na mapie stref każdej komórce przypisany jest identyfikator strefy wyrażony liczbą całkowitą. Statystyki dla danej strefy są liczone ze zbioru wartości komórek, które odpowiadają komórkom o odpowiednim identyfikatorze na mapie stref. Dane mogą być przetwarzane przez te funkcje na dwa sposoby. Może być tworzona nowa mapa (Rysunek 5.16), na której każdej komórce zostanie przypisana statystyka jej strefy.



Rys. 5.16 Tworzenie mapy ze statystykami (wartość średnia) policzonymi w strefach .

Mapa (Rysunek 5.16a) zawiera wartości pewnej zmiennej, na mapie stref zaznaczono trzy obszary określone identyfikatorami 1,2 i 3 (Rysunek 5.16b). Strefa o numerze 3 składa się z dwóch części. Za pomocą funkcji utworzono nową mapę zawierającą średnie wartości w każdej strefie. Zostały one przypisane do każdej komórki danej strefy. Drugi sposób polega na utworzeniu w efekcie działania funkcji wyłącznie tablicy atrybutowej, w której znajduje się pole (kolumna) z numerami stref i pola dla wszystkich możliwych do obliczenia statystyk (Rysunek 5.17). Oprócz opisanych wcześniej statystyk w tablicy umieszczona jest wartość powierzchni każdej strefy.



CID	VALUE	COUNT	AREA	MIN	MAX	RANGE	MEAN
0	1	22	88000000	0	9	9	4.59091
1	2	20	80000000	0	9	9	4.15
2	3	14	56000000	1	9	8	5.85714

Rys. 5.17 Tworzenie tablicy ze statystykami policzonymi w strefach (na rysunku pokazano wybrane statystyki).

Opisane funkcje strefowe, dostępne w ArcGIS, umożliwiają wprowadzenie stref w postaci wektorowej warstwy poligonów, która jest wewnętrznie rasteryzowana [patrz podroz. 5.7]. Niemniej wykorzystanie tej funkcji, podobnie jak i innych funkcji opisanych w tym rozdziale, wymaga posiadania rozszerzenia Spatial Analyst. Zastosowanie funkcji Zonal Statistics (++) z HAT (Ramka 5.3) pozwala na obliczanie statystyk z map rastrowych bez posiadania tego rozszerzenia.

Ramka 5.3

Obliczanie statystyk w strefach za pomocą funkcji Zonal Statistics (++) w Hawth's Analysis Tools

Hawth's Analysis Tools (HAT) (<http://www.spatial ecology.com/htools>) funkcja Zonal statistics (++) daje możliwość wyznaczania statystyk z danych rastrowych za pomocą stref określonych wektorową warstwą poligonów bez konieczności posiadania narzędzi do analizy rastrowej. Tworzy ona tablicę atrybutową zawierającą identyfikatory poszczególnych stref i policzone statystyki. Funkcja ta może być także wykorzystana do ekstrakcji danych punktowych. W tym przypadku dane punktowe powinny zostać otoczone buforami z przypisanymi identyfikatorami punktów o rozmiarze mniejszym od komórki rastra.

5.4.2 Geometria stref (*Zonal Geometry*)

Dane: Mapy rastrowe (tylko mapa stref).

Pytania i zadania badawcze: Określenie powierzchni, obwodu oraz szeregu innych parametrów opisujących geometrię stref lub grup.

Jedynym argumentem funkcji *Zonal Geometry* est mapa stref (lub grup). Dla każdej strefy (grupy) obliczana jest jej powierzchnia, obwód oraz szereg parametrów opisujących geometrię. Tak jak poprzednio istnieje możliwość utworzenia nowej mapy z przypisanymi obliczonymi wartościami bądź wyłącznie ich zestawienie w postaci tablicy atrybutowej. Na Rysunku 5.18 przedstawiona została mapa powierzchni stref.

strefy							powierzchnia [km ²]							
3	3	1	1	1	1	1	56	56	88	88	88	88	88	88
3	1	1	1	1	1	1	56	88	88	88	88	88	88	88
1	1	1	1	1	1	3	88	88	88	88	88	88	88	56
1	1	1	1	1	3	3	88	88	88	88	88	56	56	56
2	2	2	2	3	3	3	80	80	80	80	56	56	56	56
2	2	2	2	2	3	3	80	80	80	80	80	56	56	56
2	2	2	2	2	3	3	80	80	80	80	80	56	56	56
2	2	2	2	2	2	3	80	80	80	80	80	80	56	56

Rys. 5.18 Tworzenie mapy powierzchni stref.

Tego typu mapy są przydatne na przykład przy poszukiwaniu obszarów, co do których wymagana jest odpowiednia powierzchnia. Jeżeli poszukiwano by wysp spełniających warunków związanych z ich powierzchnią, to mapa stref wody i lądu powinna zostać najpierw poddana grupowaniu, a następnie powinna zostać utworzona z niej mapa powierzchni (za pomocą geometrii stref), której reklasyfikacja pozwoli na wyznaczenie obszarów o powierzchniach zgodnych z wymaganiami. Wszystkie geometryczne miary można otrzymać w tablicy atrybutowej (Rysunek 5.19). W tabeli umieszczona jest wartość powierzchni, obwodu oraz miara określona jako *thickness*. Opisuje ona promień największego koła jakie może być wpisane wewnątrz obszaru danej strefy (bok komórki na mapie stref wynosi 2 km). Tworzenie tablic atrybutowych przez funkcje strefowe umożliwia ich integrację z danymi wektorowymi.

strefy

3	3	1	1	1	1	1
3	1	1	1	1	1	1
1	1	1	1	1	1	3
1	1	1	1	1	3	3
2	2	2	2	3	3	3
2	2	2	2	2	3	3
2	2	2	2	2	3	3
2	2	2	2	2	2	3

QID	VALUE	AREA	PERIMETER	THICKNESS
0	1	88000000	44000	4242
1	2	80000000	40000	7000
2	3	56000000	52000	3414

Rys. 5.19 Tworzenie tablicy z geometrią stref (na rysunku pokazano wybrane miary).

5.5 FUNKCJE GLOBALNE

Funkcje globalne charakteryzują się tym, że przypisują komórce wartości na podstawie analizy prowadzonej na całej mapie rastrowej. Bardzo wiele złożonych funkcji stosowanych w systemach GIS spełnia ten warunek, ale niewątpliwie do podstawowych można zaliczyć funkcję dystansu (EUCLIDEAN DISTANCE) i alokacji (EUCLIDEAN ALLOCATION).

5.5.1 Dystans (*Euclidean Distance*)

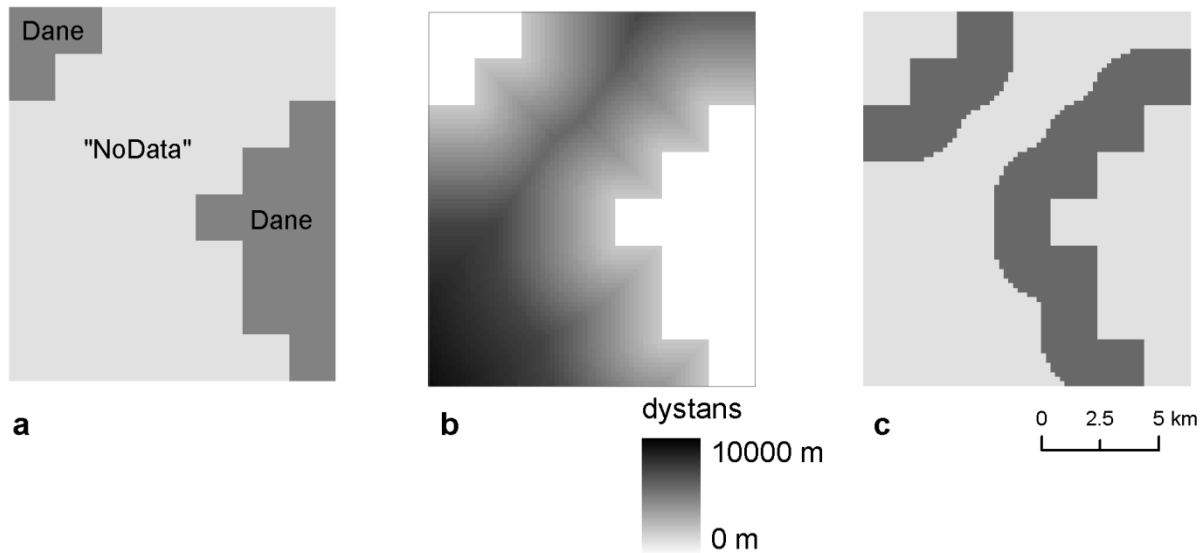
Dane: Mapy rastrowe zawierające komórki oznaczone jako „brak danych” (NoData).

Pytania i zadania badawcze: Wyznaczenie mapy odległości do określonych obiektów.

Utworzenie rastrowej mapy bufora o określonym rozmiarze naokoło obiektów rastrowych.

Mapy odległości od wybranych obiektów lub zbiorów obiektów są istotnym elementem analizy rastrowej. W różnych programach działanie tej funkcji przebiega w podobny sposób. Istotą procesu jest istnienie pewnej grupy komórek rastrowych, do których będzie liczona odległość z pozostałych komórek. Te wyróżnione komórki noszą nazwę danych źródłowych (*source data*). W ArcGIS wszystkie komórki posiadające wartości są traktowane jako komórki źródłowe, a odległość do nich jest obliczana dla komórek nie zawierających danych (NoData). Na powstałej w rezultacie analizy mapie odległości komórki źródłowe otrzymują wartość zero. Jest to uzasadnione, gdyż odległość komórki źródłowej do najbliższej komórki źródłowej wynosi zero. Odległość na mapie rastrowej może być pojmowana w różny sposób. Omawiane tu funkcje używają odległości euklidesowej, zdefiniowanej w geometrii analitycznej i opisującej odległość

między dwoma punktami (środkami komórek rastra) w układzie współrzędnych prostokątnych. Działanie funkcji tworzącej mapę dystansu euklidesowego zostało przedstawione na Rysunku 5.20. Z innych rozwiązań można wspomnieć funkcję kosztów, która wiąże obliczanie odległości z mapą szorstkości. Odległość opisuje tutaj bardziej pracę, jaka musi być wykonana na przemieszczenie się z jednego punktu do drugiego. Praca ta (koszty lub czas) zależy od rodzaju powierzchni



Rys. 5.20 Działanie funkcji dystansu (euklidesowego) i tworzenie buforów rastrowych.

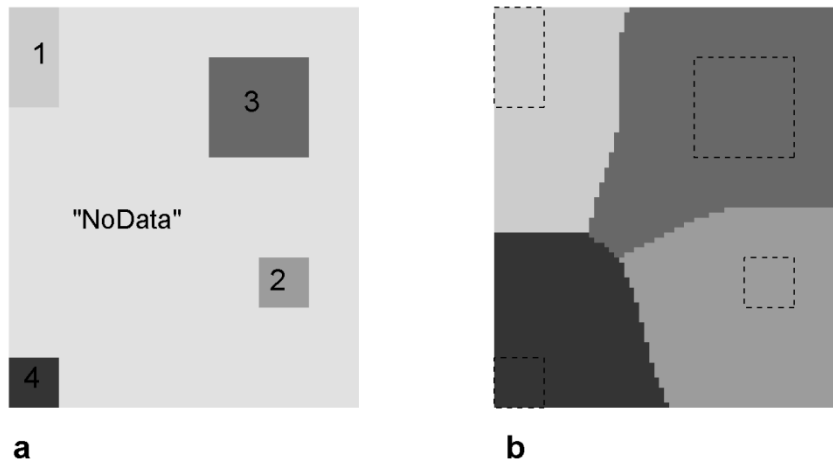
Na Rys.20a przedstawiono mapę, na podstawie której będzie wykonana mapa odległości. Część komórek tej mapy zawiera dane (wartości) tworzące komórki źródłowe. Pozostałe komórki nie posiadają wartości i mają przypisany status „NoData”. Wynik działania funkcji został przedstawiony jako Rys.20b. Dla każdej komórki „NoData” wyznaczono odległość do najbliższej komórki źródłowej (pomiędzy środkami tych komórek). Wartość ta została przypisana do odpowiadającej komórki mapy wynikowej. Komórki odpowiadające na mapie wynikowej komórkom źródłowym otrzymały wartość zero. Na Rys. 20c pokazano sposób wyznaczenia rastrowego bufora z mapy odległości. W tym celu przeprowadza się rekłasyfikację mapy odległości przypisując wartościom np. poniżej 2500 m ($\text{dystans} > 0 \text{ AND } \text{dystans} \leq 2500 \text{ m}$) wartość jeden, a pozostałym „NoData”.

5.5.2 Alokacja (*Euclidean Allocation*)

Dane: Mapy rastrowe zawierające komórki oznaczone jako „brak danych” (NoData).

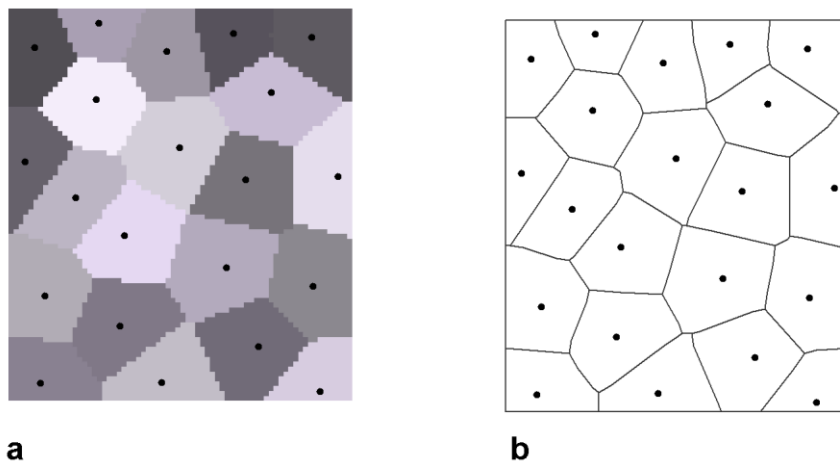
Pytania i zadania badawcze: Wypełnienie komórek z „NoData” wartościami z najbliższej leżących komórek.

Funkcja alokacji używa podobnej mapy jak funkcja dystansu. Komórkom „NoData” nie przypisuje ona jednak odległości, ale wartość najbliższej komórki źródłowej. Na nowo tworzonej mapie komórki źródłowe utrzymują swoje wartości.



Rys. 5.21 Działanie funkcji alokacji: a – mapa z komórkami źródłowymi wprowadzona do funkcji; b – mapa wynikowa, (na mapie b zaznaczono położenie komórek źródłowych z mapy a).

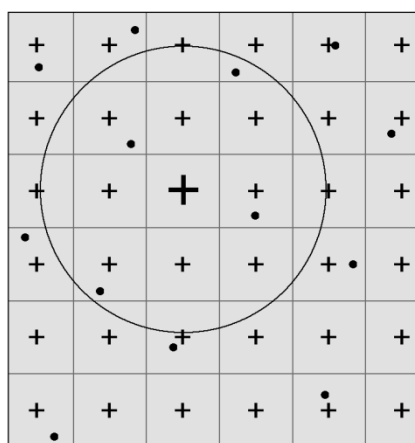
Działanie funkcji jest przedstawione na Rysunku 5.21. Na mapie (a) przedstawiono trzy grupy komórek z przypisanymi wartościami, pozostałe komórki mapy mają wartość „NoData”. Wynik działania funkcji (b) pokazuje, że wszystkim komórkom zostały przypisane wartości w oparciu o przedstawioną powyżej zasadę. W przypadku, kiedy komórki źródłowe pochodzą z rasteryzacji danych punktowych [patrz podroz. 5.7] (Rysunek 5.22a), zostają one otoczone obszarami oddziaływania tworząc rastrowy odpowiednik poligonów Thiessena [patrz podroz. 3.2.2] (Rysunek 5.22b).



Rys. 5.22 Działanie funkcji alokacji przy zrasteryzowanych danych punktowych: a – rastrowa mapa „oddziaływania” poszczególnych punktów; b – odpowiadająca jej mapa poligonów Thiessena (może być otrzymana przez wektoryzację mapy a) .

5.6 INTERPOLACJA

Interpolacja w analizie przestrzennej polega na zamianie punktowych danych pomiarowych na rastrowe pola ciągle zmiennych ilościowych lub jakościowych, czyli na odtworzeniu ich przestrzennego rozmieszczenia. Ze względu na to, że otrzymane w ten sposób warstwy są wykorzystywane następnie w procesie analizy, ich dokładne odtworzenie ma istotny wpływ na jej ostateczny wynik. Dane pomiarowe używane w interpolacji mogą mieć różnorodny charakter (ilościowy albo jakościowy) i są zwykle pobierane z niewielkich powierzchniowo fragmentów badanej powierzchni (odpowiadających np. wymiarowi sondy), co uzasadnia ich punktowy charakter. W procesie interpolacji, na podstawie istniejących danych oblicza się najczęściej wartości w centrach poszczególnych komórek rastra. Idea procesu została przedstawiona na Rysunku 5.23.



Rys. 5.23 Proces interpolacji. Wartości w centrach komórek rastrowych (krzyżyki) są obliczane na podstawie wartości otaczających je (np. według kryterium odległości) podzbiorów punktowych pomiarów (punkty).

Punktami zaznaczono dane pomiarowe, natomiast krzyżykami centra komórek rastrowych, w których zostaną policzone (wyinterpolowane) nieznanne wartości zmiennej. Cała operacja, jako próba odtworzenia rzeczywistości, ma sens tylko wtedy, jeżeli badana powierzchnia wykazuje się ciągłością zmienności przestrzennej, rozumianej jako tendencja wzrostu zróżnicowania wraz ze wzrostem odległości pomiędzy zmiennymi. Na tej podstawie możemy oczekiwać, że najbardziej prawdopodobną wartością w centrum komórki leżącej pomiędzy dwoma punktami pomiarowymi o różnych wartościach jest wartość pośrednia. Nowe wartości są najczęściej liczone na podstawie otaczającego je podzbioru punktów pomiarowych, przy czym dobór tych punktów może się odbywać albo za pomocą kryterium odległości, albo liczby punktów. Obliczając nieznaną wartość w punkcie (centrum komórki rastrowej) oznaczonym dużym krzyżykiem możemy posłużyć się wszystkimi punktami leżącymi wewnątrz koła o zadanym

promieniu, ze środkiem w centrum komórki, albo określoną liczbą najbliższych jej punktów. Należy zwrócić uwagę na to, że punkty pomiarowe i obliczeniowe (centra komórek) nie pokrywają się. Oznacza to, że maksymalne zmierzone wartości, mogą nie wystąpić na mapie rastrowej, ponieważ w procesie obliczania wartości pobliskich im centrów komórek brane są pod uwagę także inne wyniki pomiarów.

Odtwarzając za pomocą interpolacji rozmieszczenie przestrzenne, nie zawsze jesteśmy ograniczeni do korzystania wyłącznie z naszych danych pomiarowych. Czasami istnieje inna zmienna, dostępna na przykład w postaci mapy cyfrowej, która wykazuje istotny związek (korelacyjny) z badaną wielkością. Typowym przykładem jest tworzenie map rozmieszczenia opadów deszczu na podstawie punktowych danych pomiarowych. Wielkość opadu wykazuje najczęściej zależność od wysokości, która jest dostępna w postaci cyfrowej mapy terenu DEM. Tego typu dane noszą nazwę danych pomocniczych. Metody interpolacji mogą być podzielone na metody wykorzystujące dane pomocnicze [patrz podroz. 9.5.4] i na metody posługujące się wyłącznie jednym zbiorem danych pomiarowych. Interpolacja punktowych danych wysokości w celu budowy poprawnego modelu ukształtowania powierzchni Ziemi (tworzenie mapy DEM) wymaga uwzględnienia specyfiki procesów ją kształtujących, a w szczególności (1) roli wód powierzchniowych i spływu wód opadowych po terenie [patrz podroz. 6.1], a także (2) istnienia stref nieciągłości jak klify i urwiska. Zupełnie odrębnym zagadnieniem jest uwzględnienie na mapie DEM obiektów antropogenicznych. W rezultacie metody interpolacyjne są bardzo różnorodne i często zorientowane na określone zmienne (wysokość terenu, habitaty czy rozmieszczenie gatunków [patrz podroz. 2.4]).

Podział na metody deterministyczne i statystyczne, a właściwie geostatystyczne, jest następnym podejściem definiowania sposobów interpolacji. Metody deterministyczne obliczają wartości w centrach komórek rastra za pomocą wzorów matematycznych, zapewniających ciągłość modelowanej powierzchni (łagodne przejście wartości od komórki do komórki). Metody geostatystyczne [patrz rozdział 9], które stanowi cała rodzina technik związanych z krigingiem, bazują na statystycznym modelu uwzględniającym autokorelację danych. Ich istotną zaletą jest możliwość nie tylko określenia najbardziej prawdopodobnej wartości w danej komórce rastra, ale także ocena spodziewanego błędu jej określenia. Odgrywa to oczywiście kluczową rolę we wnioskowaniu statystycznym, będącym istotnym elementem metodyki prowadzenia badań przyrodniczych, oraz w wielu zastosowaniach praktycznych np. w ochronie środowiska.

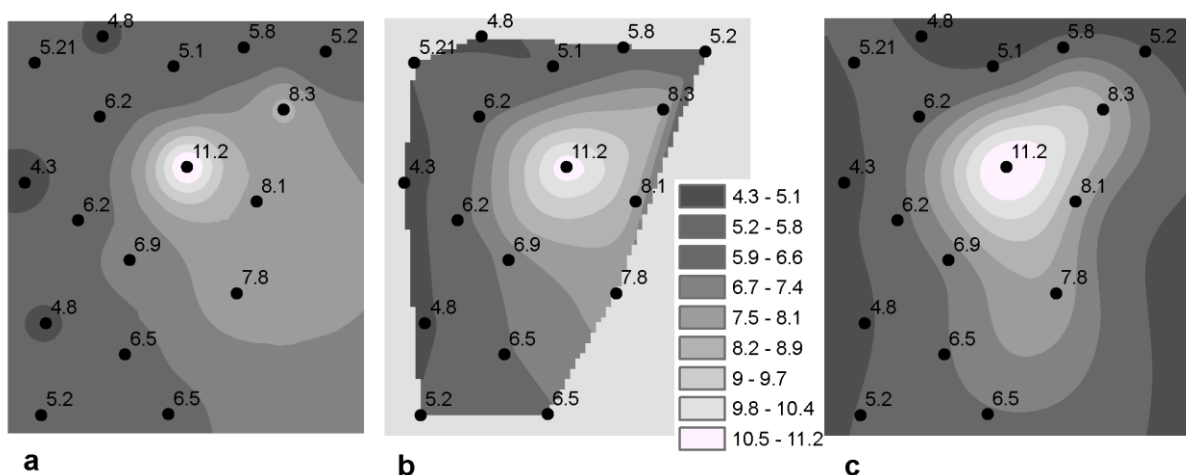
Interpolacja danych — przy wykorzystaniu deterministycznych metod zapewniających ciągłość powierzchni, a także określeniu (estymacji) wartości najbardziej prawdopodobnych

(przeciętnych) — tworzy „wygładzone” modele powierzchni, które wyraźnie różnią się pod względem „szorstkości” od powierzchni rzeczywistych. Do tworzenia powierzchni zachowujących zmienność przestrzenną, które nie przedstawiają w każdej komórce wartości najbardziej prawdopodobnej (co w rezultacie daje efekt wygładzenia) stosuje się geostatystyczne metody symulacji [patrz rozdział 9].

Podstawową deterministyczną metodą interpolacji danych ilościowych jest metoda odwrotnych odległości (*Inverse Distance Weighted* – IDW). Powszechnie stosuje się także metodę splinów (funkcja w ArcGIS SPLINE) opartą na analitycznym procesie tworzenia powierzchni o jak najmniejszych krzywiznach przechodzącej przez punkty pomiarowe. W ArcGIS dostępna jest także metoda naturalnego sąsiedztwa (NATURAL NEIGHBOR), wykorzystująca podobny mechanizm obliczania co IDW, ale pozbawiona szeregu jej wad. Przy danych jakościowych podstawowym rozwiązaniem dostępnym w każdym systemie GIS jest wykorzystanie funkcji alokacji, jednak otrzymywane rezultaty najczęściej nie są satysfakcjonujące. Pozostaje wtedy stosowanie metod regresyjnych [patrz podroz. 2.4 i ramka 8.2] lub geostatystycznych [patrz rozdział 9].

Metoda odwrotnych odległości, za pomocą średniej ważonej z n pomiarów w znanych punktach $z(x_i, y_i)$, określa wartość Z w miejscu (x_j, y_j) , w którym nie dokonano pomiaru. Jako wagi stosuje się najczęściej odwrotności kwadratu odległości d_{ij}^{-2} danego punktu pomiarowego od miejsca interpolacji. Ostatecznie wyrażenie przyjmuje postać,

$$Z(x_j, y_j) = \frac{\sum_{i=1}^n z(x_i, y_i) \cdot d_{ij}^{-2}}{\sum d_{ij}^{-2}} \quad (5.1)$$



Rys. 5.24 Interpolacja przy pomocy funkcji ArcGIS: a – metoda odwrotnych odległości (IDW); b – metoda naturalnego sąsiedztwa (NATURAL NEIGHBOR); c – metoda splinów (SPLINE).

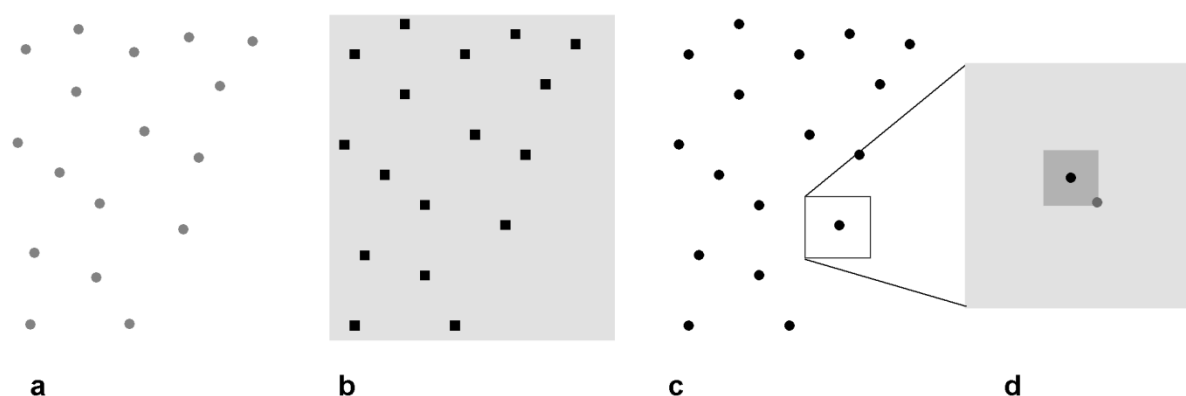
Na Rysunku 5.24 przedstawiono interpolację przeprowadzoną trzema przedstawionymi powyżej metodami. Każda z metod zobrazowała przestrzenny rozkład badanej zmiennej w trochę inny sposób. Dane punktowe nie wypełniały równomiernie rejonu badań pozostawiając w prawym dolnym rogu obszar pozbawiony pomiarów. Proces estymacji (prognozowania) wartości w punkcie, przy braku pomiarów otaczających z jednej ze stron (taka sytuacja występuje właśnie w prawym dolnym rogu mapy), nosi nazwę ekstrapolacji. Metoda odwrotnych odległości (Rys. 5.24a) posiada wadę tworzenia sztucznych kulistych wzorów naokoło punktów pomiarowych. Na mapie istnieje pięć takich tworów w porównaniu z jednym, jak najbardziej uzasadnionym, na pozostałych mapach. Proces ekstrapolacji ma neutralny charakter z tendencją do zachowywania wartości pomiarów znajdujących się po lewej stronie punktów, w których określana jest nowa wartość. Metoda naturalnego sąsiedztwa (Rys.5.24b) nie przeprowadziła ekstrapolacji, ograniczając tworzoną mapę do obrysu punktów. Metoda ta, jako jedyna, daje dobre rezultaty przy bardzo dużych zbiorach punktów pomiarowych, radzi sobie także dobrze z ich nierównomiernym rozmieszczeniem. Brak ekstrapolacji zabezpiecza przed pojawieniem się rezultatów obarczonych potencjalnie dużym błędem. Z taką właśnie sytuacją mamy do czynienia na mapie wykonanej techniką splinów (Rys. 5.24c). Ogólny obraz prezentowanego rozkładu jest w centralnej części podobny do uzyskanego poprzednią metodą. Z prawej strony na obszarze ekstrapolowanym pojawiają się jednak mało prawdopodobne niskie wartości.

5.7 KONWERSJA WEKTOR-RASTER I RASTER-WEKTOR

Często istnieje potrzeba zmiany modelu danych, z wektorowego na rastrowy lub odwrotnie. Pojawia się ona zarówno w trakcie przygotowywania i integracji danych, jak również podczas wykonywania analiz. W szeregu przypadków proces analizy danych przebiega z wykorzystaniem obu modeli. Część funkcji rastrowych (np. niektóre funkcje analizy rastrowej w rozszerzeniu Spatial Analyst) akceptują jako argumenty dane wektorowe, które są następnie czasowo zamieniane do postaci rastrowej w trakcie działania funkcji. Istnieją także funkcje, które łączą oba modele (np. funkcje dokonujące ekstrakcji danych z map rastrowych do danych punktowych).

Każdy typ danych wektorowych może być zamieniony na dane rastrowe, a dane rastrowe mogą być przekształcone do dowolnego typu danych wektorowych. Na Rysunku 5.25 pokazano, w jaki sposób dokonywana jest konwersja danych punktowych (Rys. 5.25a) do danych

rastrowych w ArcGIS (Conversion Tools > FEATURE TO RASTER) i odwrotnie (Conversion Tools > RASTER TO POINT). Punkty zamieniane są na pojedyncze komórki rastra (Rys. 5.25b), którym przypisywane są wartości z dowolnego pola tablicy atrybutowej warstwy wektorowej. Rozmiar komórki rastrowej może być dowolnie definiowany. Lokalizację komórki określa fakt zawierania przez nią punktu. Pozostałe komórki mają przypisane „No Data”. Zamiana danych rastrowych na punktowe jest możliwa tylko dla wartości całkowitych. W przypadku rastra z wartościami rzeczywistymi można go pomnożyć np. przez 10^3 , zamienić na wartości całkowite, dokonać konwersji i w tablicy atrybutowej danych punktowych utworzyć nowe pole z wartościami podzielonymi przez 10^3 . Ogranicza to w prawdzie dokładność danych do trzech miejsc po przecinku, ale w większości przypadków może być to wystarczającym rozwiązaniem.

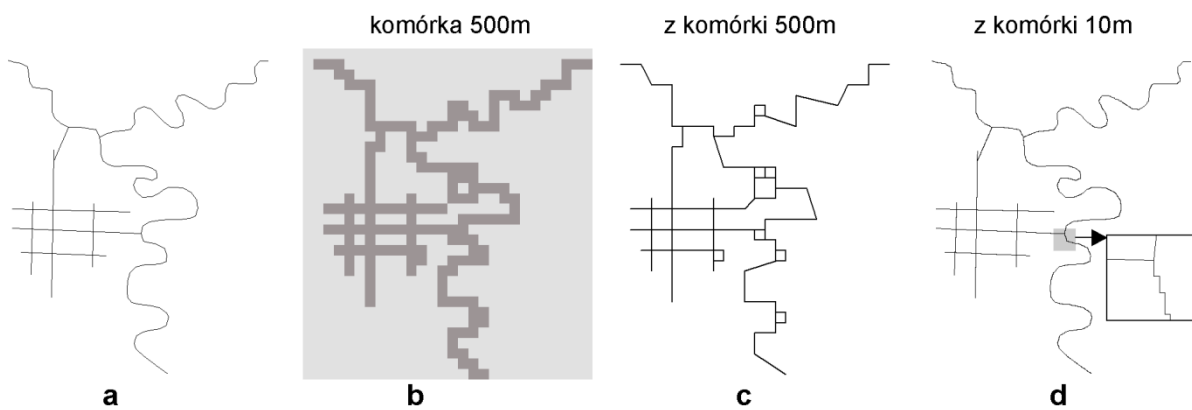


Rys. 5.25 Konwersja punktowych danych wektorowych na rastrowe i odwrotnie: a – dane punktowe; b – po konwersji dane punktowe są zamieniane na pojedyncze komórki mapy rastrowej (tło otrzymuje wartość NoData); c – konwersja rastra do punktów (tylko dla wartości całkowitych) umieszcza punkty w centrum komórki rastrowej; d – konwersja danych punktowych do rastra i z powrotem powoduje przesunięcie punktu.

Podczas konwersji rastra do punktów wszystkie komórki o wartości innej niż „NoData” zostają zamienione na punkty położone w centrum komórki (Rys. 5.25c). W rezultacie położenie punktu po dwukrotnej konwersji nie jest zgodne z początkowym (Rys. 5.25d). Maksymalna różnica może wynosić do połowy przekątnej komórki, co pozwala za pomocą jej rozmiaru kontrolować to odchylenie. Należy zwrócić także uwagę na to, że przy wizualizacji zrasteryzowanych punktów, przy małych rozmiarach komórki, mogą być one niewidoczne.

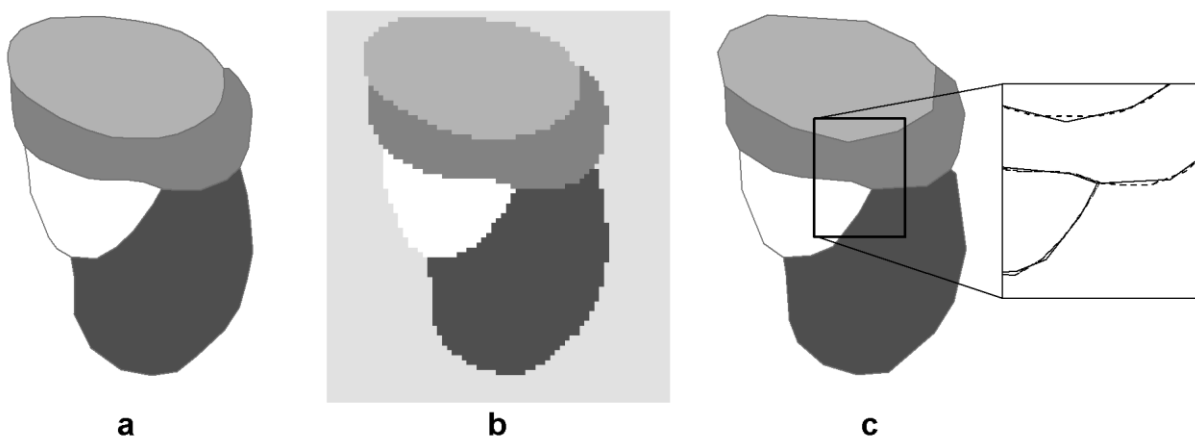
Konwersja danych liniowych do rastra (Conversion Tools > FEATURE TO RASTER) i odwrotnie (Conversion Tools > RASTER TO POLYLINE) odbywa się na podobnych zasadach (Rysunek 5.26). Przy zamianie danych liniowych (Rysunek 5.26a) komórkom rastrowym, które są przecinane przez linie przypisywany jest ich atrybut z wybranego pola (Rysunek 5.26b).

Otrzymany rastrowy model obiektów liniowych będzie silnie zależał od zdefiniowanego rozmiaru komórki. Dobrze uwidacznia to proces konwersji z danych rastrowych do wektorowych (Rysunek 5.26c i d). Podobnie jak w przypadku danych punktowych jest to możliwe wyłącznie dla danych całkowitych. Przyjęcie zbyt dużej komórki rastrowej tworzy nieistniejące zapętlenia. Natomiast zastosowanie komórki o małych rozmiarach, w porównaniu ze zmiennością przestrzenną linii, pozwala na wierne przedstawienie elementów sieci. Po konwersji z rastra do modelu wektorowego linie zachowują częściowo schodkowy charakter, pomimo stosowania opcji wygładzania. (Rys. 5.26d).



Rys. 5.26 Konwersja liniowych danych wektorowych na rastrowe i odwrotnie: a – dane liniowe; b – po konwersji dane liniowe są zamieniane na połączone komórki mapy rastrowej (tło otrzymuje wartość NoData); c – konwersja rastra do linii przy zbyt dużych rozmiarach komórki tworzy sztuczne formy; d – konwersja rastra do linii przy małych rozmiarach komórki.

Konwersja poligonów do rastra (Conversion Tools > FEATURE TO RASTER) i odwrotnie (Conversion Tools > RASTER TO POLYGON) została przedstawiona na Rysunku 5.27.



Rys. 5.27 Konwersja poligonów z warstwy wektorowej na rastrową i odwrotnie: a – dane wektorowe; b – po konwersji poligony są zamieniane na połączone komórki mapy rastrowej (tło otrzymuje wartość NoData); c – konwersja rastra do poligonów wykorzystuje wygładzanie linii.

Komórki rastra znajdujące się wewnątrz poligonów otrzymują wartości z wybranego pola ich tablicy atrybutowej (Rys. 5.27b). Pozostałym komórkom przypisywana jest wartość „NoData”. Wektoryzacja rastra do warstwy poligonów (Rys. 5.27c) przebiega z wygładzeniem schodkowej struktury ich brzegów, ale w rezultacie przy konwersji poligonów do rastra i z powrotem wystąpią pewne różnice w położeniu brzegów poligonów.

6. ANALIZA TERENU I MODELOWANIE HYDROLOGICZNE

Ukształtowanie powierzchni Ziemi ma istotny wpływ na wiele zachodzących na niej procesów fizycznych i biologicznych. Pełne zrozumienie tych procesów wymaga prowadzenia badań w różnych skalach. Poznanie mechanizmów przemian związków organicznych w glebie, czy produkcji pierwotnej podwodnej łąki odbywa się w nano i mikroskali. Na drugim krańcu przedziału skal znajdują się procesy badane w skali całej Ziemi, oceanów czy kontynentów, jak na przykład globalne ocieplenie. Badania przyrodnicze prowadzone w tych skalach stanowiły do niedawna przeważającą większość podejmowanych inicjatyw poznawczych. Stopniowo rosło jednak przekonanie, co do istotności skal pośrednich w całościowym zrozumieniu wielu procesów hydrologicznych, geomorfologicznych i ekologicznych. W badaniach nad ochroną gatunków, analizie rozprzestrzeniania się nie-punktowych zanieczyszczeń, czy określeniu roli zmian klimatycznych konieczne stało się prowadzenia analiz w skalach pośrednich: topograficznej i mezoskali. W tych skalach ukształtowanie powierzchni terenu ma podstawowy wpływ na przemieszczanie się wód płynących i opadowych (a wraz z nimi substancji chemicznych i biologicznych), na dopływ promieniowania słonecznego i rozmieszczenie roślinności, kształtowanie falowania i prądów w strefie brzegowej, czy też na średnie wieloletnie warunki klimatyczne. Potrzeba uwzględniania w różnorodnych badaniach ukształtowania terenu stało się podstawą do rozwoju metod i technik badawczych określanych jako analiza terenu.

Podstawowym zbiorem danych opisujących kształt powierzchni Ziemi jest mapa topograficzna. W formie analogowej tworzy ją rysunek poziomicy lub izobat, a cyfrowej numeryczny model terenu. Cyfrowy obraz powierzchni Ziemi, dzięki komputerowemu przetwarzaniu danych, stworzył zupełnie nowe możliwości uwzględniania jej w procesie badawczym. Metody analizy terenu obejmują jego wizualizację i uwzględnienie ukształtowania powierzchni Ziemi w poznawaniu i modelowaniu procesów hydrologicznych, geomorfologicznych i biologicznych. Metody cieniowania, zastosowania perspektywy czy wykorzystanie efektu stereoskopowego są używane do wizualizacji trójwymiarowego obrazu powierzchni Ziemi. Hydrologiczna analiza numerycznego modelu terenu umożliwiła wprowadzenie automatycznego i znacznie bardziej wiarygodnego sposobu wydzielenia granic zlewni i wyznaczania dla danego miejsca obszarów zasilających spływem powierzchniowym. Dzięki cyfrowemu modelowi terenu możliwe jest modelowanie spływu wody w rezultacie gwałtownych opadów, dopływu zanieczyszczeń do wód przybrzeżnych ze źródeł nie-punktowych, przewidywanie zalewania terenu podczas powodzi. Analiza geomorfologiczna wykorzystuje model terenu w geomorfometrii, klasyfikacji form terenowych oraz modelowaniu

osuwisk. W zagadnieniach ekologicznych rozmieszczenie w przestrzeni elementów biologicznych może być modelowane na podstawie ich zależności od wysokości, rodzaju form terenowych i dopływu promieniowania słonecznego, które jest pochodną ukształtowania terenu.

Choć numeryczny model terenu może wykorzystywać różne modele danych, to najczęściej w zagadnieniach analizy terenu wchodzących w zakres nauk przyrodniczych wykorzystuje się jego rastrową postać — DEM (*Digital Elevation Model*), definiowaną jako regularną dwuwymiarową macierz wysokości powierzchni terenu próbkowaną względem wysokościowego układu odniesienia (Moore i in., 1991). Należy jednak zwrócić uwagę na to, że definicje związane z numerycznym modelem terenu przyjmują różną postać. W literaturze polskiej dość powszechne jest ujmowanie w nich metody interpolacyjnej pozwalającej na transformację powyżej zdefiniowanej struktury danych do powierzchni ciągłej z wartościami określonymi w każdym punkcie. W literaturze naukowej związanej z analizą terenu pojawiają się także różnice w definiowaniu DEM i DTM (*Digital Terrain Model*), który dodatkowo obejmuje czasem warstwy pokrycia i użytkowania terenu oraz warstwy pochodne DEM, jak nachylenie czy ekspozycja (kierunek nachylenia względem stron świata). Niezależnie jednak od różnic w definicjach powszechny jest pogląd, że numeryczny model terenu posiada szczególne cechy wyróżniające go spośród innych ciągłych pól fizycznych czy biologicznych zmiennych. Wynika to zarówno z przyczyn naturalnych, jak i sztucznych. Naturalny kształt terenu jest formowany przez wzajemne oddziaływanie wód i tworzącego go materiału. Wody powodują erozję, rzeźbiąc teren w różnych skalach tworząc charakterystyczne formy grzbietów i dolin. Z kolei kształt terenu określa kierunek spływu i transport niesionych przez wody substancji, w postaci rozpuszczonej lub zawieszanej, a następnie ich akumulację. W rezultacie w odróżnieniu od np. ciągłego pola temperatury powietrza, kształt terenu zawiera linie opisujące krawędzie grzbietów, klifów czy dna dolin. Ich uwzględnienie w tworzeniu numerycznego modelu jest niezbędne, jeśli ma być on wykorzystany np. w modelowaniu hydrologicznym. Tego typu linie noszą nazwę linii szkieletowych (*skeleton lines* lub *breaklines*). Podobnie działalność człowieka może prowadzić do powstawania regularnych odkształceń w ukształtowaniu terenu. Przy czym przy uwzględnianiu ich w zastosowaniach inżynierskich bardzo często preferowany jest model TIN.

6.1 Tworzenie map DEM

Ze względu na potrzebę uwzględnienia w DEM linii szkieletowych jego tworzenie wymaga zastosowania szczególnych metod. Podstawowym źródłem danych w tworzeniu numerycznych map terenu są poziomicze pozyskiwane z topograficznych map papierowych. Pewien udział mają dane pozyskiwane metodami fotogrametrycznymi ze stereoskopowych zdjęć lotniczych i satelitarnych oraz dane pozyskiwane tradycyjnymi metodami geodezyjnymi.

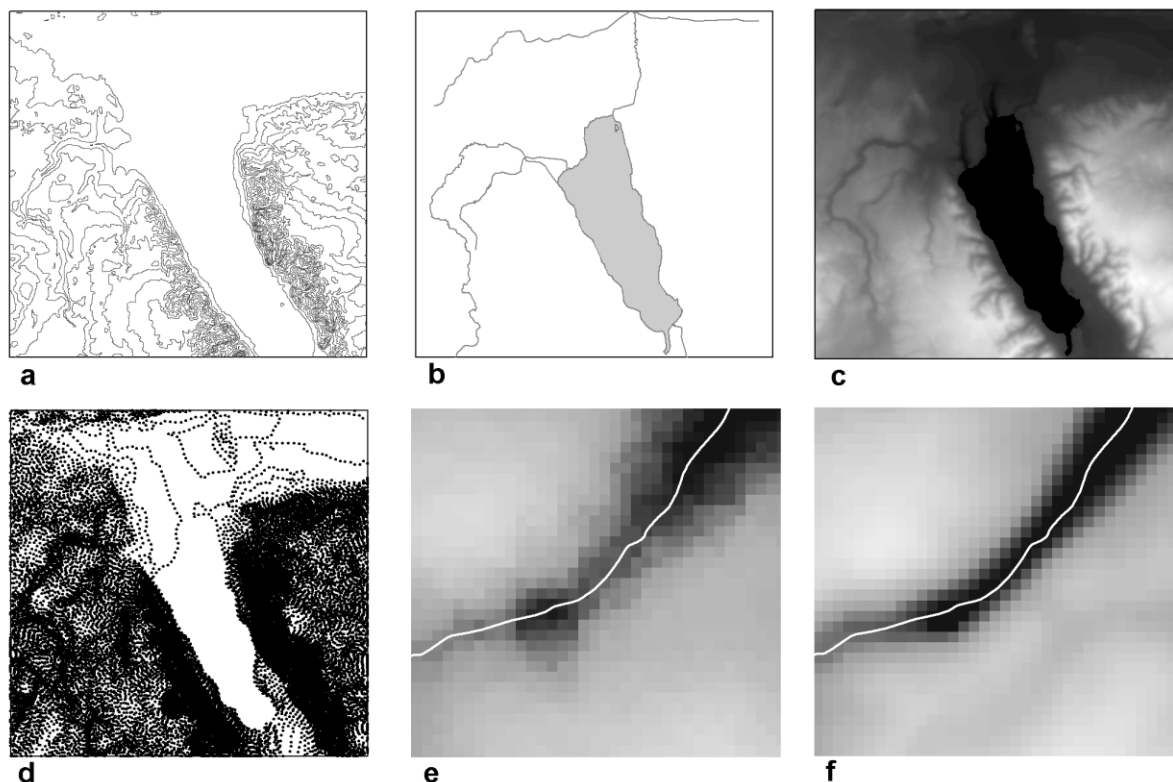
Ostatnio coraz powszechniejsze staje się także pozyskiwanie danych metodami radarowymi czy z wykorzystaniem LIDARU.

Wykorzystanie DEM w projekcie badawczym wymaga rozważenia szeregu kwestii. Podstawowa to pytanie, czy istniejące modele DEM są właściwe dla potrzeb danego projektu pod względem skali i dokładności.

Ramka 6.1

Tworzenie DEM dla Polski z DTED 2 i MPHP w ArcGIS

Przedstawiony w Ramce 3.7 numeryczny model terenu dla Polski ma szereg wad z punktu widzenia jego wykorzystania do pracy naukowej. Jedną z wcześniej wspomnianych [patrz ramka 3.7] jest przedstawienie wysokości jako wartości całkowitych. Nie jest on także zgodny z elementami numerycznej mapy hydrograficznej MPHP [patrz ramka 3.5], choć obie mapy zostały wykonane z materiałów źródłowych w podobnej skali.



Rys. 6.1 Tworzenie mapy DEM z danych DTED 2 i MPHP: a – poziomic otrzymane z DTED 2 (na rysunku przedstawiono co dziesiątą poziomice); b – rzeki i jeziora z mapy MPHP; c – wynik działania narzędzia TOPO TO RASTER, jako parametrów użyto trzech warstw wektorowych (poziomic, rzek i jezior); d – punkty wysokościowe pobrane z poziomic (z mapy a) co 200 m; e – fragment doliny rzecznej (biała linia oznacza rzekę) na mapie DEM wykonanej metodą krigingu z danych punktowych; f – ten sam fragment wykonany narzędziem TOPO TO RASTER (ANUDEM).

Zastosowanie przedstawionej w Ramce 3.7 metody utworzenia poziomic o kroku 1 metra z mapy DTED2 i wykorzystanie narzędzia TOPO TO RASTER daje możliwość stworzenia numerycznego modelu terenu

zespalającego oba zbiory danych przez wykorzystanie dodatkowych informacji zawartych w numerycznych danych hydrograficznego podziału Polski MPHP. Tak utworzony model może być następnie stosowany w modelowaniu hydrologicznym uwzględniającym sieć rzeczną zobrazowaną w dostępnym modelu numerycznym. Ma to tym większe znaczenie, że model MPHP jest oficjalnym zbiorem danych stosowanym przy realizacji zadań Ramowej Dyrektywy Wodnej. Na Rysunku 6.1 przedstawiono sposób tworzenia DEM. Z mapy numerycznej DTED 2 tworzy się wektorowy plik poziomic o kroku 1 metr za pomocą procedury opisanej w Ramce 3.7 (Rys. 6.1a). Ze zbioru danych MPHP pobiera się wektorową warstwę rzek i jezior dla obszaru tworzenia mapy (Rys. 6.1b). Wykorzystując pobrane warstwy (poziomice, rzeki, jeziora) jako parametry dla narzędzia TOPO TO RASTER tworzy się DEM (Rys. 6.1c). Wykonana mapa odwzorowuje znacznie lepiej kształt dolin rzecznych. Widoczne jest to przy porównaniu elementu mapy wykonanej metodą krigingu (Rys. 6.1e) i omawianą powyżej (Rys. 6.1f). Kriging został wykonany z danych punktowych pobranych z poziomic co 200 m (Rys. 6.1d).

Rozdzielczość mapy rastrowej jest jej podstawową, choć może być mylącą charakterystyką opisującą możliwą skalę badań. Wielkość komórki rastrowej określa jednoznacznie najmniejsze formy terenu, które mogą być analizowane na mapie. Jednak ze względu na to, że mapa rastrowa może być przekształcona do rastra o dowolnej wielkości komórki istotne jest źródło i sposób pozyskiwania danych. Omawiana już polska mapa numeryczna terenu DTED 2 ma rozmiar komórki rastrowej wynoszący 15 metrów, ale powstała z digitalizacji map topograficznych w skali 1: 50000. Jako generalną wskazówkę można przyjąć, że faktyczna rozdzielczość mapy numerycznej, rozumiana jako możliwość analizowania obiektów w danej skali, jest rzędu 0,5 mm na mapie źródłowej, czyli w tym przypadku około 25 metrów. Rozdzielczość rzeczywista map tworzonych z pomiarów geodezyjnych, radarowych lub lidarowych będzie zależna od metody próbkowania. Osobną sprawą jest dokładność mapy w wiernym przedstawianiu form terenu, zarówno w kierunku poziomym, jak i pionowym. W celu jak najwierniejszego przedstawiania powierzchni terenu na mapach DEM opracowane zostały specjalne techniki.

Stworzony pod koniec lat 80-dziesiątych przez Hutchinsona (1993) i nadal rozwijany program ANUDEM wykorzystuje szereg metod do zapewnienia naturalnego kształtu i zachowania struktury powierzchni zgodnej ze wpływem wody po terenie. Osiągnięte jest to przez zastosowanie algorytmu *drainage enforcement*, usuwającego bezodpływowe zagłębienia w terenie (*sinks, pits*), które często powstają jako sztuczne elementy przy zastosowaniu klasycznych metod interpolacji. Rzeczywiste obszary bezodpływowe mogą być zachowane po ich oznaczeniu. Program wykorzystuje do interpolacji technikę TPS (*Thin Plate Spline*) z modyfikowanym parametrem szorstkości, co umożliwia przedstawianie ostrych załamień

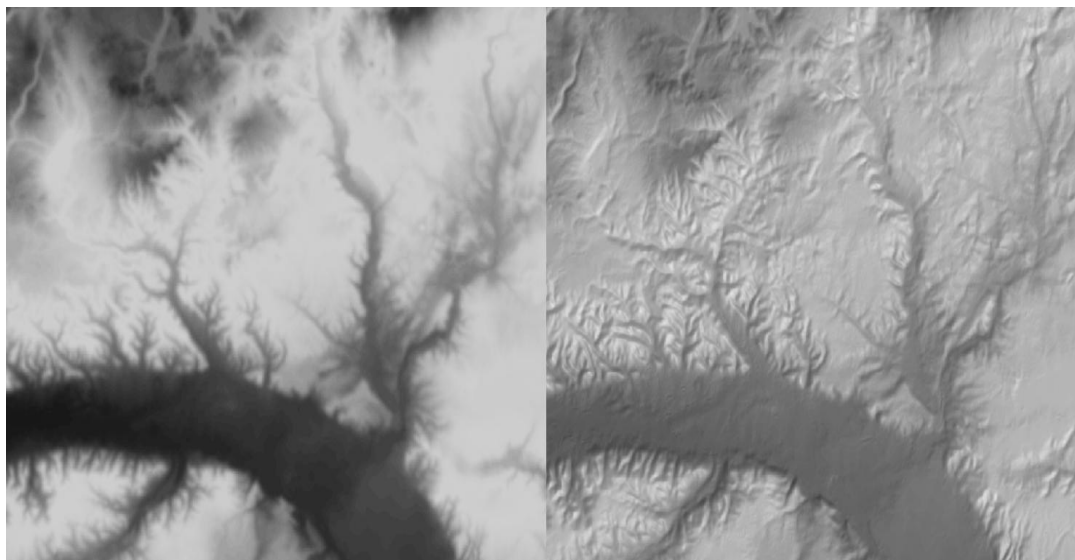
w terenie. Program może uwzględniać wektorową sieć rzeczna do wiernego kształtowania form związanych ze spływem wody. Możliwość tworzenia DEM z jednoczesnym wykorzystaniem różnego rodzaju danych: poziomice (linie), pomiary wysokości (punkty), sieć rzeczna (linie), rejony bezodpływowe (punkty), jeziora (poligony), daje możliwość dopasowywania tworzonego modelu do określonych celów badawczych. Program ANUDEM został dołączony do ArcGIS jako jedna z metod interpolacji (TOPO TO RASTER). Obecnie (ArcGIS 9.1) jest to wersja ANUDEM nosząca numer 4.6, oddzielnie sprzedawana jest bardziej zaawansowana wersja 5.1 (cena edukacyjna wynosi około 700 dolarów – listopad 2006). W Ramce 6.1 przedstawiono wykorzystanie tej metody do tworzenia map DEM dla Polski z danych DTED 2 i MPHP.

6.2 Wizualizacja powierzchni terenu

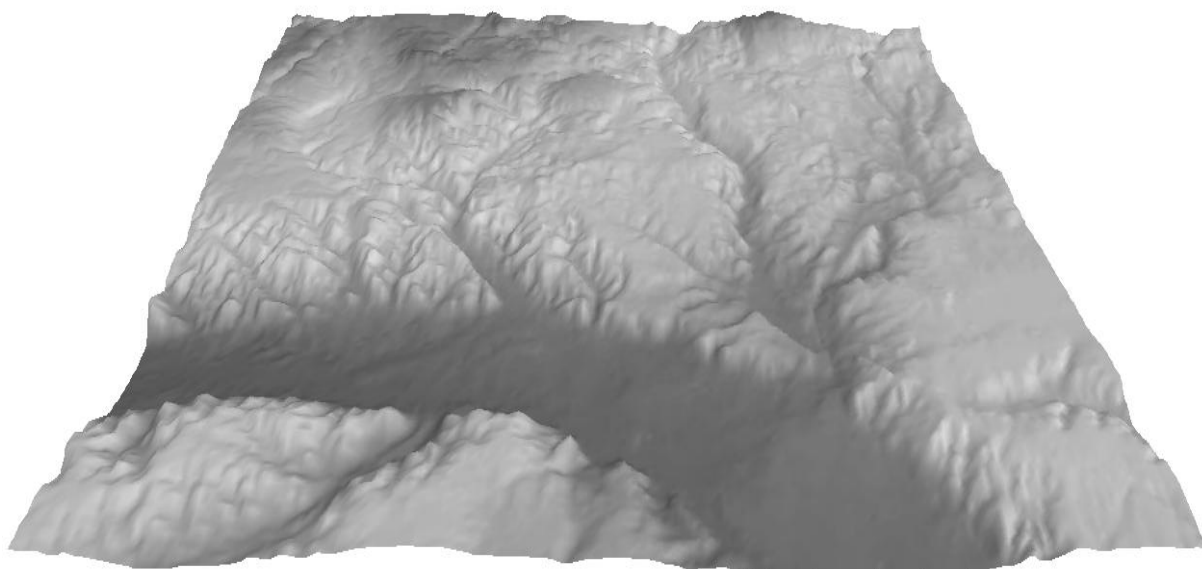
Wizualizacja powierzchni terenu jest powszechnie używana w wielu dziedzinach. Jej rezultaty w postaci przyciągających oko map lub obrazów są wykorzystywane nie tylko w kartografii, ale w reklamie, dydaktyce czy działalności publicystyczno-popularyzatorskiej, przykładem której mogą być osiągnięcia „National Geographic”. Wizualizacja terenu w badaniach naukowych ma głównie na celu stworzenie możliwości wzrokowej analizy występujących w nim form i ich związku z innymi obiektami badań. Najprostszą metodą wizualizacji powierzchni ciągłych jest przypisanie jej wartościom palety kolorów lub odcieni szarości. Mapy wykonane tą techniką (lewa strona Rysunku 6.2) dobrze nadają się do wizualizacji pól temperatury lub zanieczyszczeń, nie pokazują jednak form ukształtowania powierzchni topograficznej takich jak grzbiety i doliny. Nad rozwiązaniem tego zagadnienia pracowały całe pokolenia kartografów, którzy opracowali szereg metod takich jak kreskowanie zboczy (*hatchures*), czy cieniowanie poziomic (*illuminated contour method*). Te tradycyjne, często bardzo pracochłonne metody, mogą być znacznie łatwiej wykonywane za pomocą możliwości analitycznych współczesnych systemów GIS (Kennelly i Kimerling, 2001).

Obecnie podstawową metodą uwypuklania rzeźby terenu jest metoda cieniowania (*hillshading*) wykorzystująca stopień oświetlenia powierzchni poszczególnych komórek mapy rastrowej. W przypadku tym zakłada się, że są to powierzchnie idealnie rozpraszające odbite światło zgodnie z prawem Lamberta (powierzchnie Lambertowskie, taką powierzchnią jest na przykład powierzchnia kredy). Komórkom przypisywany jest odcień szarości proporcjonalnie do wartości cosinusa kąta pomiędzy kierunkiem światła i normalną do powierzchni. Intensywność odbicia światła zależy wyłącznie od orientacji powierzchni względem źródła światła, którego położenie określa się za pomocą azymutu (*declination*) i wysokości (*inclination*). Najczęściej metoda ta jest łączona z paletą kolorów przypisaną do wysokości. Warstwa cieniowania jest

nakładana na warstwę DEM jako warstwa półprzezroczysta. Wynik takiej operacji został przedstawiony po prawej stronie Rysunku 6.2.



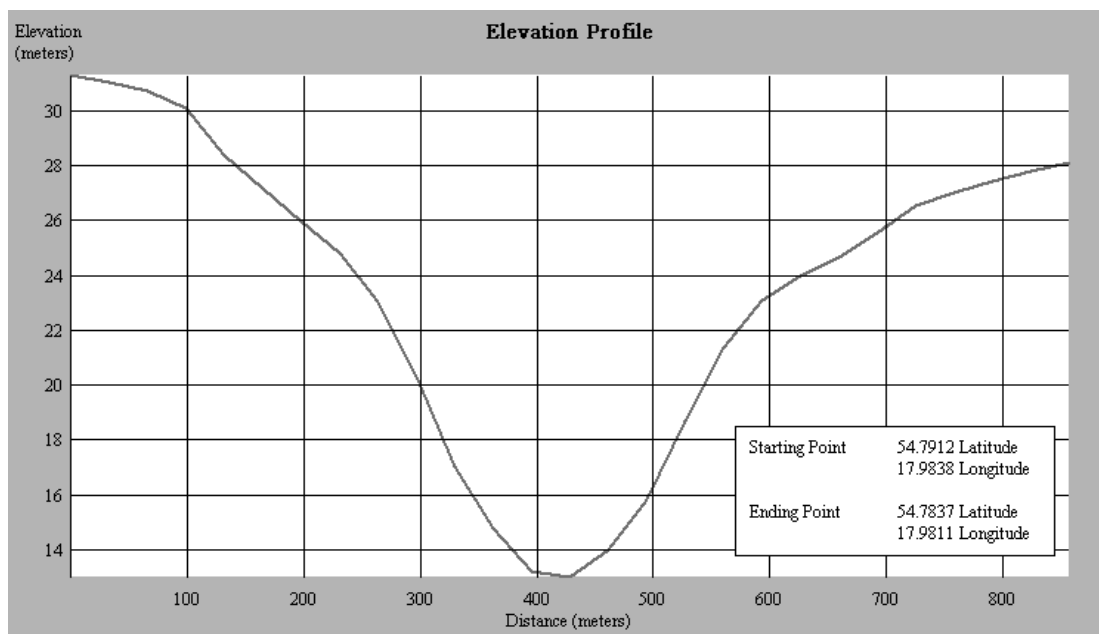
Rys. 6.2 Wizualizacja mapy DEM za pomocą palety odcieni szarości (lewa strona) i dodatkowo z wykorzystaniem cieniowania (prawa strona).



Rys. 6.3 Wizualizacja mapy DEM za pomocą palety odcieni szarości , cieniowania i perspektywy (wykonana za pomocą programu SAGA [patrz ramka 6.2]).

Kolejnym krokiem w tworzeniu realistycznego obrazu jest wykorzystanie rzutu perspektywicznego dającego obraz zbliżony do widoku z samolotu (Rysunek 6.3). Uzupełnieniem może być pokrycie tego rodzaju powierzchni odpowiednio dopasowanym

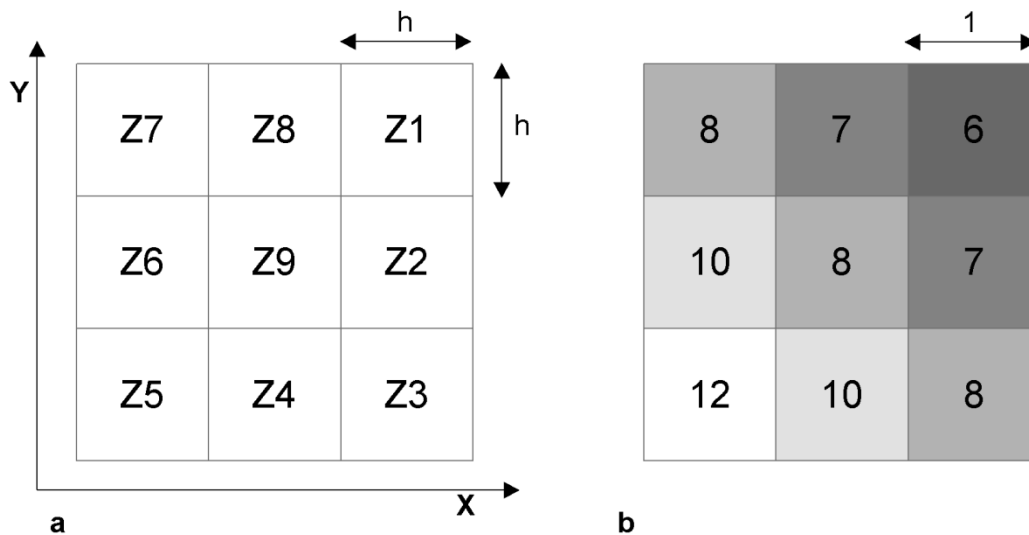
zdjęciem lotniczym lub mapą pokrycia terenu (*draping*). Możliwa jest także wizualizacja powierzchni Ziemi za pomocą tworzenie obrazów stereoskopowych z wykorzystaniem techniki anaglifowej, do oglądania tego typu obrazów niezbędne są okulary z jednym szkłem czerwonym, a drugim niebieskim. Przy analizie ukształtowania terenu często przydatne jest wykreślanie profili wysokości wzdłuż linii poprowadzonych na mapie. Daje to możliwość zarówno wstępnej analizy terenu, jak i sprawdzenie poprawności wykonania DEM (Rysunek 6.4).



Rys. 6.4 Profil terenu wykonany z mapy DEM (darmowe oprogramowanie 3DEM <http://www.visualizationsoftware.com/3dem.html>)

6.3 Podstawowe atrybuty topograficzne

Analiza terenu za pomocą ilościowych technik analitycznych opisuje ukształtowanie terenu oraz jego wpływ na zjawiska i procesy hydrologiczne, geomorfologiczne i ekologiczne. Podstawą tych technik są parametry morfometryczne obliczane bezpośrednio z mapy DEM noszące nazwę atrybutów topograficznych (*topographic attributes*). Najczęściej dzieli się je na podstawowe atrybuty topograficzne (*primary topographic attributes*) i wtórne atrybuty topograficzne (*secondary topographic attributes*). Większość podstawowych atrybutów topograficznych może być wyznaczona z lokalnych, w oknie 3 X 3 komórki, zmian wysokości z wzdłuż osi x i y . Zmiany te są określane za pomocą różniczek przybliżonych różnicami skończonymi.



Rys. 6.5 Okno 3 X 3 mapy DEM (kierunek północny jest zgodny z osią y): a – symbole użyte we wzorach poniżej (Zn opisuje wartości komórek rastrowych); b – przykładowe wartości wysokości.

Jeżeli poszczególne komórki okna rastrowej mapy DEM zostaną opisane w sposób przedstawiony na Rysunku 6.5a, to różniczki pierwszego stopnia i ich przybliżenia różnicami skończonymi Z_x i Z_y mogą być zdefiniowane jako:

$$Z_x = \frac{\partial z}{\partial x} \approx \frac{Z2 - Z6}{2h} \quad (6.1)$$

$$Z_y = \frac{\partial z}{\partial y} \approx \frac{Z8 - Z4}{2h} \quad (6.2)$$

W programie ArcGIS do ich wyznaczania używa się innej postaci algorytmu numerycznego (*average maximum technique*):

$$Z_x = \frac{\partial z}{\partial x} \approx \frac{(Z1 + 2Z2 + Z3) - (Z7 + 2Z6 + Z5)}{8h} \quad (6.3)$$

$$Z_y = \frac{\partial z}{\partial y} \approx \frac{(Z5 + 2Z4 + Z3) - (Z7 + 2Z8 + Z1)}{8h} \quad (6.4)$$

Do podstawowych atrybutów terenowych zalicza się: nachylenie (*slope*), kąt nachylenia (*aspect*) oraz krzywiznę (*curvature*), mogą być one wyznaczane w programie ArcGIS (*Spatial Analyst*).

6.3.1 Nachylenie (*slope*) określa zmianę wysokości na jednostkę długości w kierunku największego spadku. Jest ono wyznaczane z wyrażenia:

$$S = \sqrt{p} \quad (6.5)$$

gdzie:

$$p = Z_x^2 + Z_y^2$$

Nachylenie policzone dla środkowej komórki wycinka mapy wysokości przedstawionej na Rysunku 6.5b zgodnie z powyższymi wzorami wyniesie:

$$Z_x = \frac{7 - 10}{2} = -1.5$$

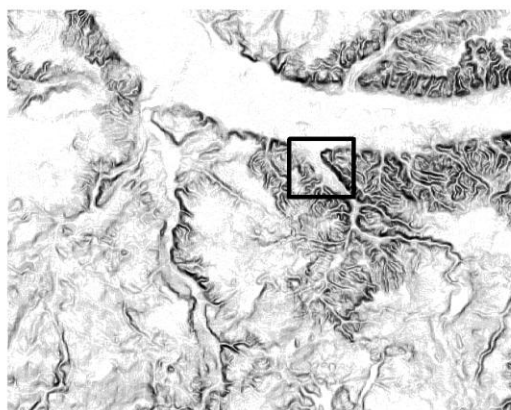
$$Z_y = \frac{7 - 10}{2} = -1.5$$

$$p = \sqrt{(-1.5)^2 + (-1.5)^2} = 4.5$$

$$S = \sqrt{4.5} = 2.1232$$

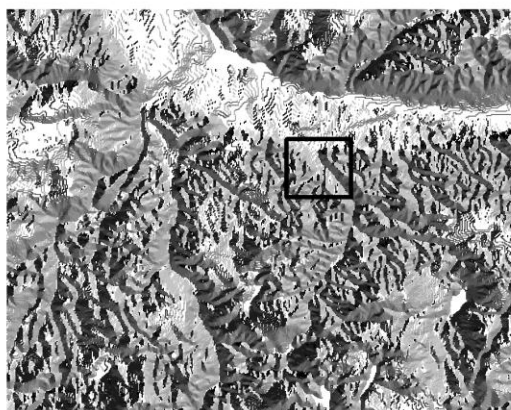
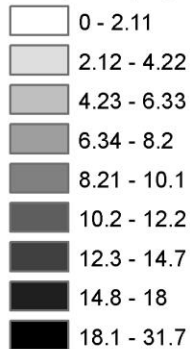
Nachylenie może być wyrażone w procentach jako $100 S$ czyli w powyższym przykładzie wyniesie 212%. Należy zwrócić uwagę na to, że wartość 100% odpowiada kątowi nachylenia 45° . Drugim sposobem wyrażania nachylenia jest kąt, który może być obliczony w stopniach z następującego wyrażenia (wartość 57.29578 służy do zamiany radianów na stopnie):

$$S_{\text{stopnie}} = \arctan(\sqrt{p}) * 57.29578 = \arctan(\sqrt{4.5}) * 57.29578 = 64.74 \quad (6.6)$$



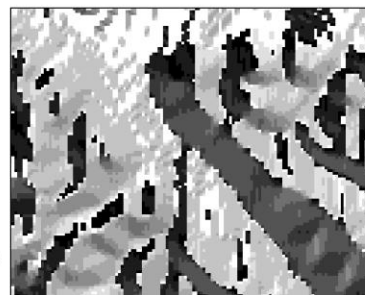
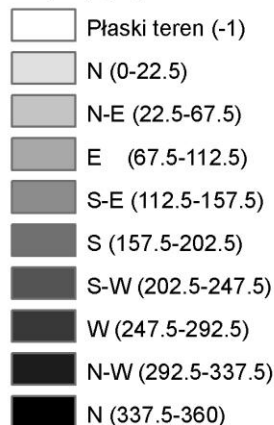
a

Nachylenie (stopnie)



b

Ekspozycja (kierunek nachylenia)



Rys. 6.6 Mapa nachylenia (a) i ekspozycji (b).

Mapa nachylenia wyrażona w stopniach została przedstawiona na Rysunku 6.6a.

6.3.2 Kierunek nachylenia lub ekspozycja (*aspect*)

Aspect określa kierunek nachylenia stoku i jest zdefiniowany przez jego azymut, czyli kąt mierzony zgodnie ze wskazówkami zegara między kierunkiem północnym a kierunkiem maksymalnego nachylenia. Kąt ten, w stopniach, może być obliczony z wyrażenia:

$$\Psi = 180 - \arctan\left(\frac{Z_y}{Z_x}\right) * 57.29578 + 90 \frac{Z_x}{|Z_x|} \quad (6.7)$$

Kierunek nachylenia obliczony z tego wyrażenia dla środkowej komórki wycinka mapy DEM przedstawionej na Rysunku 6.5b przyjmie wartość,

$$\Psi = 180 - \arctan\left(\frac{-1.5}{-1.5}\right) * 57.29578 + 90 \frac{-1.5}{|-1.5|} = 45$$

Wartość kierunków nachylenia dla płaskich obszarów może być traktowana jako nieokreślona. Mapa kierunku nachylenia przedstawiona na Rysunku 6.6b pokazuje, że obszarom o nachyleniu poniżej jednego stopnia przypisana została wartość -1 wyznaczająca obszary płaskiego terenu. Tworzenie map kierunku nachylenia ma istotne znaczenie zarówno w modelowaniu hydrologicznym (określa on kierunek spływu wody po terenie), jak i ekologicznym, ze względu na to, że od ekspozycji stoku zależy ilość docierającego promieniowania słonecznego.

6.3.3 Krzywizna (*curvature*)

Curvature opisuje kształt stoku. Atrybuty opisujące krzywiznę opierają się na różniczkach drugiego stopnia, czyli zmianie w przestrzeni wartości różniczek pierwszego stopnia wykorzystywanych do określenia nachylenia i kierunku nachylenia. Różniczki drugiego stopnia i ich analogi różnicowe są zdefiniowane jako:

$$Z_{xx} = \frac{\partial^2 z}{\partial x^2} \approx \frac{Z2 - 2Z9 + Z6}{h^2} \quad (6.8)$$

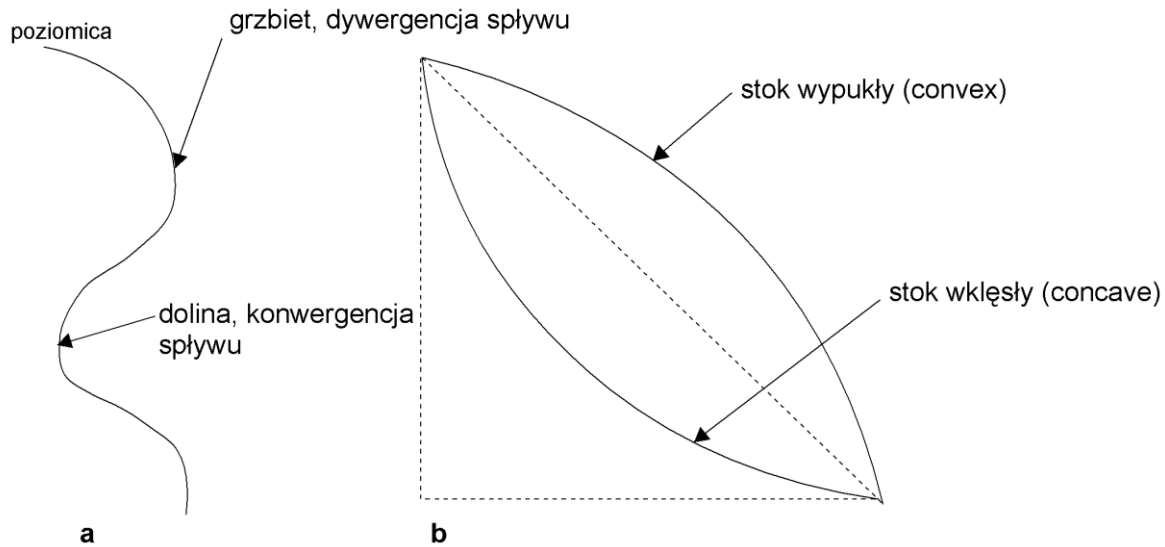
$$Z_{yy} = \frac{\partial^2 z}{\partial y^2} \approx \frac{Z8 - 2Z9 + Z4}{h^2} \quad (6.9)$$

$$Z_{xy} = \frac{\partial^2 z}{\partial x \partial y} \approx \frac{-Z7 + Z1 + Z5 - Z3}{4h^2} \quad (6.10)$$

Dwoma najczęściej używanymi miarami opisującymi krzywiznę są krzywizna planarna i wertykalna. Krzywizna planarna (*plan* lub *contour curvature*) opisuje krzywiznę poziomą na poziomej powierzchni, czyli zmianę kierunku nachylenia stoku wzdłuż poziomicy. Wyznacza się ją z wyrażenia :

$$K_c = -\frac{Z_{xx}Z_y^2 + 2Z_{xy}Z_xZ_y + Z_{yy}Z_x^2}{p^{3/2}} \quad (6.11)$$

Tak zdefiniowana krzywizna jest topograficzną miarą skłonności płynącej wody do skupiania się (konwergencji) i rozptywu (dywergencji).



Rys. 6.7 Krzywizna poziomic (a) określa położenie grzbietów i dywergencji spływu oraz dolin i konwergencji spływu. Krzywizna profilu (b) określa kształt stoku (wypukły lub wklęsły).

Znak minus został wprowadzony w celu zapewnienia, zgodnie z najczęściej stosowaną zasadą, wartości dodatnich dla grzbietów i ujemnych dla dolin. Krzywizna planarna, choć może właściwszą byłaby nazwa krzywizna poziomic, jest wykorzystywana przy klasyfikacji form terenowych (grzbiety, doliny, stoki). Krzywizna wertykalna (*profile curvature*), opisuje zmianę nachylenia wzdłuż linii spływu, czyli krzywiznę profilu powstałego przez przecięcie powierzchni topograficznej powierzchnią pionową. Opisuje ona zmiany gradientu potencjału, czyli ma istotne znaczenie przy określaniu zmian prędkości i procesów akumulacyjnych. Wyznacza się ją z wyrażenia (Willson i Gallant, 2000):

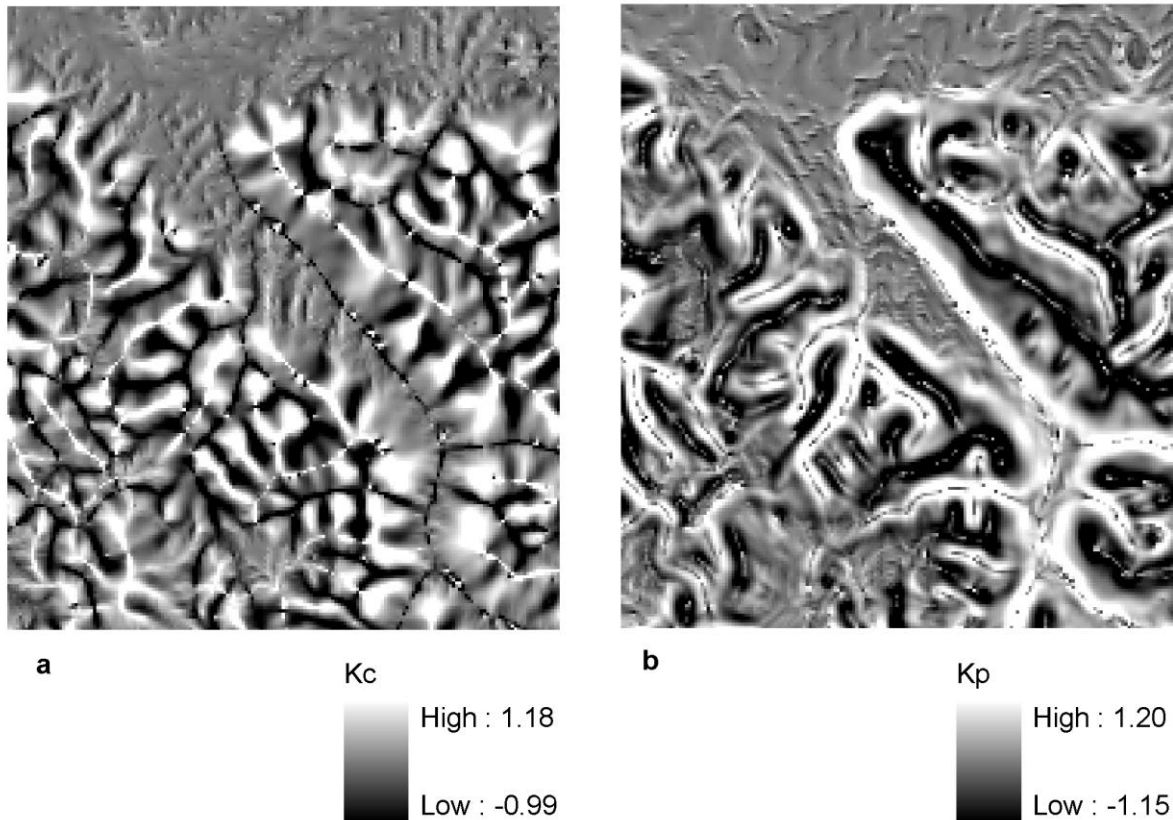
$$K_p = -\frac{Z_{xx}Z_{xx} + 2Z_{xy}Z_xZ_y + Z_{yy}Z_{yy}^2}{pq^{3/2}} \quad (6.12)$$

gdzie,

$$q = p+1$$

Krzywizna profilu określa kształt stoku (Rysunek 6.7b). Przyjmuje ona wartości dodatnie dla stoków wklęsłych i ujemne dla wypukłych. Na Rysunku 6.8 przedstawiono mapy krzywizny planarnej (poziomic) i wertykalnej (profilu). Na mapie krzywizny planarnej (Rys.6.8a) uwidocznione są doliny (wartości ujemne) skupiające spływ wody i grzbiety (wartości dodatnie),

natomiast na mapie krzywizny wertykalnej (Rys. 6.8b) uwidoczniiony jest kształt stoków: wklęsły (wartości dodatnie) i wypukły (wartości ujemne).



Rys. 6.8 Mapy krzywizny planarnej (a) i wertykalnej (b).

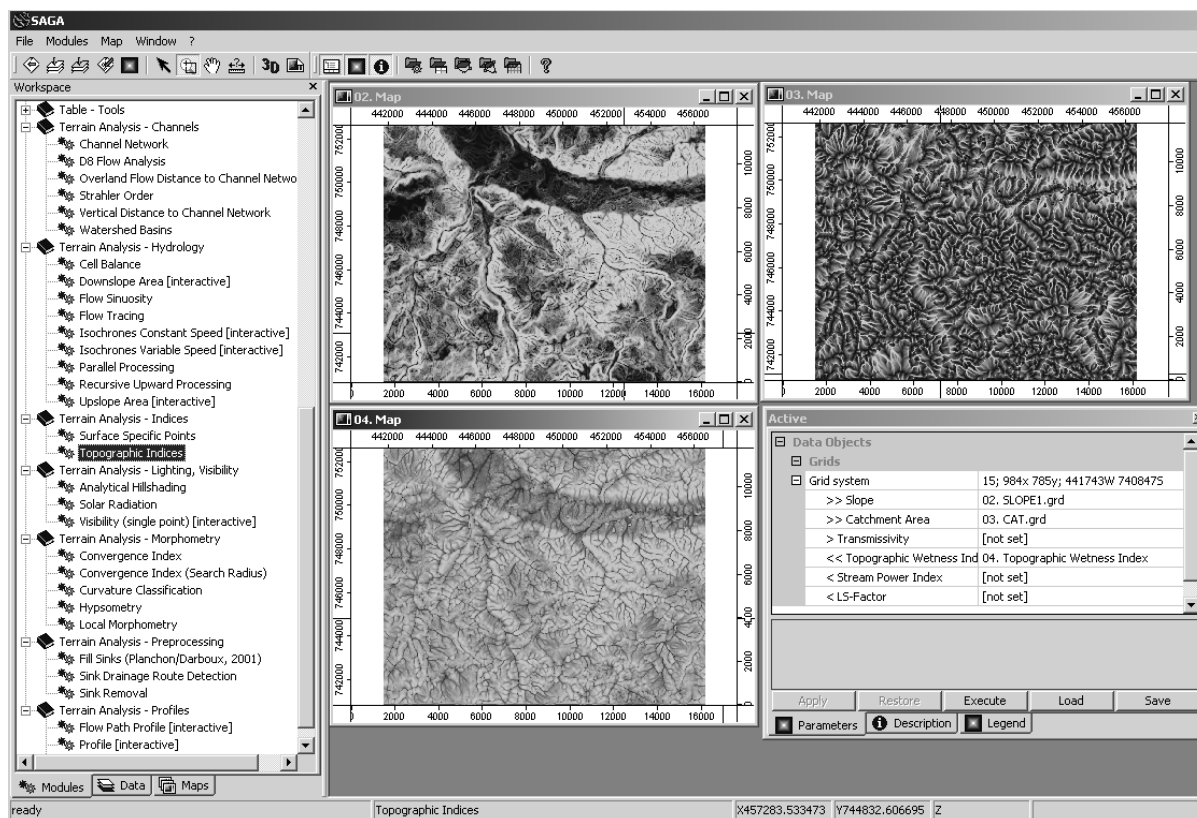
Używa się także miary zwanej całkowitą krzywizną. Opisuje ona zakrzywienie płaszczyzny topograficznej, a nie linii (poziomica, profil) będącej rezultatem przecięcia płaszczyzn topograficznej z poziomą lub pionową. Może ona przyjmować wartości ujemne lub dodatnie. Wartości bliskie zero oznaczają miejsca płaskie lub miejsca, gdzie wypukłość w jednym kierunku jest bilansowana przez wklęsłość w drugim (forma siodła). Krzywiznę całkowitą wyznacza się za pomocą wyrażenia:

$$K = Z_{xx}^2 + 2Z_{xy}^2 + Z_{yy}^2 \quad (6.13)$$

Ramka 6.2
Program SAGA

<http://www.saga-gis.uni-goettingen.de/html/index.php>
(11.2006)

Program SAGA – *System for Automated Geoscientific Analyses* jest darmowym hybrydowym systemem GIS stworzonym na Uniwersytecie w Getyndze, przeznaczonym głównie dla naukowców zajmujących się analizą terenu i modelowaniem hydrologicznym. Oprócz typowego interfejsu graficznego (Rysunek 6.9) program zawiera szereg modułów obejmujących między innymi implementacje szeregu metod analitycznych, które pojawiły się w ostatnich latach w literaturze naukowej.



Rys. 6.9 Graficzny interfejs programu naukowego SAGA

Poniżej przedstawiono wybrane moduły, za pomocą których można między innymi wykonać mapy podstawowych i wtórnych atrybutów topograficznych.

Moduł	Opis działania
Parallel Processing	Z mapy DEM oblicza lokalną powierzchnię zlewni [patrz podroz. 6.4.2] (Catchment Area) stosując szereg metod.
Local Morphometry	Z mapy DEM oblicza nachylenie (Slope), kierunek nachylenia (Aspect), krzywiznę planarną (Plan curvature) i krzywiznę wertykalną (Profile curvature).
Topographic Indices (Indeksy topograficzne)	Na podstawie warstw nachylenia (Slope) i lokalnej powierzchni zlewni (Catchment Area) zostają obliczone warstwy indeksów TWI (Topographic Wetness Index), SPI (Stream Power Index) i LS (LS-Factor).
Analytical Hillshading (Analityczne cieniowania)	Na podstawie mapy DEM tworzona jest mapa cieniowania (Rys. 6.2 i 6.3). Istnieje możliwość wykorzystywania trzech różnych metod cieniowania.
Solar Radiation (Dochodzące promieniowanie słoneczne)	Tworzy mapę sumarycznego dopływu promieniowania słonecznego (kWh/m ² lub kJ/m ²) oraz liczbę godzin nasłonecznienia dla każdej komórki mapy DEM w dowolnym okresie czasu. Metoda uwzględnia nachylenie stoku, ekspozycję, zacienienie topograficzne, lokalizację

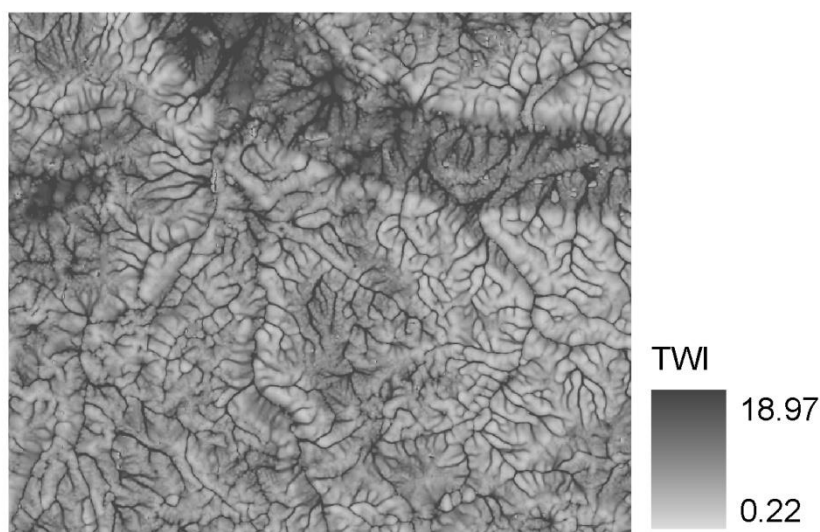
	na powierzchni Ziemi. Stan atmosfery jest określany za pomocą szeregu parametrów (transmisji, która umożliwia uwzględnienie zachmurzenia albo zawartości wody i cząsteczek zawieszonych w powietrzu).
Hypsometry (Krzywa hipsometryczna)	Tworzy krzywą hipsometryczną dla danego DEM w formie tablicy (wykresu).
Surface specific points	Klasyfikuje formy terenowe z mapy DEM na poziomie poszczególnych komórek, (szczyty, depresje, przełęcze, załamania wklęsłości, załamania wypukłości, grzbiety, kanały)

6.4 Wtórne atrybuty topograficzne

Ten rodzaj parametrów, bazując na podstawach fizycznych lub empirycznych, tworzy mapy indeksów lub wielkości charakteryzujących przestrzenną zmienność poszczególnych procesów pozostających w ścisłej zależności od ukształtowania powierzchni Ziemi, modelowanej za pomocą DEM. Najczęściej używanymi są indeksy TWI (*Topographic Wetness Index*), SPI (*Stream Power Index*), współczynnik LS (*LS-Factor*) oraz przestrzenny rozkład promieniowania słonecznego dochodzącego do powierzchni Ziemi.

6.4.1 TWI - Topograficzny indeks wilgotności (*Topographic Wetness Index*)

TWI jest jedną z miar ilościowych opisującą wpływ topografii na procesy hydrologiczne. TWI został wprowadzony wraz z modelem hydrologicznym spływu wody po terenie (TOPMODEL) na początku lat 80tych.



Rys. 6.10 Mapa topograficznego indeksu wilgotności TWI

Wielkość indeksu jest funkcją nachylenia stoku i powierzchni obszaru zasilającego daną komórkę. Oblicza się go za pomocą wyrażenia:

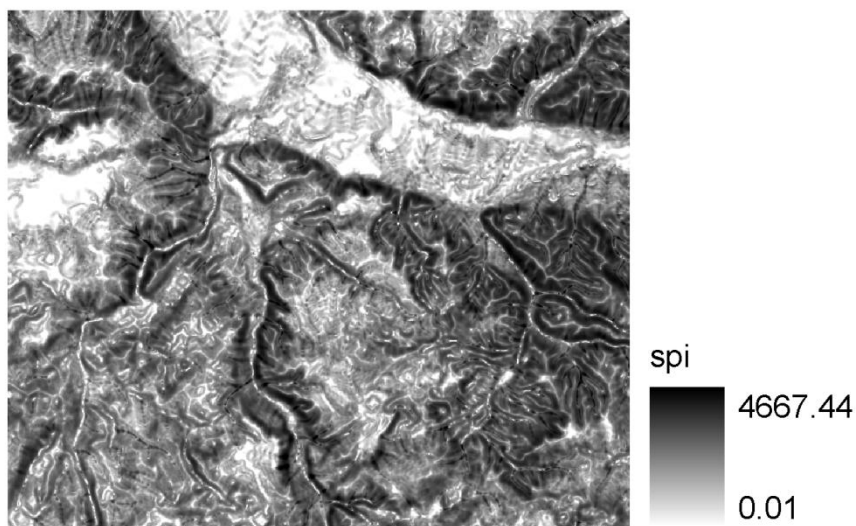
$$TWI = \ln\left(\frac{A_s}{\tan \beta}\right) \quad (6.14)$$

gdzie: A_s – właściwa lokalna powierzchnia zlewni, czyli powierzchnia obszaru zasilającego daną komórkę podzielona przez bok komórki,
 β – kąt nachylenia stoku.

Największe wartości indeks osiąga przy dużym obszarze zasilania i małym kącie nachylenia. Ze względów topograficznych, takie miejsca powinny odznaczać się znaczną wilgotnością powierzchni. Indeks ten był wykorzystywany w pracach analizujących rolę skali w procesach hydrologicznych, do identyfikacji dróg spływu w modelowaniu geochemicznym oraz do charakteryzowania procesów biologicznych, np. rocznej produkcji pierwotnej. Opisuje on wpływ topografii na wilgotność gleby, a także jej pH. Te dwie zmienne często określają rozmieszczenie i różnorodność roślin naczyniowych. Ze względu na to, indeks TWI jest wykorzystywany do modelowania rozmieszczenia roślinności (Sørensen i inni 2006). Na Rysunku 6.10 przedstawiono mapę indeksu dla rejonu obejmującego pradolinę rzeki Redy, umiejscowienie której wyraźnie pokazują większe wartości indeksu.

6.4.2 SPI – Indeks siły spływu (Stream Power Index)

SPI jest miarą potencjalnej siły erozyjnej spływającej po powierzchni terenu wody. Oparty jest na założeniu, że ilość spływającej wody jest proporcjonalna do powierzchni obszaru zasilającego, czyli obszaru z którego woda spływa do danej komórki (lokalna powierzchnia zlewni). Następstwem zwiększania się objętości spływającej wody i nachylenia stoku jest zwiększanie ryzyka erozji.



Rys. 6.11 Mapa indeksu SPI.

Indeks ten jest wyznaczany z identycznych zmiennych jak TWI ale wykorzystując ich iloczyn, albo logarytm naturalny iloczynu:

$$SPI = A_s * \tan \beta \quad (6.15)$$

gdzie: A_s – właściwa lokalna powierzchnia zlewni, czyli powierzchnia obszaru zasilającego daną komórkę podzielona przez bok komórki,
 β – kąt nachylenia stoku.

SPI jest wykorzystywany do przewidywania erozji na obszarach o stokach wypukłych i akumulacji na stokach wklęsłych w rejonach, gdzie następuje zmniejszenie prędkości spływającej wody. Indeks ten wykazuje znaczące skorelowanie ze strukturą gleby, ilością substancji organicznej, pH oraz pokryciem roślinnością. Istnieje także inna wersja tego indeksu, w której $\tan \beta$ jest podniesiony do kwadratu. Jest on wykorzystywany do wyznaczania górnych odcinków biegów rzek .

6.4.3 LS – współczynnik zdolności transportowania osadu (*sediment transport capacity index*)

LS jest odpowiednikiem iloczynu topograficznych czynników L i S ($L*S$) w empirycznym modelu erozji gleb USLE (*Universal Soil Loss Equation*) i jego późniejszej modyfikacji RUSLE. W modelu tym ubytek gleby w rezultacie erozji szacuje się za pomocą wyrażenia:

$$A = R * K * L * S * C * P \quad (6.16)$$

gdzie:

A – masa gleby erodowanej z jednostki powierzchni w określonym czasie;

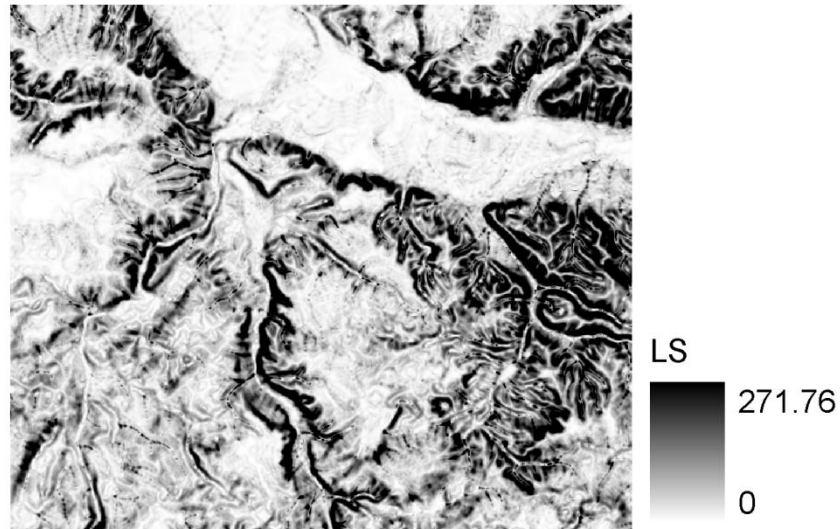
R – współczynnik erozji powodowanej przez deszcz;

K – współczynnik podatności gleby na erozję wodną;

L – współczynnik długości stoku;

S – współczynnik nachylenia stoku;

C, P – współczynniki pokrycia i zarządzania gruntami.



Rys. 6.12 Mapa indeksu LS

Indeks ten oblicza się z wyrażenia:

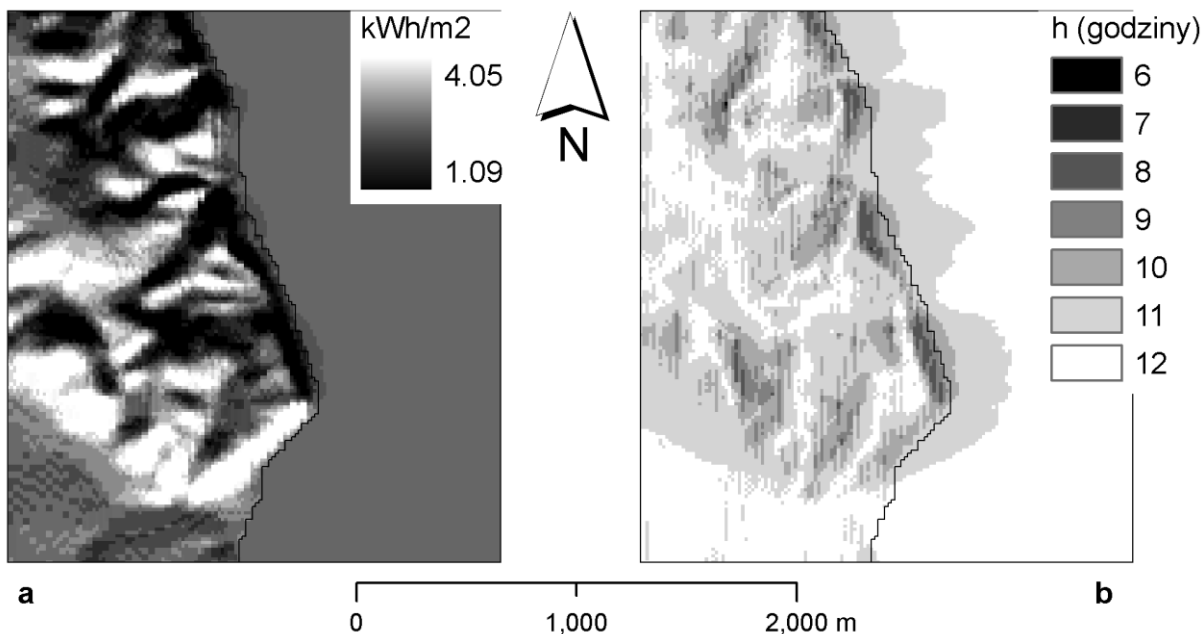
$$LS = \left(\frac{A_S}{22.13} \right)^{0.4} \times \left(\frac{\sin \beta}{0.0896} \right)^{1.5} \quad (6.17)$$

gdzie: A_S – właściwa lokalna powierzchnia zlewni, czyli powierzchnia obszaru zasilającego daną komórkę podzielona przez bok komórki,

β – kąt nachylenia stoku.

6.4.4 Promieniowanie słoneczne dochodzące do powierzchni Ziemi (*Solar Radiation*)

Solar Radiation jest istotnym elementem wielu procesów zarówno fizycznych, jak i biologicznych. Jego ilość docierająca do jednostkowej powierzchni jest silnie zdeterminowana topografią terenu. Nachylenie terenu i jego ekspozycja są czynnikami lokalnymi, na poziomie pojedynczej komórki rastra, natomiast zacienienie topograficzne ma charakter funkcji globalnej. Wynika ono z możliwości zacienienia danego miejsca w określonym czasie, przez bliższe lub bardziej odległe formy terenu.



Rys. 6.13 Mapy promieniowania słonecznego dochodzącego do powierzchni Ziemi - Redłowo (SAGA): a – suma dobowego promieniowania (21 marzec) dla bezchmurnego nieba; b – nasłonecznienie (liczba godzin ze słońcem) dla tego samego dnia. Ciąga linia oznacza brzeg morza.

Na Rysunku 6.13 przedstawiono strumień promieniowania powierzchniowego docierającego do rejonu Klifu Redłowskiego w bezchmurny dzień 21 marca (Rysunek 6.13a), obliczony za pomocą programu SAGA. Czarną linią oznaczono brzeg morza. Ilość promieniowania jest silnie uzależniona od nachylenia i ekspozycji stoków, natomiast na powierzchni morza, z wyjątkiem zacienionej przez wysoki brzeg strefy przy samym brzegu, jest stała. Ekspozycja klifu w bardzo istotny sposób wpływa na ilość docierającego promieniowania. Na Rysunku 6.13b przedstawiono przestrzenny rozkład czasu nasłonecznienia tego dnia, zaokrąglony do pełnych godzin. Wyraźnie zaznacza się cień rzucany na powierzchnię morza przez dochodzący do 60 metrów wysokości klif. Ograniczenie czasu nasłonecznienia sięga do 500 m od brzegu. Funkcja *Solar Radiation* w programie SAGA i funkcja SRAD w ArcGIS 9.2 wykorzystują metody obliczeniowe pierwszego programu SRAD opracowanego w latach 90tych przez Moora i rozwijanego następnie przez szereg innych osób .

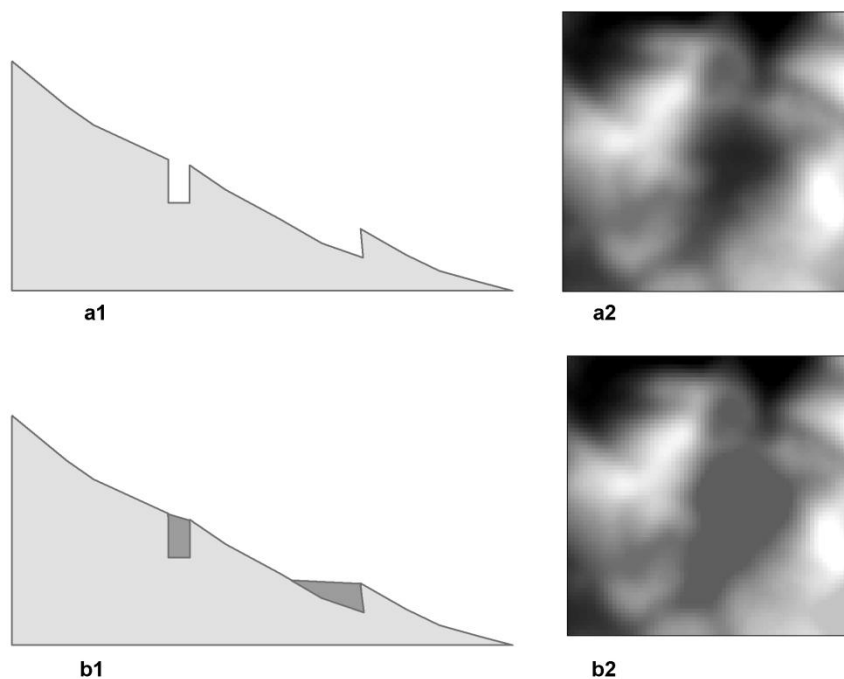
6.5 Modelowanie hydrologiczne

DEM odgrywa istotną rolę w modelowaniu szeregu procesów hydrologicznych ze względu na wzajemne związki płynącej wody i ukształtowania terenu. W wielu badaniach przyrodniczych zlewnia rozumiana jest jako całościowy system, w ramach którego badane są fizyczne lub biologiczne procesy. Definiuje się ją zwykle jako obszar, z którego woda spływa do jednego „odbiornika”, którym może być dowolny punkt, odcinek rzeki, jezioro lub bagno. Jeszcze do niedawna granice zlewni były wyznaczane ręcznie przy pomocy poziomic, na podstawie których

szacowano kierunki spływu. Metoda ta odznaczała się znacznym stopniem subiektywizmu i nie spełniała warunku powtarzalności. Zlewnie wyznaczone przez dwie różne osoby różniły się kształtem i obszarem. Wykorzystanie DEM umożliwia automatyczne i obiektywne wydzielenie zlewni.

Istotnym zagadnieniem w modelowaniu hydrologicznym jest analiza nie-punktowych źródeł zanieczyszczeń, które okazują się często odpowiedzialne za utrzymujący się dopływ substancji biogenicznych, bakterii i zanieczyszczeń różnego rodzaju do śródlądowych zbiorników wodnych, a także strefy brzegowej morza. Zanieczyszczenia te, zwane również obszarowymi lub rozproszonymi, są spłukiwane z powierzchni terenu przez wody opadowe i odprowadzane siecią rzeczną do jezior lub morza. Analiza i modelowanie tego zjawiska wymaga wyznaczenia ilości wody spływającej w danym miejscu terenu (*flow accumulation*), która zależy między innymi od wielkości obszaru zasilającego spływem powierzchniowym dane miejsce. Umożliwia to także wyznaczenie sieci rzecznej z modelu DEM. Kolejnym rodzajem zagadnień jest modelowanie procesu zalewania terenu w wyniku podnoszenia się poziomu wody w rzece lub morzu. Zagadnienie to zyskało ostatnio szczególnie duże zainteresowanie, w związku z zagrożeniem strefy brzegowej przez podnoszenie się poziomu morza w rezultacie globalnego ocieplenia. Ze względu na probabilistyczny charakter prognoz podnoszenia się poziomu morza i błędy (niepewność) modelu DEM, stosuje się metody pozwalające na określenie prawdopodobieństwa zalania danego miejsca.

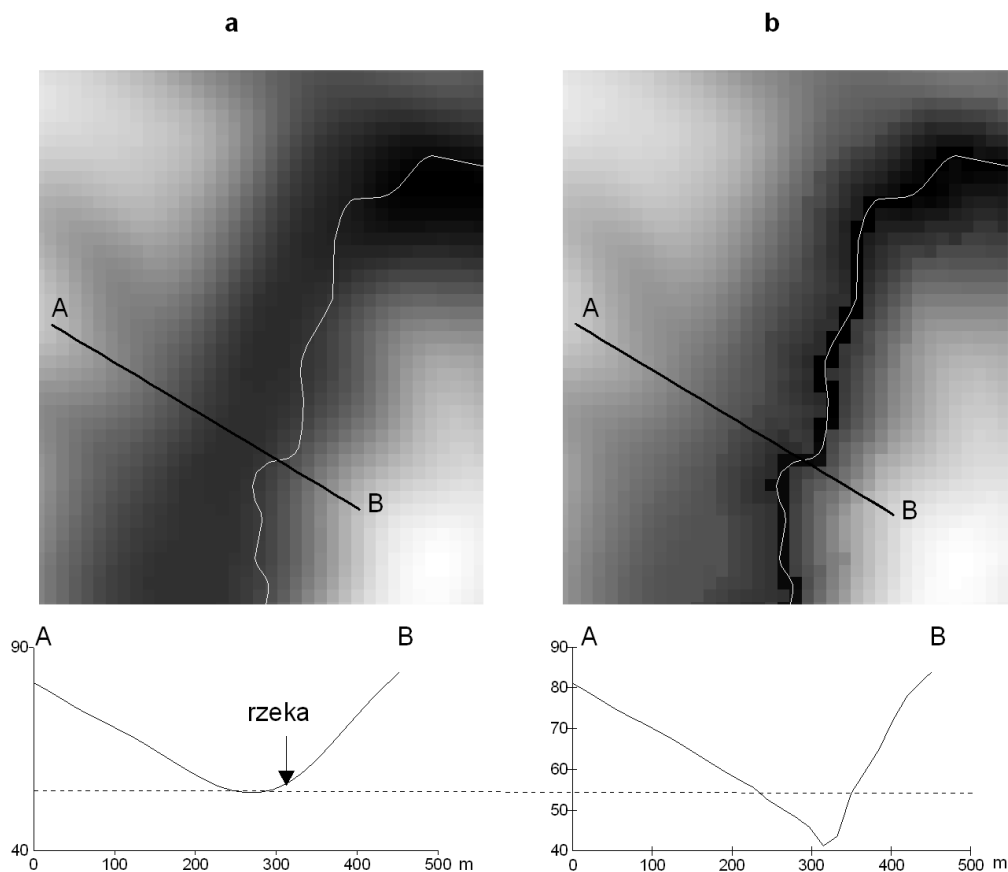
Istotą modelowania spływu wody w rastrowym modelu DEM jest założenie, że przemieszcza się ona w dół stoku, czyli z komórek leżących wyżej do znajdujących się niżej. Aby dany model DEM mógł być wykorzystywany do tego celu, należy najpierw usunąć z niego wszelkie nieprawdziwe wgłębienia (*pits*) na powierzchni terenu, które powstają zarówno w procesie interpolacji, jak i podczas tworzenia DEM z danych radarowych lub lidarowych. Zagadnienie to zostało przedstawione na Rysunku 6.14.



Rys. 6.14 Usuwanie nieprawdziwych wgłębień (*pits*) z mapy DEM: a1 – profil przez nieskorygowaną mapę DEM z widocznymi wgłębieniami blokującymi spływ wody po terenie; a2 – w centrum DEM widoczny obszar bezodpływowy zidentyfikowany jako sztuczny; b1 – wypełnienie wgłębień metodą „pit filling”; b2 – mapa DEM z obszarem skorygowanym w centrum.

Wgłębienia stanowią zbiory jednej lub wielu komórek, które ze wszystkich stron są otoczone przez komórki o większych wartościach wysokości. Na Rysunku 6.14 przedstawiono je na profilu (a1) oraz w centrum mapy (a2). Wgłębienia te tworzą albo obszary bezodpływowe (*sinks*) — i wtedy powinny zostać pozostawione na mapie, albo stanowią „błędy” mapy i powinny zostać usunięte. Istnieją dwie podstawowe metody ich wypełniania. Pierwsza (*pit filling*) polega na zwiększaniu wysokości komórek DEM we wgłębieniach, aż do ich usunięcia (Rysunek 6.14b1), a druga (*carving*) na obniżaniu całej powierzchni, aż do zaniknięcia wgłębień. Ostatnio opracowano metodę stosującą jedno z obu rozwiązań w zależności od sytuacji, tak aby oryginalna powierzchnia uległa jak najmniejszym zmianom. Na Rysunku 6.14b2 pokazano rezultat wypełnienia wgłębienia na mapie DEM. W procesie wypełniania wgłębień istnieje możliwość zadeklarowania pewnych obszarów jako bezodpływowych i wtedy są one pozostawiane bez zmian. Jeżeli dla danego obszaru istnieje wektorowa warstwa rzek, to pojawia się problem jej zgodności z modelem DEM. Dla zespolenia tych dwóch zbiorów danych stosuje się metodę „wypalania” rzek (*burning in / fencing*). Polega ona na modyfikacji mapy DEM tak, aby dna dolin, najniżej leżące komórki, pokrywały się z przebiegiem rzeki. Proces wypalania pokazany został na Rysunku 6.15. Na oryginalnej mapie DEM (Rys. 6.15a) dno doliny nie jest zgodne z przebiegiem rzeki pokazanej jasną linią (patrz profil). Skorygowana mapa (Rys. 6.15b) ma zmienione wartości na obszarze bufora otaczającego linię tak, aby kształt

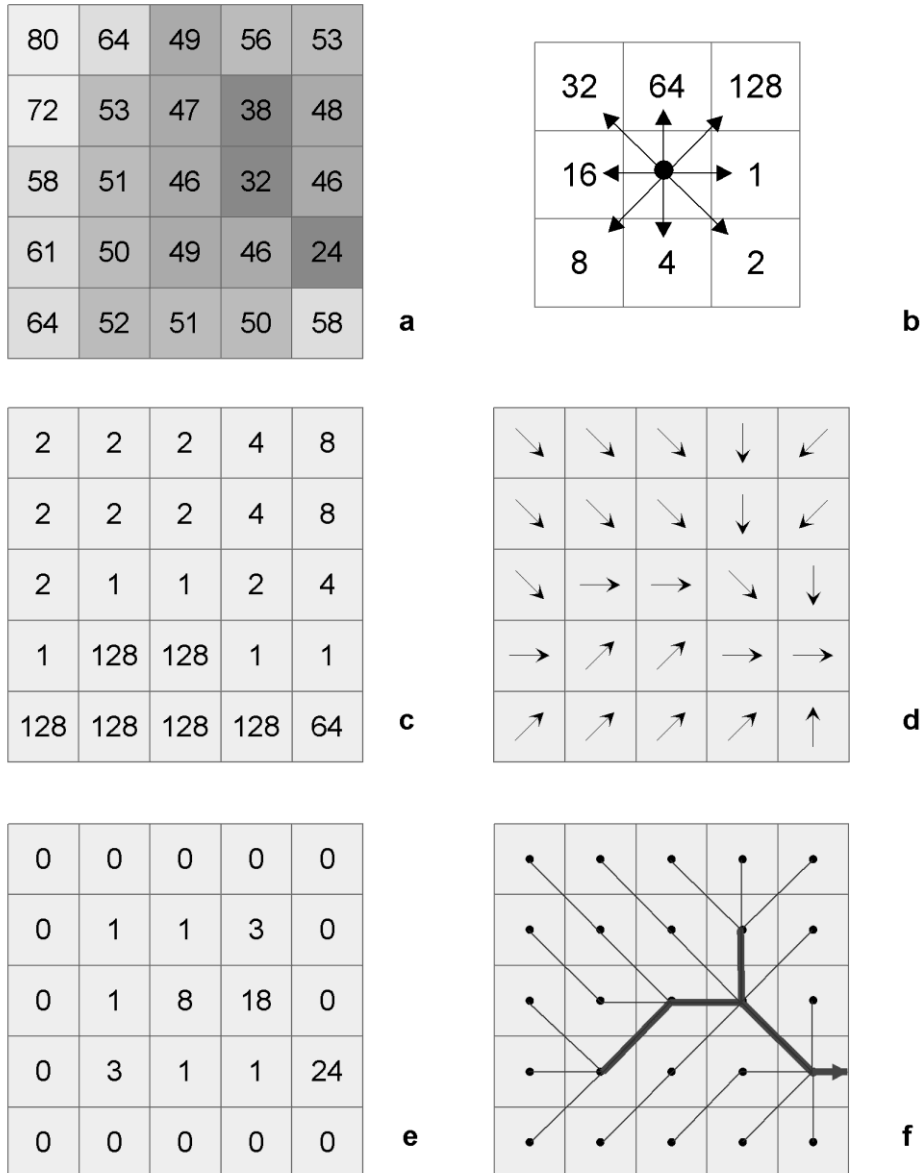
doliny dostosować do przebiegu rzeki. Dzięki temu modelowanie hydrologiczne prowadzone na DEM będzie się odnosiło do danego modelu wektorowej sieci rzecznej.



Rys. 6.15 „Wypalanie” rzek na mapie DEM: a – mapa DEM z nałożoną wektorową rzeką, przebieg rzeki nie jest zgodny z przebiegiem dna doliny (profil); b – proces „wypalania” modyfikuje otoczenie rzeki na DEM, tak aby płynęła ona dnem doliny.

Usunięcie wgłębień i ewentualne „wypalanie” rzek jest wstępnym warunkiem wykorzystania DEM do modelowania spływu wody po terenie, przy czym jeżeli wykonano „wypalanie” rzek, usuwanie wgłębień powinno zostać wykonane jako drugie, aby zapewnić spływ wody wzdłuż linii rzek.

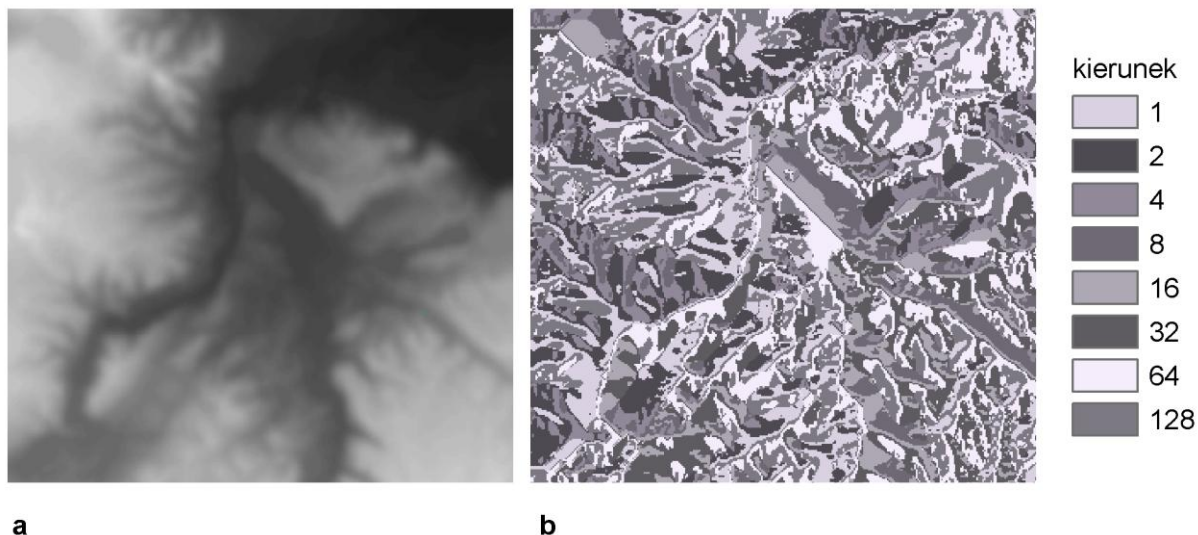
Podstawową mapą w modelowaniu hydrologicznym przy pomocy DEM jest mapa kierunku spływu. Wykonuje się ją za pomocą przypisywania komórkom mapy rastrowej identyfikatora odpowiadającego kierunkowi spływu, który jest określany na podstawie wysokości komórek sąsiednich. Podstawową zasadą jest spływ wody do komórki lub komórek leżących niżej. Istnieje szereg metod określania kierunku spływu.



Rys. 6.16 Podstawowe etapy modelowania spływu wody za pomocą DEM: a – mapa DEM; b – kodowanie kierunku spływu metodą D8; c – mapa kierunku spływu (kodowana wg. metody D8 (rys. b)); d – kierunek spływu na mapie (c); e – mapa akumulacji spływu; f – linie spływu i sieć rzeczna utworzona z mapy (e).

Najprostszym i najczęściej stosowanym sposobem (także w ArcGIS) jest metoda D8 pojedynczego kierunku spływu (*single flow direction*) opracowana w latach 80tych. Pozwala ona na spływ wody z komórki rastrowej tylko do jednej z sąsiednich komórek. Popularna konwencja zapisu została przedstawiona na Rysunku 6.16b. Zgodnie z tą konwencją mapa spływu po powierzchni terenu przedstawionej na mapie DEM (Rysunek 6.16a) będzie miała postać taką, jak na Rysunku 6.16c. Kierunek spływu dla poszczególnych komórek został przedstawiony na Rysunku 6.16d. Ze względu na to, że spływ może się akumulować (do jednej komórki woda spływa z wielu ale odpływ jest tylko do jednej), metoda ta nadaje się do spływów konwergentnych (w dolinach), ale nie dywergentnych (na grzbietach). Ze względu na dobre

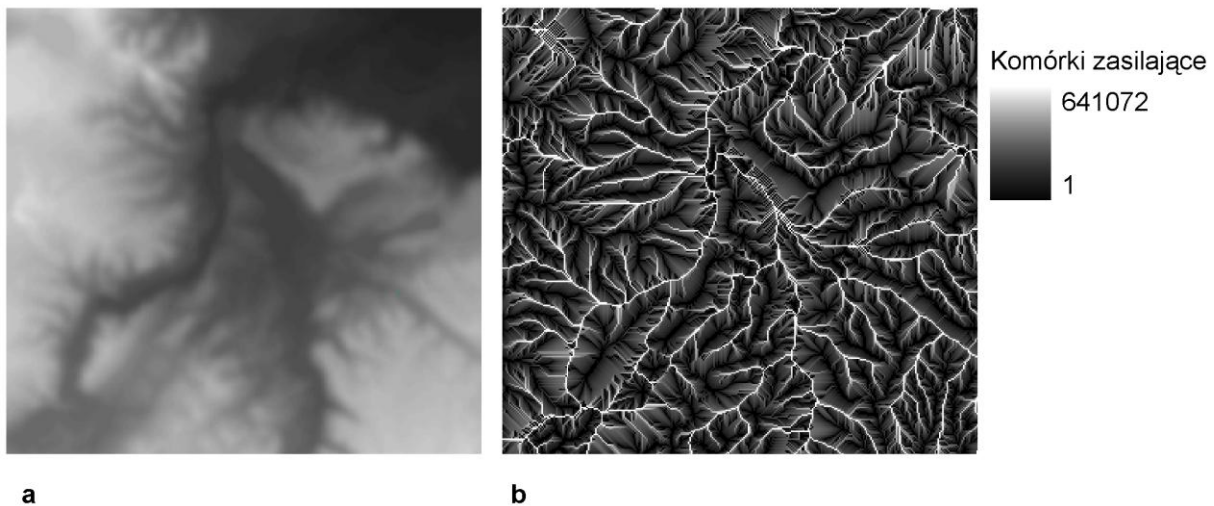
modelowanie spływów konwergentnych metoda ta jest stosowana do wydzielenia zlewni. Na Rysunku 6.17 przedstawiono wycinek mapy DEM i wykonaną dla niej metodą D8 mapę spływu.



Rys. 6.17 Wycinek mapy DEM (a) i wykonana dla niej metodą D8 mapa spływu (b).

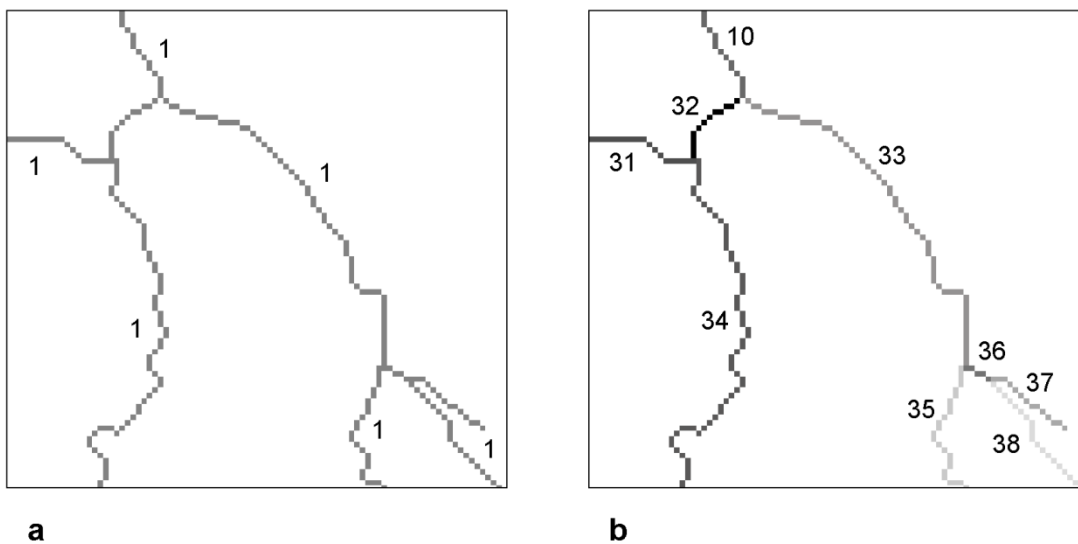
Jedną z wad tej metody jest tendencja do tworzenia długich równoległych linii spływu. Tej wady nie ma metoda Rho8 (*random eight-node*), która wprowadza czynnik losowy do wyznaczania odległości pomiędzy środkami sąsiednich komórek. Zamiast odległości pomiędzy środkami komórek, równej 1 albo $\sqrt{2}$, przyjmuje się wartość $2 - r$, gdzie r jest liczbą losową o rozkładzie prostokątnym i zakresie 0-1. Metoda ta nadal odprowadza wodę do pojedynczej komórki. Dywergencję spływu można modelować stosując metody spływu wielokierunkowego (*multiple flow direction*) FD8 i Frho8. Są one modyfikacją powyżej przedstawionych metod i za pomocą przydzielanych poszczególnym komórkom wag, zależnych od ich usytuowania na stoku powodują rozptył wody do kilku komórek (metoda ta jest jedną z opcjonalnych metod programu SAGA).

Mapa kierunku spływu umożliwia określenie, jak woda spływa po terenie. Woda przepływając z komórki do komórki tworzy linie spływu zobrazowane na Rysunku 6.16f. Każda kolejna komórka na ścieżce spływu akumuluje wodę z komórek leżących na ścieżce wyżej. Mapa, na której każdej komórce przypisana jest liczba komórek, z jakich spływa do niej woda (komórek zasilających), nosi nazwę mapy akumulacji spływu (*flow accumulation*) (Rysunek 6.16e). Na Rysunku 6.18 przedstawiono wycinek mapy DEM i wykonaną na jej podstawie mapę akumulacji spływu.



Rys. 6.18 Wycinek mapy DEM (a) i wykonana dla niej mapa akumulacji spływu (b).

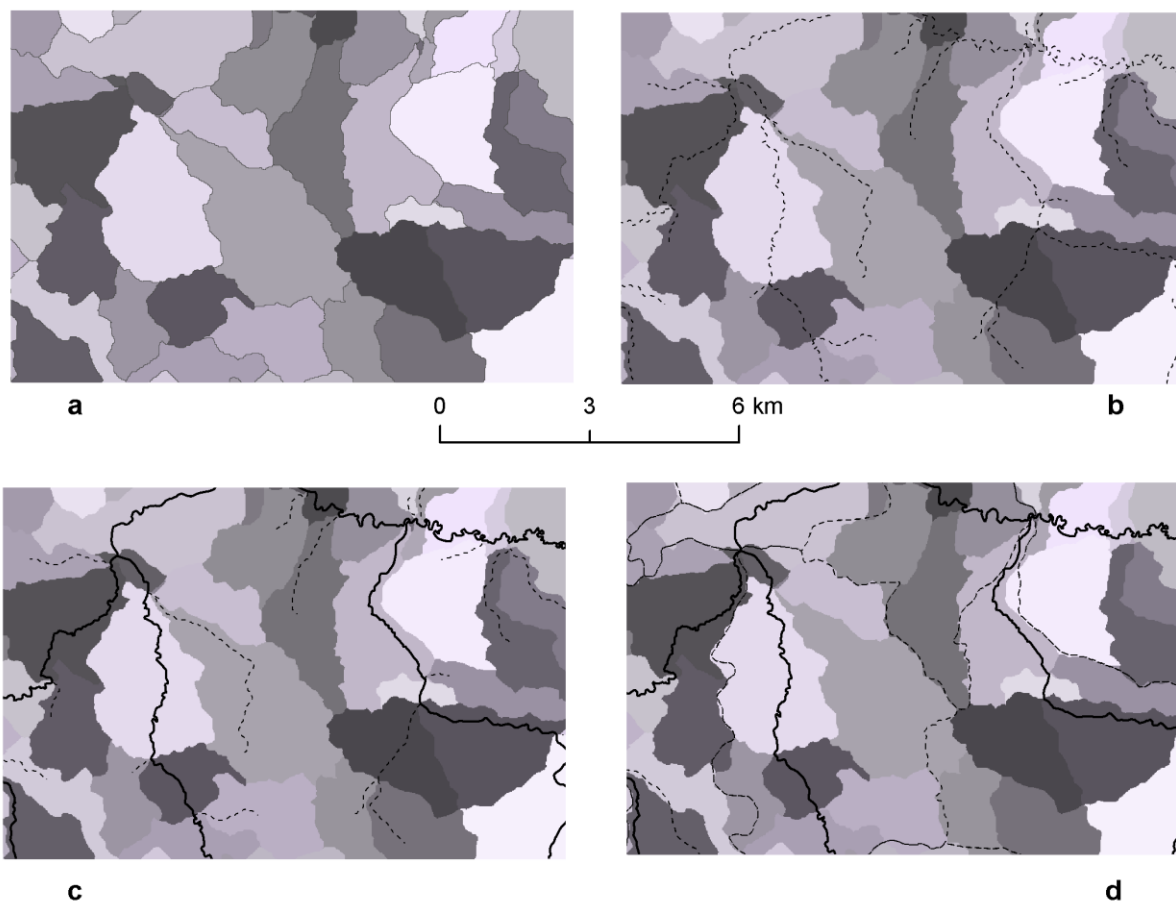
Mapa taka zawiera wartości proporcjonalne do ilość wody przepływającej przez daną komórkę. Jeżeli przyjmie się, że powyżej pewnej jej ilości tworzą się stałe ciekі, można za pomocą reklasyfikacji w oparciu o wybraną wartość progową je wyznaczyć. Na Rysunku 6.16f komórki o akumulowanej wartości spływu większej od 2 potraktowano jako ciekі, połączenie ich centrów tworzy sieć rzek. W ten sposób otrzymuje się rastrową mapę sieci rzecznej (Rysunek 6.19a). Wszystkim komórkom sieci zostaje przypisany jednakowy identyfikator.



Rys. 6.19 Rastrowe mapy sieci rzecznej: (a) po reklasyfikacji mapy akumulacji spływu; (b) po przeprowadzeniu segmentacji.

Kolejnym etapem jest segmentacja cieków, która przypisuje oddzielny identyfikator każdemu segmentowi sieci rzecznej, czyli odcinkowi sieci pomiędzy miejscami połączeń z innymi odcinkami (Rysunek 6.19b). Tak wykonana mapa wraz z mapą kierunku spływu stanowi

argumenty procedury wydzielenia zlewni elementarnych, która określa obszary, z których woda spływa do poszczególnych odcinków cieków.



Rys. 6.20 Wydzielone zlewnie elementarne (a); zlewnie elementarne i rzeki otrzymane z mapy akumulacji spływu (b); zlewnie elementarne, rzeki otrzymane z mapy akumulacji spływu (linie przerywane) i rzeki z MPHP (linie ciągłe) (c); zlewnie elementarne, rzeki z MPHP (linie ciągłe) i granice zlewni elementarnych rzek z MPHP (linie przerywane) (d).

Na Rysunku 20a przedstawiono wydzielone zlewnie elementarne, a na Rys. 20b nałożono dodatkowo na mapę odcinki rzek otrzymane z mapy akumulacji spływu. Mapy rastrowe odcinków rzek, jak i wydzielonych zlewni elementarnych mogą być zwektoryzowane do wektorowych warstw linii i poligonów. Dzięki przeprowadzeniu wypalania rzek pochodzących z danych MPHP [patrz ramka 3.5] otrzymane warstwy rzek są z nimi zgodne. Na Rys. 20c jednocześnie nałożono warstwę rzek otrzymaną z DEM (linia przerywana) i pochodzącą z MPHP (linia ciągła). Część rzek otrzymanych z DEM stanowi dodatkowe dopływy do podzbioru zgodnego z MPHP, w większości pokrywają się one z rzekami zawartymi w zbiorze „pozostałe ciek” w MPHP. Na Rysunku 6.20d pokazano granice zlewni elementarnych (linie przerywane) rzek zgodnych z MPHP (linie ciągłe). Generalnie przebieg obu wydzielen zlewni jest zgodny, ale na rysunku widocznych jest szereg miejsc niewłaściwego przypisania danego

obszaru do odpowiedniej zlewni. Wynika to z ręcznego, a co za tym idzie mniej dokładnego i obiektywnego wydzielenia zlewni w zbiorze danych MPHP. Analiza hydrologiczna zlewni z modelu DEM może służyć do korekty i uściślenia rzeczywistego położenia ich granic.

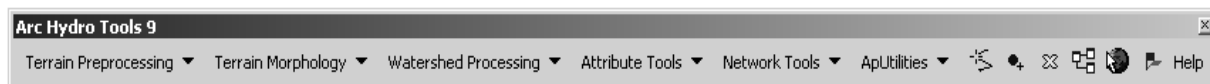
Istnieje szereg narzędzi do modelowania hydrologicznego za pomocą map DEM. W ArcGIS (*Spatial Analyst*) istnieje specjalny zbiór narzędzi (*Hydrology*). Bardzo wszechstronny zbiór funkcji dostępny jest w programie SAGA, który jako jedyny z tu omawianych umożliwia tworzenie map kierunku spływów dywergentnych. Wszechstronnym narzędziem do modelowania hydrologicznego w GIS, za pomocą którego zostały zrealizowane wszystkie przykłady w tym podrozdziale jest rozszerzenie ArcHydro Tools działające w środowisku ArcGIS (Ramka 6.3).

Ramka 6.3

ArcHydro Tools (rozszerzenie ArcGIS do analizy hydrologicznej)

(<http://www.crrw.utexas.edu/giswr/hydro/ArcHOSS/Downloads/index.cfm>)

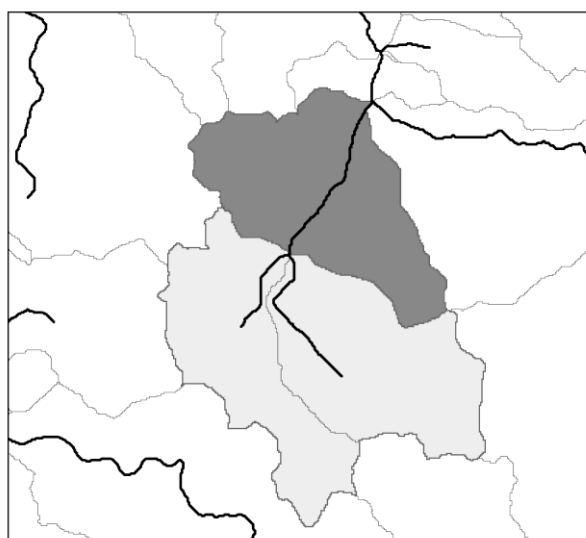
Version 1.1 (11.2006)



ArcHydro jest bezpłatnym rozszerzeniem do ArcGIS wspomagającym analizę i zarządzanie zasobami wodnymi wykonanym przez Center for Research in Water Resources (University of Texas at Austin). Składa się z dwóch istotnych elementów ArcHydro Data Model i ArcHydro Tools, który stanowi zintegrowany zestaw narzędzi do hydrograficznej analizy i modelowania. Opis podstaw teoretycznych cyfrowej analizy hydrograficznej i modelu danych został zawarty w książce *Arc Hydro GIS for Water Resources* (Maidment, 2002). Jednym z celów rozszerzenia jest dostarczenie funkcji analitycznych potrzebnych do analizy podstawowych zagadnień hydrograficznych takich jak wydzielenie zlewni czy generowanie sieci wodnej na podstawie DEM. Cel ten jest realizowany za pomocą zbioru narzędzi do wstępnego przetwarzania DEM (Terrain Preprocessing), które umożliwiają w kolejnych etapach utworzenie szeregu produktów analizy hydrograficznej z mapy rastrowej DEM (tabela poniżej).

Etap	Narzędzie	Opis
1. Wypalanie sieci rzecznej na mapie DEM	DEM Reconditioning	Umożliwia wypalanie sieci rzecznej (liniowa warstwa wektorowa) na danej mapie DEM.
2. Wypełnianie wgłębień	Fill Sinks	Wypełnianie wgłębień dla całej mapy DEM. Możliwe jest wprowadzenie warstwy poligonów zawierających granice obszarów bezodpływowych (nie będą one wypełniane), oraz progu różnicy wysokości powyżej którego dokonuje się wypełniania.
3. Tworzenie mapy	Flow Direction	Tworzy mapę kierunku spływu z mapy

kierunku spływu		DEM (Rys. 6.17b).
4. Tworzenie mapy akumulacji spływu	Flow Accumulation	Tworzy mapę akumulacji spływu z mapy kierunku spływu (Rys. 6.18b).
5. Definiowanie cieków wodnych	Stream Definition	Tworzy mapę rastrową cieków z mapy akumulacji spływu (Rys. 6.19a)
6. Segmentacja cieków wodnych	Stream Segmentation	Tworzy mapę rastrową segmentów cieków z mapy rastrowej cieków i mapy kierunku spływu (Rys. 6.19b). Rastrowa mapa segmentów cieków może być zamieniona na warstwę wektorową linii za pomocą narzędzia Drainage Line Processing
7. Wydzielenie zlewni elementarnych	Catchment Grid Delination	Tworzy mapę rastrową zlewni elementarnych dla każdego segmentu cieków z rastrowych map segmentów cieków i kierunku spływu. Rastrowa mapa zlewni elementarnych może być zamieniona do warstwy wektorowej poligonów za pomocą narzędzia Catchment Polygon Processing. Z mapy tej, oraz map rastrowej zlewni elementarnych i mapy akumulacji spływu można wyznaczyć punkty drenażu danej zlewni (wektorowy plik punktowy).
8. Wyznaczenie zlewni sprzężonych (adjoint catchment) dla zlewni elementarnych	Adjoint Catchment Processing	Tworzy wektorową mapę zlewni sprzężonych (Rys. 6.21) dla każdej zlewni elementarnej na podstawie wektorowych map zlewni elementarnej i odcinków cieków.



Rys. 6.21 Wyznaczanie zlewni sprzężonych. Na mapie przedstawiono warstwę zlewni elementarnych i sieci rzecznej. Dla zlewni elementarnej (poligon z ciemniejszym szrafem) zlewnią sprzężoną jest obszar z którego woda spływa do tej zlewni. Tworzą ją dwie zlewnie elementarne (poligony z jaśniejszym szrafem).

Mapy rastrowe i wektorowe tworzone w tym rozszerzeniu są ze sobą powiązane za pomocą reguł określonych w ArcHydro Data Model. Mapy wektorowe i tablice są tworzone w geobazie danych o nazwie odpowiadającej projektowi w ArcGIS (*.mxd), warstwy rastrowe w katalogu o nazwie Layers. Każdy tworzony obiekt wektorowy posiada unikalny identyfikator hydrograficzny, każdy obiekt związany ze zlewnią elementarną (np. zlewnia sprzężona) posiada pole z jej identyfikatorem. Daje to bardzo wszechstronne możliwości prowadzenia różnorodnych analiz. Oprócz zestawu narzędzi do wstępnego przetwarzania DEM istnieje drugi zestaw do analizy morfologii terenu w granicach zlewni (Terrain Morphology). Arc Hydro Tools zawiera także szereg narzędzi interakcyjnych oraz narzędzia do prowadzenia analiz sieci rzecznych.

Mapa DEM jest podstawowym źródłem danych przy modelowaniu zagrożenia powodziowego. Prognozowanie tego rodzaju zjawisk wiąże się z koniecznością uwzględniania niepewności, która wynika zarówno z braku możliwości przewidzenia dokładnego poziomu wody, jak i faktu, że wartości na mapie DEM są obciążone pewnym błędem. Generalnie w tego typu modelowaniu przyjmuje się, że komórki mapy rastrowej, które będą leżały niżej od poziomu wody ulegną zalaniu. Dodatkowy warunek wynika z możliwości powstania obszarów depresyjnych, czyli takich, które — choć leżą poniżej poziomu wody — nie zostaną zalane, ponieważ są otoczone przez wyższe obszary. Mogą być one zidentyfikowane za pomocą grupowania maski obszarów zalanych. Będą one tworzyć oddzielne grupy, ze względu na brak połączenia z właściwym obszarem zalanim. Przy uwzględnianiu niepewności prognozy i błędu mapy tworzy się mapy prawdopodobieństwa zalania przy zadanym poziomie wody. Przygotowanie takiej mapy wymaga znajomości błędu prognozy (błąd standardowy) i błędu mapy DEM, określonego za pomocą błędu średniokwadratowego (RMS – *root mean-square error*) obliczonego z wyrażenia:

$$RMS = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Obs_i - DEM_i)^2}{n}} \quad (6.18)$$

gdzie: Obs – zmierzona wartość w punkcie kontrolnym i ,

DEM – wartość na mapie DEM w punkcie kontrolnym i ,

n – liczba punktów kontrolnych.

Liczba punktów kontrolnych, w których dokonywane są pomiary wysokości jest określana za pomocą wyrażenia:

$$n = \frac{z^2 * RMS^2}{2 * e} \quad (6.19)$$

gdzie:

n – liczba punktów kontrolnych,

e – przedział ufności określenia RMS,

z – standardowa wartość dla danego poziomu ufności (np. 1.96 dla 95%),

RMS – estymacja wartości średniego błędu kwadratowego.

Ponieważ przy wyznaczaniu obszarów zalanych, wpływ na ostateczny wynik ma zarówno błąd mapy jak i prognozy, korzystając z zasad propagacji błędów (Urbański, 2001) można przyjąć, że ostateczny błąd S_p będzie miał postać:

$$S_p = \sqrt{S^2 + RMS^2} \quad (6.20)$$

gdzie:

S – błąd prognozy.

Jest to rezultat propagacji błędu na nowej mapie DEM, która opisuje wysokość terenu nad nowy poziom wody. Powstaje ona z odjęcia dwóch map, mapy DEM o błędzie określonym przez RMS i mapy ze stałą wartością prognozy nowego poziomu wody o błędzie S . Z punktu widzenia statystyki możliwe wartości danej komórki mapy DEM mają rozkład normalny, określony przez wartość średnią (wartość komórki na mapie DEM) i odchylenie standardowe (RMS, a w omawianym przypadku S). Z rozkładu normalnego może być obliczone prawdopodobieństwo, że rzeczywista wartość danej komórki jest niższa od wartości progowej. Wykorzystuje się do tego zmienne losowe standaryzowane (z-score) obliczane z wyrażenia:

$$Z = \frac{Poziom - DEM}{S_p} \quad (6.21)$$

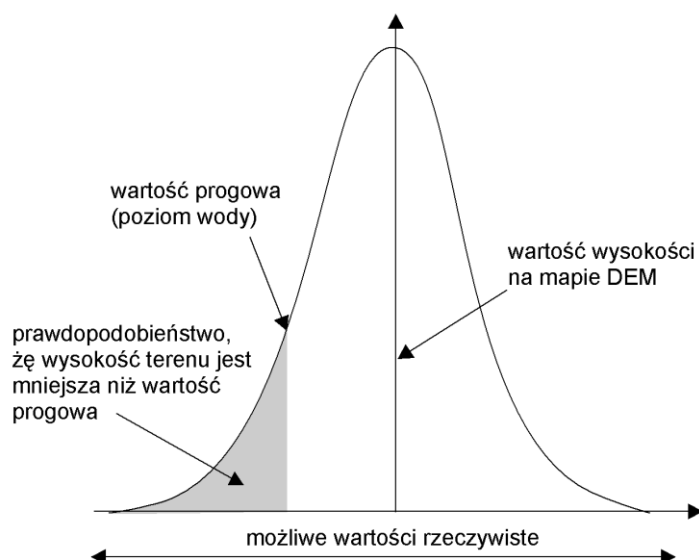
gdzie:

$Poziom$ – wartość progowa wyznaczona przez nowy poziom wody,

DEM – wartość z mapy wysokości,

S_p – błąd wynikowej mapy powstały w trakcie odjęcia mapy progowej i DEM.

Z rozkładu zmiennej losowej standaryzowanej można wyznaczyć prawdopodobieństwo, że prawdziwa wartość znajdzie się poniżej poziomu wody (wartości progowej), określając powierzchnię pod krzywą rozkładu (Rysunek 6.22) od minus nieskończoności do odciętej wartości progowej. Można posłużyć się tablicami dystrybuanty rozkładu normalnego lub dostępnymi w sieci kalkulatorami do obliczania powierzchni pod krzywą rozkładu normalnego (<http://www.psychstat.missouristate.edu/introbook/normal.htm>).

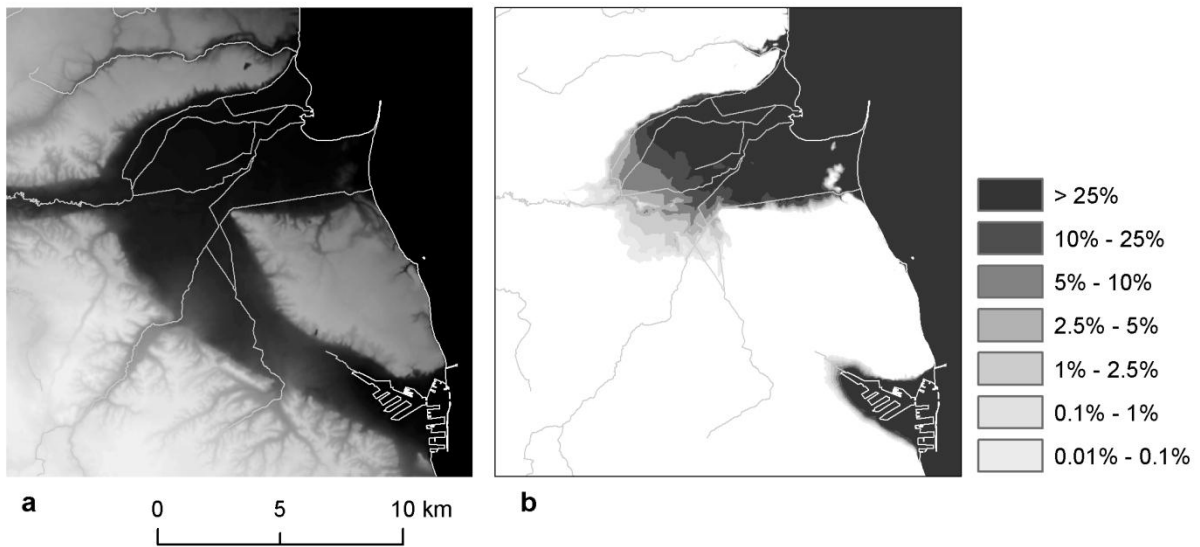


Rys. 6.22 Wyznaczanie prawdopodobieństwa że prawdziwa wartość na mapie DEM znajdzie się poniżej poziomu wody (wartości progowej).

W praktyce można za pomocą przedstawionego powyżej wyrażenia obliczyć mapę wartości standaryzowanych, którą następnie reklasyfikuje się na klasy opisujące prawdopodobieństwo zalania według poniższej tabeli:

Klasa	Prawdopodobieństwo	Zakres zmiennej standaryzowanej
1	powyżej 25%	- 0.6745 do $+\infty$
2	od 25% do 10%	-1.282 do -0.6745
3	od 5% do 10%	-1.645 do -1.282
4	od 2.5% do 5%	-1.96 do -1.645
5	od 1% do 2.5%	-2.326 do -1.96
6	od 0.1% do 1%	-3.09 do -2.36
7	od 0.01% do 0.1%	-3.719 do -3.09

Ten sposób został wykorzystany do stworzenia mapy zagrożenia powodziowego spowodowanego przez ekstremalny sztorm dla strefy brzegowej w okolicy Gdyni (spiętrzenie wody do 2 m), przy jednoczesnym podniesieniu się średniego poziomu morza o 1 metr (Rysunek 6.23). Modelowanie przeprowadzono przy pomocy numerycznego modelu terenu DTED 2 przyjmując $RMS = 2$ m. Błąd prognozy podniesienia się poziomu morza i spiętrzenia sztormowego został określony na 0.5 m.



Rys. 6.23 Model zagrożenia powodziowego (prawdopodobieństwo zalania) w rezultacie ekstremalnego sztormu (spiętrzenie wody o 2 metry) przy jednoczesnym podniesieniu się średniego poziomu morza o 1 m.

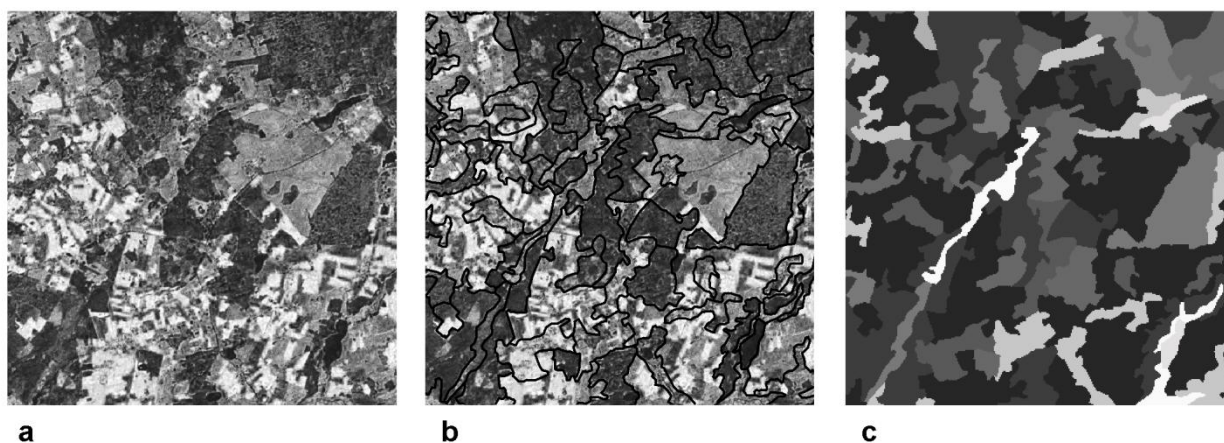
7. ANALIZA ROZMIESZCZENIA ELEMENTÓW KRAJOBRAZU

Analiza przestrzennego rozmieszczenia elementów krajobrazu (*landscape pattern analysis*) znajduje zastosowanie przede wszystkim w badaniach ekologicznych. W ekologii krajobrazu, ale także w innych jej dziedzinach, przyjmuje się, że rozmieszczenie elementów środowiska ma istotny wpływ na procesy ekologiczne. Elementy te tworzą specyficzne struktury, których naruszenie może prowadzić do zakłócenia tych procesów lub sprzyjać zapoczątkowaniu całkiem nowych. Dlatego też opracowano wiele indeksów będących ilościowymi miarami (*landscape matrices*) rozmieszczenia elementów krajobrazu, które są używane w badaniach wpływu struktury przestrzennej na procesy ekologiczne. Geograficzne systemy informacyjne stanowią dogodną płaszczyznę do ich wyznaczania i prowadzenia analiz.

Krajobraz może być rozumiany jako mozaika jednorodnych obszarów (*patches*), które w literaturze polskiej zostały nazwane płatami przez Richlinga i Solona (2002), a dla potrzeb tej pracy będą określane jako elementy krajobrazu. We wspomnianej pracy przytacza się także ekologiczną definicję krajobrazu Formanna i Gordona (1986), określającą krajobraz jako heterogeniczny obszar powierzchni lądu pokryty mozaiką oddziałujących na siebie ekosystemów o specyficznej strukturze, występujący w podobnej postaci w różnych miejscach. Pojęcie krajobrazu może się także odnosić do pokrycia dna morskiego (*seascape*) (Sleeman i in., 2005). Zasadniczym zagadnieniem w praktycznym wykorzystaniu tej definicji jest właściwa klasyfikacja elementów krajobrazu oraz wybór odpowiedniej skali analiz, gdyż zarówno rodzaje elementów krajobrazu, jak i jego skala muszą mieć rzeczywiste znaczenie dla badanych procesów ekologicznych.

Modelowanie krajobrazu w systemach GIS może się odbywać za pomocą różnych modeli danych, które w istotny sposób determinują możliwości i sposoby analizy. W praktyce wykorzystywane są wszystkie modele danych opisane w rozdziale 3.2. Model punktowy wykorzystuje metody analizy przestrzennej danych punktowych (*point pattern analyses*), pozwalającej między innymi na ocenę stopnia klasteryzacji i jej zależności od skali oraz wzajemnej relacji dwóch zbiorów punktów pod względem ich położenia (przyciąganie, odpychanie, brak związku). Model liniowy znajduje zastosowanie w analizach sieciowych. Jest on przydatny tam, gdzie elementy krajobrazu tworzą struktury sieciowe lub zbliżone do nich. Typowymi elementami tego rodzaju są wody płynące. Dwa kolejne modele mają charakter powierzchniowy, przy czym znacznie częściej do modelowania krajobrazu używa się powierzchni dyskretnej (zawierającej obiekty, którym przypisane są identyfikatory klas elementów krajobrazu) niż powierzchni ciągłej. Wymaga to przeprowadzenia na początku prac

klasyfikacji elementów krajobrazu, przy czym zastosowany schemat klasyfikacyjny powinien być ściśle związany z rodzajem badanych procesów. Dyskretna mapa powierzchniowa może mieć zarówno charakter wektorowy (mozaika poligonów), jak i rastrowy. Istnieje szereg metod analizy przestrzennej mozaiki poligonów znanej pod nazwą *lattice data analysis*, jednak wspomniane uprzednio miary krajobrazu są wyznaczane najczęściej z map o charakterze rastrowym (Rysunek 7.1c). W tym przypadku każdej komórce mapy przypisany jest identyfikator odpowiadający pewnej klasie pokrycia powierzchni terenu. Kiedy poszczególne elementy krajobrazu mają powierzchnię większą od pojedynczej komórki, tworzą grupy komórek o tej samej wartości, które są rastrowym modelem tych elementów. Obecnie mapy krajobrazu, będące rodzajem map pokrycia terenu, są najczęściej tworzone na podstawie zdjęć lotniczych lub satelitarnych (Rysunek 7.1).

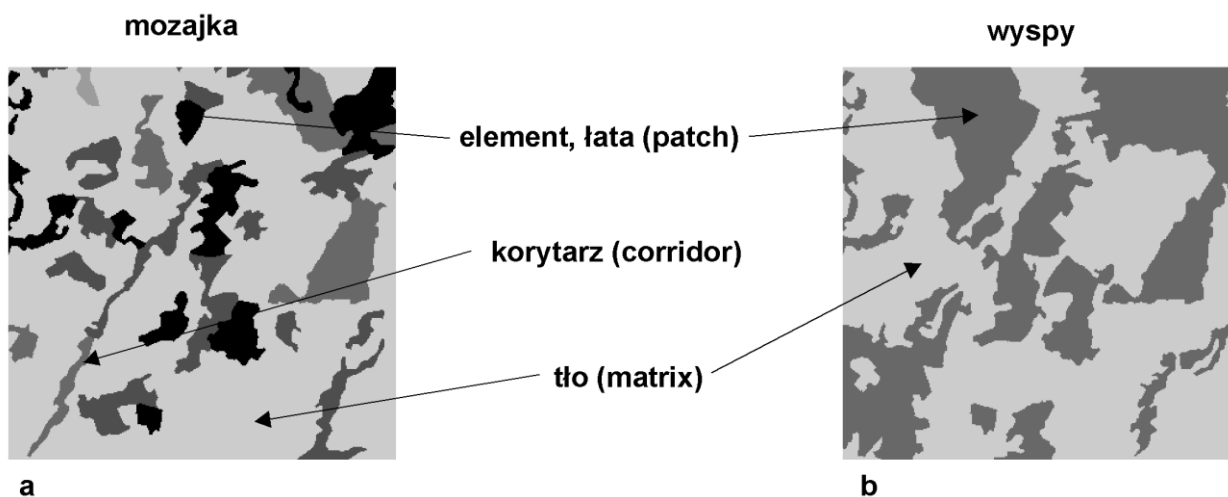


Rys. 7.1 Tworzenie mapy pokrycia terenu (krajobrazu): a – warstwa multispektralnego zdjęcia satelitarnego; b – segmentacja obiektów w określonej skali; c – rastrowa mapa obiektów przypisanych do określonej klasy.

Bardzo wiele map powstało za pomocą ręcznej digitalizacji [patrz podroz. 3.3.5] elementów krajobrazu ze zdjęć. Tradycyjne metody automatycznej klasyfikacji polegają na oddzielnym przypisaniu jednej z wcześniej zdefiniowanych klas do każdego piksela. Jest to przeprowadzane za pomocą porównania jego wartości na warstwach zdjęcia multispektralnego ze statystykami otrzymanymi z pewnych obszarów kontrolnych o znanej klasie. Do niedawna najczęściej stosowaną techniką tego typu klasyfikacji była metoda największego prawdopodobieństwa (Adamczyk, Bedkowski 2005). Obecnie coraz częściej wykorzystywana jest tzw. klasyfikacja obiektowa, bazująca na statystykach z multispektralnej informacji pochodzącej od grup pikseli. W metodzie tej najpierw obraz dzielony jest na elementarne obiekty odznaczające się dużym stopniem wewnętrznej homogeniczności (Rysunek 7.1b). Proces ten nosi nazwę segmentacji obrazu. Obiekty te mogą być łączone ze sobą na podstawie hierarchicznego schematu klasyfikacyjnego tworząc końcową mapę obiektów o klasach i skali rozmiarów dostosowanych

do analizowanych procesów ekologicznych. Większość klasyfikacji obiektowych wykorzystywanych w projektach badawczych jest przeprowadzana obecnie (2006) za pomocą komercyjnego programu eCognition (Definiens) (http://www.definiens.com/products/definiens_professional.php)

Koncepcyjny model krajobrazu zbudowany za pomocą rastrowego modelu z komórkami o przypisanych klasach może przyjmować formę mozaiki albo mieć charakter wyspowy (binarny). W pierwszym przypadku mamy do czynienia z wieloma klasami występującymi na mapie, z których jedna (występująca najczęściej) może być traktowana jako tło (*matrix*). Spośród pozostałych elementów mogą być dodatkowo wydzielone wydłużone elementy zwane korytarzami (*corridor*), które oprócz specyficznej struktury mogą pełnić różne funkcje w krajobrazie.



Rys. 7.2 Rastrowy model krajobrazu i jego składowe (tło, korytarze, elementy) : a – mozaika elementów; b – wyspy i tło.

Wywodząca się z teorii *island biogeography* druga postać modelu zawiera tylko tło i elementy jednej klasy. Oba modele mogą być dodatkowo opisane za pomocą: (1) ich rozdzielczości przestrzennej (*grain*), która odpowiada rozmiarowi komórki, (2) wielkości obszaru badań (*extent*) i ewntualnie (3) minimalnego rozmiaru elementu krajobrazu branego pod uwagę. Wszystkie te parametry modelu powinny znajdować uzasadnienie w skalach badanych procesów ekologicznych. Krajobraz tworzący mozaikę elementów (wyspy mogą być traktowane jako jej szczególny przypadek) może być analizowany na trzech poziomach jego struktury. Na najniższym poziomie istnieją pojedyncze elementy (Rys. 7.3a). Z punktu widzenia ekologii znaczenie może mieć szereg czynników z nimi związanych. Rozmiar elementu może mieć zasadnicze znaczenie dla wielu organizmów, ponadto szereg z nich może wykazywać wrażliwość na bliskość granic i stąd być uzależniona od rozmiaru strefy centralnej (*core area*)

elementu, czyli obszaru wewnątrz elementu oddzielonego od granic buforem wewnętrznym. Poziom wyżej znajdują się klasy elementów (Rys. 7.3b), które tworzą zbiory elementów tego samego typu. Analiza ilości i rozmieszczenia elementów danej klasy jest podstawą badań nad procesem fragmentacji krajobrazu, czyli postępującym podziałem danej klasy na coraz mniejsze elementy. Na najwyższym poziomie znajduje się krajobraz jako całość (Rys. 7.3c). Istotne znaczenie w ekologii ma jego różnorodność. Miary krajobrazu mogą się odnosić do każdego z tych poziomów, czyli być obliczane dla pojedynczych obiektów, klas albo całego krajobrazu. Analiza może być także prowadzona lokalnie albo globalnie. Przy analizie lokalnej (poziom klas lub krajobrazu), miary są wyznaczane dla podobszaru określonego przez ruchome okno [patrz podroz. 5.3.1] i przypisywane do jego centralnej komórki. W rezultacie tworzona jest ciągła mapa rastrowa tej miary. Przy analizie globalnej miary są wyznaczane dla każdego elementu, klasy lub krajobrazu i zapisywane w formie tablicy.



Rys. 7.3 Analiza mozaikowego modelu krajobrazu może być prowadzona na różnych poziomach: a – pojedynczego elementu ; b – klasy elementów; c – całego krajobrazu.

Istnieje ogromna liczba stosowanych miar krajobrazu i wiele sposobów ich klasyfikacji. Jednym z podstawowych jest podział na miary opisujące skład krajobrazu (*landscape composition*), które nie uwzględniają położenia w przestrzeni oraz miary opisujące konfigurację krajobrazu (*landscape configuration*) do wyznaczenia których niezbędna jest informacja o tym położeniu. Poniżej przedstawiono szereg miar, które tworzą pewną reprezentację analitycznych możliwości przestrzennej analizy elementów krajobrazu, w żadnym jednak stopniu nie stanowią kompletnego opisu dostępnych technik badawczych. Wykorzystano ich implementację w programie FRAGSTATS [Ramka 7.1], który jest często wykorzystywany w badaniach naukowych. Nazwy poszczególnych funkcji są zgodne z użytymi w tym programie.

7.1 Powierzchnia i proporcja klas na mapie

Podstawową informacją o składzie krajobrazu, której głównymi miarami jest powierzchnia i procentowy udział poszczególnych klas, jest powierzchnia klas i ich proporcja na mapie. Powierzchnia klas (*Class Area*) jest wyznaczana za pomocą wyrażenia:

$$CA_i = \sum_{j=1}^n a_{ij} \left(\frac{1}{10000} \right) \quad (7.1)$$

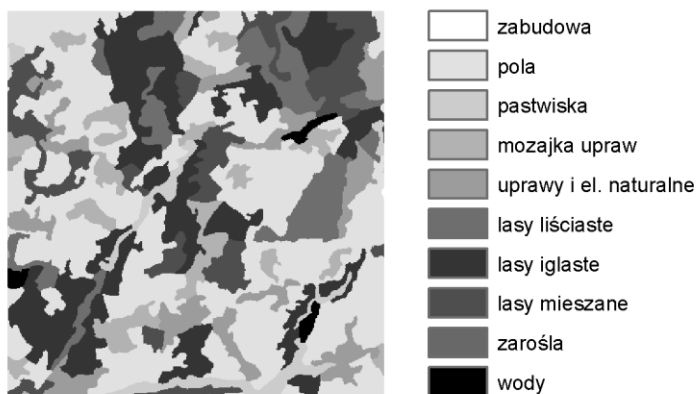
gdzie:

i – klasa,

j – numer elementu krajobrazu danej klasy,

a_{ij} – powierzchnia w (m²) elementu krajobrazu ij .

Podzielenie sumy powierzchni elementów przynależnych do danej klasy przez 10000 zmienia jednostkę CA na hektary.



ID	TYPE	CA	PLAND
1	pola	3831.25	40.9322
2	lasz_igl	1779.8125	19.0151
3	lasz_lis	790.5	8.4455
4	mozaika_upraw	718.4375	7.6756
5	uprawy_naturalne	812.9375	8.6852
6	lasz_miesz	994.125	10.621
7	pastwiska	313	3.344
8	zarośla	26.5625	0.2838
9	wody	84.4375	0.9021
10	zabudowa	8.9375	0.0955

Rys. 7.4 Powierzchnia klas w hektarach (CA) i ich procentowy udział w krajobrazie (PLAND).

Drugą miarą jest procentowy udział każdej z klas w krajobrazie (*Percentage of Landscape*) określany wyrażeniem:

$$PLAND_i = \frac{\sum_{j=1}^n a_{ij}}{A} \cdot 100 \quad (7.2)$$

gdzie:

i – klasa,

j – numer elementu krajobrazu danej klasy,

a_{ij} – powierzchnia w (m^2) elementu krajobrazu ij ,

A – całkowita powierzchnia krajobrazu w (m^2).

Na Rysunku 7.4 przedstawiono policzone miary dla mapy przykładowej.

7.2 Liczba klas (*richness*)

Istnieje kilka miar służących do analizy liczby klas krajobrazu. Najprostszą i najbardziej oczywistą jest liczba klas występujących w danym krajobrazie (*Patch Richness*):

$$PR = m \quad (7.3)$$

gdzie:

m – liczba klas.

Miara ta jest niezależna od proporcji klas oraz od powierzchni mapy, nie nadaje się także do porównywania krajobrazów o różnych powierzchniach i skalach, które to cechy mają pośredni wpływ na liczbę klas. Na mapie obejmującej dużą powierzchnię istnieje większe prawdopodobieństwo napotkania wszystkich występujących w krajobrazie klas elementów. Problem różnych powierzchni może być rozwiązany za pomocą obliczania liczby klas na jednostkę powierzchni. Służy do tego miara gęstości liczby klas (*Patch Richness Density*) wyznaczająca ich liczbę na 100 ha za pomocą wyrażenia:

$$PRD = \frac{m}{A} \left[\frac{10000}{100} \right] \quad (7.4)$$

gdzie:

m – liczba klas,

A – całkowita powierzchnia krajobrazu w (m^2).

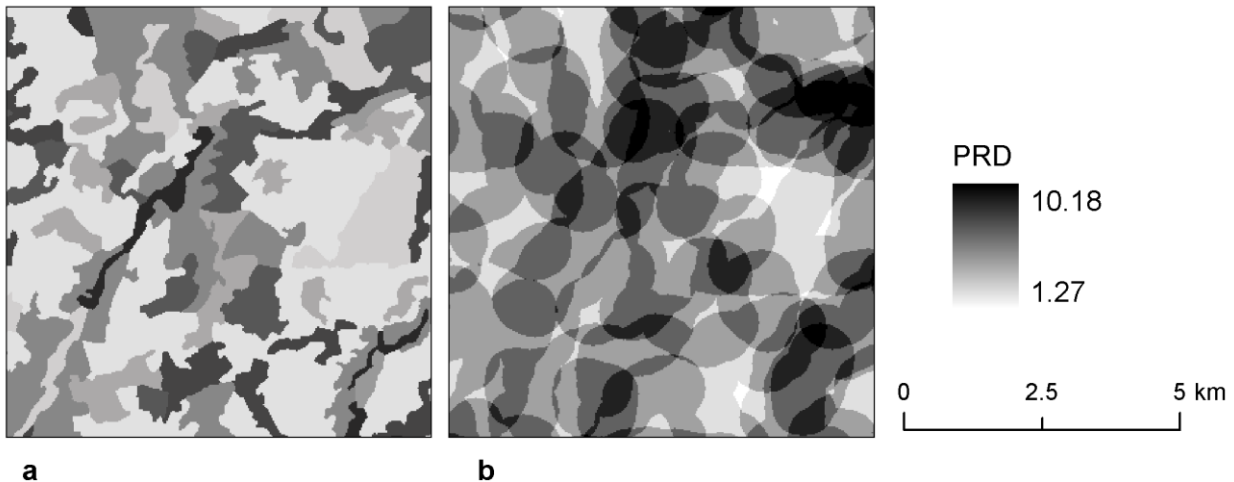
Na Rysunku 7.5 przedstawiono mapę gęstości liczby klas wyznaczoną za pomocą lokalnej miary PRD. Każdej komórce przypisano wartość miary wyznaczonej z otoczenia o promieniu 500 metrów. Problem skali polega na związku skali badań ze szczegółowością schematu klasyfikacyjnego. W przypadku porównywania map krajobrazu różniących się skalą wyznaczanych elementów może być wykorzystana miara RPR (*Relative Patch Richness*), która do standaryzacji wykorzystuje pewną przyjętą przez użytkownika maksymalną liczbę klas związanych z daną skalą, a określoną przez wykorzystywany schemat klasyfikacyjny. Miara ta ma postać:

$$RPR = \frac{m}{m_{MAX}} \quad (7.5)$$

gdzie:

m – liczba klas.

m_{MAX} – maksymalna liczba klas.



Rys. 7.5 Mapa gęstości liczby klas krajobrazu: a – mapa krajobrazu; b – lokalna miara PRD liczona dla otoczenia o promieniu 500 m.

7.3 Różnorodność krajobrazu (*diversity*)

W ekologii istnieje szereg miar różnorodności krajobrazu. Były one często wykorzystywane w analizach związanych z liczbą gatunków roślin i zwierząt. Prezentowane poniżej miary opisujące różnorodność składu krajobrazu uwzględniają dwa czynniki. Pierwszym z nich jest liczba występujących w danym krajobrazie klas, a drugim ich proporcje. Miar tych używa się na poziomie krajobrazu, dla którego wyznaczany jest indeks różnorodności. Miarą często używaną w ekologii jest indeks różnorodności Shannona (Shannon's Diversity Index) w postaci:

$$SHDI = - \sum_{i=1}^m P_i * \ln P_i \quad (7.6)$$

gdzie:

P_i – proporcja danej klasy (i) w krajobrazie,

m – liczba klas w krajobrazie.

Indeks ten jest równy 0, gdy krajobraz zawiera tylko jeden element. Jego wartość rośnie wraz ze wzrostem liczby klas (nie ma górnej granicy) oraz dążeniem do takiego samego stopnia pokrycia przez poszczególne klasy. Panuje opinia, że indeks ten jest wrażliwy na klasy o bardzo małej powierzchni. Kolejną miarą jest indeks (wskaźnik) różnorodności Simpsona (*Simpson's Diversity Index*) określony wyrażeniem:

$$SIDI = 1 - \sum_{i=1}^m P_i^2 \quad (7.7)$$

gdzie:

P_i – proporcja danej klasy (i) w krajobrazie,

m – liczba klas w krajobrazie.

Charakterystyczne dla tego indeksu jest przyjmowanie wartości od 0 do 1, opisującej prawdopodobieństwo, że dwie losowo wybrane komórki są położone w elementach krajobrazu należących do różnych klas. Istnieje zmodyfikowana postać tego wskaźnika przyjmująca zakres podobny do indeksu Shannona w postaci:

$$MSIDI = -\ln \sum_{i=1}^m P_i^2 \quad (7.8)$$

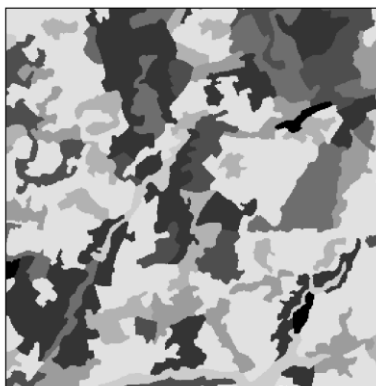
gdzie:

P_i – proporcja danej klasy (i) w krajobrazie,

m – liczba klas w krajobrazie.

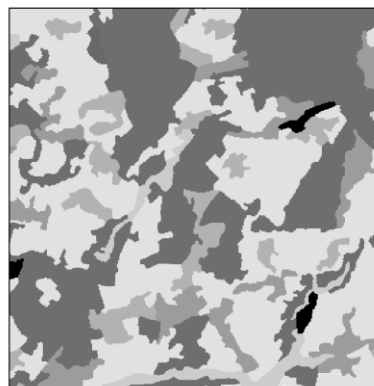
Na Rysunku 7.6 przeprowadzono porównanie tych współczynników dla trzech różnych krajobrazów. Krajobraz pierwszy (Rys. 7.6a) zawiera 10 klas i może być traktowany jako podstawowy. Krajobraz drugi (Rys. 7.6b) został wykonany przez połączenie wszystkich trzech klas z lasami w jedną i zawiera aktualnie 8 klas. Ostatni krajobraz (Rys. 7.6c) zawiera tyle klas, co pierwszy, natomiast zmieniono ich proporcje wprowadzając dwie duże klasy. Policzone indeksy zostały przedstawione nad mapami. Najniższe wartości wszystkich indeksów otrzymano dla sytuacji środkowej (b). Świadczy to o istotnym wpływie liczby występujących w krajobrazie klas na wielkość tych współczynników. Różnice pomiędzy indeksami Shannona i Simpsona są nieznaczne i tylko w niewielkim stopniu uwidaczniają większą zależność pierwszego z indeksów od klas o małych powierzchniach.

SHDI = 1.7168
SIDI = 0.7632
MSIDI = 1.4407



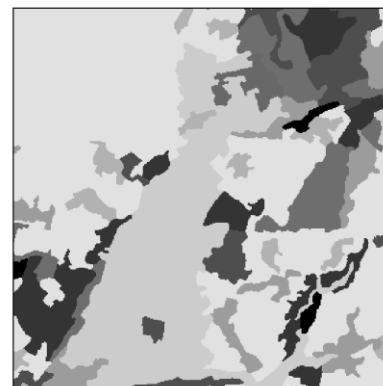
a

SHDI = 1.3219
SIDI = 0.6728
MSIDI = 1.1172



b

SHDI = 1.6417
SIDI = 0.7268
MSIDI = 1.2974



c

Rys. 7.6 Indeksy różnorodności wyznaczone dla trzech różnych krajobrazów: a – 10 klas z jedną klasą dominującą; b – 8 klas z jedna klasa dominująca; c – 10 klas z dwoma klasami dominującymi.

Równomierność jest miarą równych proporcji pomiędzy klasami. Maksymalną wartość osiąga wtedy, gdy wszystkie klasy mają jednakową powierzchnię (wartość 1), a minimalną, gdy występuje tylko jedna klasa (wartość 0). Często stosowanymi w ekologii są także miary dominacji. Wzajemna relacja tych miar może być określona wyrażeniem *równomierność* = 1 – *dominacja*. Używane miary równomierności są związane z przedstawionymi powyżej indeksami różnorodności:

$$SHEI = \frac{\sum_{i=1}^m P_i \cdot \ln P_i}{\ln m} \quad (7.9)$$

gdzie:

SHEI – indeks równomierności Shannona
P_i – proporcja danej klasy (i) w krajobrazie,
m – liczba klas w krajobrazie.

$$SIEI = \frac{1 - \sum_{i=1}^m P_i^2}{1 - \frac{1}{m}} \quad (7.10)$$

gdzie:

SIEI – indeks równomierności Simpsona
P_i – proporcja danej klasy (i) w krajobrazie,
m – liczba klas w krajobrazie.

$$MSIEI = \frac{-\ln \sum_{i=1}^m P_i^2}{\ln m} \quad (7.11)$$

gdzie:

MSIEI – indeks równomierności Simpsona,
P_i – proporcja danej klasy (i) w krajobrazie,
m – liczba klas w krajobrazie.

Tab. 7.1 Wartości indeksów dla trzech map przedstawionych na Rysunku 7.

	a	b	c
SHEI	0.7456	0.6386	0.7112
SIEI	0.8480	0.7698	0.8033
MSIEI	0.6257	0.5384	0.5575

7.4 Zróźnicowanie kształtu elementów krajobrazu

Istnieje wiele miar i sposobów opisu geometrii elementów krajobrazu, rozumianej najczęściej jako ogólny stopień złożoności ich kształtu. Jedną z podstawowych relacji branych pod uwagę jest stosunek obwodu do powierzchni. Podobnie jak w większości innych miar, istotnym problemem jest wpływ powierzchni i skali. Prostą i popularną miarą kształtu jest Indeks Kształtu (*Shape Index*) zdefiniowany jako:

$$SHAPE = \frac{P_{ij}}{\min p_{ij}} \quad (7.12)$$

gdzie:

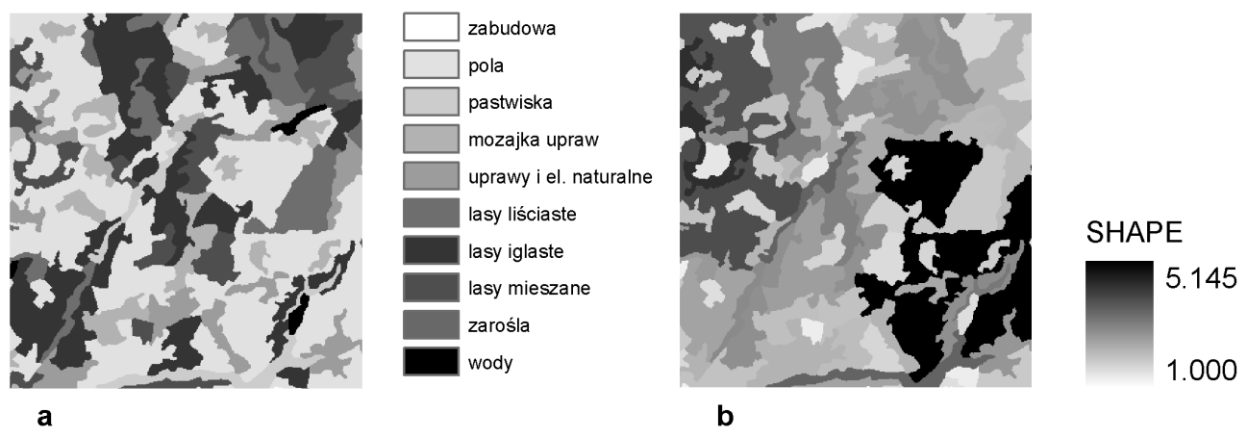
i – klasa,

j – numer elementu krajobrazu danej klasy,

p_{ij} – obwód danego elementu krajobrazu,

$\min p_{ij}$ – minimalny możliwy obwód danego elementu krajobrazu przy maksymalnym jego skupieniu (kwadrat lub prawie kwadrat).

Przyjmuje on wartość 1 przy maksymalnie skupionym kształcie i wartości większe od 1 w miarę wzrostu złożoności jego geometrii. Indeks ten jest obliczany dla pojedynczych elementów. Najczęściej przedstawiane są statystyki z obliczeń dla klas i całego krajobrazu. Na Rysunku 7.7 przedstawiono mapę krajobrazu i odpowiadającą jej mapę indeksów kształtu.



Rys. 7.7 Mapa indeksu kształtu: a – mapa krajobrazu; b – lokalna miara indeksu kształtu (wyznaczona dla każdego elementu krajobrazu).

Do analizy kształtu elementów krajobrazu wykorzystuje się także metody oparte o fraktale. Krajobraz pod wieloma względami dobrze nadaje się do opisu za ich pomocą. Poszczególne jego elementy, niezależnie od skali, mają skomplikowaną postać. Ponadto wykazują „samopodobieństwo”, które polega na podobieństwie kształtu niezależnie od skali. Jedną

z często wykorzystywanych miar tego typu jest Indeks Wymiaru Fraktalnego (*Fractal Dimension Index*) zdefiniowany wyrażeniem:

$$FRAC = \frac{2 \ln(0.25 p_{ij})}{a_{ij}} \quad (7.13)$$

gdzie:

i – klasa,

j – numer elementu krajobrazu danej klasy,

p_{ij} – obwód danego elementu krajobrazu,

a_{ij} – powierzchnia danego elementu krajobrazu.

Indeks ten przyjmuje wartości od 1 do 2. Wartości większe od 1 dla obiektów dwuwymiarowych świadczą o złożoności kształtu [patrz podroz. 4.3]. Średnia (MN) i zmienność wyrażona w procentach (CV) przedstawionych powyżej indeksów dla klas krajobrazu z Rysunku 7a zostały zestawione poniżej.

Tab. 7.2 Wartości średnich elementów kształtu

Indeks Kształtu

TYPE	SHAPE_MIN	SHAPE_CV
pola	1.901	49.4238
lasy_igl	2.2604	26.1045
lasy_lis	2.1267	25.8809
mozajka_upraw	1.6994	20.1339
uprawy_naturalne	2.0045	21.094
lasy_miesz	2.131	37.6497
pastwiska	2.8737	23.9251
zarosla	1.5	0
wody	1.6249	21.6389
zabudowa	1.2083	12.9023

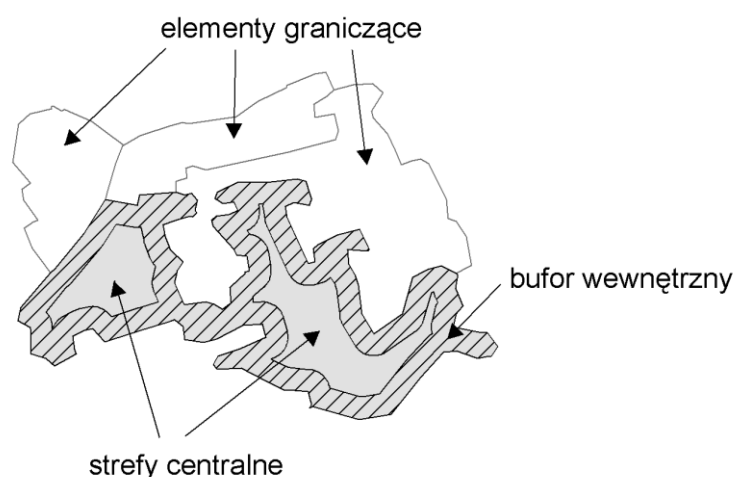
Indeks Wymiaru Fraktalnego

TYPE	FRAC_MIN	FRAC_CV
pola	1.0884	4.2171
lasy_igl	1.1149	3.3793
lasy_lis	1.1077	3.28
mozajka_upraw	1.083	2.1676
uprawy_naturalne	1.1049	2.7687
lasy_miesz	1.1048	4.0374
pastwiska	1.1576	2.9987
zarosla	1.0679	0
wody	1.0757	3.0552
zabudowa	1.0389	2.6526

7.5 Strefy centralne

Pojęcie stref centralnych wiąże się z wpływem granic (*edge effect*) elementów krajobrazu na procesy ekologiczne. Wiele zjawisk i procesów wykazuje wrażliwość na bliskość granic. Ich wpływ może zależeć zarówno od rodzaju zachodzących procesów, jak i typu graniczących elementów krajobrazu. Strefy centralne (Rysunek 7.8) tworzą obszary wewnątrz danego elementu krajobrazu (oznaczone na szaro) odizolowane od brzegów strefami buforowymi

(szraf kreskowy). Głębokość strefy buforowej może być stała lub zależeć od rodzaju granicy, czyli klasy elementu graniczącego. Na Rysunku 7.8 w analizowanym elemencie widoczne są dwie oddzielne strefy buforowe. W szeregu badań zwraca się uwagę, że dla wielu procesów uwzględnienie brzegu jest istotne. Miary opisujące strefy centralne mogą być wyznaczone na poziomie elementów, klas i całego krajobrazu. Do podstawowych miar należą: powierzchnia stref centralnych, liczba stref centralnych oraz indeks powierzchni stref centralnych. Miary te są wyznaczone dla poszczególnych elementów, natomiast dla klas i całego krajobrazu opisuje się ich rozkład za pomocą wybranych statystyk.



Rys. 7.8 Strefy centralne tworzą obszary oddzielone od granic elementu buforem wewnętrznym.

Powierzchnia stref centralnych (*Core Area*) jest określona wyrażeniem:

$$CORE = a_{ij}^c \left(\frac{1}{10000} \right) \quad (7.14)$$

gdzie:

i – klasa,

j – numer elementu krajobrazu danej klasy,

a_{ij}^c – powierzchnia w (m^2) stref centralnych w elemencie krajobrazu ij .

Kolejna miara — liczba stref centralnych (*Number of Core Areas*) określa dla każdego elementu krajobrazu ilość stref centralnych powstałych przy danym buforze wewnętrznym:

$$NCORE = n_{ij}^c \quad (7.15)$$

gdzie:

i – klasa,

j – numer elementu krajobrazu danej klasy;

n_{ij}^c – liczba stref centralnych w elemencie krajobrazu ij .

Indeks powierzchni stref centralnych (*Core Area Index*) określa dla każdego elementu stosunek powierzchni stref do powierzchni elementu:

$$CAI = \frac{a_{ij}^c}{a_{ij}}(100) \quad (7.16)$$

gdzie:

i – klasa,

j – numer elementu krajobrazu danej klasy,

a_{ij} - powierzchnia w (m²) elementu krajobrazu ij ,

a_{ij}^c – powierzchnia w (m²) stref centralnych w elemencie krajobrazu ij .

Przy wyznaczaniu stref centralnych podstawowym zagadnieniem jest szerokość bufora wewnętrznego. Aby mógł on symulować rzeczywiste procesy ekologiczne, powinien zależeć nie tylko od rodzaju procesu, ale także od rodzaju granicy między elementami (kombinacji klas elementów graniczących). Poniżej przedstawione zostało porównanie średniej powierzchni stref centralnych, policzonych dwiema metodami dla różnych klas elementów krajobrazu przedstawionego na Rysunku 7.7a. W metodzie pierwszej przyjęto stały bufor wewnętrzny o rozmiarze 50 metrów, natomiast w drugiej zmienny bufor, zależnie od rodzaju granicy, od 100 do 0 metrów. Dla obszarów leśnych uzależniono szerokość bufora od rodzaju granicy. Dla granicy z innym rodzajem lasu przyjęto szerokość bufora wynoszącą 0 metrów, dla granic z polami 50 metrów, a dla obszarów zabudowanych 100 metrów.

Tab. 7.3 Średnie powierzchnie obszarów centralnych przy stałym i zmiennym buforze wewnętrznym

Klasy elementów	Średnia powierzchnia przy stałym buforze wewnętrznym 50m	Średnia powierzchnia przy zmiennym buforze wewnętrznym od 0 do 100 m
pola	97.1	127.5
las iglaste	86.2	99.1
lasy liściaste	71.1	89.7
mozajka upraw	23.9	37.8
uprawy i elementy naturalne	34.0	54.2
las mieszane	55.9	66.5
pastwiska	31.3	61.4
zarośla	16.1	20.9
wody	16.3	28.1
zabudowa	0.8	2.9

Istnieje alternatywna metoda wyznaczania miar obszarów centralnych oparta o tzw. MAT-konstrukcję. Jest ona tworzona za pomocą transformacji elementów krajobrazu (*Medial Axis Transformation*), która polega na tworzeniu i przekształceniu tzw. mapy głębokości. Jest to mapa odległości każdego piksela od granicy otaczającego go elementu krajobrazu. Przekształcenie

polega na usunięciu wszystkich pikseli, które nie mają charakteru lokalnych maksimumów (nie są otoczone przez komórki o mniejszych odległościach). Następnie dla każdego elementu obliczane są dwie statystyki średnia głębokość i maksymalna głębokość. Średnia głębokość (*Average Depth Index*) jest określona wyrażeniem:

$$ADEPTH = MAT_{AVE} * Cellsize - Cellsize \quad (7.17)$$

gdzie:

MAT_{AVE} – średnia głębokość (miarą jest liczba pikseli),

$Cellsize$ – rozmiar komórki.

Indeks ten jest pośrednio miarą wydłużenia poszczególnych elementów, ponieważ im bardziej elementy krajobrazu są wydłużone, tym mniejsze wartości będą osiągać lokalne maksima.

Maksymalna głębokość (*Maximum Depth Index*) jest obliczana z wyrażenia:

$$MDEPTH = MAT_{MAX} * Cellsize - Cellsize$$

gdzie:

MAT_{MAX} – maksymalna głębokość (miarą jest liczba pikseli),

(7.18)

$Cellsize$ – rozmiar komórki.

Wartość tej miary może być interpretowana jako „głębokość” najszerszej części elementu krajobrazu. Obie miary oparte o MAT mogą być wyznaczane dla pojedynczych elementów krajobrazu lub jako policzone z nich statystyki dla klas oraz całego krajobrazu.

7.6 Izolacja elementów krajobrazu

Pojęcie izolacji elementów krajobrazu jest istotne zarówno w badaniu procesów fragmentacji krajobrazu, jak i ochronie zagrożonych gatunków. Do jej analizy używa się dwóch modeli koncepcyjnych. W pierwszym, podstawą którego jest teoria wysp, badana klasa elementów jest postrzegana jako wyspy na jednorodnym tle. W drugim klasa otoczona jest mozaiką innych klas, o różnym stopniu podobieństwa do badanej. Najprostszą miarą izolacji, opartą o teorię wysp, jest odległość do najbliższego elementu danej klasy (*Euclidian Nearest-Neighbor Distance*), wyrażona wzorem:

$$ENN = h_{ij} \quad (7.19)$$

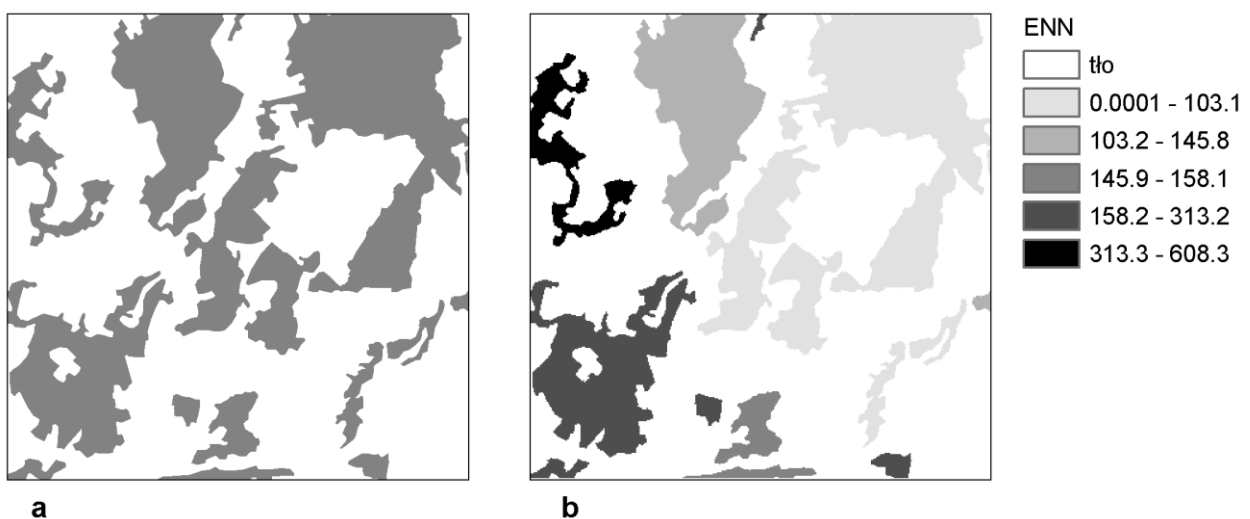
gdzie:

i – klasa,

j – numer elementu krajobrazu danej klasy,

h_{ij} – odległość elementu krajobrazu ij do najbliższego elementu danej klasy (m).

Odległość ta jest wyznaczana pomiędzy granicami elementów (ściślej pomiędzy środkami granicznych komórek). Miara ta może być wyznaczana dla poszczególnych elementów, albo analizie mogą być poddawane jej rozkłady statystyczne (statystyki) dla klas lub całego krajobrazu. Istotną wadą tej metody jest brak uwzględniania wielkości najbliższego elementu, co ma znaczenie w większości procesów ekologicznych. Na Rysunku 7.9b przedstawiono wartości indeksu *ENN* policzone dla poszczególnych elementów „wyspowego” krajobrazu (Rysunek 7.9a). Maksymalna wartość indeksu jest przypisywana elementowi o największej izolacji, czyli największej odległości do najbliższego sąsiada.



Rys. 7.9 Ocena izolacji poszczególnych elementów krajobrazu: a – krajobraz „wyspowy”; b – policzone wartości indeksu ENN.

Powierzchnia sąsiadujących elementów jest uwzględniana w indeksie opisującym stopień „bliskości” elementów (*Proximity Index*). Jest to miara względna, dla której definiuje się promień poszukiwania sąsiednich elementów (*Search Radius*). Indeks wyznaczany jest jako suma ilorazów powierzchni wszystkich znalezionych elementów i kwadratu oddzielającej je odległości. Wyrażenie obliczeniowe ma postać:

$$PROX = \sum_{s=1}^n \frac{a_{ijs}}{h_{ijs}^2} \quad (7.20)$$

gdzie:

i – klasa,

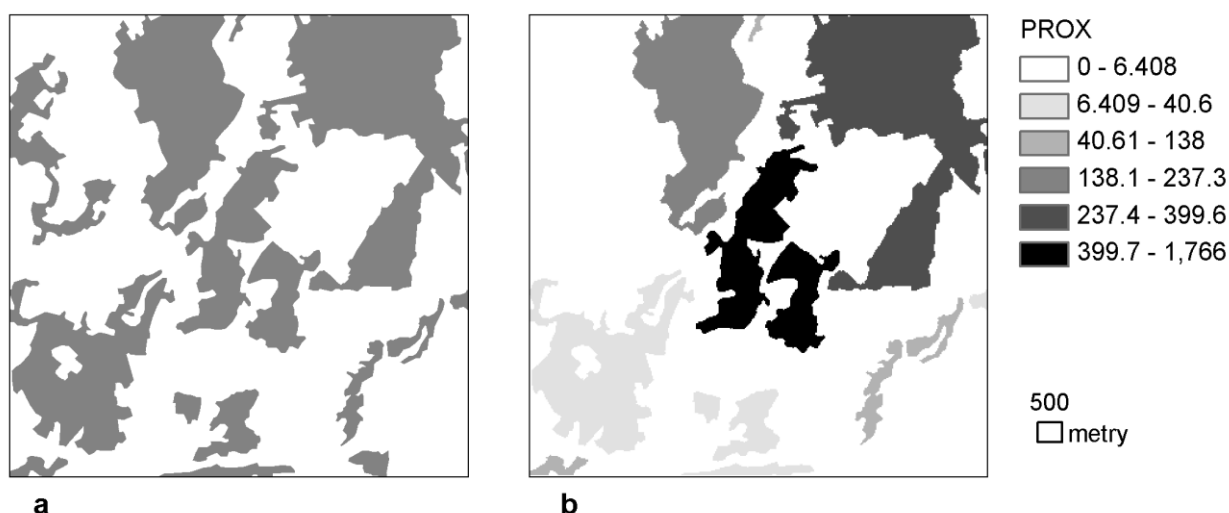
j – numer elementu krajobrazu danej klasy,

s – numer znalezionego elementu,

*a*_{ij_s} – powierzchnia w (m²) elementu krajobrazu *ij*,

h_{ij} – odległość elementu krajobrazu ij do elementu danej klasy (m).

Na Rysunku 7.10b przedstawiono policzone indeksy *PROX* dla krajobrazu „wyspowego” (Rysunek 7.10a jest identyczny z Rysunkiem 7.9a). W porównaniu z mapą indeksu *ENN* (Rysunek 7.9b) zaznacza się różnica w stopniu „bliskości do innych” poszczególnych elementów, ze względu na uwzględnianie ich powierzchni. Elementowi o największym indeksie *ENN* została przypisana wartość indeksu *PROX* równa 0, ze względu na to, że sąsiednie elementy są położone w odległości większej od promienia poszukiwania (500 m).



Rys. 7.10 Ocena „bliskości do innych” poszczególnych elementów krajobrazu: a – krajobraz „wyspowy”; b – policzone wartości indeksu *PROX*.

Oba przedstawione powyżej indeksy wykorzystują wyspowy model krajobrazu. Odpowiednikiem indeksu *PROX*, ale realizowanym dla modelu mozaikowego jest indeks podobieństwa (*Similarity Index*) oceniający podobieństwo elementu krajobrazu do elementów go otaczających w otoczeniu zdefiniowanym przez promień poszukiwania. Każdej klasie krajobrazu przypisany jest współczynnik podobieństwa d przyjmujący wartość od 0 (całkowity brak podobieństwa) do 1 (całkowite podobieństwo). Indeks ten ma postać:

$$SIMI = \sum_{s=1}^n \frac{a_{ijs} \times d_{ik}}{h_{ijs}^2} \quad (7.21)$$

gdzie:

i – klasa,

j – numer elementu krajobrazu danej klasy,

s – numer znalezionej elementu,

a_{ijs} – powierzchnia w (m^2) elementu krajobrazu ij ,

d_{ik} – podobieństwo pomiędzy elementem klasy i i klasy k ,

h_{ij} – odległość elementu krajobrazu ij do elementu danej klasy (m).

7.7 Granice i kontrast pomiędzy elementami krajobrazu

Granice oraz różnice pomiędzy sąsiadującymi ze sobą elementami krajobrazu mogą mieć istotny wpływ na różnorodne procesy ekologiczne. Granice mogą być opisane na poziomie klas lub krajobrazu za pomocą ich całkowitej długości lub gęstości. Miara opisująca całkowitą długość granic (*Total Edge*) jest wyrażona jako:

$$TE = \sum_{k=1}^m e_{ik} \quad (7.22)$$

gdzie:

i – klasa,

e_{ik} – długość (m) granic danego elementu krajobrazu danej klasy.

Gęstość granic (*Edge Density*) opisuje długość granic danej klasy na jednostkę powierzchni (na hektar) całego krajobrazu. Do jej obliczania używa się wyrażenia:

$$ED = \sum_{k=1}^m \frac{e_{ik}}{A} \cdot 10000 \quad (7.23)$$

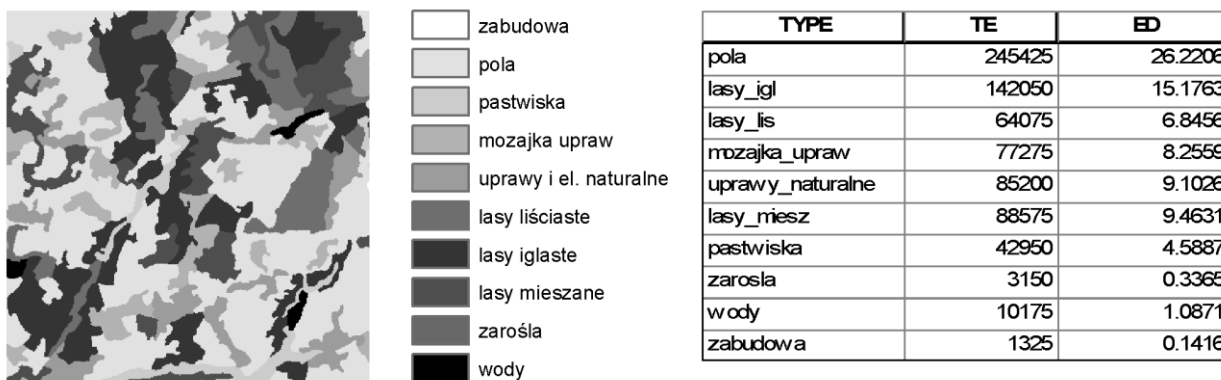
gdzie:

i – klasa,

e_{ik} – długość (m) granic danego elementu krajobrazu danej klasy,

A – całkowita powierzchnia krajobrazu (m^2).

Na Rysunku 7.11 przedstawiono policzone wartości tych miar dla poszczególnych klas krajobrazu.



Rys. 7.11 Całkowita długość granic elementów krajobrazu (TE) i indeks gęstości granic (ED).

Miary kontrastu opisują ekologiczne różnice pomiędzy danym elementem krajobrazu, a elementami z nim sąsiadującymi. Różnice między klasami definiuje się za pomocą współczynnika kontrastu, który przyjmuje wartości od 0 (brak kontrastu) do 1 (maksymalny kontrast). Wielkość tego współczynnika jest uzależniona od analizowanych procesów

ekologicznych. Podstawową miarą kontrastu jest indeks kontrastu na granicach (*Edge Contrast Index*) opisujący sumaryczny kontrast między elementem, a jego otoczeniem. Indeks ten jest niezależny od powierzchni elementu, a opisuje proporcję granic o znacznym kontraście. Wyrażony jest w procentach. Wartość 100% oznacza, że wszystkie jego granice charakteryzują się maksymalnie silnym kontrastem (wartość 1). Indeks opisuje wyrażenie w postaci:

$$ECON = \frac{\sum_{k=1}^m p_{ijk} * d_{ijk}}{p_{ij}} * 100 \quad (7.24)$$

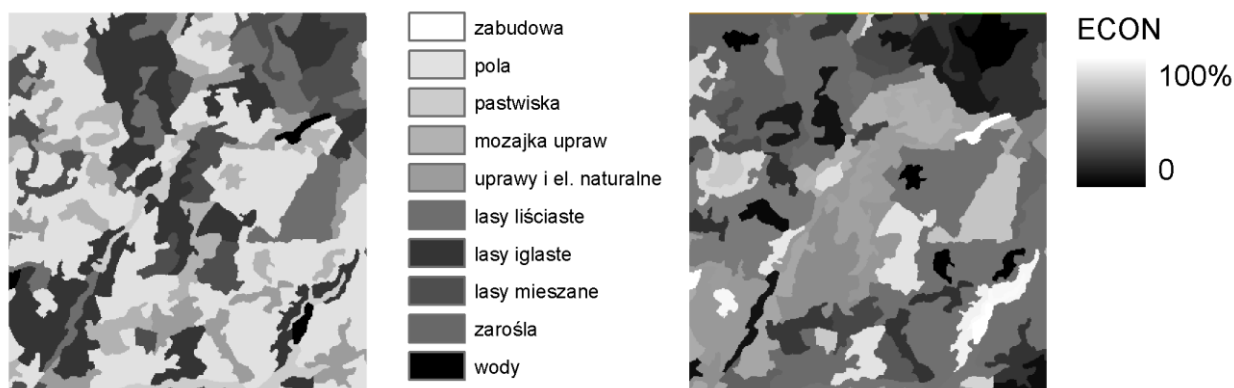
gdzie:

p_{ijk} – długość krawędzi elementu ij (m) graniczącej z elementami klasy k ,

d_{ik} – współczynnik kontrastu pomiędzy klasą i i k ,

p_{ij} – długość (m) obwodu elementu krajobrazu.

Na Rysunku 7.12 przedstawiono mapę indeksu policzoną dla analizowanego krajobrazu.



Rys. 7.12 Mapa indeksów ECON opisujących kontrast elementu względem elementów otaczających.

Statystyki wartości tego indeksu mogą być także obliczane na poziomie klas i całego krajobrazu.

7.8 Fragmentacja krajobrazu (landscape fragmentation)

Fragmentacja krajobrazu polega na zmianie struktury jego elementów prowadzącej do ich rozrywania, a następnie stopniowego zaniku. Istnieje kilka faz fragmentacji (Jaeger, 2000). Proces zaczyna się często od powstawania luk w pokryciu terenu lub pojawiania się szczelin, które ostatecznie mogą doprowadzić do rozpadu elementu na parę mniejszych części. Kolejnym często obserwowanym procesem jest oddzielanie się małych części od danego elementu na granicach i stopniowy ich zanik. Fragmentacja krajobrazu jest procesem, który prawie zawsze pociąga za sobą konsekwencje ekologiczne. Ze względu na to, że bardzo często jej przyczyną jest działalność człowieka, a rezultatem zmniejszanie bioróżnorodności i powstawanie

zagrożenia dla istnienia gatunków znajdujących się pod ochroną, jej analiza jest często stosowana w ochronie środowiska. Ilościowy opis fragmentacji prowadzi się w celu: (1) dokumentacji oraz przestrzennej i czasowej analizy jej trendów; (2) porównywania różnych obszarów pod względem ich fragmentacji (i jej konsekwencji) oraz do (3) oceny podejmowanych działań kompensacyjnych (Jaeger, 2000). Istnieje szereg miar ilościowych, które mogą być przydatne w tego typu analizach. Miarą posiadającą pewne ekologiczne znaczenie jest miara podziału krajobrazu (*Landscape Division Index*). Opisuje ona prawdopodobieństwo, że dwa losowo wybrane punkty nie znajdują się w tym samym jego elemencie. Dla organizmu będzie to oznaczać prawdopodobieństwo braku możliwości spotkania drugiego osobnika w elemencie krajobrazu, w którym się aktualnie znajduje. Miara ta na poziomie krajobrazu jest zdefiniowana jako:

$$DIVISION = \left[1 - \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \left(\frac{a_{ij}}{A} \right)^2 \right] \quad (7.25)$$

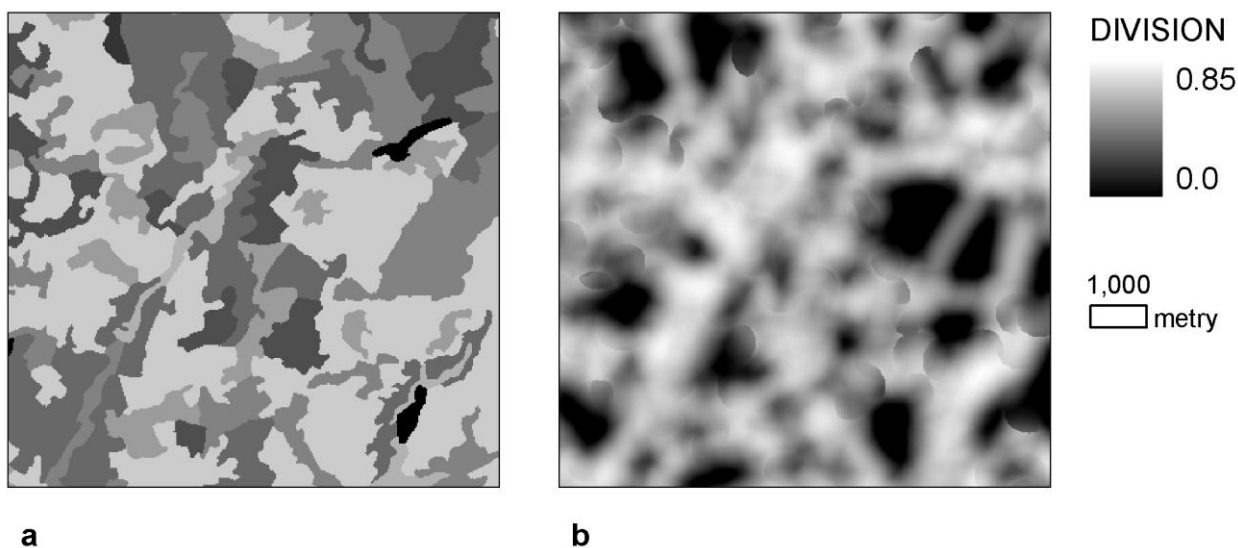
gdzie:

i – klasa,

a_{ij} – powierzchnia (m^2) elementu krajobrazu,

A – powierzchnia całego krajobrazu (m^2).

Miara ta może być wykorzystana lokalnie do tworzenia ciągłych map indeksu fragmentacji (DIVISION). Wartość indeksu jest obliczana dla każdej komórki na podstawie jej otoczenia określonego za pomocą koła lub kwadratu (o zadanym promieniu lub boku).



Rys. 7.13 Mapa indeksów DEVISION dla całego krajobrazu: a – mapa krajobrazu; b – mapa indeksu dla otoczeń kolistych o średnicy 1000 metrów.

Na Rysunku 7.13 przedstawiono mapę indeksów dla obszarów wyznaczonych przez koła o średnicy 1000 metrów. Są one liczone z uwzględnieniem wszystkich klas na danym obszarze i opisują fragmentację jego struktury. Miara ta może być także liczona dla jednej klasy za pomocą wyrażenia:

$$DIVISION = \left[1 - \sum_{j=1}^n \left(\frac{a_{ij}}{A} \right)^2 \right] \quad (7.26)$$

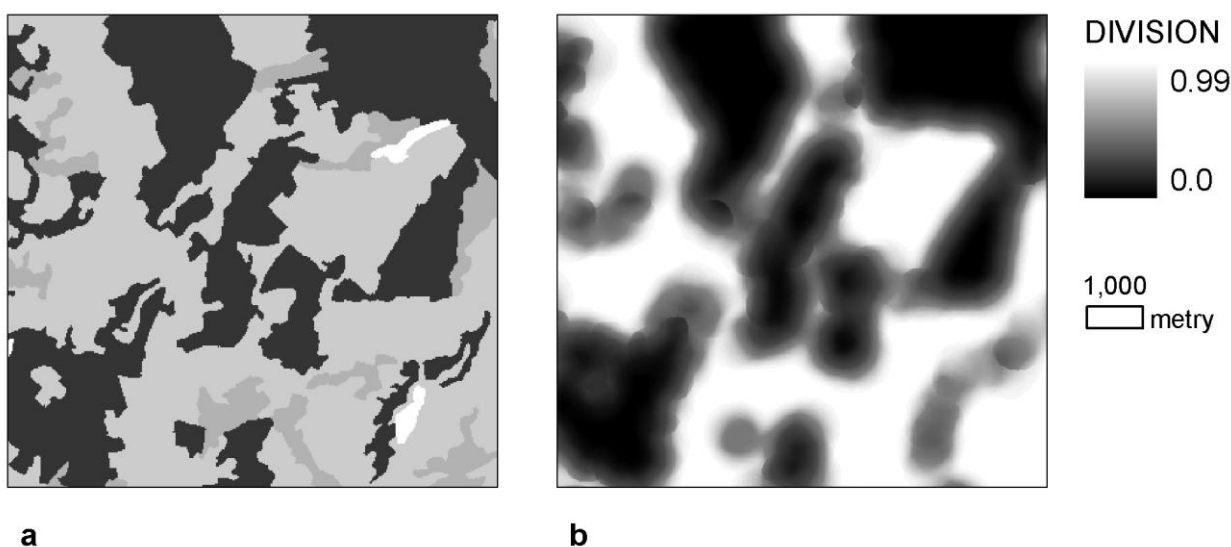
gdzie:

i – klasa,

a_{ij} – powierzchnia (m^2) elementu krajobrazu,

A – powierzchnia całego krajobrazu (m^2).

Na Rysunku 7.14 przedstawiono mapę indeksu (b) wyznaczoną dla jednej wybranej klasy dla identycznych jak poprzednio otoczeń.



Rys. 7.14 Mapa indeksów DIVISION dla wybranej klasy: a – krajobraz (wybrana klasa oznaczona ciemnym odcieniem); b – mapa indeksów dla otoczeń kolistych o średnicy 1000 metrów.

Przedstawione powyżej indeksy reprezentują miary odnoszące się do całych elementów krajobrazu. Istnieje druga grupa indeksów oparta na operacjach wykonywanych na poziomie komórek mapy rastrowej. Polegają one na zliczaniu różnych rodzajów połączeń (sąsiedztw) między komórkami. Sąsiadami dowolnej komórki mogą być komórki tej samej klasy, albo innych klas. Sumy połączeń pomiędzy komórkami różnych klas są zestawiane często w tablicy połączeń (*adjacency matrix*). Miarami tego typu jest procent identycznego sąsiedztwa (*Percentage of Like Adjancencies*) oraz indeks agregacji (*Aggregation Index*). Pierwsza z miar jest zdefiniowana jako:

$$PLADJ = \left(\frac{g_{ii}}{\sum_{k=1}^m g_{ik}} \right) \cdot 100 \quad (7.27)$$

gdzie:

g_{ii} – liczba połączeń pomiędzy komórkami danej klasy z komórkami tej samej klasy,

g_{ik} – liczba połączeń pomiędzy komórkami danej klasy a wszystkimi innymi komórkami.

Wartość indeksu jest wyrażona w procentach. Osiąga wartość zero przy maksymalnym rozproszeniu komórek danej klasy, czyli wtedy, gdy żadna z komórek nie graniczy z komórkami tej samej klasy. Im większa jest agregacja komórek, tym większa wartość indeksu. Wartość maksymalna (100%) zostanie osiągnięta wtedy, gdy cały krajobraz składa się z komórek jednej klasy. Indeks agregacji jest miarą podobną, ale liczba połączeń z komórkami identycznej klasy jest odniesiona do liczby połączeń przy maksymalnej agregacji danej klasy (pojedynczy element o maksymalnym skupieniu). Miara ta jest określona wyrażeniem:

$$AI = \left(\frac{g_{ii}}{\max \rightarrow g_{ii}} \right) \cdot 100 \quad (7.28)$$

gdzie:

g_{ii} – liczba połączeń pomiędzy komórkami danej klasy z komórkami tej samej klasy,

$\max \rightarrow g_{ii}$ – liczba połączeń pomiędzy komórkami danej klasy z komórkami tej samej klasy przy maksymalnej agregacji.

Na Rysunku 7.15 przedstawiono policzony procent identycznego sąsiedztwa i indeks agregacji dla analizowanego krajobrazu.



Rys. 7.15 Policzone miary procentu identycznego sąsiedztwa (*PLADJ*) i indeksu agregacji (*AI*).

7.9 Analiza łączności pomiędzy elementami krajobrazu

Miara łączności opisuje możliwość przemieszczania się organizmów pomiędzy elementami krajobrazu tej samej klasy. Uznaje się powszechnie, że jest to istotna charakterystyka struktury

krajobrazu. Istnieje jednak problem z jej ścisłym zdefiniowaniem. Jedną z miar używanych do opisu tej charakterystyki jest indeks połączeń (*Connectance Index*) opisujący procent funkcjonujących połączeń między elementami krajobrazu. Każda para elementów danej klasy krajobrazu może posiadać połączenie funkcjonujące, albo nieczynne. O tym, czy dane połączenie funkcjonuje, może decydować odległość pomiędzy elementami. Jeżeli odległość pomiędzy elementami jest mniejsza od pewnej wartości progowej, połączenie przyjmuje się za funkcjonujące, jeśli większa za niefunkcjonujące. Indeks połączeń zdefiniowany jest za pomocą wyrażenia:

$$CONNECT = \left[\frac{\sum_{j=k}^n c_{ijk}}{n_i(n_i-1)} \right] \cdot 100 \quad (7.29)$$

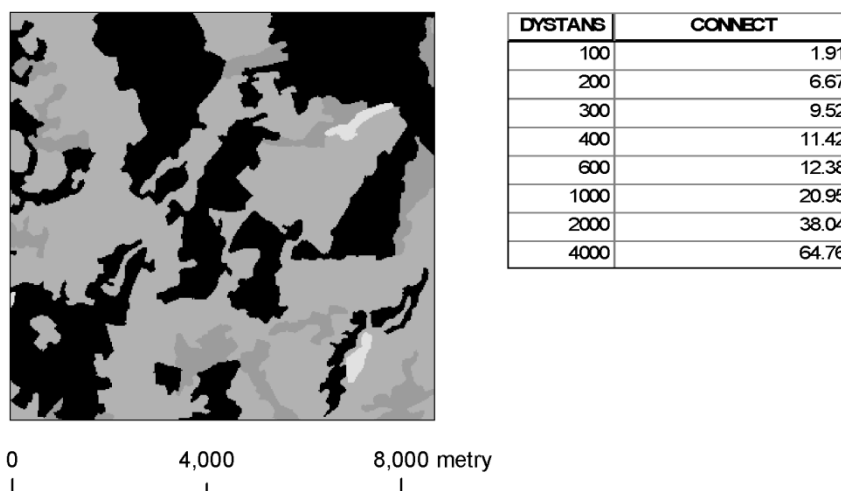
gdzie:

i – klasa,

c_{ijk} – stan połączenia pomiędzy parą elementów krajobrazu (j, k) tej samej klasy (0 – brak połączenia, 1 – połączenie),

n_i – liczba elementów krajobrazu danej klasy.

Ponieważ liczba funkcjonujących połączeń jest dzielona przez liczbę wszystkich możliwych połączeń, to jednostką tej miary są procenty. Wielkość ta opisuje procentowy udział funkcjonujących połączeń między elementami danej klasy przy zadanej wartości dopuszczalnej odległości pomiędzy elementami. Na Rysunku 7.16 pokazano, jak zmienia się ten indeks (dla klasy zaznaczonej najciemniejszym odcieniem) wraz ze zmianą odległości, przy której funkcjonuje połączenie między elementami.



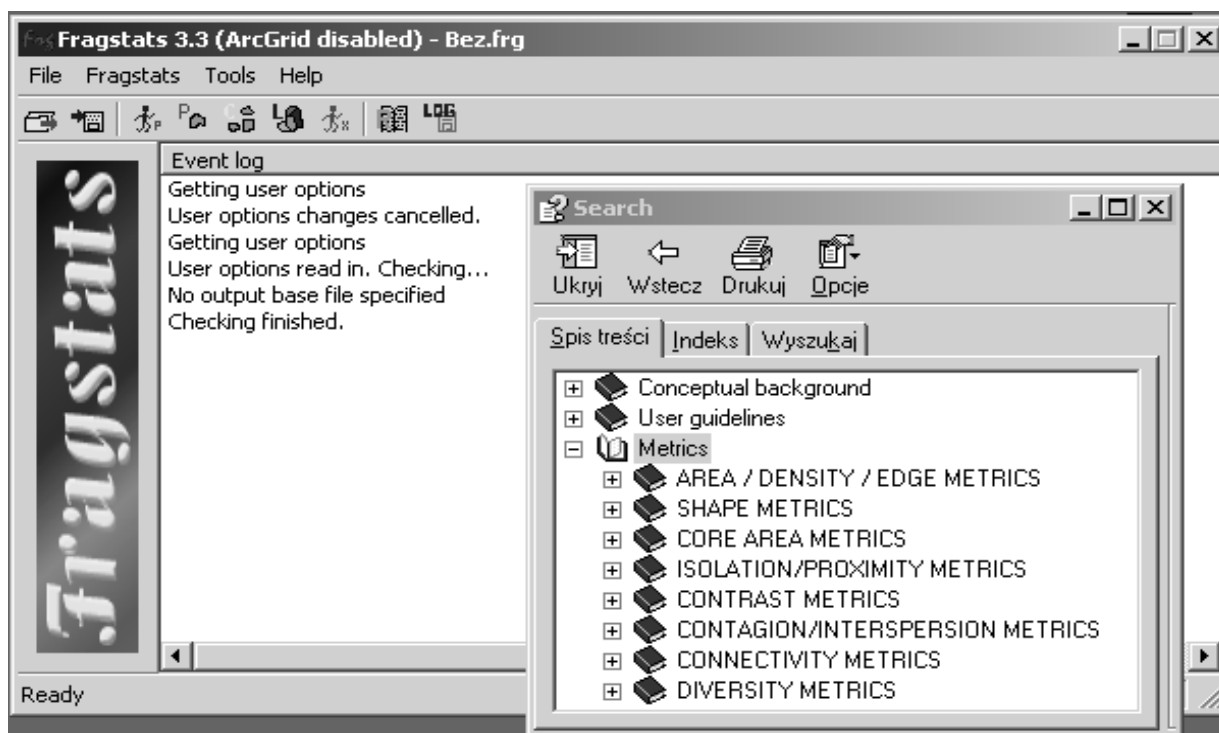
Rys. 7.16 Zmiany wartości indeksu CONNECT (w %) zależnie od przyjętego progu odległości.

Ramka 7.1

Program FRAGSTATS

<http://www.umass.edu/landeco/research/fragstats/fragstats.html>
(11.2006)

FRAGSTATS (McGargial i in., 2002) jest darmowym programem służącym do analizy przestrzennej rozmieszczenia elementów krajobrazu. Pracuje on z rastrowymi mapami jakościowymi, na których całkowitym identyfikatorom przypisane są klasy krajobrazu. Program używa następujących formatów danych rastrowych: ArcGRID, ASCII, binarny 8, 16 i 24 bitowy, oraz formatów programów ERDAS i IDRISI. Miary i ich statystyki obliczane są na trzech poziomach: elementów krajobrazu (*patch metrics*), klas krajobrazu (*class metrics*) oraz całego krajobrazu (*landscape metrics*).



Rys. 7.17 Program FRAGSTATS zawiera osiem grup statystyk używanych do analizy przestrzennej krajobrazu.

Praca z programem rozpoczyna się od określenia jego parametrów (*Set Run Parameters*), które mogą być następnie zapisane w tzw. Model file (*.frg). Dodatkowo tworzy się plik tekstowy opisujący właściwości poszczególnych klas o rozszerzeniu *.fdc (Class Properties File) w postaci:

```
112,zabudowa,true,false
211,pola,true,false
231,pastwiska,true,false
242,mozajka_upraw,true,false
243,uprawy_naturalne,true,false
311,lasy_lis,true,false
312,lasy_igl,true,false
313,lasy_miesz,true,false
324,zarosla,true,false
512,wody,true,false
```

Pierwsza kolumna zawiera identyfikatory klasy, druga ich opis, trzecia określa czy dana klasa ma być uwzględniana przy wyprowadzaniu wyników, a ostatnia czy klasa ma być traktowana jako tło. Kolejnym elementem w definiowaniu parametrów jest sposób prowadzenia analizy. Może on mieć charakter standardowy lub odbywać się za pomocą ruchomego okna o zadanych rozmiarach, o kształcie kwadratowym lub kolistym. Przy standardowym trybie analizy obliczone miary lub ich statystyki są wyprowadzane jako tekstowe pliki danych, natomiast przy wykorzystaniu ruchomego okna tworzone są z nich mapy rastrowe. Na poziomie analizy elementów krajobrazu każdemu elementowi przypisywany jest unikalny identyfikator. Istnieje możliwość utworzenia mapy rastrowej tych identyfikatorów, która następnie może posłużyć do przypisania obliczonych wartości zestawionych w tablicach w celu utworzenia map miar dla poszczególnych elementów. Program umożliwia obliczanie wielu miar, które zostały pod względem funkcjonalnym podzielone na osiem grup (Rysunek 7.17). Niektóre z nich wymagają tablic opisujących relacje pomiędzy poszczególnymi klasami (np. podobieństwo, kontrast). Są one tworzone jako pliki tekstowe (*.csv) w postaci:

```
FTABLE, 112, 211, 231, 242, 243, 311, 312, 313, 324, 512
112, 0, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1
211, 0.8, 0, 0, 0, 0, 0.5, 0.5, 0.5, 0.5, 1
231, 0.7, 0.1, 0, 0, 0, 0.4, 0.4, 0.4, 0.4, 1
242, 0.8, 0, 0, 0, 0, 0.4, 0.4, 0.4, 0.4, 1
243, 0.8, 0.1, 0.1, 0.1, 0.1, 0.3, 0.3, 0.3, 0.3, 1
311, 1, 0.5, 0.5, 0.5, 0.2, 0, 0, 0, 0.1, 0.2
312, 1, 0.5, 0.5, 0.5, 0.2, 0, 0, 0, 0.1, 0.2
313, 1, 0.5, 0.5, 0.5, 0.2, 0, 0, 0, 0.1, 0.2
324, 1, 0.5, 0.5, 0.5, 0.2, 0.1, 0.1, 0.1, 0, 0.3
512, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 0
```

W tablicy tej na przecięciu wierszy i kolumn umieszcza się wymagany parametr. Dostępne miary w każdej z grup zorganizowane są według poziomu analizy. Zawierają dokładny opis i sposób interpretacji rezultatów.

8. MODELOWANIE W GIS

Pojęcie modelowania ma dwa różne znaczenia w GIS. Po pierwsze odnosi się do modelu danych [patrz rozdział 3.2] określającego struktury danych przestrzennych (model danych wektorowych lub rastrowych) lub tworzącego reprezentację rzeczywistości przedstawioną za pomocą tych struktur. Reprezentację tą tworzy się najczęściej jako zbiór warstw, które mogą być dodatkowo łączone ze sobą za pomocą istniejących pomiędzy nimi relacji. Model danych, jako reprezentacja rzeczywistości, ma postać geobazy danych, która w sposób cyfrowy opisuje jej istotne cechy. Drugie znaczenie modelowania, o którym będzie mowa w tym rozdziale, odnosi się do procesów zachodzących w rzeczywistości zobrazonej modelem danych. Przykładowo za pomocą warstw DEM i pokrycia terenu możemy przedstawić obraz (model danych) wycinka powierzchni Ziemi. Następnie korzystając z opisanych w rozdziale 6 metod możemy analizować proces przemieszczania się wody po terenie, używając do tego sekwencji funkcji analitycznych. W rezultacie otrzymamy model GIS spływu wody opadowej po terenie. Należy zwrócić uwagę, że stanowi on połączenie modelu danych i matematycznego opisu zachodzących procesów, w tym przypadku fizycznych procesów związanych ze spływem wody:

$$\text{MODEL GIS} = \text{MODEL DANYCH} + \text{OPIS PROCESU}$$

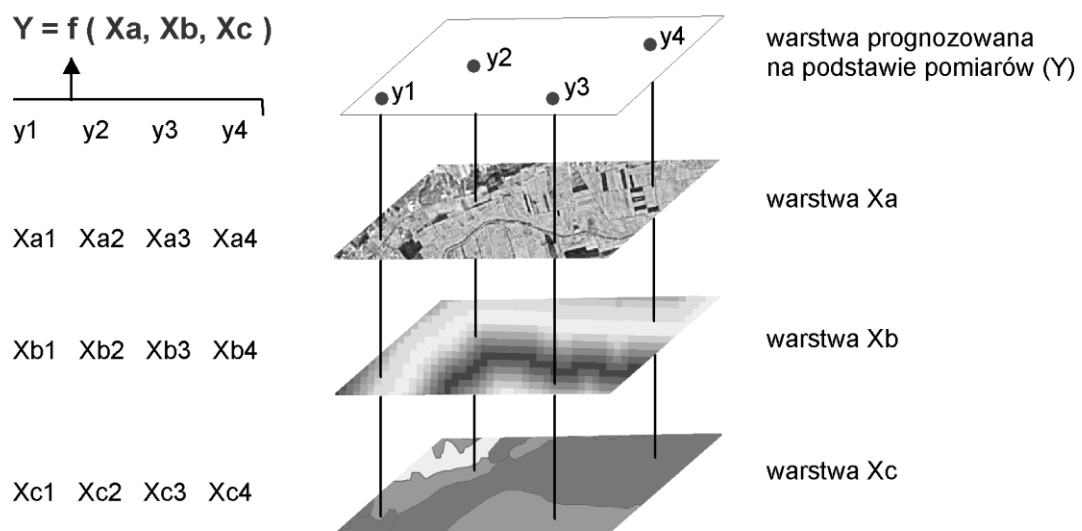
Jeżeli przedmiotem naszej analizy będzie wyznaczenie miejsc podatnych na erozję badane procesy fizyczne zostaną uzupełnione o procedurę definiowania miejsc zagrożonych. W ten sposób opis procesu w modelu GIS może być rozszerzony o wszystkie operacje związane z modelem danych, a nie ograniczy się tylko do zjawisk natury fizycznej czy biologicznej zachodzących na powierzchni Ziemi.

Większość autorów próbujących zdefiniować pojęcie modelu GIS jest zgodna, że celem tych modeli jest z jednej strony zrozumienie fizycznego (biologicznego) świata, a z drugiej dostarczenie narzędzi przydatnych do szeroko rozumianego zarządzania środowiskiem przyrodniczym. Cele te są realizowane za pomocą sekwencji operacji przeprowadzanych realizowanych w GIS na odpowiednim modelu danych. Tak szerokie rozumienie tego czym są modele GIS powoduje oczywiście problemy z ich klasyfikacją. Brak jest ogólnie przyjętego schematu klasyfikacyjnego, można natomiast wyodrębnić pewne rodzaje modeli, których nazwy i istota powtarzają się w artykułach i podręcznikach (Longley i inni, 2005, DeMers M.N., 2002, Berry J.K., 2006). Problematiczne jest także określenie wyraźnej granicy pomiędzy analizą i modelowaniem w GIS. Można przyjąć, że analiza koncentruje się na relacjach między danymi w GIS, a modelowanie na obrazie rzeczywistości. Modele GIS posiadają także szereg cech, które wyróżniają je od zwykłej sekwencji operacji analizy. Jedną z nich jest większy stopień

sformalizowania całego procesu jego powstawania. Model ma zwykle dokładnie określony cel lub odpowiada na konkretne pytanie. Istnieje jego dokumentacja i formalny zapis, który z jednej strony umożliwia analizę i weryfikację jego założeń oraz logicznej i funkcjonalnej spójności, a z drugiej wykorzystanie przez innych użytkowników GIS dla odmiennych warunków i danych. Model podlega zwykle walidacji, która ma na celu jego kalibrację i określenie jego stabilności. Granica jest oczywiście płynna i większość złożonych procesów analitycznych w GIS może być przedstawiona w postaci modelu GIS.

Klasycznym już pojęciem dotyczącym modelowania w GIS jest wprowadzone przez Tomlina (1990) modelowanie kartograficzne (*cartographic modeling*). Jest ono najczęściej definiowane jako sekwencja operacji w GIS, mających charakter zautomatyzowania technik manualnych. Przykładem takich operacji jest nakładanie lub buforowanie. Tego typu zabiegi, choć najczęściej bardzo pracochłonne, były stosowane w czasach, kiedy nie istniały mapy cyfrowe. Warstwy map były przedstawiane na przezroczystych kalkach, które następnie były na siebie nakładane tworząc wspólnie obraz, który był selektywnie kopiowany na nową kalkę. Warstwy GIS mogą być traktowane jako zmienne lub dwuwymiarowe tablice zmiennych, a relacje pomiędzy nimi, wyznaczone na podstawie praw fizyki lub zależności statystycznych mogą przyjmować postać matematyczną. Dla odróżnienia od modeli kartograficznych modele wykorzystujące relacje matematyczne nazywa się czasem modelami przestrzennymi (*spatial models*). Nie wszyscy autorzy używają tego rodzaju podziału i często pojęcie modeli przestrzennych jest używane dla określenia wszystkich modeli GIS. Biorąc pod uwagę rodzaj rozwiązywanego problemu można wydzielić trzy znaczące pod względem liczby aplikacji grupy modeli — są to modele wskaźnikowe, przestrzennych procesów fizycznych i regresyjne. Modele wskaźnikowe (*indicator models*) określają stopień przydatności różnych lokalizacji dla danego celu lub wrażliwości na określone zagrożenia. Rezultatem ich działania jest warstwa bezwymiarowych wskaźników. Mogą one mieć charakter binarny (teren nadaje się (1) lub nie (0)), porządkowy (średni, lepszy, najlepszy) lub ilościowy, wyrażony liczbami rzeczywistymi. Modelowanie wskaźnikowe zazwyczaj ma charakter modelowania kartograficznego i jest coraz częściej wykorzystywane do zarządzania środowiskiem przyrodniczym i w jego ochronie. Modelowanie procesów fizycznych wykorzystuje zapisane matematycznie teoretyczne zależności fizyczne, przy czym rolę zmiennych w tych zależnościach pełnią warstwy GIS. Modelowanie regresyjne (*regression modeling*) jest chyba najliczniej reprezentowanym typem modeli GIS w artykułach naukowych [patrz podroz. 2.4 i 2.5]. Jego idea przedstawiona na Rysunku 8.1 polega na estymacji (prognozie) nieznanych wartości (zmiennych) warstwy Y za pomocą funkcji regresji. Jest ona wyznaczana metodami statystycznymi na podstawie relacji

zmiennej estymowanej (zakłada się, że znane są jej wartości w pewnej liczbie punktów) i zmiennych na istniejących warstwach. W miejscach istniejących danych, w warstwie estymowanej pobiera się zmienne z istniejących warstw i na ich podstawie określa się funkcję (model regresji), która pozwala obliczyć dla każdego miejsca warstwy estymowanej nowe wartości na podstawie odpowiadających jej pod względem lokalizacji zmiennych z warstw znanych.



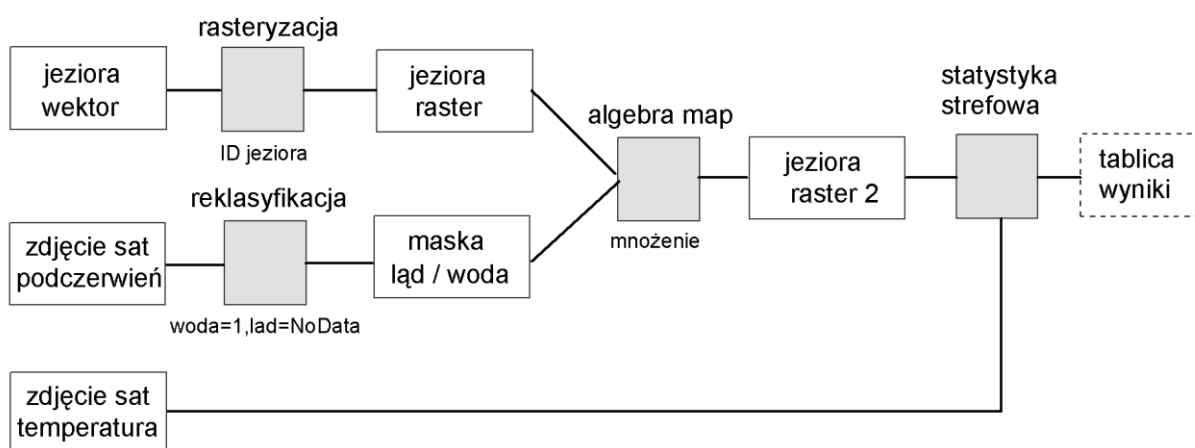
Rys. 8.1 Modelowanie regresyjne. Wartości w warstwie Y są prognozowane za pomocą funkcji pozwalającej je obliczyć na podstawie odpowiadających im wartości w szeregu warstw. Funkcja wyznaczana jest z analizy punktowych danych warstwy estymowanej i odpowiadającym im wartości z innych warstw.

Modele wskaźnikowe i regresyjne mają najczęściej charakter modeli statycznych, co oznacza że wartości warstw modelu danych nie ulegają zmianom w czasie. Modele, które uwzględniają zmienność w czasie noszą nazwę modeli dynamicznych i umożliwiają symulację procesów zachodzących w czasie. Przykładem takiego modelu jest model komórkowy, którego najbardziej znanym i popularnym przykładem jest model „*game of life*” (www.math.com/students/wonders/life/life.html). Innym często stosowanym w ekologii i badaniach społecznych typem modelu jest symulacja oparta na autonomicznych elementach (*agent-based model* ABM). W modelu tym każdy organizm (człowiek, roślina lub zwierzę) stanowi oddzielny element uczestniczący w symulacji dużych zbiorowisk. Istnieje wiele modeli o charakterze numerycznym, symulujących zjawiska i procesy fizyczne np. w atmosferze lub hydrosferze, które istnieją poza GIS. Tego typu modele mogą być w różnym stopniu integrowane z programami GIS, poczynając od wymiany danych wejściowych i wyjściowych, aż

po ich pełną implementację w GIS. Modele działające w środowisku GIS mogą być modelami deterministycznymi, czyli nie uwzględniać niepewności, bądź modelami stochastycznymi, zakładającymi, że analizowane zmienne są zmiennymi losowymi. Systemy GIS są wyposażone w funkcje generujące zmienne losowe o różnych rozkładach, mogą one być wykorzystywane także w procesie kalibracji modeli.

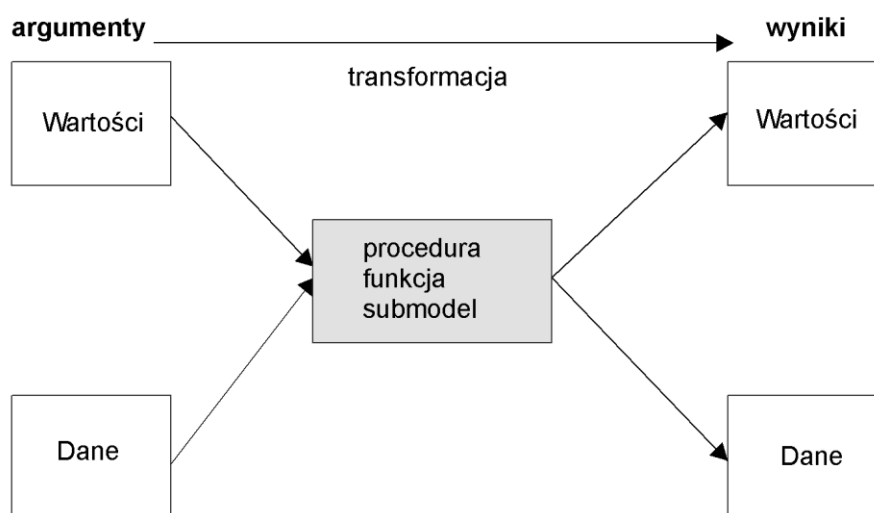
8.1 Tworzenie modelu GIS

Jak wspomniano wcześniej, jedną z cech różniących proces modelowania od analizy jest istnienie zapisu modelu, czyli sekwencji realizowanych operacji. Dokonuje się tego zarówno w trakcie jego tworzenia, jak i dokumentowania. Model może być sekwencją bardzo wielu operacji na różnych warstwach, przy czym jego przebieg może być uzależniony od rezultatów otrzymywanych na poszczególnych etapach. W efekcie może mieć on bardzo złożoną strukturę, co wymaga pewnej formy zapisu. Istniejący już model może pełnić rolę pojedynczej operacji w nowo tworzonym modelu jako tak zwany submodel. W modelach dynamicznych elementem modelu są struktury iteracyjne, które polegają na wielokrotnym powtarzaniu pewnych operacji, w których dane wyjściowe zrealizowanego kroku iteracyjnego używane są w następnym kroku jako dane wejściowe. Jak widać proces modelowania pod względem swojej istoty jest zbliżony do programowania. Dostępne operacje lub submodele pełnią rolę funkcji i procedur, a warstwy modelu danych rolę zmiennych. Podobnie jak w programowaniu, graficzną prezentacją przebiegu modelowania może być diagram blokowy (*flowchart*). Przykład takiego diagramu dla modelu obliczającego średnie temperatury wody powierzchni jezior na podstawie zdjęcia satelitarne został przedstawiony na Rysunku 8.2.



Rys. 8.2 Graficzna prezentacja modelu GIS wyznaczającego średnią temperaturę powierzchni jezior pewnego obszaru na podstawie zdjęcia satelitarne (kanał podczerwony i kanał z temperatura powierzchni Ziemi) oraz wektorowej warstwy obrysu jezior.

Model ten wykorzystuje zdjęcie temperatury powierzchni Ziemi do obliczenia średniej wartości temperatury powierzchni szeregu jezior, których obrysy zawarte są w warstwie wektorowej. Problem z wyznaczeniem tej wartości powodują tzw. piksele brzegowe, które leżąc częściowo na wodzie i lądzie nie powinny być brane pod uwagę. Aby je wyeliminować wykorzystano zdjęcie wykonane w podczerwieni, na którym za pomocą reklasyfikacji można łatwo wyodrębnić piksele położone całkowicie na wodzie. Korzystając z tej możliwości utworzono maskę ląd-woda. Proces modelowania przebiega w następujący sposób. Warstwa wektorowa obrysów jezior jest rasteryzowana, przy czym komórkom rastra zostają przypisane identyfikatory poszczególnych jezior. Warstwa ta jest mnożona przez maskę ląd-woda, aby wyeliminować komórki z pikselami brzegowymi. Następnie warstwa identyfikatorów jest traktowana jako warstwa stref, dla których oblicza się statystyki temperatury ze zdjęcia temperatury. Statystyki umieszczone są w tablicy, która jest wynikiem działania modelu. W trakcie pracy modelu generowane są warstwy tymczasowe, potrzebne w kolejnych krokach, ale nie będące jego wynikiem. Podstawowym elementem budowy modelu GIS są transformacje zmiennych (w postaci warstw wektorowych i rastrowych) oraz stałych (np. w formie tablic). Transformacji tych dokonuje się za pomocą procedur, funkcji lub submodeli. Ich wynikiem są nowe dane, które mogą podlegać kolejnym transformacjom. (Rysunek 8.3).



Rys. 8.3 Transformacja danych i wartości (argumentów) w wynikowe dane i wartości jest podstawowym elementem budowy modeli GIS.

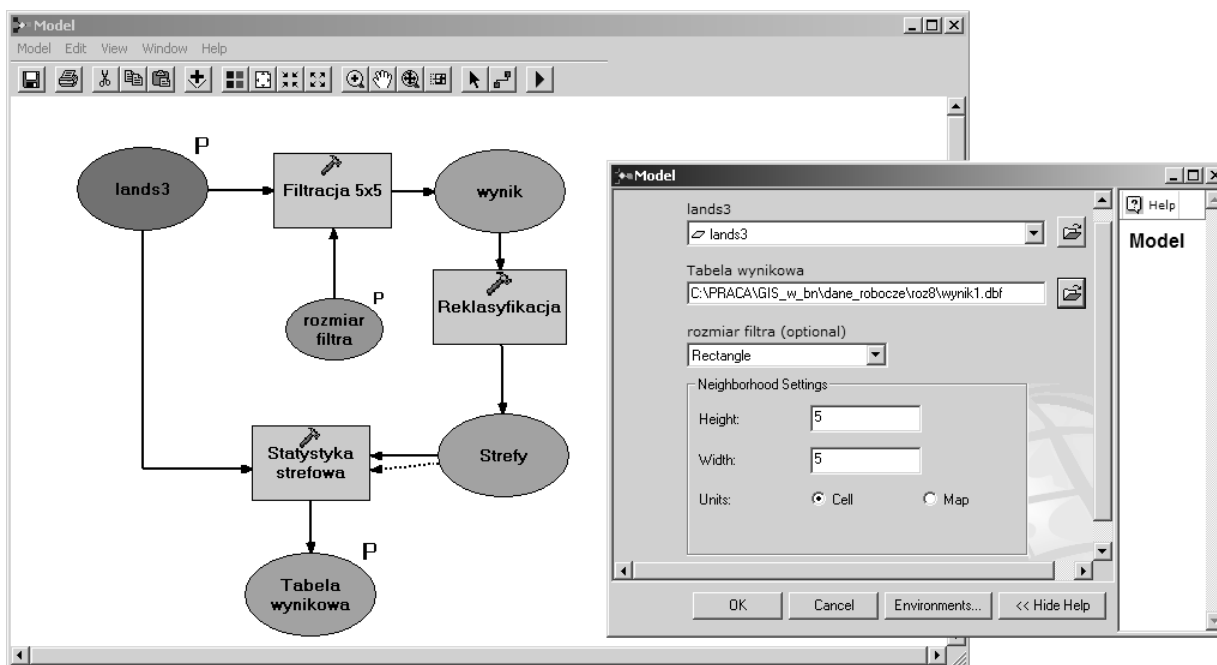
Model tworzony jest jako sekwencja połączonych ze sobą transformacji. Istotnym zagadnieniem staje się zatem sposób ich łączenia. Powinien on zapewnić pełną kontrolę nad działaniem modelu, czyli kolejnością wykonywanych transformacji. Tak jak w programowaniu, gdzie stosuje się instrukcje warunkowe i iteracyjne, podobne rozwiązania są wprowadzane do zapisu

modeli. Sam zapis modelu może powstać na kartce papieru. Aby został zrealizowany na podstawie szkicu w konkretnym oprogramowaniu GIS należałoby wykonywać funkcję po funkcji. Jest to możliwe, ale pracochłonne i nie daje możliwości uczynienia z modelu nowej złożonej procedury (submodelu), która mogłaby być wykonywana dla zmieniających się danych przez różnych użytkowników. W rozwoju oprogramowania GIS i IP istnieje obecnie tendencja do tworzenia graficznego interfejsu do budowania, testowania i wykonywania modeli GIS. Takie rozwiązania można znaleźć w takich programach jak ERDAS IMAGINE, IDRISI czy ArcGIS. Interfejs ModelBuilder programu ArcGIS został przedstawiony w Ramce 8.1.

Ramka 8.1

ModelBuilder w ArcGIS

Interfejs graficzny ModelBuilder w programie ArcGIS umożliwia tworzenie modelu GIS, jego testowanie, uruchamianie, tworzenie dokumentacji i zapisanie jako nowe narzędzie, które może być uruchomione po wprowadzeniu wymaganych parametrów.



Rys. 8.4 ModelBuilder graficzny interfejs służący do tworzenia modeli GIS w programie ArcGIS.

Na Rysunku 8.4 przedstawiono interfejs (większe okno) z zaprojektowanym modelem GIS. Celem modelu jest wykonanie filtracji zdjęcia satelitarnego, wyznaczenie stref za pomocą reklasyfikacji i obliczenie statystyk z wartości zdjęcia w każdej ze stref. Parametrami modelu są nazwa zdjęcia, nazwa tablicy wynikowej i parametry filtracji. Tworzenie modelu przebiega w następujący sposób. Testowe zdjęcie *lands3* zostaje przeciągnięte do obszaru roboczego interfejsu, gdzie zostaje umieszczone w formie elipsy. Następnie przeciągnięte zostają potrzebne narzędzia służące do filtracji, reklasyfikacji i statystyki strefowej. Każde z nich zostaje umieszczone na obszarze roboczym w formie prostokąta z symbolem narzędzia wraz z dołączoną strzałką elipsy danych wynikowych. Dane wejściowe (zdjęcie) i poszczególne pary (narzędzie i dane wynikowe) zostają ze sobą połączone w diagram blokowy za pomocą narzędzia

łączenia (aktywowanego przedostatnią ikonką). Ze względu na to, że zdjęcie jest argumentem dwóch narzędzi, wprowadzony został warunek wstępny, że operacja Statystyki strefowej może być wykonana dopiero, gdy utworzona zostanie warstwa stref (oznacza to druga przerywana strzałka). Rozstrzyga to problem, w jaki sposób (za którą strzałką od zdjęcia *lands3*) ma przebiegać praca modelu. Rezultatem operacji jest tabela wynikowa, która wraz ze zdjęciem zostały określone jako parametry (litera P). Rozmiar filtra, będący parametrem procedury filtracji, został określony jako zmienna w modelu i dodatkowo jako parametr. Zapisany model tworzy nowe narzędzie w ArcGIS. Jego uruchomienie powoduje pojawienie się okna (mniejsze okno na Rysunku 8.4), w którym po wpisaniu parametrów: nazwy dowolnego zdjęcia, nazwy tablicy wynikowej i metod filtracji można nacisnąć przycisk OK, aby wykonać model. Od wersji ArcGIS 9.2 ModelBuilder umożliwia modelowanie dynamiczne dzięki wprowadzeniu szeregu możliwości przebiegu procesu modelowania. Wprowadzono warunkową i bezwarunkową iterację, pozwalającą na tworzenie pętli w modelu, która wykonywana jest bądź do momentu osiągnięcia przez pewną wartość prawdy, bądź określoną liczbę razy. Do modelu jako dane wejściowe mogą być wprowadzane listy i serie danych. W przypadku listy poszczególne procedury modelu są realizowane dla każdego elementu listy, natomiast w przypadku serii danych dla każdego elementu realizowany jest cały model GIS. Oprócz instrukcji iteracyjnych wprowadzone zostały także instrukcje warunkowe oraz możliwość tworzenia wizualizacji modelowanych symulacji.

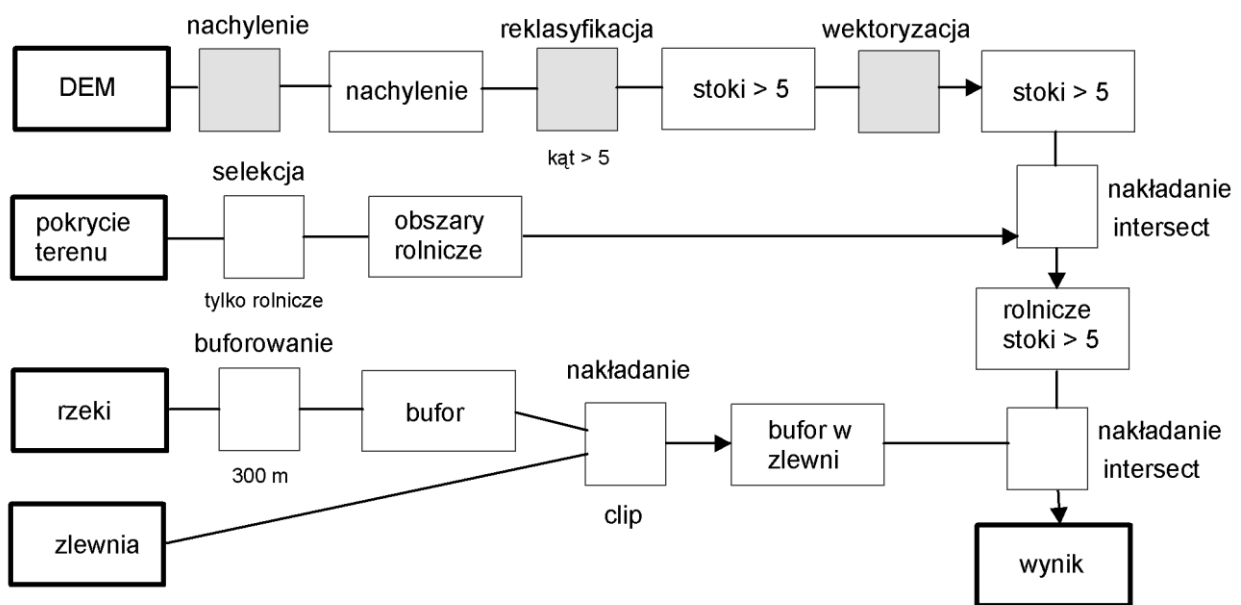
Podobnie jak w procesie programowania, budowa modelu jest procesem twórczym i kompleksowym, z trudem poddającym się prostemu schematowi zasad jego tworzenia. Niemniej podstawowym warunkiem sukcesu jest już na samym początku dokładne zdefiniowanie celu modelu oraz postaci rezultatów (warstwy lub wartości, względnie serii warstw przy procesie symulacji). Kolejnym krokiem powinno być utworzenie spisu wszystkich warstw i zmiennych, które mogą być rozważane jako dane wejściowe do modelu. Sam proces konstrukcji modelu często prowadzony jest wstecz od danych wynikowych do wejściowych. Początkowe prace koncepcyjne mogą polegać na szkicowaniu ogólnego schematu modelu. Na tym etapie bardziej złożone części modelu mogą być traktowane jako submodele, które będą potem rozpracowywane oddzielnie.

Graficzny interfejs nie jest jedynym sposobem tworzenia modeli w GIS. Większość systemów posiada możliwości tworzenia ich w skryptach lub językach programowania (np. Python, VBA w ArcGIS). Tworzenie modelu nie różni się wtedy od pisania programu, korzysta tylko ze specyficznych funkcji i procedur danego systemu.

8.2 Modelowanie wskaźnikowe (*indicator modeling*)

GIS od powstania był często postrzegany jako narzędzie służące do wspomaganie decyzji związanych z zarządzaniem środowiskiem przyrodniczym. Decyzje te wymagają brania pod uwagę bardzo wielu powiązanych ze sobą czynników z jednoczesnym uwzględnieniem ich aspektów przestrzennych. Pojęcia przydatności (*suitability*) danego obszaru do realizacji określonego zamierzenia lub wrażliwości (*vulnerability*) na zagrożenia są powszechnie używane w zarządzaniu środowiskiem przyrodniczym. Praktyka wykazała, że mapy przydatności i wrażliwości mogą w znaczący sposób poprawiać jakość podejmowanych decyzji. Są one też

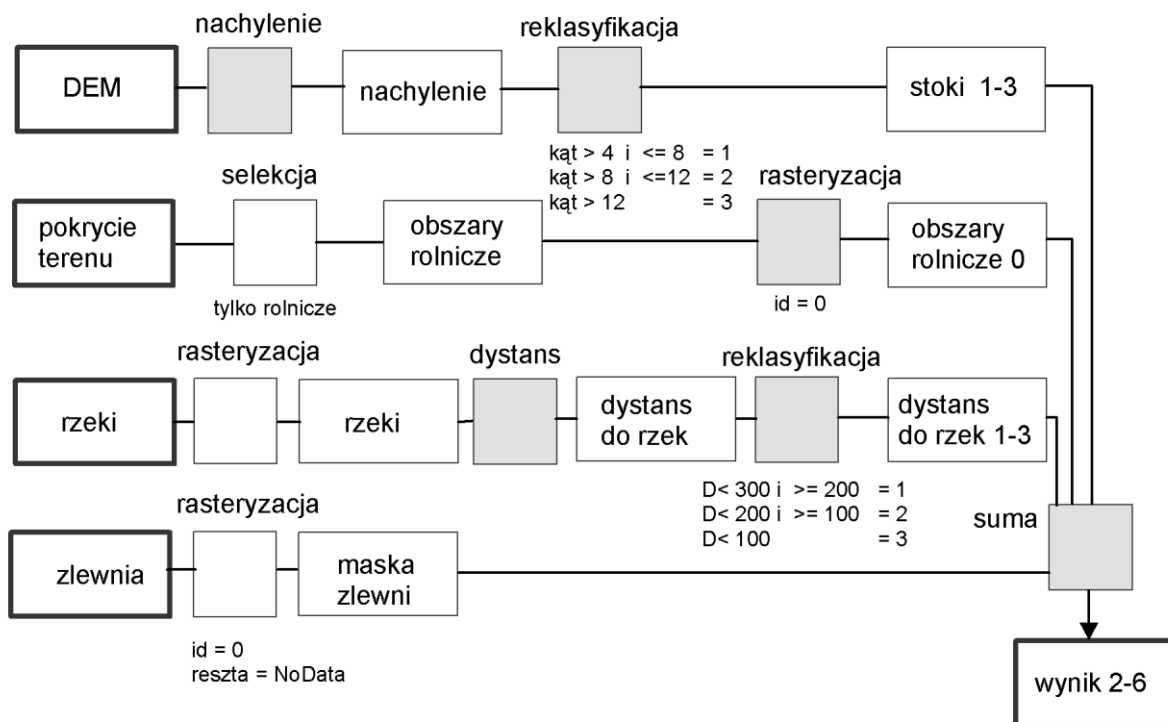
powszechnie wykonywane za pomocą GIS. Mapy te przedstawiają najczęściej za pomocą bezwymiarowej miary stopień zgodności z pewnymi założonymi warunkami lub wymogami. Najprostszym rodzajem miar są miary binarne, dzielące powierzchnię mapy na obszary przydatne i nieprzydatne lub na wrażliwe i niewrażliwe. Typowym i prostym przykładem projektu wykorzystującego tą metodę jest model ochrony wód podziemnych w środowisku krasowym, który wraz z danymi przykładowymi można znaleźć pod adresem (www.esri.com/news/arcuser/0704/files/modelbuilder.pdf). Ze względu na to, że zidentyfikowanym zagrożeniem wód podziemnych obszaru chronionego są substancje chemiczne używane w rolnictwie postanowiono utworzyć mapę miejsc będących potencjalnym źródłem tych zanieczyszczeń. Miejsca te zostały zdefiniowane jako obszary wykorzystywane rolniczo, leżące na stokach w pobliżu rzek i strumieni na obszarze zlewni, z której woda jest odprowadzana do obszaru chronionego. Zmodyfikowany schemat modelu został przedstawiony na Rysunku 8.5.



Rys. 8.5 Schemat modelu wyznaczającego obszary odpowiedzialne za zanieczyszczenie wód podziemnych. Prostokątami zaznaczono warstwy danych (pogrubiony obrys dla danych wejściowych i wyniku). Kwadraty oznaczają funkcje i procedury (funkcje rastrowe oznaczone na szaro).

Z lewej strony modelu umieszczono dane wejściowe. Ze względu na to, że DEM potrzebny jest do wyznaczenia stoków, część modelu była realizowana w modelu rastrowym (górna linia), po czym warstwa rastrowa stoków większych niż 5 stopni została zwektoryzowana. Kierunek działania modelu (strzałki) został zaznaczony tylko w najbardziej istotnych miejscach. Bufor rzek został przycięty wielobokiem zlewni, dzięki czemu jego nałożenie (*intersect*) ze stokami i obszarami rolniczymi dało pożądaný rezultat, eliminując nieistotne obszary. Przedstawiony

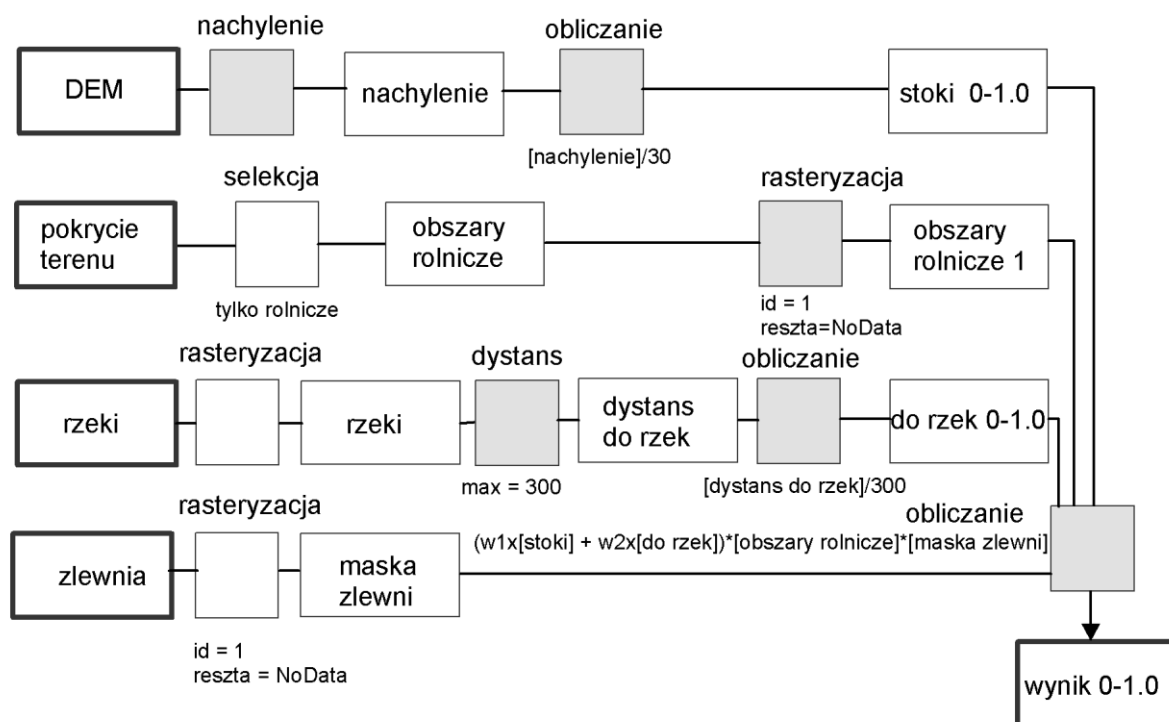
model ma charakter zero-jedynkowy. Stok o nachyleniu 5.01 jest uważany za istotny pod względem zagrożenia, a mający nachylenie 5 bezpieczny. Podobnie nie rozróżnia się obszarów o nachyleniu 5.1 leżących 200 m od rzeki, od mających nachylenie 10 stopni w odległości 30 metrów od rzeki. Na wynikowej mapie wszystkie obszary traktowane są tak, jakby stwarzały identyczne zagrożenie. Więcej informacji dostarczają mapy indykatorowe opisujące stopień zagrożenia, wrażliwości lub przydatności za pomocą rang (skali porządkowej). Modyfikacja modelu nadająca obszarom stwarzającym zagrożenie rangi w skali od 2 do 6 została przedstawiona na Rysunku 8.6.



Rys. 8.6 Schemat modelu wyznaczającego obszary odpowiedzialne za zanieczyszczenie wód podziemnych ze wskaźnikiem rangowym (od 2 do 6). Prostokątami zaznaczono warstwy danych (pogrubiony obris dla danych wejściowych i wyniku). Kwadraty oznaczają funkcje i procedury (funkcje rastrowe oznaczono na szaro).

W porównaniu z poprzednim modelem dużo większą rolę odgrywa modelowanie rastrowe, choć istnieje także możliwość zrealizowania tego modelu korzystając wyłącznie z funkcji wektorowych. W praktyce istnieje najczęściej wiele możliwości zaprojektowania modelu realizującego dane zadanie. Kryteriami przydatnymi do oceny poszczególnych wersji może być ich prostota, uniwersalność i możliwość rozbudowy. W modyfikowanym modelu rastrowe mapy nachylenia i odległości do rzek zostały zreklasyfikowane do trzech klas (nieprzynależnym do tych klas komórkom przypisano wartość NoData). Klasa o numerze 3 odpowiada randze

największego zagrożenia, a klasa o numerze 1 najmniejszego. Obszary rolnicze na mapie rastrowej mają wartość 0. Obszar zlewni także przyjmuje wartość zero, a obszary poza zlewnią mają wartość NoData. Dodanie tych czterech map daje sumy 2, 3, 4, 5 lub 6, odpowiadające stopniowi zagrożenia powodowanego przez poszczególne podobszary. Kolejnym możliwym rozwiązaniem przy tworzeniu modeli wskaźnikowych jest stosowanie wskaźników, będących liczbami rzeczywistymi, opisującymi podatność, wrażliwość lub zagrożenie w skali ciągłej. Metoda ta najczęściej skaluje każdy z czynników przypisując do niego indeks o wartościach od 0 do 1 (albo od 0 do 100 lub 255), a następnie oblicza średnią ważoną ze wszystkich czynników. Wagi dla poszczególnych czynników są określane na podstawie ich roli w analizowanym procesie. Zmodyfikowaną wersję analizowanego modelu dla wskaźników rzeczywistych przedstawiono na Rysunku 8.7.



Rys. 8.7 Schemat modelu wyznaczającego obszary odpowiedzialne za zanieczyszczenie wód podziemnych ze wskaźnikiem rzeczywistym (od 0 do 1.0). Prostokątami zaznaczono warstwy danych (pogrubiony obrys dla danych wejściowych i wyniku). Kwadraty oznaczają funkcje i procedury (funkcje rastrowe oznaczono na szaro).

Założono, że nachylenie na analizowanym obszarze nie jest większe od 30 stopni, a mapa dystansu była wyznaczana tylko do 300 metrów od rzek. W rezultacie powstała mapa przypisująca obszarom stanowiącym potencjalne zagrożenie wartości ciągłe od 0 do 1. Wagi mogą być potraktowane jako parametry modelu, co umożliwi łatwe porównanie rezultatów przy ich różnych wartościach.

8.3 Modelowanie przestrzenne (*spatial modeling*)

Modelowanie procesów fizycznych, ale także biologicznych jest istotnym elementem nauk przyrodniczych. Zależności pomiędzy zmiennymi mogą być przedstawiane za pomocą wyrażeń matematycznych, wynikających z praw fizyki lub wyprowadzonych empirycznie. Jeżeli w danym procesie znaczącą rolę odgrywa aspekt przestrzenny, to GIS może być właściwym miejscem do budowy i wykorzystywania takiego modelu. Większość modeli GIS, które powstały do tej pory, ma charakter statyczny. Jednak w ostatnich latach, ze względu na rozwój narzędzi do modelowania dynamicznego oraz na stały wzrost prędkości przetwarzania danych w systemach komputerowych, istnieje wyraźna tendencja do tworzenia w GIS modeli symulacyjnych (dynamicznych). Największą grupę wśród modeli, które powstały do tej pory, stanowią analizy procesów, w których zmiennymi są ukształtowanie terenu (DEM), pokrycie terenu oraz sieć wodna. Implementacja tych modeli w GIS wynikała przede wszystkim z istnienia w systemie gotowych narzędzi analitycznych przydatnych do budowy modelu. Przykładami takich modeli mogą być empiryczny model erozji gleb USLE [patrz podroz. 6.4.3], w którym współczynnik zdolności transportowej osadu zależy od nachylenia stoku, lub modelowanie promieniowania słonecznego dochodzącego do powierzchni Ziemi. Ilość promieniowania słonecznego, która dociera do danego miejsca powierzchni terenu zależy nie tylko od jego nachylenia i ekspozycji, co w łatwy sposób może być obliczone z warstwy DEM, ale także zacielenia topograficznego [patrz podroz. 6.4.4], które ma charakter globalnej funkcji przestrzennej.

Jako przykład prostego statycznego modelu przestrzennego wykorzystującego prawa fizyki może posłużyć model GIS, określający roczny dopływ promieniowania słonecznego do dna zbiornika. Sumaryczny dopływ promieniowania słonecznego (a ściślej fotosyntetycznie aktywnej radiacji PAR będącej jego częścią) do powierzchni zbiornika może być określony dla poszczególnych miesięcy w kWh/m². Oświetlenie na poziomie dna jest uzależnione od głębokości i współczynnika osłabiania oświetlenia i może być obliczona za pomocą wyrażenia:

$$I_z = I_0 e^{-cz} \quad (8.1)$$

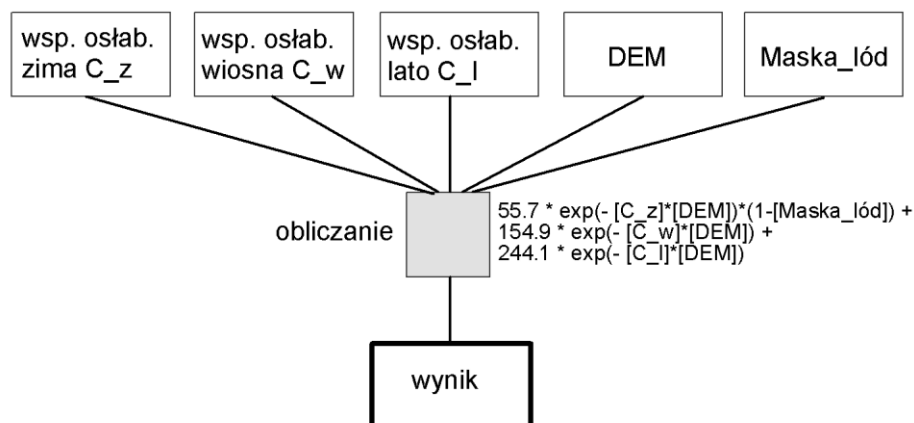
gdzie: I_z – oświetlenie na głębokości z ,
 I_0 – oświetlenie na powierzchni,
 c – dyfuzyjny współczynnik osłabiania oświetlenia odgórnego
(uśredniony w kolumnie wody).

Zarówno głębokość, jak i współczynnik osłabiania światła są zmiennymi o charakterze przestrzennym, przezroczystość wody zmienia się ponadto sezonowo. W badanym akwenu

wydzielono trzy sezony: zimowy, wiosenny i letni dla których wykonano mapy przeciętnego rozkładu współczynnika osłabiania. Obliczono, że w okresach tych do powierzchni zbiornika dociera odpowiednio:

sezon zimowy (od października do lutego)	55.7 kWh / m ² ,
sezon wiosenny (od marca do maja)	154.9 kWh / m ² ,
sezon letni (od czerwca do września)	244.1 kWh / m ² .

Dodatkową komplikację powoduje zlodzenie, które pokrywa część zbiornika w okresie zimowym i całkowicie odcina wtedy dopływ światła. Dla uwzględnienia tego czynnika w modelowaniu utworzono mapę prawdopodobieństwa występowania lodu w sezonie zimowym. Na mapie tej wartość 1.0 oznacza, że przez całą zimę w danym miejscu występuje lód, a 0.1 że lód występuje przez 10% dni zimowych. Model, którego celem było stworzenie mapy rocznego dopływu światła do dna został przedstawiony na Rysunku 8.

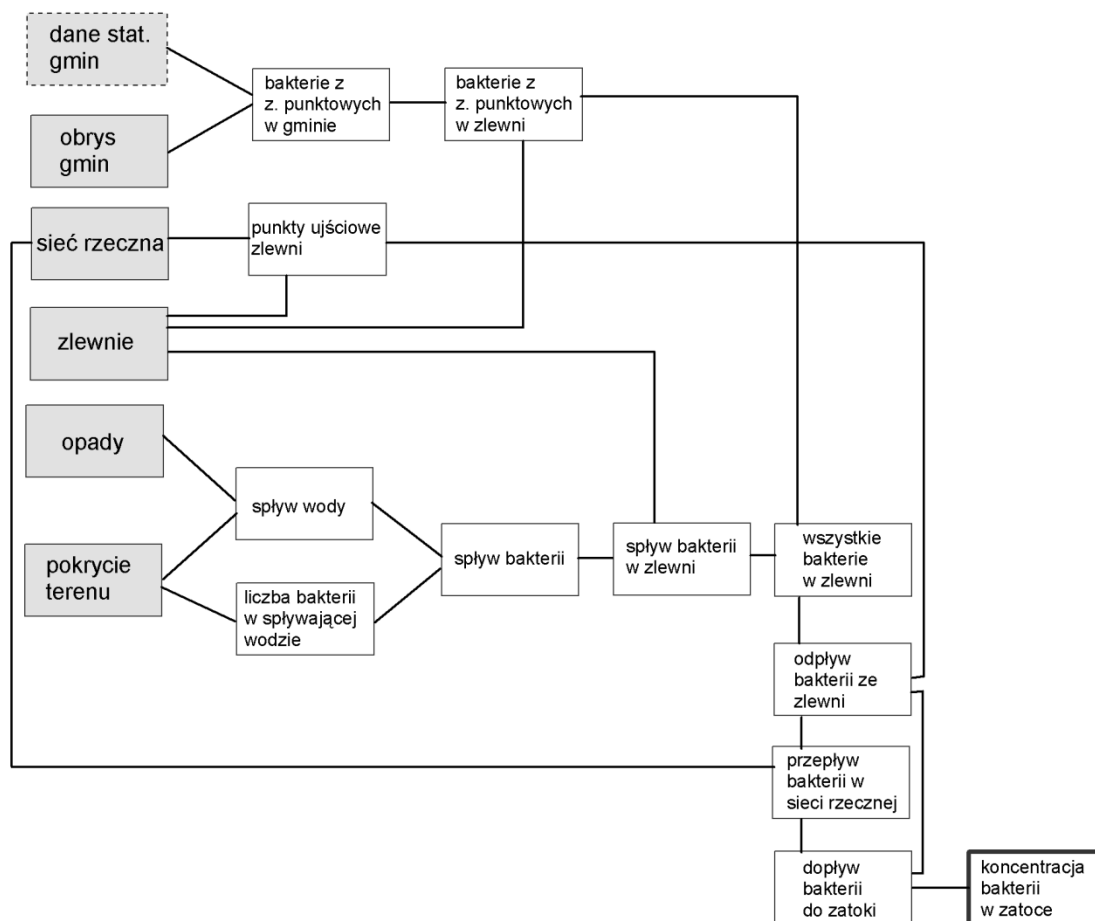


Rys. 8.8 Model tworzenia mapy rocznego dopływu promieniowania do dna uwzględniający istnienie lodu w zimie i trzech sezonów przezroczystości wody, charakteryzowanych różnym przestrzennym rozkładem współczynników osłabiania światła.

Ma on bardzo prostą strukturę i polega na wykonaniu algorytmu będącego sumą trzech wyrażeń, obliczających ilość promieniowania docierającego do każdej komórki rastra w danym sezonie za pomocą przedstawionego powyżej fizycznego wzoru. Dodatkowo dla sezonu zimowego uwzględnia się wagę odpowiadającą proporcji dni bez lodu. Tego typu prosty model może posłużyć do odpowiedzi na pytanie, o ile zmieni się ilość światła docierająca do dennego habitatu (np. łąki podwodnej) o określonych rozmiarach przestrzennych, jeśli w sezonie letnim współczynnik osłabiania światła wzrośnie o 10%, albo pokrywa lodowa będzie trwała dwa razy dłużej.

Istnieje szereg procesów, które ze względu na swój przestrzenny charakter, kompleksowość i rodzaj danych trudno jest modelować poza systemami GIS. Jednym z nich jest

modelowanie dopływu zanieczyszczeń ze źródeł nie-punktowych (rozproszonych). Dotyczy to głównie substancji odżywczych (związków azotu lub fosforu), zawiesiny oraz zanieczyszczeń bakteryjnych, które dostają się do zbiorników wodnych wraz ze spływającą po terenie wodą pochodzenia deszczowego i są często główną przyczyną eutrofizacji oraz zanieczyszczenia wód w rejonie kąpielisk. Modelowanie tego procesu oraz analiza przestrzenna rezultatów w środowisku GIS może pozwolić na identyfikację obszarów, w których powinny zostać podjęte kroki dla poprawy sytuacji lub poznanie przyszłych skutków ewentualnych zmian w środowisku. Do modelowania dopływu ze źródeł nie-punktowych wykorzystuje się przestrzenny rozkład opadów, pokrycie terenu, model sieci rzecznej i dostępne informacje statystyczne np. o liczbie hodowanych zwierząt (Gibson C, 2005). Poniżej na Rysunku 8.9 przedstawiono ideowy schemat modelu GIS zanieczyszczenia bakteryjnego zatoki morskiej.



Rys. 8.9 Ideowy schemat modelu GIS zanieczyszczenia bakteryjnego zatoki morskiej (na podstawie Gibson C., 2005, zmodyfikowane).

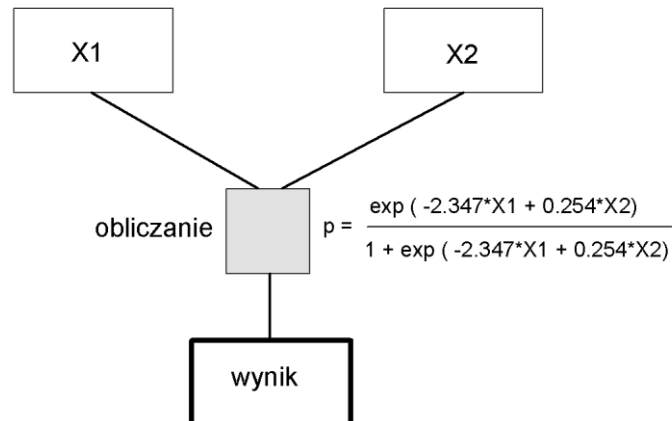
Przedstawiony schemat nie zawiera informacji o użytych funkcjach, pełni tylko rolę planu modelu dla zilustrowania jego wewnętrznej logiki i zaplanowania potrzebnych submodeli. Celem modelu jest mapa średniej koncentracji bakterii w zatoce. Ze względu na to, że tego typu

informacja może być otrzymana z pomiarów, daje ona możliwość kalibracji modelu. W modelu wykorzystuje się zarówno źródła punktowe, jak i nie-punktowe bakterii na obszarze zlewiska danego akwenu. Źródła punktowe zestawione są dla poszczególnych gmin i dotyczą: liczby zwierząt hodowlanych, oczyszczalni ścieków, nieszczelnych instalacji sanitarnych, kolonii ptaków itp.. Każdemu źródłu punktowemu (np. krowie) przypisana jest liczba bakterii wytworzona w ciągu roku. Zostają one zsumowane i przypisane danej gminie jako sumaryczna liczba bakterii ze źródeł punktowych wytworzona na jej obszarze. Ich liczbę w każdej zlewni można obliczyć stosując metody przypisania atrybutów jednej warstwy poligonów drugiej, na podstawie ich relacji przestrzennych. Liczba bakterii ze źródeł nie-punktowych jest przypisana do różnych rodzajów pokrycia terenu i wyrażona jako stężenie bakterii w jednostce spływającej po niej wody. Ilość spływającej po terenie wody jest funkcją rodzaju pokrycia terenu i wielkości opadu. Wykorzystując mapę spływającej po terenie wody i stężenie zawartych w niej bakterii, można określić liczbę bakterii ze źródeł nie-punktowych spływającą rocznie z każdej zlewni. Po dodaniu źródeł punktowych otrzymujemy sumaryczne liczby bakterii dostarczanych przez poszczególne zlewnie. Stężenie bakterii spływających rzekami w kierunku zatoki ulega zmianom w czasie w rezultacie ich śmiertelności. W celu modelowania tego zjawiska dzieli się zlewnie na takie, z których następuje bezpośredni spływ do zatoki i takie, z których woda odprowadzana jest siecią rzeczna. Z sieci rzecznej wyznacza się punkty ujściowe zlewni, do których przypisuje się liczbę bakterii w zlewni, pomniejszoną o część wynikającą ze średniego czasu dotarcia do tych punktów, tworząc mapę odpływu bakterii ze zlewni. Analizując przepływ bakterii w sieci rzecznej i związaną z tym ich śmiertelność określa się ostateczny dopływ bakterii do zatoki, który następnie może zostać przeliczony na wartość ich stężenia.

Ważnym elementem tworzenia modelu jest jego kalibracja i badanie stabilności. Kalibracja polega na porównaniu modelowanych rezultatów z prawdziwymi i takiej zmianie parametrów modelu, aby zapewnić jak największą zgodność wyników z rzeczywistością. Stabilność modelu polega natomiast na tym, aby niewielkie zmiany w danych lub parametrach nie powodowały dużych zmian w wynikach modelu. Przy badaniu stabilności stosuje się często metodę Monte Carlo, polegającą na generowaniu losowych map błędów i dodawaniu ich do map wejściowych modelu. Realizacja modelowania generuje mapę wynikową obarczoną błędami powstałymi w rezultacie propagacji w modelu błędów jakimi są obarczone dane wejściowe. Powtórzenie tej czynności szereg razy daje możliwość generacji średniej mapy błędów rezultatów, a na jej podstawie oceny czy wprowadzane błędy w znaczący sposób zmieniają wyniki modelowania.

8.4 Modelowanie regresyjne (regression modeling)

Modelowanie regresyjne (Rysunek 8.10) wykorzystuje do tworzenia nowych warstw przedstawione matematycznie zależności pomiędzy zmiennymi (warstwami). Przykładowo posiadając warstwy opisujące środowisko przyrodnicze (zmiennie niezależne) i stwierdzone miejsca występowania danego gatunku (zmienna zależna) poszukuje się zależności, która za pomocą wyrażenia matematycznego pozwoli na obliczenie prawdopodobieństwa występowania danego gatunku w miejscu, dla którego znamy wyłącznie zmienne niezależne.



Rys. 8.10 Modelowanie regresyjne polega na obliczeniu wartości komórek warstwy nieznaney (zmiennej niezależnej) na podstawie warstw znanych (zmiennie zależne X1 i X2) korzystając z statystycznej zależności w postaci równania regresji, otrzymanego z ograniczonego zbioru zmiennych zależnych i odpowiadających im zmiennych niezależnych.

W podrozdziale [patrz podroz. 2.4] opisano szereg prac badawczych wykorzystujących różne, głównie statystyczne metody wyznaczania równań regresji. Ich nawet najbardziej ogólny opis wykracza poza ramy tej książki. Równania te są wyznaczane poza systemem GIS w programach statystycznych. Jednym z systemów zyskujących coraz większe uznanie wśród badaczy korzystających z GIS jest „R”, o którym krótka informacja została przedstawiona w Ramce 8.2

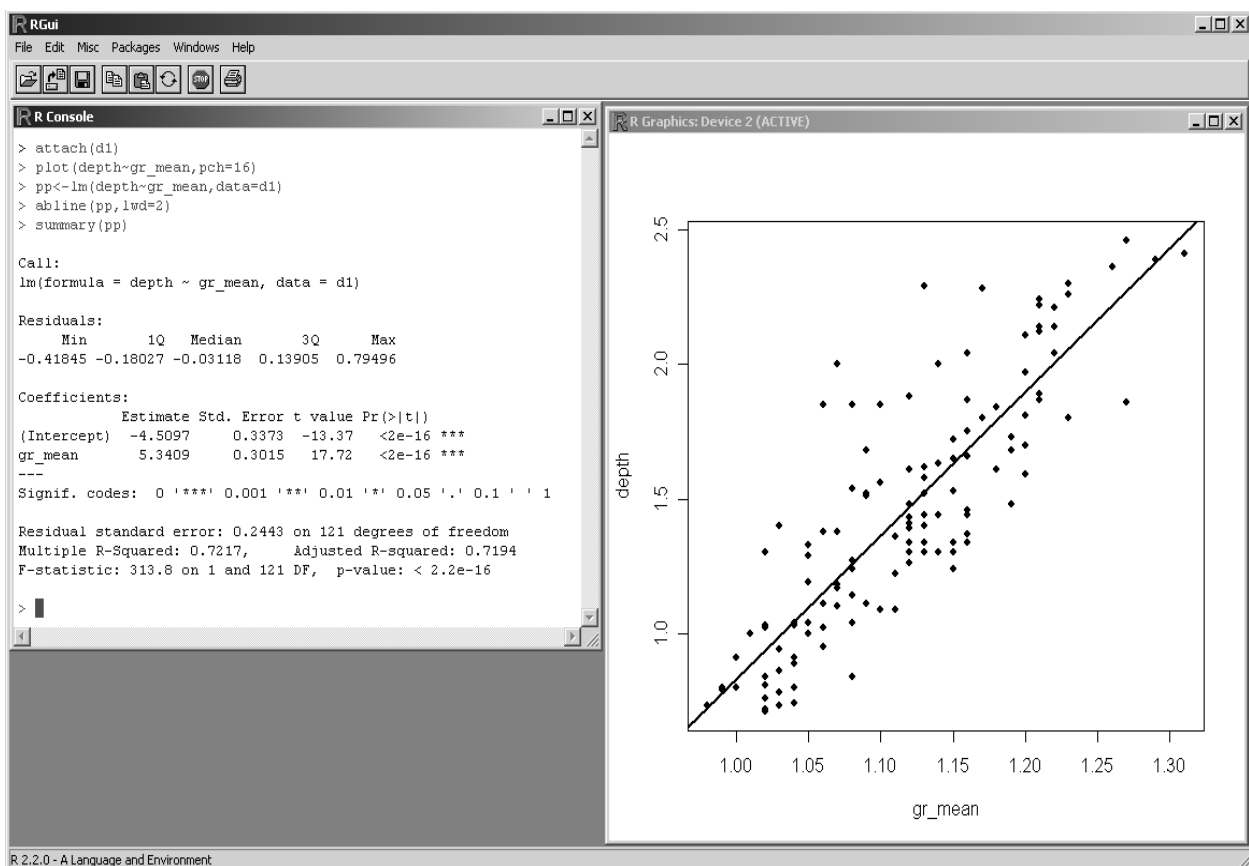
Ramka 8.2

R — program naukowy do analizy danych

<http://cran.r-project.org/>
(6.2007)

R (tworzony przez R Core Development Team) jest darmowym systemem będącym dialektem języka S, powstałym w AT&T Bell Laboratorium, służącym do naukowej i statystycznej analizy danych oraz graficznej wizualizacji jej wyników. R powstał jako narzędzie dla badaczy, które w naturalny sposób jest

przez to środowisko ciągle rozwijane dzięki możliwości swobodnego dodawania pakietów z funkcjami wykorzystującymi nowe metody analizy danych. Stworzone zostały między innymi pakiety do wymiany danych z systemami GIS i realizujące nowe metody analizy danych przestrzennych. Dostępne są specjalne pakiety funkcji do analizy statystycznej danych ekstremalnych lub danych klimatycznych. **R** jest programem, w którym pracuje się podając odpowiednie komendy (Rys. 8.10). Tworzone są jednak także graficzne interfejsy ułatwiające znacznie pracę z programem, przykładowo interfejsy takie istnieją do podstawowej analizy statystycznej (Rcommander) i do analizy danych ekstremalnych. Program zawiera szereg metod wyznaczania równań regresji dla różnego rodzaju danych: regresję liniową, regresję liniową wielu zmiennych, regresję wielomianową, *logistic* regresję jednej i wielu zmiennych oraz *tree-based* regresję. Metody analizy regresji za pomocą R zostały opisane w książce (Maindonald, Braun, 2003).



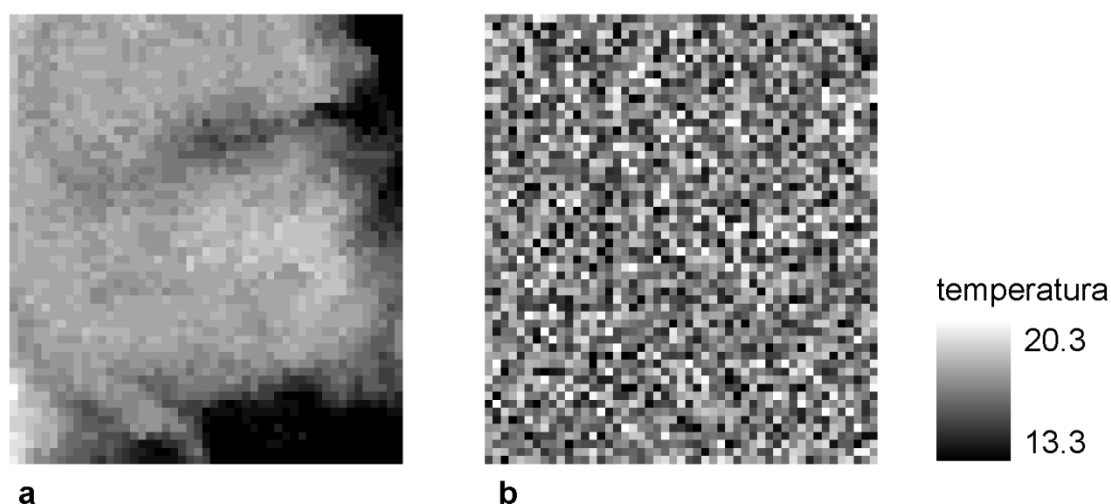
Rys. 8.11 Interfejs graficzny programu R. Przedstawiono realizację wyznaczania regresji liniowej (funkcja `lm`) pomiędzy zmierzonymi wartościami głębokości wody (*depth* – zmienna zależna) a wartościami pikseli na zdjęciu satelitarnym (*gr_mean* – zmienna niezależna) .

9. MODELOWANIE GEOSTATYSTYCZNE ROZMIESZCZENIA W PRZESTRZENI

W badaniach przyrodniczych bardzo często mamy do czynienia z analizą zmiennych o ciągłym charakterze, czyli takich, które przyjmują wartości w każdym miejscu interesującej nas przestrzeni. Najczęściej ma ona charakter dwuwymiarowy związany z powierzchnią Ziemi, ale może być także trójwymiarowa, opisująca jej wnętrze, atmosferę lub masę wód. Badane zmienne mogą mieć charakter danych ilościowych (np. zasolenie powierzchni wody, stężenie związków ołowiu w glebie, wielkość opadu deszczu, prędkość wiatru lub liczba osobników danego gatunku na jednostkę powierzchni) lub jakościowych (np. rodzaj gleby lub występowanie/brak danego gatunku). Do analizy tego typu zmiennych używa się zwykle w środowisku GIS rastrowego modelu danych. Warstwy rastrowe tworzone są często z pomiarów punktowych. Powstaje wtedy problem określenia wartości zmiennych w tych miejscach obszaru badań, które nie były próbkowane. Proces ten jest określanej bardziej ogólnie jako estymacja (szacowanie) zmiennej, lub ściślej jako interpolacja. Zagadnienie interpolacji dotyczy zatem estymacji badanej zmiennej na podstawie znanych wartości tej zmiennej w jej otoczeniu. Proces ten możemy rozszerzyć uwzględniając dodatkowo posiadane przez nas w jej otoczeniu inne dane, które wykazują skorelowanie z badaną zmienną. Istnieje szereg metod interpolacji, które generalnie mogą być podzielone na dwie grupy: deterministyczne i geostatystyczne. Niektóre metody deterministyczne zostały opisane w podroz. 5.6.

Metody geostatystyczne oparte są na modelach statystycznych i ich charakterystyczną cechą jest możliwość oceny błędu prowadzonej estymacji. Dają one także szereg możliwości niedostępnych w metodach deterministycznych, tj: (1) ocenę prawdopodobieństwa wystąpienia w danym miejscu wartości mniejszych lub większych od zadanej wartości progowej; (2) tworzenie map wartości progowych dla danego prawdopodobieństwa; (3) uwzględnianie w procesie interpolacji innych zmiennych; (4) analizę przestrzennej zmienności zmiennej lub zmiennych. Za pomocą tych metod można nie tylko tworzyć mapy estymowanych wartości średnich (najbardziej prawdopodobnych), które w porównaniu z rzeczywistością charakteryzują się znacznym wygładzeniem i nie oddają istniejącej zmienności przestrzennej, ale także przeprowadzać symulacje pozwalające na obrazowanie tej zmienności.

Proces geostatystycznej interpolacji danych przyrodniczych wykorzystuje przestrzenne skorelowanie danych, które najogólniej można zdefiniować jako tendencję wzrostu różnicowania wraz ze wzrostem odległości pomiędzy nimi. Na Rysunku 9.1a przedstawiono pole temperatury powierzchni morza otrzymane z danych satelitarnych (wielkość piksela wynosi 1 x 1 km).



Rys. 9.1 Przestrzenny rozkład danych: a – powierzchnia geostatystyczna (rozkład temperatury powierzchni morza zarejestrowany przez satelitę jest rezultatem działania praw fizyki); b – powierzchnia statystyczna (zawierająca piksele o tych samych wartościach co mapa obok) wygenerowana za pomocą procesu losowego (a dokładniej pseudolosowego, bo obliczenia komputerowe nie mają charakteru losowego).

Obok (Rysunek 9.1b) pokazano jak wyglądałaby ta sytuacja, gdyby przestrzenny rozkład temperatury był wyłącznie rezultatem procesu losowego. W punkcie, w którym nie wykonano pomiaru, mogłaby wtedy wystąpić każda wartość z prawdopodobieństwem zdefiniowanym przez rozkład zmiennej (na Rysunku 9.1b mają one rozkład normalny). Rzeczywisty obraz rozkładu przestrzennego (Rysunek 9.1a) nie ma charakteru losowego, a jest rezultatem szeregu powiązanych ze sobą i działających w różnych skalach procesów fizycznych. Wynikają one z praw fizyki i mają charakter deterministyczny, ale rezultat ich działania jest na tyle złożony, że nie potrafimy go matematycznie wiernie opisać. Potrafimy jednak wykorzystać w procesie estymacji wewnętrzne przestrzenne skorelowanie danych i istnienie w ich rozkładzie struktur przestrzennych, które powstały w wyniku działania tych praw. Ze względu na złożoność tych pól do ich opisu stosuje się model łączący losowość z istnieniem wewnętrznych struktur. Dane posiadające taki charakter, zwane za twórcą współczesnej geostatystyki G. Matheronem zmiennymi zregionalizowanymi (*regionalized variables*), są przedmiotem badań geostatystyki, a tworzone przez nie powierzchnie są nazywane powierzchniami geostatystycznymi.

Analiza geostatystyczna jest zwykle prowadzona w trzech etapach: (1) eksploracyjnej analizie danych, (2) analizie strukturalnej i modelowania wariogramu oraz (3) przeprowadzenia właściwej estymacji lub symulacji. Eksploracyjna analiza danych jest niezbędnym wstępnym etapem, którego celem jest poznanie danych i przygotowanie się do dalszej ich analizy. Szczególnie ważnymi zagadnieniami w jej trakcie jest: (1) zbadanie czy wśród posiadanych przez nas danych nie istnieją takie, których wartości znacząco różnią się od pozostałych, (2)

określenie istnienia trendu w danych oraz (3) poznanie ich rozkładu statystycznego. Dane różniące się mogą być (po sprawdzeniu) odrzucone lub zaakceptowane. Istniejący trend, czyli regularna przestrzenna tendencja zmian wartości danych, może być odjęty przed rozpoczęciem analizy geostatystycznej, a następnie po jej zakończeniu dodany do jej rezultatów. W ten sposób nie będzie on miał negatywnego wpływu na sam proces analizy. Rozkład statystyczny danych jest istotną wskazówką co do oceny możliwości zastosowania i efektywności działania niektórych metod geostatystycznych, które wymagają rozkładu normalnego lub zbliżonego do niego. Dane o rozkładach odbiegających mogą być poddane transformacji do wymaganego rozkładu.

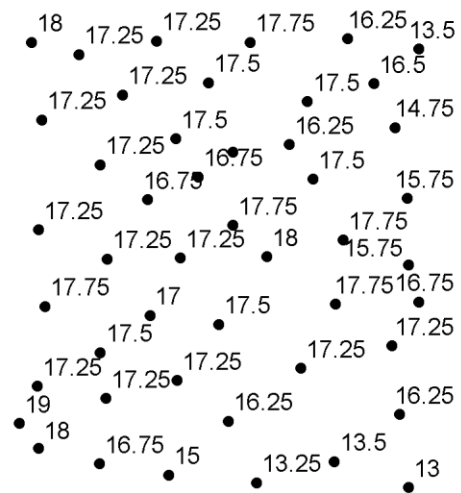
Analiza strukturalna służy do badania zależności przestrzennych (*spatial dependence*) danych, czyli ich wzajemnego skorelowania oraz istnienia w ich rozkładzie struktur przestrzennych. Podstawowym narzędziem służącym do tej analizy jest wariogram, jest to funkcja opisująca stopień zróżnicowania danych w zależności od odległości między nimi. W trakcie tej analizy bada się strukturę przestrzenną danych (*spatial structure*), czyli określa się, jak daleko i w jakim kierunku są od siebie zależne, oraz rodzaj procesów tworzących tą zależność. Z etapem tym związane jest modelowanie wariogramu za pomocą funkcji matematycznych, które są wykorzystywane w ostatnim etapie analizy, czyli prowadzeniu estymacji lub symulacji.

Podstawową metodą estymacji geostatystycznej jest kriging (nazwa ta pochodzi od jednego z pionierów zastosowania statystyki w estymacji wielkości złóż, południowoafrykańskiego inżyniera górnictwa D.G. Krige). Istnieje kilka rodzajów krigingu, z których najczęściej stosowanym jest kriging zwyczajny (*ordinary kriging*). Estymacja może być wykonywana w punktach środkowych komórek mapy rastrowej (kriging punktowy) lub jako średnia wartość dla całej powierzchni komórki (kriging blokowy). Najczęściej do estymacji wartości w danym miejscu wykorzystuje się tylko punkty pomiarowe w pewnym jego otoczeniu (ten rodzaj podejścia nazywa się lokalnym, w przeciwieństwie do globalnego, wykorzystującego wszystkie punkty pomiarowe). Estymacja lub interpolacja geostatystyczna generuje mapy wartości najbardziej prawdopodobnych dla danej komórki. Z tego względu przestrzenny obraz charakteryzuje się znacznym wygładzeniem w porównaniu z rzeczywistością. Mapom estymowanych wartości najczęściej towarzyszą mapy błędu standardowego estymacji, które pozwalają na ocenę dokładności estymacji w różnych miejscach. Dokonuje się także całościowej oceny błędów estymacji za pomocą metod walidacji i crosswalidacji. Jeżeli uzasadnione jest założenie o normalnym rozkładzie wartości w otoczeniu miejsca estymacji, można oszacować (na podstawie wartości estymowanej i błędu standardowego) prawdopodobieństwo wystąpienia

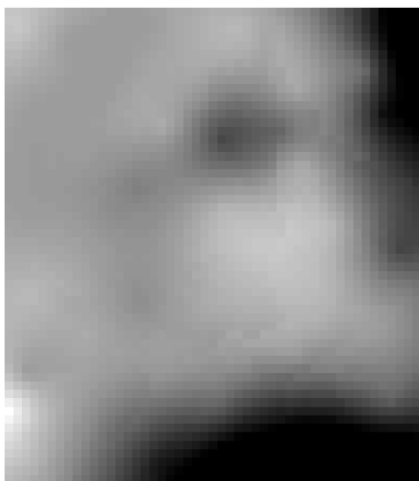
wartości większych lub mniejszych od wartości progowej albo wielkości wartości progowych dla danego prawdopodobieństwa. Osobną grupą metod są metody geostatystyki wielowymiarowej (kokrigingu), pozwalające na wykorzystanie pomiarów innych zmiennych (tzw. zmiennych pomocniczych). W przypadku danych jakościowych stosuje się metody indykatyrowe. Polegają one na zamianie danych jakościowych na dane binarne zawierające zero-jedynkową informację o występowaniu danej klasy (1- obiekty danej klasy występują, 0 – brak występowania danej klasy). Dla tego typu danych wykonuje się wariogramy, a następnie przeprowadza się kriging indykatyrowy, który tworzy mapy prawdopodobieństwa występowania danej klasy. Jeżeli w różnych miejscach obszaru badań zmienność musi być opisywana innym modelem można zastosować kriging stratyfikowany, który dzieli obszar badań na strefy, w których obowiązują inne modele zmienności.



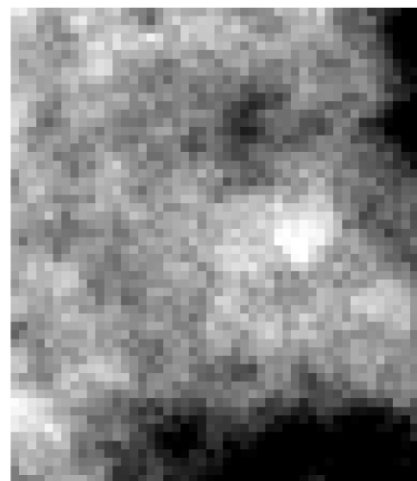
a



b



c



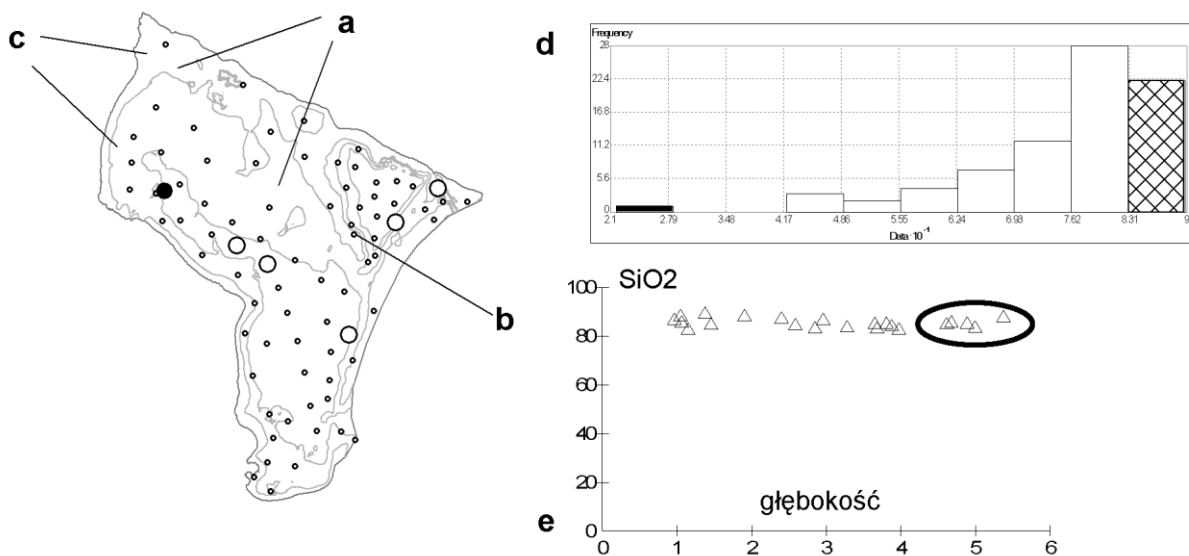
d

Rys. 9.2 Modelowanie rozmieszczenia w przestrzeni za pomocą metod geostatystycznych: a – rzeczywista powierzchnia; b – pomiary punktowe; c – estymacja za pomocą krigingu; d – symulacja.

Metody geostatystyczne umożliwiają także prowadzenie symulacji rozkładu przestrzennego. W jej trakcie tworzone są mapy, które w przeciwieństwie do map otrzymywanych z estymacji opisujących średnią z wielu możliwych rozkładów przestrzennych, przedstawiają jeden z tych rozkładów. Na Rysunku 9.2 przedstawiono różnicę pomiędzy mapami otrzymanymi za pomocą estymacji i symulacji. Pole rzeczywiste (Rys.9a) zostało opróbkowane (Rys.9b). Wykorzystując pomiary przeprowadzono estymację metodą krigingu (Rys. 9c) oraz symulację (Rys. 9 d). Zaznacza się wyraźna różnica w podobieństwie rezultatów estymacji i symulacji z polem rzeczywistym.

9.1 Eksploracyjna analiza danych

Szczegółowa analiza danych, nosząca w literaturze nazwę eksploracyjnej analizy danych przestrzennych (ESDA – *Exploratory Spatial Data Analysis*), jest niezbędnym pierwszym krokiem w procesie modelowania geostatystycznego. Dotyczy ona danych punktowych, z których będzie tworzona estymowana lub symulowana powierzchnia. Dane te zawierają współrzędne punktów oraz mogą zawierać jedną lub więcej zmiennych (*univariate* lub *multivariate data*). Rozmieszczenie punktów w przestrzeni ma istotne znaczenie dla analizy geostatystycznej.



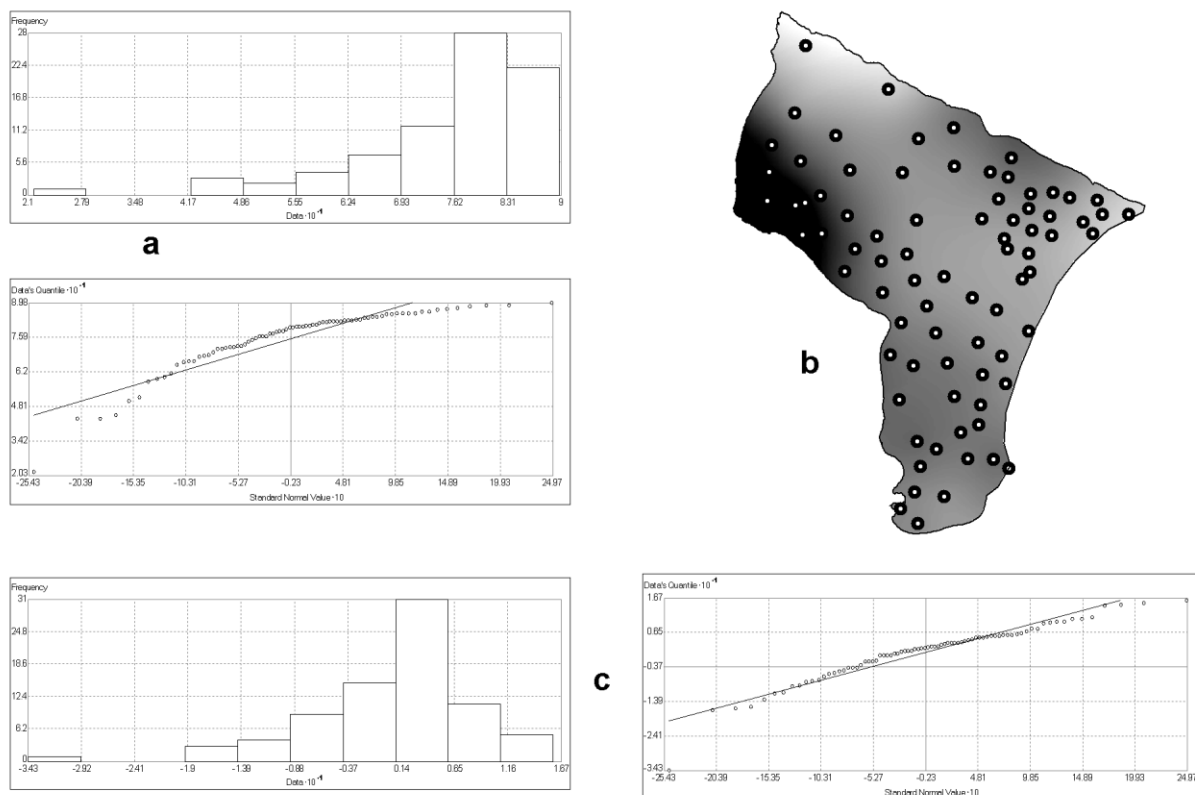
Rys. 9.3 Zagadnienia eksploracyjnej analizy danych: a – równomierne rozmieszczenie danych; b – różnorodna odległość pomiędzy danymi (istnienie punktów leżących blisko siebie); c – obszary ekstrapolacji; d – analiza rozkładu danych i wartości odbiegających od przeciętnych; e – badanie związku zmiennych ze zmiennymi innymi warstw.

Punkty powinny w miarę równomiernie pokrywać całą powierzchnię badań, bez pozostawiania obszarów o bardzo małej gęstości pomiarów (Rysunek 9.3a) . Jednocześnie odległości pomiędzy punktami powinny być zróżnicowane. Przy równomiernym rozmieszczeniu punktów, gdy znajdują się one w porównywalnej odległości, należy dodać kilka punktów leżących znacznie bliżej od innych niż pozostałe. Umożliwi to ocenę zmienności pomiędzy danymi przy małych odległościach (Rys. 9.3b). Właściwa liczba punktów pomiarowych jest trudna do określenia i zależy od rodzaju projektu. Z reguły w większości analiz geostatystycznych jest ona większa od 50, praktycznie zbiory danych o mniej niż 20–30 punktach nie nadają się do stosowania omawianych metod, ze względu na trudności z analizą przestrzennej zmienności. Na obszarach znajdujących się poza obrysem punktów (Rys. 9.3c) estymacja prowadzona jest na podstawie punktów zlokalizowanych tylko z jednej strony. Tego typu estymacja nosi nazwę ekstrapolacji i najczęściej towarzyszą jej znaczne błędy.

Pierwszym krokiem analizy danych jest znalezienie punktów pomiarowych, w których wartości różnią się ekstremalnie od średniej (*outliers*). Cecha ta może mieć charakter globalny i dotyczyć całego obszaru, lub lokalny i dotyczyć tylko określonego rejonu. Globalne (dla całego zbioru danych) maksima i minima mogą być w prosty sposób znalezione z histogramów. Szczególnie przydatne są interaktywne narzędzia pozwalające na utworzenie „dynamicznego połączenia” pomiędzy histogramem a mapą (Rys. 9.3d). Zaznaczenie na histogramie słupka z najmniejszymi wartościami powoduje równoczesne podświetlenie na mapie punktów, w których zmierzone wartości znajdują się w tym przedziale (czarna, powiększona kropka). W przypadku wyróżniających się danych w pewnym rejonie badań (lokalnych) nie będą one widoczne na histogramie. Stosuje się wtedy inne rozwiązania pozwalające na analizę lokalną jak np. mapy Voronoi, które otaczają każdy punkt wielobokiem oddziaływania [patrz podroz. 3.2.2]. Każdemu wielobokowi może być przypisana lokalna statystyka określana na podstawie danego punktu i punktów wieloboków sąsiednich. Jeżeli pomiary zostaną zreklasyfikowane do pewnej liczby klas, to można wykorzystać statystykę (klaster) określającą liczbę sąsiadów tej samej klasy. Wszystkie punkty, których sąsiedzi należą do innych klas, mogą mieć charakter lokalnych wyróżniających się danych i powinny zostać sprawdzone. Po sprawdzeniu podejmuje się decyzję o ich pozostawieniu lub wykluczeniu z dalszej analizy.

Histogram służy także do analizy rozkładu danych. Niektóre metody geostatystyczne wymagają normalnego rozkładu danych, przy czym, w przypadku estymacji lokalnej, dotyczy to podzbiorów punktów określonych geometrią stosowanego otoczenia. Powszechnie stosowaną metodą sprawdzenia zgodności z rozkładem normalnym jest wykres normalnych centyli (*normal QQ plot*), będący graficznym porównaniem rozkładu danej zmiennej do rozkładu normalnego,

reprezentowanego przez linię prostą. Na Rysunku 9.4a przedstawiono histogram i wykres normalnych centyli dla analizowanych danych. Zaznacza się wyraźne odchylenie od rozkładu normalnego. W takich sytuacjach najczęściej sugeruje się dokonanie transformacji danych do rozkładu normalnego. Jednak w przypadku danych przyrodniczych obserwowane odchylenia od rozkładu normalnego bardzo często wynikają z istnienia trendu w danych. Trend jest to wielkoskalowa zmienność przestrzenna, która może być opisana za pomocą wielomianów różnego stopnia. Może on mieć charakter globalny (jeden wielomian dla całego obszaru), lub lokalny (obszar dzielony jest na strefy, w każdej powierzchnia trendu jest określona innym wielomianem). Przeprowadzenie analizy trendu polega na utworzeniu mapy jego wartości (Rys. 10b). Wartość trendu może być odjęta od danych (od wartości w punkcie odejmuje się wartość z odpowiadającego jej miejsca na powierzchni trendu). Po odjęciu trendu wartości danych są znacznie bardziej zbliżone do rozkładu normalnego (Rys. 10c).



Rys. 9.4 Wpływ istnienia trendu na rozkład danych : a – histogram i wykres normalnych centyli analizowanych danych (rozkład odbiegający od normalnego); b – mapa trendu; c – histogram i wykres normalnych centyli analizowanych danych po odjęciu trendu (rozkład zbliżony do normalnego).

Często kriging przeprowadza się na danych z usuniętym trendem, a otrzymaną powierzchnię dodaje się na końcu do powierzchni trendu w celu otrzymania ostatecznej mapy wartości estymowanych.

W trakcie wizualnej analizy danych należy uwzględniać inne warstwy badanego obszaru. Pozwala to na postawienie hipotez o relacjach badanej zmiennej z innymi zmiennymi. Na Rysunku 9.3 pokazano wykorzystanie w analizie warstwy głębokości. Aby sprawdzić, czy istnieje relacja pomiędzy głębokością a badaną zmienną wykonano wykres (Rys. 9.3e) zależności podzbioru pomiarów z prawego skrajnego przedziału histogramu (słupek zaznaczony szrafem) od głębokości. Widoczny jest brak zależności. Wykorzystano istnienie dynamicznego połączenia z mapą dla znalezienia punktów o największych głębokościach (zaznaczono je na mapie kółkami). Przedstawione powyżej sposoby i narzędzia pozwalają na odpowiedź na szereg pytań. Czy dane charakteryzują się trendem? Jaki jest ich rozkład i czy istnieje jego związek z trendem? Czy dane są równomiernie rozmieszczone w przestrzeni i czy istnieją obszary, na których będzie wykonywana ekstrapolacja? Czy występują pomiary wyraźnie różniące się wartościami o charakterze globalnym lub lokalnym i czy mogą to być błędy pomiarowe? Czy rozmieszczenie wartości analizowanych danych może być tłumaczone zmiennymi innych warstw?

9.2 Analiza zmienności przestrzennej

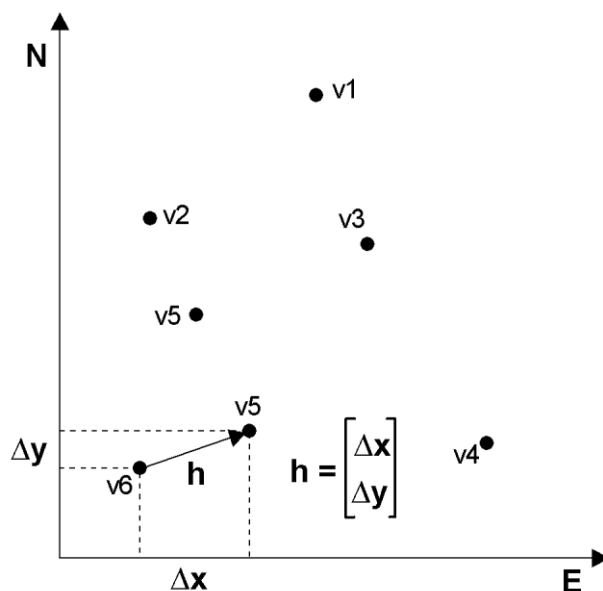
W klasycznej (nie uwzględniającej położenia w przestrzeni) statystyce podstawowymi narzędziami do mierzenia podobieństwa i zróżnicowania dwóch zmiennych są funkcje kowariancji i korelacji określone jako:

$$C_{XY} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (X_i - m_X)(Y_i - m_Y) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i Y_i - m_X m_Y \quad (9.1)$$

$$\rho_{XY} = \frac{C_{XY}}{\sigma_X \sigma_Y} \quad (9.2)$$

gdzie: C_{XY} – funkcja kowariancji zmiennych X i Y,
 ρ_{XY} – funkcja korelacji zmiennych X i Y,
n – liczba par danych,
 X_i, Y_i – zmienne,
 m_X – wartość średnia zbioru zmiennych X,
 m_Y – wartość średnia zbioru zmiennych Y,
 σ_X – odchylenie standardowe ze zbioru zmiennych X,
 σ_Y – odchylenie standardowe ze zbioru zmiennych Y.

W danych przestrzennych pojęcie podobieństwa lub zróżnicowania najczęściej dotyczy jednej zmiennej i jest funkcją odległości. Oznacza to, że wyniki pomiarów leżących od siebie bliżej wykazują większe podobieństwo niż położone w większej odległości. Geostatystyka wykorzystuje podobne narzędzia jak statystyka klasyczna do ilościowej oceny podobieństwa (przestrzennej ciągłości) i zróżnicowania (przestrzennej zmienności). Miarą przestrzennej zmienności danych jest semiwariogram (zwany także powszechnie wariogramem), a miarą przestrzennej ciągłości kowariancja i korelacja. Każda z tych miar jest funkcją odstepu pomiędzy punktami pomiarowymi określonego przez wektor \mathbf{h} (Rysunek 9.5).



Rys. 9.5 Odstęp pomiędzy danymi jest zdefiniowany przez wektor \mathbf{h} .

Jeżeli dane pomiarowe zostaną oznaczone jako $\mathbf{v}_1, \mathbf{v}_2, \dots, \mathbf{v}_n$ i są one rozmieszczone w przestrzeni dwuwymiarowej (2D), to odstęp pomiędzy nimi jest opisany przez wektor:

$$\mathbf{h} = \begin{bmatrix} \Delta X \\ \Delta Y \end{bmatrix} \quad (9.3)$$

gdzie:

- ΔX – odstęp między punktami na osi X (E),
- ΔY – odstęp między punktami na osi Y (N).

Przykładowo jeżeli $\mathbf{h} = (20, 10)$ oznacza to, że każda para porównywanych danych jest rozdzielona o 20 jednostek w kierunku z zachodu na wschód ($W \rightarrow E$) i o 10 jednostek w kierunku z południa na północ ($S \rightarrow N$). W związku z tym, że miary przestrzennej zmienności i ciągłości są funkcją wektora odstepu, mogą one przyjmować różne wartości w zależności od kierunku (przestrzenna ciągłość zmiennych może być duża w jednym kierunku a mała w innym).

Przy obliczaniu i analizie zmienności stosuje się dwa podejścia. W pierwszym przypadku określa się zmienność (podobieństwo), jako zależne wyłącznie od odstepu. Wartość h traktowana jest wtedy jako skalar. Obliczane funkcje (wariogram, kowariancja i korelacja) mają wtedy charakter omnikierunkowy (są niezależne od kierunku). W drugim przypadku funkcje zależą zarówno od kierunku, jak i odstepu, i noszą nazwę funkcji kierunkowych.

Funkcja kowariancji dla zmiennej przestrzennej v_1, v_2, \dots, v_n jest opisana wyrażeniem:

$$C(h) = \frac{1}{N(h)} \sum_{(i,j)_{h_{i,j}=h}} v_i v_j - m_{-h} m_{+h} \quad (9.4)$$

gdzie:

$$m_{+h} = \frac{1}{N(h)} \sum_{j|h_{i,j}=h} v_j \quad \text{średnia ze wszystkich danych o położeniu } -h \text{ od innych,}$$

$$m_{-h} = \frac{1}{N(h)} \sum_{i|h_{i,j}=h} v_i \quad \text{średnia ze wszystkich danych o położeniu } +h \text{ od innych,}$$

$N(h)$ – liczba par danych, które są rozdzielone przez h .

Natomiast funkcja korelacji zmiennej przestrzennej ma postać:

$$\rho(h) = \frac{C(h)}{\sigma_{-h} \sigma_{+h}} \quad (9.5)$$

gdzie:

$$\sigma_{-h} = \frac{1}{N(h)} \sum_{i|h_{i,j}=h} v_i^2 - m_{-h}^2 \quad \text{odchylenie standardowe ze wszystkich danych o położeniu } -h \text{ od innych,}$$

$$\sigma_{+h} = \frac{1}{N(h)} \sum_{j|h_{i,j}=h} v_j^2 - m_{+h}^2 \quad \text{odchylenie standardowe ze wszystkich danych o położeniu } +h \text{ od innych.}$$

Podstawową i najczęściej używaną funkcją geostatystyki jest semiwariogram służący do opisu zmienności przestrzennej. Funkcja zwana wariogramem jest ściśle biorąc jej dwukrotnością, przyjęło się jednak także używanie tej nazwy jako potocznego określenia semiwariogramu. Semiwariogram dla zmiennej przestrzennej v_1, v_2, \dots, v_n jest określony wyrażeniem:

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{(i,j)_{h_{i,j}=h}} (v_i - v_j)^2 \quad (9.6)$$

gdzie:

$N(h)$ – liczba par danych, które są rozdzielone przez h .

Wartości wariogramu, kowariancji i korelacji nie zmieniają się jeżeli w powyższych równaniach zamieni się indeksy i i j określające kierunek wektora odstepu. Oznacza to, że wartości wariogramu obliczone dla dowolnego kierunku będą równe wartościom policzonym dla kierunku przeciwnego:

$$\gamma(h) = \gamma(-h) \quad (9.7)$$

$C(0)$ jest wariancją zmiennej, a funkcja kowariancji $C(h)$ będzie przyjmować wartość zero, gdy brak jest korelacji przestrzennej. Funkcja semiwariancji i kowariancji jest związana wyrażeniem:

$$\gamma(h) = C(0) - C(h) \quad (9.8)$$

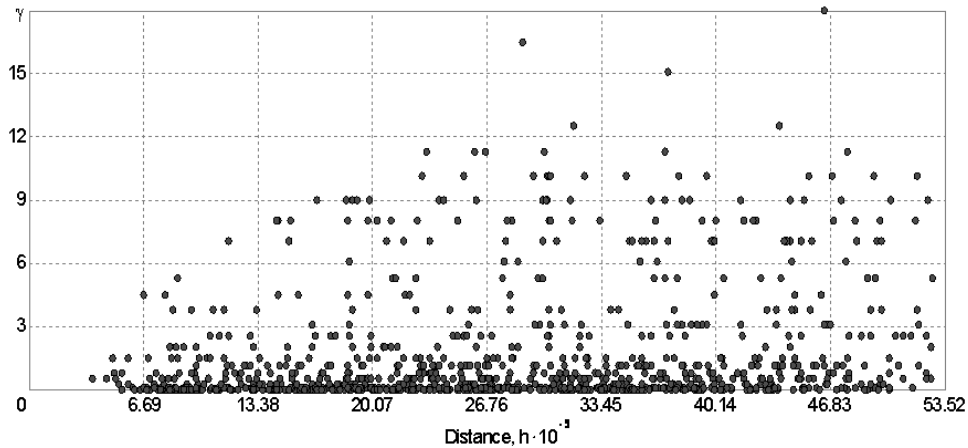
Z wyrażenia tego wynika, że przy braku skorelowania semiwariancja danej zmiennej osiąga wartość jej wariancji.

Istnieje kilka sposobów tworzenia wariogramów z danych pomiarowych. Jeżeli danych jest n pomiarów: $\mathbf{v1}(\mathbf{x}), \mathbf{v2}(\mathbf{x}), \mathbf{v3}(\mathbf{x}) \dots \mathbf{vn}(\mathbf{x})$, gdzie \mathbf{x} jest tablicą współrzędnych punktów pomiarowych, to dla każdej pary pomiarów, których będzie $0.5n(n-1)$ można obliczyć wartość semiwariancji :

$$\frac{1}{2} \left[\sum (x_i - v(x_i'))^2 \right] \quad (9.9)$$

względem odległości: $\|x_i - x_i'\| \quad (9.10)$

i utworzyć na wykresie punkt o współrzędnych: semiwariancja na osi rzędnych i odległość na osi odciętych. Otrzymany wykres (Rysunek 9.6) ma charakter wykresu rozrzutu punktów (*scatter plot*) i nosi nazwę surowego wariogramu (*raw variogram*). Na wykresie tym widoczny jest charakterystyczny dla większości powierzchni geostatystycznych wzrost zmienności (wyrażonej funkcją semiwariancji) wraz ze zwiększaniem się odległości pomiędzy pomiarami aż do osiągnięcia pewnego stałego poziomu wartości.

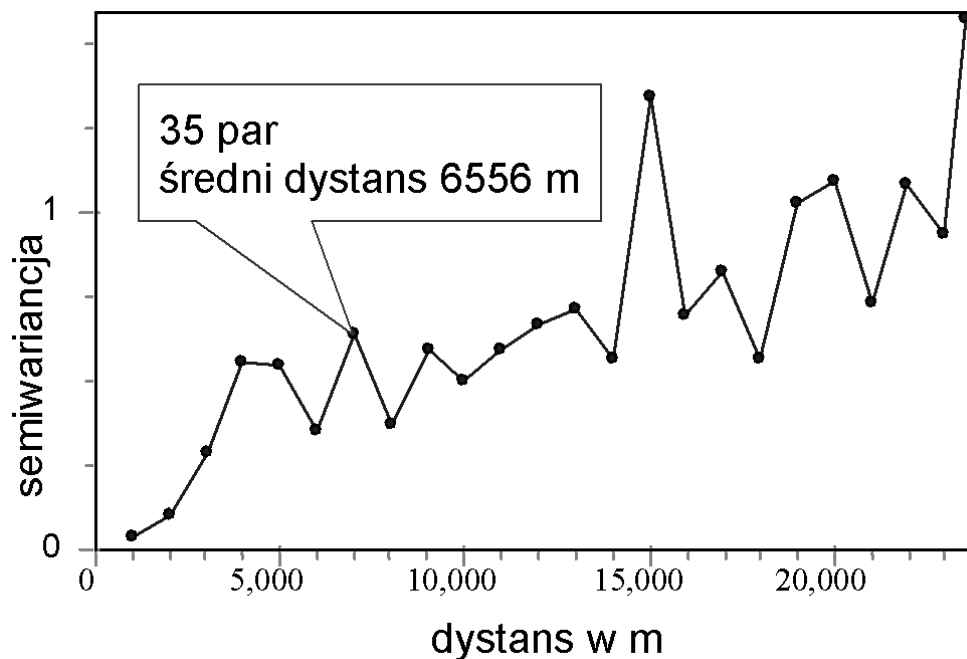


Rys. 9.6 Surowy wariogram tworzy chmurę punktów, z których każdy reprezentuje parę danych.

Drugim rodzajem wariogramu jest wariogram eksperymentalny, który ma postać wygładzonej linii generalizującej przedstawiony powyżej wykres rozrzutu. Wartości odstępów są dzielone na k przedziałów noszących nazwę kroków (*lags*). W każdym przedziale znajduje się N_k par pomiarów dla których zostaje policzona semiwariancja za pomocą wyrażenia:

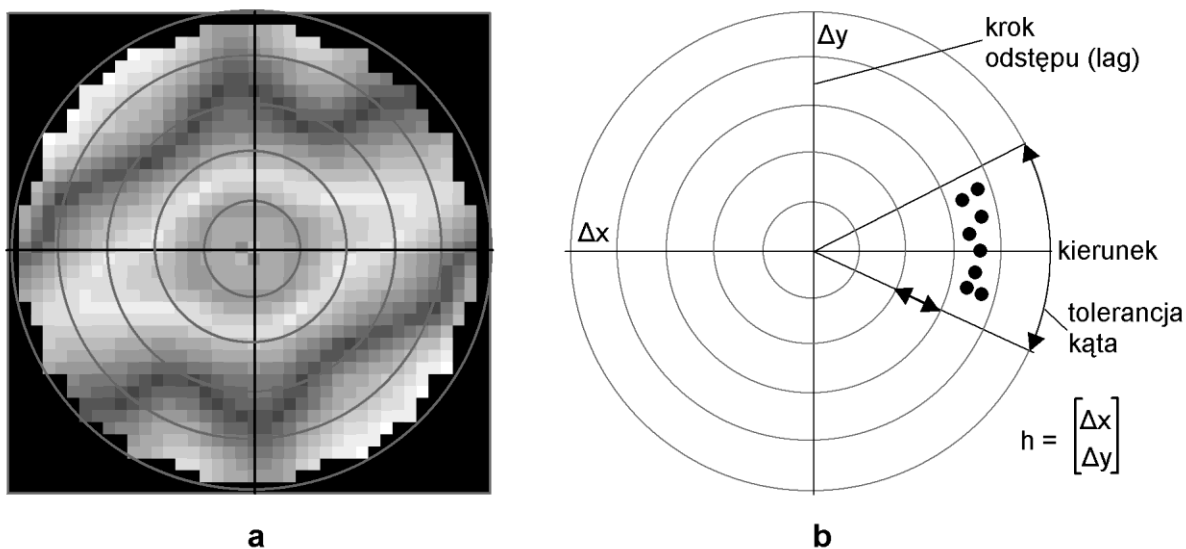
$$\gamma(h_k) = \frac{1}{2N_k} \sum [(x_i) - v(x_i')]^2 \quad (9.11)$$

gdzie i oznacza numer kolejnej pary w danym przedziale odległości. Wykres wariogramu eksperymentalnego został przedstawiony na Rysunku 9.7.



Rys. 9.7 Wariogram eksperymentalny

Każdy punkt na wykresie wariogramu jest średnią z kwadratów różnic obliczonych dla wszystkich par danego przedziału. Wyznacza się także wartość średniego odstepu dla danego przedziału. Wariogramy są tworzone jako omnikierunkowe lub kierunkowe. W tym drugim przypadku brane są pod uwagę tylko pary pomiarów o wektorach, których kierunek nie odbiega od badanego kierunku o więcej niż pewien kąt zwany tolerancją kąta (Rysunek 9.8b). Wariogramów omnikierunkowych używa się wtedy, gdy zmienność przestrzenna nie zależy od kierunku, czyli ma charakter izotropowy. Kiedy zmienność badanego pola zależy od kierunku mamy do czynienia z polem anizotropowym pod względem zmienności. Aby ją opisać stosuje się wariogramy kierunkowe, czyli tworzy się wykresy takie jak powyżej, ale dla różnych kierunków. Inna metoda polega na tworzeniu wariogramów powierzchniowych zwanych także mapami wariogramów (Rysunek 9.8). Każda para punktów o wektorze \mathbf{h} może być umieszczona w kole przedstawionym na Rysunku 9.8b. Kierunek wektora i tolerancja kąta określają wycinek koła, a odstęp położenie w pierścieniu danego kroku odstepu. Dla każdego miejsca koła może zostać policzona w ten sposób semiwariancja, której wartości zostaną przypisane komórkom mapy rastrowej (Rys. 9a). Odcienie szarości na tej mapie określają wielkość semiwariancji, wyraźnie zaznacza się asymetria zmienności. Badana powierzchnia wykazuje najmniejsze zróżnicowanie z południowego-zachodu na północny-wschód.

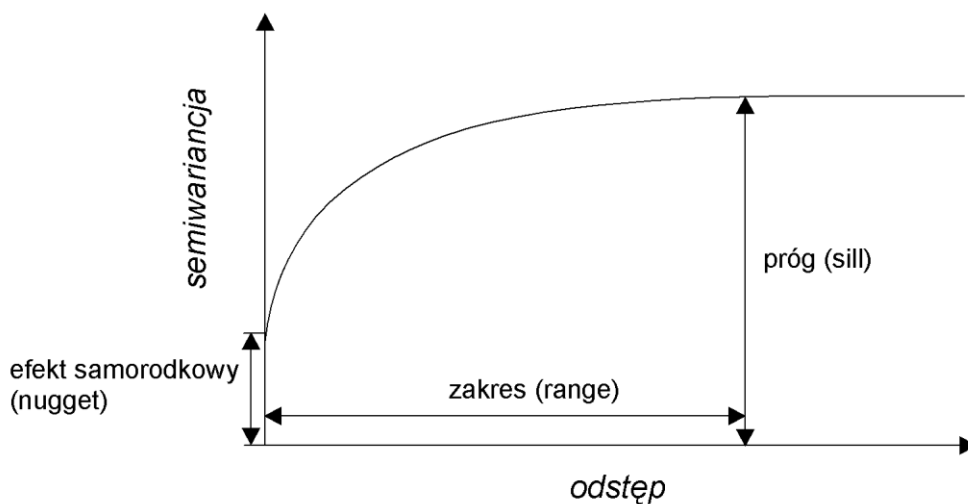


Rys. 9.8 Wariogram powierzchniowy (a) i zasada jego tworzenia (b).

Analiza wariogramów umożliwia poznanie struktury przestrzennej danych. Pierwszym etapem analizy jest zwykle określenie, czy badana powierzchnia ma charakter izotropowy, czy anizotropowy. Dla powierzchni anizotropowych określa się kierunki największej ciągłości i zmienności. Anizotropia może przyjmować dwie formy: (1) anizotropii geometrycznej wtedy,

gdy we wszystkich kierunkach osiągnięta jest ta sama zmienność, ale w różnej skali przestrzennej (różnych odległościach pomiędzy pomiarami) oraz (2) anizotropii strefowej gdy w różnych kierunkach osiągnięta jest różna zmienność. Tego typu sytuacja jest typowa dla danych zawierających trend (semiwariancja będzie wtedy cały czas rosła wraz ze wzrostem odległości). Istnienie cyklicznych struktur w danych będzie powodowało falowanie wykresu wariogramu.

W analizie wariogramu używa się pewnych podstawowych pojęć przedstawionych na Rysunku 9.9. Wartość typowego wariogramu (semiwariancja) rośnie początkowo wraz ze wzrostem odległości pomiędzy pomiarami, aż do osiągnięcia pewnej wielkości, powyżej której pozostaje już w przybliżeniu taka sama. Graniczna wartość odległości, po przekroczeniu której semiwariancja nie rośnie nosi nazwę zakresu (*range*). Odpowiada ona przestrzennej skali do której obserwuje się skorelowanie pomiarów. Wartość wariacji dla odstępów równych zakresowi nosi nazwę progu (*sill*). Często, choć nie zawsze, obserwuje się szybki wzrost wartości semiwariancji dla bardzo małych przyrostów odległości. Wynikają one z istnienia mikrostruktury w danych. W rezultacie dla odległości pomiędzy pomiarami bliskimi zeru wartość wariacji jest wyraźnie większa od zera. Zjawisko to nosi nazwę efektu samorodkowego (*nugget*), gdyż po raz pierwszy badano go w kopalniach złota, gdzie efekt ten był rezultatem istnienia samorodków. Powodowały one znaczne wzrosty zmienności w zawartości kruszcu przy bardzo małych odległościach pomiędzy pomiarami.



Rys. 9.9 Podstawowe pojęcia w analizie wariogramu.

9.3 Modelowanie wariogramu

Wariogram opisujący przestrzenną zmienność jest podstawowym elementem każdej analizy geostatystycznej. Jednak do wykonania estymacji (za pomocą krigingu) i symulacji wariogram eksperymentalny nie może być stosowany, ponieważ wykorzystywana w tych procedurach funkcja semiwariogramu musi spełniać warunek dodatniej określoności. W związku z tym przebieg wariogramu eksperymentalnego modeluje się za pomocą pewnej grupy funkcji, co do których wiadomo, że są dodatnio określone. Generalnie celem procesu modelowania jest opisanie zmienności przestrzennej funkcją matematyczną, w której argumentem jest wektor odstepu pomiędzy danymi. Często stosuje się łączenie funkcji dla lepszego przybliżenia przebiegu wariogramu eksperymentalnego i uwzględnienia efektu samorodkowego. Powszechnie używa się następujących funkcji: efektu samorodkowego, sferycznej, wykładniczej, gaussowskiej, liniowej i potęgowej.

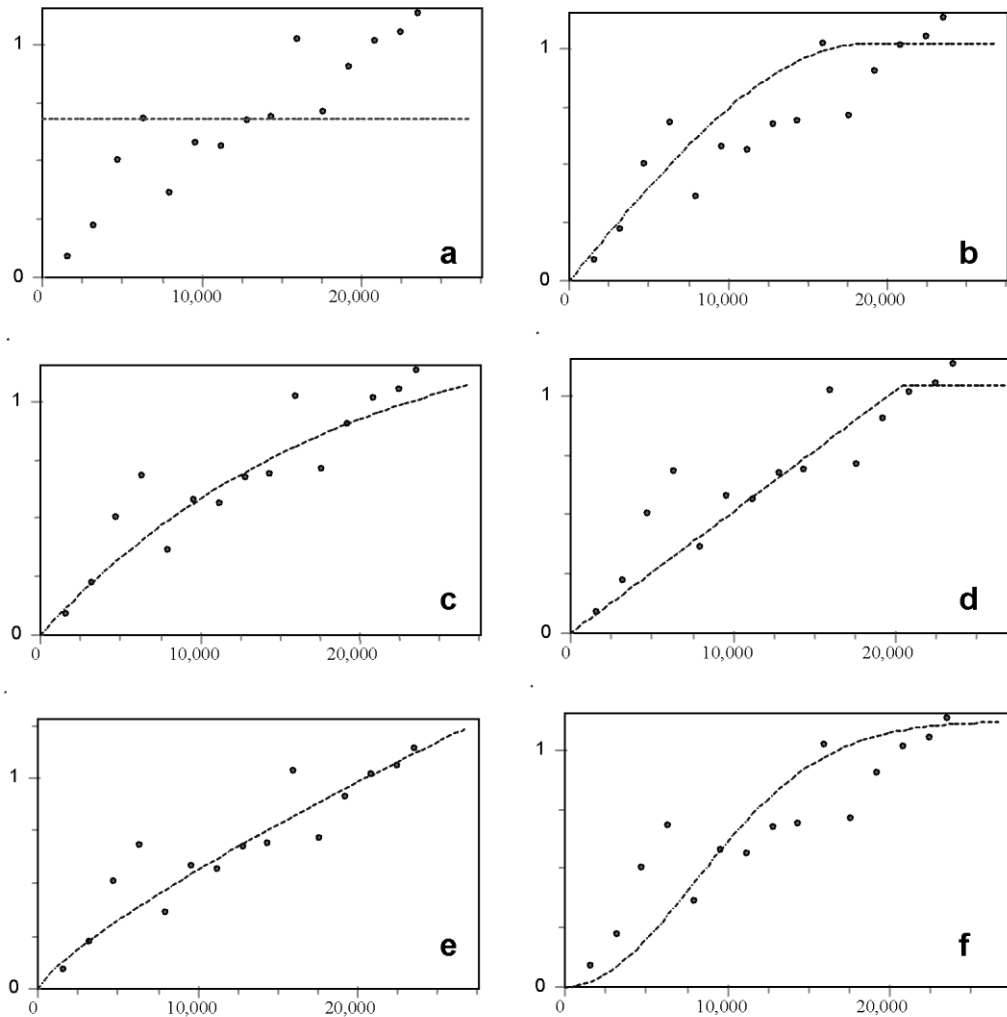
Funkcja efektu samorodkowego (*nugget effect*) jest najczęściej używana do zobrazowania wielkości semiwariancji przy bardzo małych odstępach pomiędzy danymi. Ma ona postać (Rysunek 9.10a):

$$\gamma(h) = C * \begin{cases} 0 & \text{dla } h = 0 \\ 1 & \text{dla } h > 0 \end{cases} \quad (9.12)$$

gdzie:

C – próg,
h – odstęp.

Funkcja ta jest zapisywana jako **C Nugget** albo **C Nugg** i opisuje jako pierwszy składnik sumy część progu będącą konsekwencją istnienia mikrostruktury w danych.



Rys. 9.10 Podstawowe modele wariogramów: a – efekt samorodkowy; b – model sferyczny; c – model wykładniczy; d – model liniowy (z progiem); e – model potęgowy; f – model gaussowski.

Prawdopodobnie najczęściej wykorzystywaną jest funkcja sferyczna (*spherical model*) opisana wyrażeniem (Rys. 9.10b):

$$\gamma(h) = C * \begin{cases} 1.5 \frac{h}{a} - 0.5 \left(\frac{h}{a}\right)^3 & \text{dla } 0 \leq h \leq a \\ 1 & \text{dla } h > a \end{cases} \quad (9.13)$$

gdzie:

- C – próg;
- a – zakres;
- h – odstęp.

Funkcja sferyczna przyjmuje stałą wartość progu C po osiągnięciu zakresu. Przy małych wartościach odległości charakteryzuje się ona największą stromością w porównaniu z funkcją

gaussowską i wykładniczą. Jest zapisywana jako **C Spherical(a)** lub **C Sph(a)**. W połączeniu z efektem samorodkowym może przyjąć wtedy postać: **0.5 Spherical(25430)+0.3 Nugget**.

Kolejną funkcją jest funkcja wykładnicza (*exponential model*) opisana wyrażeniem (Rysunek 9.10c):

$$\gamma(h) = C * \left(1 - \exp\left(-\frac{3h}{a}\right) \right) \quad (9.14)$$

gdzie:

C – próg,
a – zakres,
h – odstęp.

W przeciwieństwie do funkcji sferycznej osiąga ona około 95% wartości progę w odległości równej zakresowi.

Wykorzystuje się także model o charakterze liniowym. W wersji podstawowej semiwariancja rośnie cały czas wraz ze wzrostem odstepu zgodnie z wyrażeniem:

$$\gamma(h) = m * |h| \quad (9.15)$$

gdzie:

m – współczynnik,
h – odstęp.

Odmianą tego modelu jest funkcja liniowa z progą, rośnie ona do osiągnięcia wartości progowej, a następnie przyjmuje wartość stałą (Rys. 9.10d).

Brak progę jest także cechą funkcji potęgowej o postaci (Rysunek 9.10e):

$$\gamma(h) = m * h^n \quad \text{dla } 0 < n < 2 \quad (9.16)$$

gdzie:

m – współczynnik,
n – parametr,
h – odstęp.

Ostatni z przedstawionych modeli — funkcja gaussowska — podobnie jak funkcja wykładnicza nie osiąga całkowitej wartości progę dla odległości równej zakresowi. Charakteryzuje się ona największym spłaszczeniem przy małych wartościach odległości. Opisuje się ją wyrażeniem (Rysunek 9.10f):

$$\gamma(h) = C * \left(1 - \exp\left(-\frac{3h^2}{a^2}\right) \right) \quad (9.17)$$

gdzie:

C – próg,

a – zakres,
h – odstęp.

Do modelowania anizotropii stosuje się ideę zredukowanego dystansu. Jeżeli przyjmiemy, że \mathbf{a}_x jest zakresem w kierunku \mathbf{X} , a \mathbf{a}_y zakresem w kierunku \mathbf{Y} to anizotropowy wariogram może być wyrażony jako,

$$\gamma(\mathbf{h}) = \gamma(h_x, h_y) = \gamma_1(h_1) \quad (9.18)$$

gdzie h_1 wynosi
$$h_1 = \sqrt{\left(\frac{h_x}{a_x}\right)^2 + \left(\frac{h_y}{a_y}\right)^2} \quad (9.19)$$

Metoda ta wprowadza anizotropię do modelu zmienności za pomocą parametrów elipsy (długości osi i ich kierunku). W praktyce modelowanie anizotropii polega na wyznaczeniu: (1) kąta maksymalnej ciągłości, (2) zakresów w kierunku maksymalnej i minimalnej ciągłości oraz (3) progu dla kierunku minimalnej ciągłości. Zapis funkcji semiwariancji przyjmuje wtedy postać:

próg * funkcja (zakres_maksymalny, zakres_minimalny, kąt_maksymalnej_ciągłości).

Przykładowo może ona przyjąć postać:

0.5 Spherical(25430,1500,23).

Czasami zamiast zakresów stosuje się ich stosunek $\mathbf{a}_{\min}/\mathbf{a}_{\max}$ (*anizotropy ratio*) i wtedy przedstawiona powyżej funkcja przyjmuje postać:

0.5 Sph(25430,23,0.056).

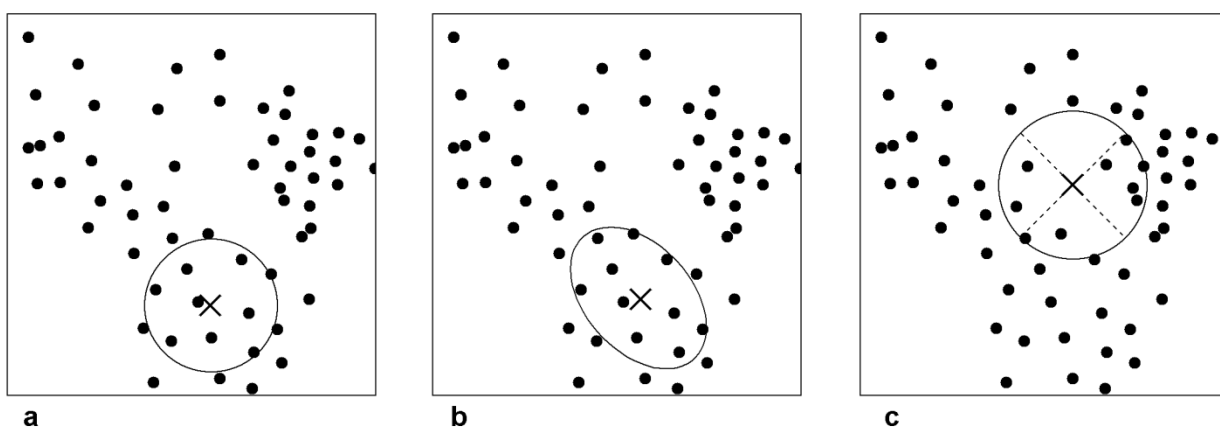
Operacja wyznaczania funkcji opisującej anizotropię może przebiegać w czterech etapach. W etapie pierwszym (1) wyznacza się kierunek maksymalnej ciągłości, tworząc wariogramy kierunkowe w poszukiwaniu takiego kierunku, dla którego wartości progu są najmniejsze. Kierunek (kąt) maksymalnej ciągłości jest pierwszym parametrem funkcji. Następnie, w podobny sposób, (2) wyznacza się kierunek i próg minimalnej ciągłości (maksymalnej zmienności). Próg maksymalnej zmienności jest drugim parametrem funkcji. Kolejnym krokiem (3) jest dopasowanie wykresu wariogramu do chmury punktów lub wariogramu eksperymentalnego (dla kierunku minimalnej ciągłości) zmieniając wartości obu zakresów, ale pozostawiając je sobie równe. Po tym kroku zakres minimalny jest kolejnym określonym parametrem funkcji. W ostatnim etapie (4) tworzony jest wariogram dla kierunku maksymalnej ciągłości i zmieniając tylko wartość zakresu maksymalnego przeprowadza się dopasowanie

przebiegu wykresu do chmury punktów lub wariogramu eksperymentalnego i w ten sposób określamy ostatni parametr funkcji (zakres maksymalny).

W zależności od oprogramowania istnieją różne metody dopasowania funkcji. Istnieją metody automatycznego lub półautomatycznego dopasowania, ale zawsze pozostawia się także możliwość dopasowania ręcznego.

9.4 Otoczenia punktów estymowanych

Większość estymacji i symulacji prowadzonych metodami geostatystycznymi ma charakter lokalny. Oznacza to, że przypisanie nowej wartości w miejscu niepróbkowanym odbywa się na podstawie podzbioru punktów w pewnym „lokalnym otoczeniu”. Istnieje szereg możliwości kontroli zarówno liczby punktów jak i kształtu lokalnego otoczenia (Rysunek 9.11).



Rys. 9.11 Otoczenia punktów estymowanych: a – otoczenie kołowe bez sektorów; b – otoczenie w kształcie elipsy (uwzględnianie anizotropii); c – otoczenie z sektorami.

Lokalne otoczenie punktów jest najczęściej definiowane za pomocą koła o zadanym promieniu (Rys. 9.11a) albo elipsy o określonym kierunku dłuższej osi i odpowiednim stosunku osi krótszej do dłuższej (Rys. 9.11b). Dzięki temu dla powierzchni anizotropowych otoczenie może być dostosowane do ich charakteru (zgodne stosunki anizotropii modelu i lokalnego otoczenia). Otoczenie może być traktowane jako całość, albo zostać podzielone na sektory (Rys. 9.11c). Zapewnia to równomierne rozłożenie punktów (we wszystkich kierunkach) na około punktu estymowanego. Zwykle określa się liczbę punktów pomiarowych w otoczeniu (lub sektorze), które mają być brane pod uwagę w procesie interpolacji. Jeżeli w otoczeniu jest więcej punktów niż jest to określone, wybierane są punkty leżące najbliżej. Istnieje także możliwość określenia minimalnej liczby punktów, które powinny się znaleźć w otoczeniu, lub każdym z sektorów. Jeżeli tak jak na Rysunku 9.11c istnieje sektor bez punktów, zostaną one dobrane przez rozszerzenie tego sektora poza granice okręgu wyznaczającego otoczenie. Sposób wyznaczania podzbioru punktów przy prowadzeniu estymacji lub symulacji lokalnej jest specyficzny dla

danego rodzaju oprogramowania [Ramka 9.1], ale w każdym z nich znajdują się zasady przedstawione powyżej.

9.5 Estymacja za pomocą krigingu

Większość metod krigingu ma charakter estymatorów liniowych, w których wartość estymowana jest określana jako średnia ważona (ważona liniowa kombinacja) z wartości w punktach pomiarowych otaczających miejsce estymacji, za pomocą wyrażenia:

$$f(x_j, y_j) = \sum (v(x_i, y_i) * waga) \quad (9.20)$$

W ten sam sposób przeprowadza się interpolację deterministyczną metodą odwrotnych odległości [patrz podroz. 5.6]. Różnica polega jedynie na sposobie wyznaczania wag. W metodzie krigingu zakłada się, że błąd estymacji powinien być nieobciążony (*unbiased*), czyli jego oczekiwana wartość (średnia) powinna wynosić zero, oraz powinien mieć jak najmniejszy rozrzut (wariancję). Estymatory, które spełniają taki warunek noszą nazwę BLUE (*Best Linear Unbiased Estimator*). Celem krigingu jest zatem estymacja nieznannej wartości w dowolnym punkcie za pomocą ważonej liniowej kombinacji pomierzonych wartości z zachowaniem przedstawionych powyżej warunków. Estymowana wartość może być wyrażona jako:

$$v_E = \sum_{j=1}^n w_j v_j \quad (9.21)$$

natomiast błąd jej estymacji może być określony wyrażeniem :

$$r_i = v_{iE} - v_{iRZECZYWISTE} \quad (9.22)$$

Średni błąd estymacji będzie wtedy wynosił,

$$m_r = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k r_i \quad (9.23)$$

Pierwszy warunek o nieobciążoności (średni błąd estymacji jest równy zero) będzie spełniony jeżeli,

$$\sum_{i=1}^k w_i = 1 \quad (9.24)$$

Natomiast uwzględnienie drugiego warunku mającego postać,

$$\sigma_r^2 = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k (v_i - m_i)^2 \rightarrow \min \quad (9.25)$$

i wymaga zastosowania metody mnożników Lagrange'a do wyznaczenia ekstremów. Parametr Lagrange'a μ jest związany z wariancją σ^2 za pomocą wyrażenia,

$$\sigma_r^2 = \sigma^2 + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_i w_j C_{ij} - 2 \sum_{i=1}^n w_i D_{i0} + 2 \mu \left(\sum_{i=1}^n w_i - 1 \right) \quad (9.26)$$

gdzie:

n – liczba pomiarów,

σ^2 – wariancja,

C_{ij} – wartość funkcji kowariancji (między pomiarami),

D_{i0} – wartość funkcji kowariancji (między pomiarami, a wartością estymowaną).

W rezultacie zbiór wag w_i , który minimalizuje wariancję z ograniczeniem, że ich suma równa się 1 spełnia układ $n+1$ równań określanych jako system równań zwyczajnego krigingu mających postać,

$$C * w = D \quad (9.27a)$$

lub

$$\begin{bmatrix} C_{11} & \cdot & \cdot & C_{1n} & 1 \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & 1 \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & 1 \\ C_{n1} & \cdot & \cdot & C_{nn} & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 0 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} w_1 \\ \cdot \\ \cdot \\ w_n \\ \mu \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{10} \\ \cdot \\ \cdot \\ C_{n0} \\ 1 \end{bmatrix} \quad (9.27b)$$

Rozwiązanie tego układu przebiega w następujący sposób,

$$C * w = D \quad (9.28)$$

$$C^{-1} * C * w = C^{-1} * D$$

$$I * w = C^{-1} * D$$

$$w = C^{-1} * D$$

gdzie:

I – macierz jednostkowa,

C^{-1} – macierz odwrotna.

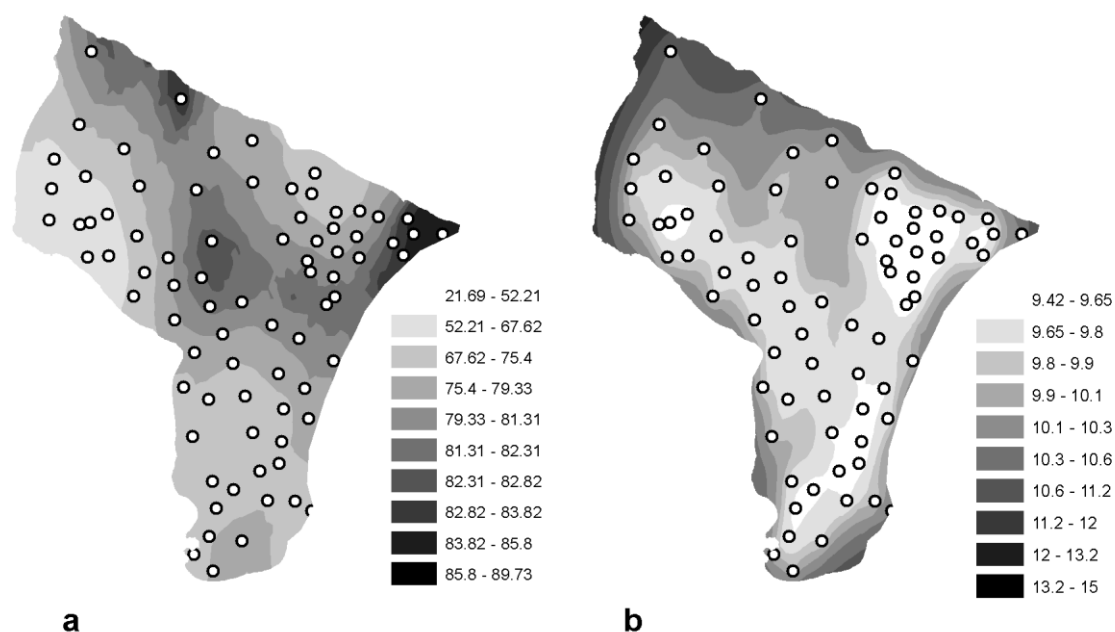
Wyrażenie na zminimalizowaną wariancję (błąd estymacji) będzie miało postać,

$$\sigma_r^2 = \sigma^2 - w * D \quad (9.29)$$

Należy zauważyć, że estymacja w każdym punkcie wykorzystuje inny zestaw wag, czyli wymaga każdorazowo rozwiązania równania krigingu. Jak pokazano powyżej, model zmienności jest reprezentowany przez wariogram, natomiast rozwiązanie równania krigingu wykorzystuje kowariogram, z którego tworzy się macierz kowariancji.

9.5.1 Kriging zwyczajny

Kriging zwyczajny to podstawowa metoda estymowania powierzchni ciągłych za pomocą punktowych pomiarów danych ilościowych. Metoda ta umożliwia tworzenie map wartości oczekiwanej (średniej) oraz map błędu standardowego estymacji (odchylenia standardowego), który przyjmuje się, że jest równy pierwiastkowi zminimalizowanej wariancji. Na Rysunku 9.12 pokazano przykład estymacji wartości oczekiwanej (Rys. 9.12a) i błędu estymacji (Rys. 9.12b) dla pomiarów punktowych pewnej zmiennej.



Rys. 9.12 Interpolacja za pomocą krigingu zwyczajnego: a – wartość oczekiwana; b – błąd standardowy estymacji.

Wartości błędu estymacji są zależne od zmienności przestrzennej i rozmieszczenia punktów pomiarowych. Na Rys. 9.12b największe wartości osiągają one w rejonach ekstrapolacji (granice obszaru) i w miejscach gdzie istnieją wyraźne luki w rozmieszczeniu punktów.

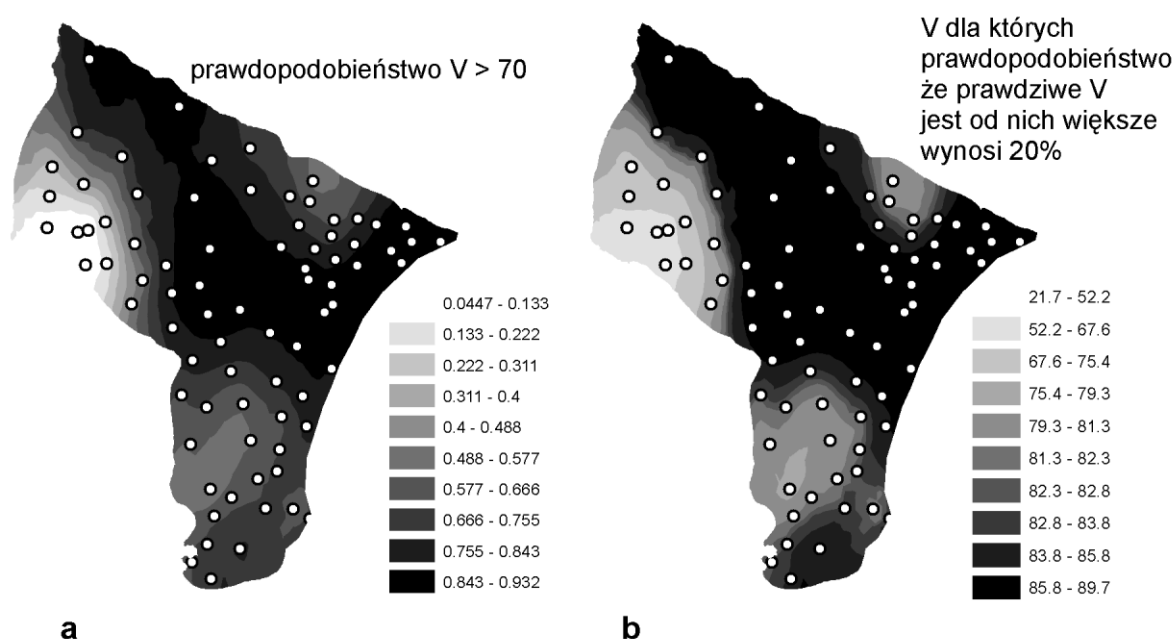
W modelowaniu geostatystycznym zakładamy, że w dowolnym punkcie estymowanej powierzchni rozkład danych jest opisany przez pewną funkcję losową. Jeżeli znamy dla danego miejsca wartość średnią i odchylenie standardowe, oraz możemy założyć normalny rozkład danych (w punkcie), to możemy wyznaczyć zarówno prawdopodobieństwo wystąpienia wartości poniżej lub powyżej pewnej wartości progowej, jak i wartości, od których zadany procent danych będzie mniejszy lub większy (kwantyle). Jeżeli nie znamy rozkładu danych, to możemy posłużyć się nierównością Czebyszewa. Podaje ona prawdopodobieństwo zdarzenia, że wartość dodatniej zmiennej losowej o dowolnym rozkładzie jest większa lub mniejsza od pewnej ustalonej liczby. Jeżeli X jest zmienną losową o wartości średniej μ i odchyleniu standardowym σ wtedy,

$$P(\mu - n\sigma < X < \mu + n\sigma) \geq 1 - \frac{1}{n^2} \quad (9.30)$$

gdzie:

n – jest wielokrotnością odchylenia standardowego.

Tworzenie map prawdopodobieństwa i kwantyli jest często opcją dostępną w oprogramowaniu geostatystycznym. Wykorzystanie nierówności Czebyszewa wymaga natomiast wykorzystania algebry map np. dodania do wartości średniej n -krotności odchylenia standardowego po to, aby wyznaczyć mapę wartości, powyżej których znajduje się mniej niż zadany procent danych. Na Rysunku 9.13 przedstawiono mapę prawdopodobieństwa przekroczenia pewnej wartości (Rysunek 9.13a) i mapę wartości (Rysunek 9.13b), dla których prawdopodobieństwo wystąpienia wartości większej wynosi 20% (kwantyli).

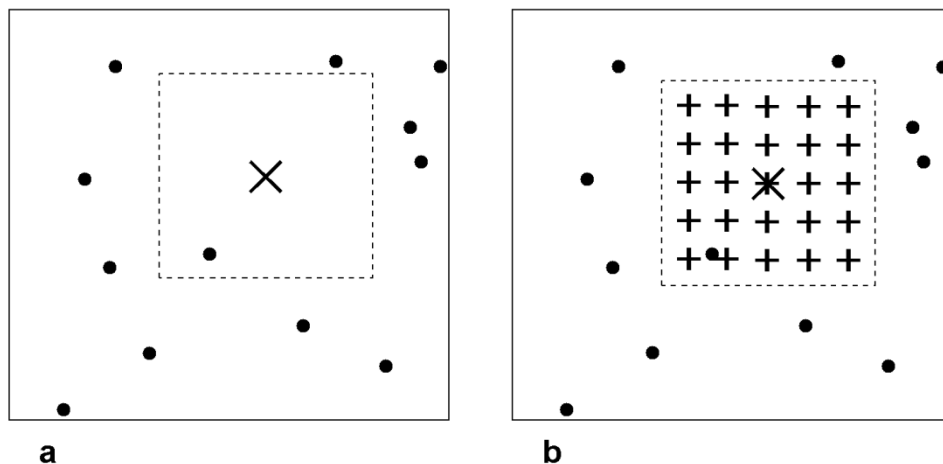


Rys. 9.13 Interpolacja za pomocą kriginu zwyczajnego: a – mapa prawdopodobieństwa (wystąpienia w danym miejscu wartości zmiennej większej od 70); b – mapa kwantyli (wartości dla których prawdopodobieństwo wystąpienia wartości większych wynosi 20%).

9.5.2 Kriging blokowy

Rozwiązanie równań kriginu daje możliwość estymacji w punktach. Istnieją jednak sytuacje, kiedy potrzebna jest informacja o średniej wartości w komórce. Przykładowo możemy chcieć obliczyć masę wody jaka spadła na dany obszar w czasie roku na podstawie punktowych pomiarów lub przygotować dane z pomiarów punktowych do porównania z danymi pozyskanymi za pomocą zdjęć satelitarnych. Przy pomiarze z satelity wartość w komórce rastra zdjęcia satelitarnego (pikselu) reprezentuje najczęściej średnią wartość dla odpowiadającego

komórce wycinka powierzchni ziemi. Estymacja wartości średniej jest także podstawą wykorzystania geostatystyki w ocenie zawartości danego minerału czy pierwiastka w objętości wydobywanego materiału w górnictwie. Podstawową metodą takiego szacunku jest kriging blokowy (Rysunek 9.14).



Rys. 9.14 Kriging punktowy i blokowy: a – do komórki przypisana jest wartość estymowana w punkcie centralnym (kriging punktowy) ; b – do komórki przypisywana jest wartość średniej z szeregu punktowych estymacji na obszarze komórki.

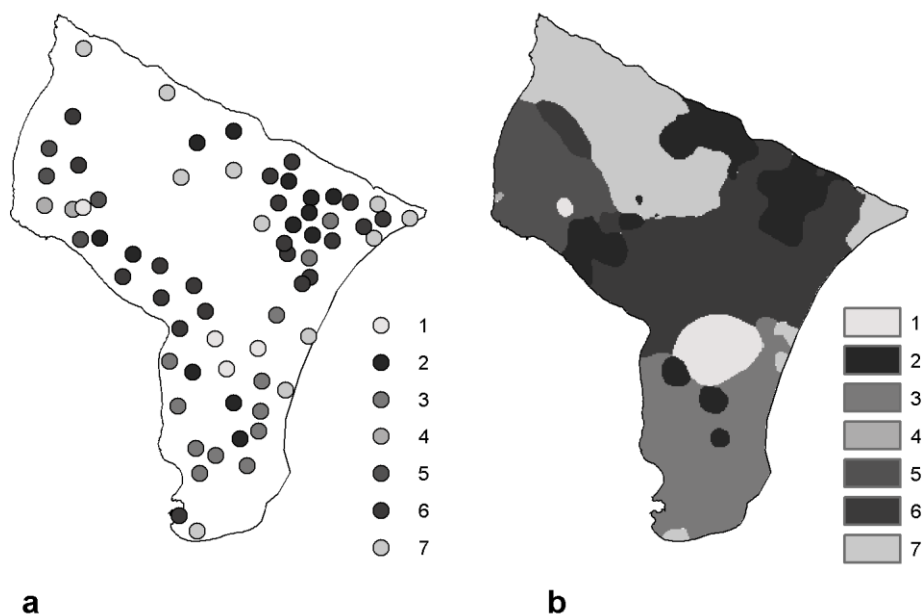
W przeciwieństwie do krigingu punktowego, w którym estymacja wartości w komórce rastrowej (zaznaczonej na rysunku linią przerywaną) jest wykonywana w jej punkcie centralnym, w kringingu blokowym szacuje się średnią wartość dla powierzchni komórki. W tym celu wykonuje się szereg punktowych estymacji, a następnie oblicza z nich wartość średnią. W praktyce najczęściej nie dokonuje się estymacji zmiennej dla każdego punktu, ale oblicza się średnie wagi i estymuje wartość średnią. Metoda kringingu blokowego może być stosowana z każdym rodzajem kringingu, gdyż określa jedynie sposób obliczania wartości w danej komórce rastrowej.

9.5.3 Kriging indykatorowy

Tworzenie map zmiennych jakościowych z pomiarów punktowych, na przykład rodzaju osadów na dnie, przysparza sporo problemów przy stosowaniu metod deterministycznych. Różne dziedziny wykształciły co prawda własne metody interpolacji takich danych, ale najczęściej mają one charakter subiektywny i wymagają dużych nakładów pracy. Podobnie jak inne metody deterministyczne, one także nie dają możliwości oceny błędu estymacji. Geostatystyczną metodą interpolacji danych jakościowych jest kriging indykatorowy. Operuje on wyłącznie pomiarami o wartościach 0 lub 1 zwanych indykatorami. Konwersja danych

jakościowych na indykatorowe dokonuje się dla każdej klasy oddzielnie. Punktom pomiarowym, w których ta klasa występuje przypisuje się 1, a pozostałym 0. Tego typu zmienne pomiarowe mogą także zostać utworzone z danych ciągłych przez zastosowanie progu, który dokona konwersji tych danych na wartości binarne, przypisując wszystkim wartościom znajdującym się poniżej progu 0, a powyżej 1 albo odwrotnie.

Następnie dla tak przetransformowanych danych (0 lub 1) przeprowadza się na przykład kriging zwyczajny, ale równie dobrze można zastosować inny rodzaj krigingu. Utworzona mapa pokazuje prawdopodobieństwo, że w danym miejscu występuje dana klasa. Takie mapy prawdopodobieństwa tworzy się oddzielnie dla każdej klasy. W ostatnim etapie do każdej komórki rastra przypisuje się klasę o największym prawdopodobieństwie wystąpienia. Ten ostatni etap można przeprowadzić w GIS wykorzystując rastrowe funkcje lokalne.



Rys. 9.15 Kriging indykatorowy: a – punktowe dane jakościowe (siedem klas) ; b – jakościowa mapa ciągła siedmiu klas

Na Rysunku 9.15b pokazana jest mapa klas otrzymana z punktowych pomiarów zmiennej jakościowej o wartościach odpowiadających identyfikatorowi klasy (Rysunek 9.15a). Najpierw za pomocą krigingu indykatorowego wykonano mapy prawdopodobieństwa wystąpienia każdej z klas (siedem oddzielnych map **k1,k2....k7**). Następnie za pomocą statystyki lokalnej utworzono mapę wartości maksymalnej z tych map (**mapa_max**) oraz posłużono się następującą sekwencją funkcji algebry map wykorzystując funkcję warunkową [patrz ramka 5.2]:

```
s1 = con( Abs( [k1]-[mapa_max] ) < 0.00001, 1, 0)
s2 = con( Abs( [k2]-[mapa_max] ) < 0.00001, 2, 0)
s3 = con( Abs( [k3]-[mapa_max] ) < 0.00001, 3, 0)
s4 = con( Abs( [k4]-[mapa_max] ) < 0.00001, 4, 0)
```

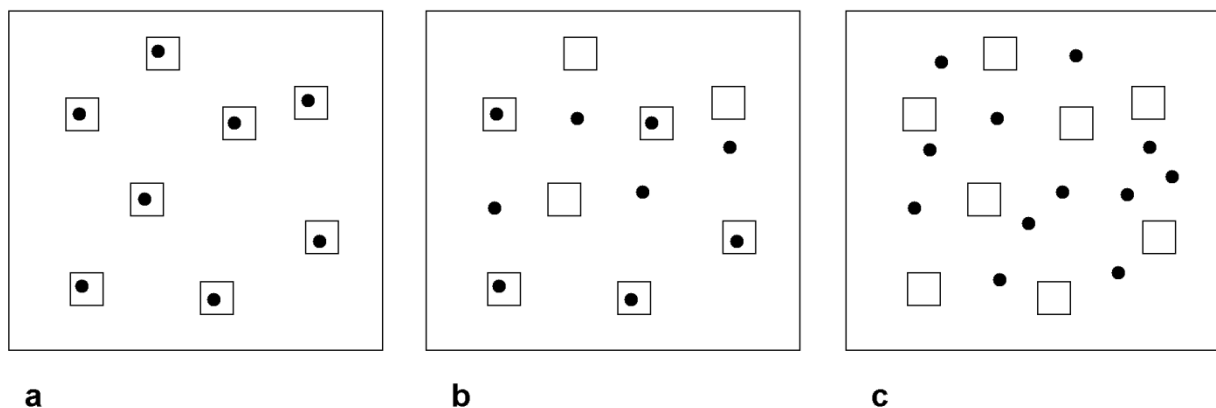
```

s5 = con( Abs( [k5]-[mapa_max]) < 0.00001, 5, 0)
s6 = con( Abs( [k6]-[mapa_max]) < 0.00001, 6, 0)
s7 = con( Abs( [k7]-[mapa_max]) < 0.00001, 7, 0)
mapa_9_15B = s1+s2+s3+s4+s5+s6+s7

```

9.5.4 Kokriging

Częstym problemem przy tworzeniu map metodami geostatystycznymi jest ograniczona liczba punktów pomiarowych. Jednocześnie zdarza się, że oprócz analizowanych danych istnieją inne, które ze względu na skorelowanie z badaną zmienną mogą dostarczyć dodatkowej informacji do prowadzonej estymacji w niepróbkowanych miejscach. Kokriging jest metodą pozwalającą na wykorzystanie w procesie interpolacji oprócz danych podstawowych (*primary data*) innych pomocniczych danych (*secondary data*). Wszystkie zbiory danych wprowadzane do kokrigingu mają charakter punktowy i mogą być rozmieszczone w przestrzeni według trzech schematów (Rysunek 9.16). Jeżeli mamy dwa zbiory danych punktowych (zaznaczone na rysunku dwoma różnymi symbolami) reprezentujących dwie zmienne, to ich wzajemne położenie może być izotropiczne, częściowo heterotropiczne lub całkowicie heterotropiczne (Rysunek 9.16).



Rys. 9.16 Wzajemne położenie pomiarów (punktów pomiarowych) w kokrigingu: a – izotropiczne ; b – częściowo heterotropiczne; c – całkowicie heterotropiczne.

Przy położeniu izotropicznym (Rys. 9.16a) lokalizacja punktów pomiarowych obu zbiorów pokrywają się (w każdym punkcie pomiarowym istnieją zmienne podstawowe i pomocnicze). Natomiast w sytuacji całkowicie heterotropicznej (Rys. 9.16c) brak jest wspólnych punktów pomiarowych (o tym samym położeniu) dla obu zmiennych, czyli w każdym punkcie pomiarowym dokonano pomiaru tylko jednej zmiennej. Istnieje także możliwość sytuacji pośredniej (Rys. 9.16b), w której w części punktów pomiarowych zmierzono dwie zmienne, a w części tylko jedną. Istnieją dwa możliwe scenariusze pozyskiwania danych do kokrigingu.

W pierwszym w trakcie akcji pomiarowej wykonuje się w punktach pomiary, przy czym na części punktów wykonujemy tylko pomiaru jednej zmiennej, a w pozostałych dwóch lub więcej. Takie postępowanie może być uzasadnione dużą czasochłonnością lub kosztami pozyskania określonej zmiennej. W drugim scenariuszu na punktach pomiarowych wykonujemy pomiar jednej zmiennej (podstawowej), natomiast dane pomocnicze pozyskujemy za pomocą ekstrakcji wartości z mapy rastrowej lub zdjęcia satelitarnego.

Aby dane pomocnicze mogły być uzupełnieniem informacji o rozkładzie przestrzennym danych podstawowych, muszą być z nimi skorelowane. Tak jak w krigingu do modelowania przestrzennej zmienności jednej zmiennej wykorzystywany był wariogram tak w kokrigingu modeluje się relację między dwiema zmiennymi w funkcji odległości za pomocą cross-wariogramu, który ma postać:

$$\gamma_{vu}(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{(i,j)_{h_{i,j}=h}} (v_i - v_j)(u_i - u_j) \quad (9.31)$$

gdzie:

$N(h)$ – liczba par danych, które są rozdzielone przez h ,
 v, u – zmienne.

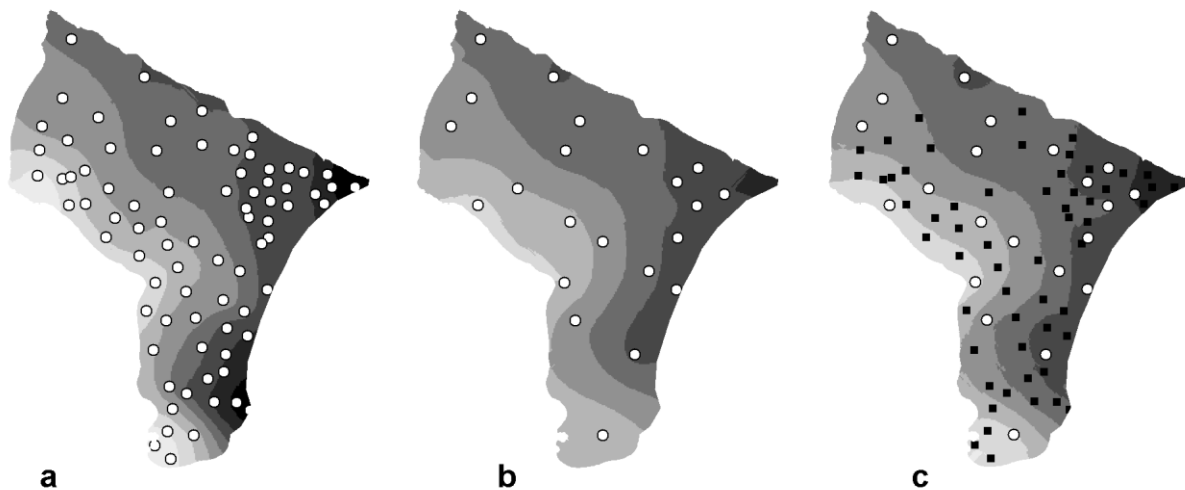
Jeżeli zmiennych pomocniczych jest więcej niż jedna konieczne jest badanie wszystkich kombinacji wzajemnych relacji. Estymacja metodą kokrigingu zmiennej podstawowej u na podstawie pomiarów punktowych u i pomocniczych v będzie miała postać:

$$u = \sum_{j=1}^n a_j u_j + \sum_{i=1}^m b_i v_i \quad (9.32)$$

gdzie a i b wektory wag spełniających warunek $\sum_{j=1}^n a_j = 1$ i $\sum_{i=1}^m b_i = 0$.

Istotnym problemem przy stosowaniu kokrigingu jest opracowanie modeli semiwariancji dla zmiennej podstawowej, każdej ze zmiennych pomocniczych oraz modeli cross-semiwariancji pomiędzy zmienną podstawową i pomocniczymi. Modele te nie mogą być tworzone niezależnie od siebie, ponieważ układ równań kokrigingu powinien spełniać warunek liniowej koregionalizacji (*linear model of coregionalization* – LMC) sprawiający, że wariancja jakiegokolwiek kombinacji zmiennych będzie zawsze dodatnia. Proces kokrigingu został przedstawiony na Rysunku 9.17. Na pierwszym rysunku (Rysunek 9.17a) pokazano mapę otrzymaną za pomocą zwykłego krigingu z punktów pomiarowych jednej zmiennej (podstawowej). Na punktach tych wykonywano także pomiar drugiej zmiennej (pomocniczej), w celu wykorzystania jej w kokrigingu. Ze zbioru zmiennej podstawowej wybrano podzbiór

punktów (około 30%) i wykonano powtórnie mapę za pomocą kriginu zwyczajnego (Rysunek 9.17b). Mapa ta wyraźnie różni się od poprzedniej ze względu na znacznie mniejszą liczbę punktów pomiarowych. Trzecia mapa (Rysunek 9.17c) została wykonana za pomocą kokriginu. Wykorzystano podzbiór zmiennej podstawowej z którego wykonano drugą mapę i wszystkie dane pomocnicze. Efekt wykorzystania dodatkowych zmiennych jest dobrze widoczny w dolnej części mapy.



Rys. 9.17 Porównanie interpolacji metodą kriginu i kokriginu: a – kriging z pełnego zbioru danych podstawowych (koła z białym środkiem) ; b – kriging z podzbioru danych podstawowych; c – kokriging z podzbioru danych podstawowych i zbioru danych pomocniczych (czarne punkty). Symbolizacja estymowanych wartości jest taka sama dla trzech map.

Ramka 9.1

Programy geostatystyczne

Istnieje szereg programów umożliwiających analizę geostatystyczną oraz prowadzenie interpolacji za pomocą kriginu. Generalnie można je podzielić na trzy grupy. Pierwszą grupę stanowią programy komercyjne, które często posiadają ukierunkowane wersje przeznaczone dla zastosowań górniczych (wydobywczych). Przy tego typu zastosowaniach muszą one umożliwiać prowadzenie interpolacji w przestrzeni trójwymiarowej. Przykładami takich programów są **Isatis** (<http://www.geovariances.com/>) i **GS+** (<http://www.rockware.com/catalog/pages/gsplus.html>). Drugą grupę stanowią programy naukowe, których niewątpliwą zaletą jest to, że są bezpłatne, a wadami najczęściej uboga, a w każdym razie niepełna dokumentacja, często brak wygodnego interfejsu użytkownika i możliwości tworzenia produktów końcowych analizy czyli map różnego rodzaju. Do takich programów należą obecny od wielu lat **GSTAT** (<http://www.gstat.org/>) którego najnowsza wersja jest pakietem w środowisku **R** [patrz ramka 8.2] oraz nowy program do trójwymiarowej analizy geostatystycznej **SgeMS** (<http://sgems.sourceforge.net/>) będący następcą biblioteki **GSLIB** (<http://www.gslib.com/>). Trzecią i ostatnią grupę stanowią zestawy funkcji geostatystycznych, które zostały dołączone do komercyjnych

programów służących do tworzenia map jak **Surfer** (<http://www.goldensoftware.com/products/surfer/surfer.shtml>), lub oprogramowania GIS takiego jak **Idrisi** (<http://www.clarklabs.org/>), do którego dołączono funkcje programu GSTAT wraz z graficznym interfejsem oraz **ArcGIS** dla którego zostało stworzone specjalne geostatystyczne rozszerzenie **Geostatistical Analyst**.

Wszystkie wymienione wyżej programy pozwalają na realizację podstawowych funkcji analizy geostatystycznej związanych z procesem dwuwymiarowej estymacji. Są to analiza strukturalna czyli analiza zmienności przestrzennej i tworzenie wariogramu eksperymentalnego, modelowanie wariogramu i przeprowadzanie estymacji za pomocą krigingu. Programy przeznaczone do celów górniczych oraz niektóre programy naukowe pozwalają na prowadzenie estymacji i symulacji za pomocą szeregu metod w przestrzeni dwu lub trójwymiarowej.

A. Literatura

Podręczniki

Adamczyk J., Będkowski K., 2005, Metody cyfrowe w teledetekcji, Wydawnictwo SGGW, Warszawa

Berry J.K., 2006, Map Analysis. Procedures and Applications in GIS Modeling. BASIS Press, (on line book <http://www.innovativegis.com/basis/MapAnalysis/>)

Bonham-Carter G. F., 1994, Geographic Information Systems for Geoscientists: Modelling with GIS, Pergamon

Bugayevskiy L. M., J. P. Snyder, 1995, Map Projections, A Reference Manual, Taylor & Francis

Burrough P.A., 1986, Principles of Geographical Information Systems for land resources assessment, Clarendon Press, Oxford

Clarke K. C., 1995, Analytical and Computer Cartography, Prentice Hall

Convis C. L., Jr., 2003, Conservation Geography, Case Studies in GIS, Computer Mapping and Activism, ESRI Press

DeMers M.N., 2002, GIS modeling in raster, John Wiley & Sons

DeMers M. N., 2005, Fundamentals of Geographic Information Systems, John Wiley & Sons

Goodchild M. F., B. O. Parks, L. T. Steyaert, 1993, Environmental Modeling with GIS, Oxford University Press

Isaaks E.H., Srivastava R.M., 1989, Applied Geostatistics, Oxford University Press

Litwin L., G. Myrda, 2005, Systemy Informacji Geograficznej, Helion

Longley P.A., Goodchild M.F., Maguire D.J., Rhind D.W. (red.), 2005, Geographical Information Systems: Principles, Techniques, Management and Applications (abridged edition), Hoboken, N.J., Wiley

Longley P.A., Goodchild M.F., Maguire D.J., Rhind D.W., 2005, Geographic Information Systems and Science, 2nd Edition, John Wiley & Sons

Magnuszewski A., 1999, GIS w geografii fizycznej, PWN

Maidment D.R. (red.), 2002, ArcHydro GIS for Water Resources, ESRI Press, Redlands, California

Tomlin C.D., 1990, Geographic Information Systems and cartographic modeling, Prentice Hall, New Jersey

Urbański Jacek, 1997, Zrozumieć GIS. analiza informacji przestrzennej, Wydawnictwo Naukowe PWN

Urbański Jacek, 2001, Modelowanie kartograficzne strefy brzegowej morza, Wydawnictwo Uniwersytetu Gdańskiego
Wang F., 2006, Quantitative Methods and Applications in GIS, Taylor & Francis, Boca Raton, London, New York
Webster R., Oliver M. A., 2001, Geostatistics for Environmental Scientists, John Wiley & Sons

Pozostała literatura

Agnew M.D., Palutikof J.P., 2000, GIS-based construction of baseline climatologies for the Mediterranean using terrain variables, *Climate Research* 14, s. 115-127
Anderson R.P., Peterson A.T., Gomez-Laverde M., 2002, *Using niche-based GIS modeling to test geographic predictions of competitive exclusion and competitive release in South American pocket mice*, *OIKOS* 98, s. 3-16
Andrews B.D., Gares P.A., Colby J.D., 2002, Techniques for GIS modeling of coastal dunes, *Geomorphology*, 48, s. 289-308
Antonic O., Krizan J., Marki A., Bukovec D., 2001, *Spatio-temporal interpolation of climatic variables over large region of complex terrain using neural networks*, *Ecological Modelling* 138, 255-263
Barban S.M.J., Parry T., 2001, *Developing and applying a GIS-assisted approach to locating wind farms in the UK*, *Renewable Energy* 24, s. 59-71
Bateman M.D., 2004, *Map and GIS database of glacial landforms and features related to the last British Ice Sheet*, *Boreas*, 33, s. 359-375
Bonazountas M., Kallidromitou D., Kassomenos P.A., Passas N., 2005, Forest Fire Risk Analysis, *Human and Ecological Risk Assessment* 11, s. 617-626
Broesamle H., Mannstein H., Schillings C., Trieb F., 2000, Assessment of solar electricity potentials in North Africa based on satellite data and a geographic information system, *Solar Energy* 70, s. 1-12
Brossard T., Elvebakk A., Joly D., Nilsen L., 2002, Modelling index of thermophily by means of a multi-source database on Broggerhalvøya Peninsula (Svalbard), *International Journal of Remote Sensing* 23(21), s. 4683-4698
Clark C.D., Evans D.J.A., Khatwa A., Bradwell T., Jordan C.J. Marsh S.H., Mitchell W.A., Federici P.R., Spagnolo M., 2004, *Morphometric analysis on the size, shape and areal distribution of glacial cirques in the Maritime Alps (Western French-Italian Alps)*, *Geografiska Annaler* 86A(3), s. 235-248

- Chapman L., Thornes J.E., 2003, *The use of geographical information systems in climatology and meteorology*, Progress in Physical Geography, 27(3), s. 313-330
- Chow T.E., Gaines K.F., Hodgson M.E., Wilson M.A., 2005, Habitat and Exposure Modeling of Raccoon for Ecological Risk Assessment: A Case Study in Savannah River Site, Ecological Modelling 189, s. 151-167
- Cole I.S., Chan W.Y., Trinidad G.S., Paterson D.A., 2004, *Holistic model for atmospheric corrosion, Part 4 – Geographic information system for predicting airborne salinity*, Corrosion Engineering, Science and Technology 39(1), s. 89-96
- Crist M.R., Wilmer B., Aplet G.H., 2005, *Assessing the value of roadless areas in a conservation reserve strategy: biodiversity and landscape connectivity in the northern Rockies*, Journal of Applied Ecology 42, s. 181-191
- Cyrus J., Hochadel M., Gehring U., Diegmann V., Brunekreef B., Heinrich J., 2005, GIS-Based Estimation of Exposure to Particulate Matter and NO₂ in an Urban Area: Stochastic versus Dispersion Modeling, Environmental Health Perspectives 113(8), s. 987 - 992
- Danks F.S., Klein D.R., 2002, Using GIS to predict potential wildlife habitat: a case study of muskoxen in northern Alaska, International Journal of Remote Sensing 23(21), s. 4611-4632
- Dirnböck T., Dullinger S., Gotfried M., Ginzler C., Grabherr G., 2003, Mapping alpine vegetation based on image analysis, topographic variables and Canonical Correspondence Analysis, Applied Vegetation Science 6, s. 85-96
- Dockerty T., Lovett A., 2003, *A Location-centered, GIS-based Methodology for Estimating the Potential Impacts of Climate Change on Nature Reserves*, Transactions in GIS, 7(3), s. 345-370
- Dömötörfy Z., Reeder D., Pomogyi P., 2003, Changes in the macro-vegetation of the Kis-Balaton Wetlands over the last two centuries: a GIS perspective, Hydrobiologia 506-509, s. 671-679
- EEA, 2005, Guide to geographical data and maps, version 1.3, European Environment Agency, s. 53, (<http://www.eionet.eu.int/gis>)
- Federici P.R., Spagnolo M. 2004, Morphometric analysis on the size, shape and areal distribution of glacial cirques in the Maritime Alps (Western French - Italian Alps), Geografiska Annaler Series A-Physical Geography, num. 3, 86 A , pp. 235-248
- Finlayson D.P., Montgomery D.R., 2003, *Modeling large-scale fluvial erosion in geographic information systems*, Geomorphology, 53, s. 147-164
- Fleming M.D., Chapin F.S., Cramer W., Hufford G.L., Serreze M.C., 2000, Geographic patterns and dynamics of Alaskan climate interpolated from a sparse station record, Global Change Biology 6, s. 49-58

- Footo M., Horn D., 2002, *Using Video and GIS to Measure Two-dimensional Water Surface Elevation in the Swash Zone*, Transactions in GIS 6(1), s. 43-68
- Formann R.T.T., Gordon M., 1986, Landscape ecology, John Wiley & Sons, New York
- Gazioglu C., Yucel Z.Y., Dogan E., 2005, *Morphological Features of Najor Submarine Landslides of Marmara Sea Using Multibeam Data*, Journal of Coastal Research, 21(4), s. 664-673
- Gegout J.C., Coudone C., Gilles B., Bernard J., 2005, *EcoPlant: A forest site database linking floristic data with soil and climate variables*, Journal of Vegetation Science 16, s. 257-260
- Gibson C., 2005, Schematic Processor Bacterial Loadings Model, CRWR (<http://www.crwr.utexas.edu/gis/gishydro05/Modeling/WaterQualityModeling/BacteriaModel.htm>)
- Gibson L.A., Wilson B.A., Cahill D.M., Hill J., 2004, Spatial prediction of rufous bristlebird habitat in a coastal heathland: a GIS-based approach, Journal of Applied Ecology, 41, s. 213-223
- Gewin V., 2004, *Mapping opportunities*, Nature 427, s. 376-377
- Guisan A., Zimmermann N.E., 2000, *Predictive habitat distribution models in ecology*, Ecological Modelling 135, s. 147-186
- Gurnell J., Shirley M.D.F., Rushton S.P., Clark M.J., Lurz P.W., 2002, Conserving red squirrels (*Sciurus vulgaris*): mapping and forecasting habitat suitability using Geographical information Systems, Biological Conservation 105, s. 53-64
- Halley V., Eriksson M., Nunez M., 2003, *Frost Prevention and Prediction of Temperatures and Cooling Rates using GIS*, Australian Geographical Studies 41(3), s. 287-302
- Hartnett M., Nash S., 2004, Modelling nutrient and chlorophyll_a dynamics in an Irish brackish waterbody, Environmental Modelling & Software 19, s. 47-56
- Hickey R., 2000, *Slope Angle and Slope Length Solutions for GIS*, Cartography, 29(1), s. 1-8
- Huabin W., Gangjun L., Weiya W., Gonghui, 2005, *GIS-based landslide hazard assessment: an overview*, Progress in Physical Geography 29(4), s. 548-567
- Huang B., Jiang B., 2002, AVTOP: a full integration of TOPOMODEL into GIS, Environmental Modelling & Software, 17, s. 261-268
- Huggel C., Kaab A., Salzman N., 2004, *GIS-based modeling of glacial hazards and their interactions using Landsat-TM and IKONOS imagery*, Norwegian Journal of Geography, 58, s. 61-73
- Hutchinson, M. F., 1993, *Development of a continent-wide DEM with applications to terrain and climate analysis*. W In Environmental Modeling with GIS, red. M. F. Goodchild i in. New York: Oxford University Press, s. 392-399

Inserra S., Phifer B., Pierson R., Campagna D., 2002, *Community-based exposure estimate for hydrogen sulfide*, Journal of Exposure Analysis and Environmental Epidemiology 12, s. 124-129

Jaeger J.A.G., 2000, *Landscape division, splitting index, and effective mesh size: new measures of landscape fragmentation*, Landscape Ecology 15: 115-130

Jaiswal R.K., Mukherjee S., Krishnamutry J., 2003, Role of remote sensing and GIS techniques for generation of groundwater prospect zones towards rural development – an approach, International Journal of Remote Sensing 24(5), s. 993-1008

Jarup L., 2004, Health and Environment Information Systems for Exposure and Disease Mapping, and Risk Assessment, Environmental Health Perspectives 112(9), s. 995-997

Joy M.K., Death R.G., 2004, *Predictive modeling and spatial mapping of freshwater fish and decapod assemblages using GIS and neural networks*, Freshwater Biology 49, 1036-1052

Kampanis N.A., Flouri E.T., 2003, *A GIS interfaced numerical model for the simulation of sound propagation in the atmosphere over irregular terrain*, Systems Analysis Modeling Simulation 43(9), s. 1199-1212

Kennelly P.J., Kimerling A.J., 2001, *Hillshading Alternatives. New Tools Produce Classic Cartographic Effects*, ArcUser, 7-9, (<http://www.esri.com/news/arcuser/0701/althishshade.html>)

Knight C.G., Chang H., Staneva M.P., Kostov D., 2001, *A Simplified Basin Model for Simulating Runoff: The Struma River GIS*, Professional Geographer, 53(4), s. 533-545

Kobler A., Adamiec M., 2000, *Identifying brown bear habitat by a combined GIS and machine learning method*, Ecological Modelling 135, s. 291-300

Laidre K.L., Heide-Jørgensen M.P., Logdson M.I., Hobbs R.C., Heagerty P., Dietz R., Jørgensen O.A., Treble M.A., 2004, Seasonal narwhal habitat associations in the high Arctic, Marine Biology 145, s. 821-831

Liu Y.B., Gebremeskel S., De Smedt F., Hoffmann L., Pfister L., 2003, A diffusive transport approach for flow routing in GIS-based flood modeling, Journal of Hydrology 283, s. 91-206

Lehman A., 1998, GIS modeling of submerged macrophyte distribution using Generalized Additive Models, Plant Ecology 139, s. 113-124

Lehman S.M., 2004, Distribution and Diversity of Primates in Guyana: Species-Area Relationships and Riverine Barriers, International Journal of Primatology 25(1), s. 73-95

Luzio M.D., Arnold J.G., Srinivasan R., 2004, *A GIS-Coupled Hydrological Model System for the Watershed Assessment of Agricultural Nonpoint and Point Sources of Pollution*, Transactions in GIS, 8(1), s. 113-136

Maindonald J., Braun J., 2003, Data Analysis and Graphics Using R. An Example-based Approach, Cambridge University Press, pp. 360

- Mathieu R., Richardson D.M., Lavorel S., Vayreda J.G., Milton S.J., 2001, Determinants of distribution of six Pinus species in Catalonia, Spain, *Journal of Vegetation Science* 12, s. 491-502
- McGargial K., Marks B. J., 1995, *FRAGSTATS: spatial pattern analysis program for quantifying landscape structure*. General Technical Report Pnw 0, US Forest Service, Washington, DC
- McGarigal, K., S. A. Cushman, M. C. Neel, and E. Ene, 2000, *FRAGSTATS: Spatial Pattern Analysis Program for Categorical Maps*. Computer software program produced by the authors at the University of Massachusetts, Amherst. Available at the following web site:
www.umass.edu/landeco/research/fragstats/fragstats.html
- McLure J.T., Griffiths G.H., 2002, *Historic Landscape Reconstruction and Visualisation, West Oxfordshire, England*, *Transactions in GIS* 6(1), s. 69-78
- Miller C., 2005, *The Use of GIS to Compare the Land Areas Captured by Very Basic and Complex Wellhead Protection Area Models*, *Journal of Environmental Health*, 68(4), s. 21-26
- Moore I. D., Grayson R. B., Ladson A.R., 1991, *Digital terrain modeling - a review of hydrological, geomorphological and biological applications*, *Hydrol. Proc.* 5, s. 3-30
- Ninyerola M., Pons X., Roure J.M., 2000, *A methodological approach of climatological modeling of air temperature and precipitation through GIS technique.*, *Int. J. Climatol.*, 20, s. 1823-1841
- Nonomura A., Sanga-Ngoie K., Fukuyama K., 2003, *Devising a new Digital Vegetation Model for eco-climatic analysis in Africa using GIS and NOAA AVHRR data*, *International Journal of Remote Sensing* 24(18), s. 3611-3633
- Nunes de Lima M. V. (ed.), 2005, *Image2000 and CLC2000. Products and Methods*, JRC-IES, European Communities, s. 152
- Olden J.D., Poff N.L., Bledsoe B.P., 2006, *Incorporating ecological knowledge into ecoinformatics: An example of modeling hierarchically structured aquatic communities with neural networks*, *Ecological Informatics* 1, s. 33-42
- Paul J.F., Copeland J.L., Charpentier M., August P.V., Hollister J.W., 2003, *Overview of GIS Applications in Estuarine Monitoring and Assessment Research*, *Marine Geodesy*, 26, s. 63-72
- Pieterse N.M., Bleuten W., Jorgensen S.E., 2003, *Contribution of point sources and diffuse sources of nitrogen and phosphorus loads in lowland river tributaries*, *Journal of Hydrology* 271, s. 213-225
- Podlacha K., 1994, *Podstawy matematyczne polskich map topograficznych wydawanych po drugiej wojnie światowej*, *Polski przegląd kartograficzny*, tom 26, nr 3, s. 129-139

- Pullar D., Springer D., 2000, *Towards integrating GIS and catchment models*, Environmental Modelling & Software, 15, s. 451-459
- Reinfelds I., Cohen T., Batten P., Brierley G., 2004, *Assessment of downstream trends in channel gradient, total and specific stream power: a GIS approach*, Geomorphology 60, s. 403-416
- Richling A., Solon J., 2002, *Ekologia krajobrazu*, PWN
- Rigol J.P., Jarvis C.H., Stuart N., 2001, *Artificial neural networks as a tool for spatial interpolation*, International Journal of Geographical Information Science 15, s. 323-343
- Rouget M., Richardson D.M., Lavorel S., Vayreda J., Gracia C., Milton S., 2001, *Determinants of distribution of six Pinus species in Catalonia, Spain*, Journal of Vegetation Science 12, s. 491-502
- Roure J.M., 2000, *A methodological approach of climatological modeling of air temperature and precipitation through GIS techniques*, International Journal of Climatology 20, s. 1823-1841
- Saraf A.K., Choudhury P.R., Roy B., Sarma S., Vijay S., Choudhury S., 2004, *GIS based surface hydrological modeling in identification of groundwater recharge zones*, International Journal of Remote Science 25(24), s. 5759-5770
- Scull P., Franklin J., Chadwick O.A., 2005, *The application of classification tree analysis to soil type prediction in a desert landscape*, Ecological Modeling 181, s. 1-15
- Shahid S., Nath S.K., Roy J., 2000, *Groundwater potential modeling in a soft rock area using a GIS*, International Journal of Remote Sensing 21(9), s. 1919-1924
- Siitonen P., Lehtinen A., Siitonen M., 2005, *Effects of Forest Edges on the Distribution, Abundance, and Regional Persistence of Wood-Rotting Fungi*, Conservation Biology 19(1), s. 250-260
- Simonson J.T., Johnson E.A., 2005, *Development of the cultural landscape in the forest-grassland transition in southern Alberta controlled by topographic variables*, Journal of Vegetation Science 16, s. 523-532
- Singer F.J., Bleich V.C., Gudorf M.A., 2000, *Restoration of Bighorn Sheep Matapopulations in and Near Western National Parks*, Restoration Ecology 8(4S), s. 14-24
- Sleeman J.C., Kendrick G.A., Boggs G.S., Hegge J.J., 2005, *Measuring fragmentation of seagrass landscapes: which indices are most appropriate for detecting change?*, Marine and Freshwater Research, 56, pp. 851-864.
- Smith R.V., Jordan C., Annett J.A., 2005, *Aphosphorus budget for Northern Ireland: inputs to inland and coastal waters*, Journal of Hydrology 304, s.193-202

- Sørensen R., Zinko U., Seibert J., 2006, *On the calculation of the topographic wetness index evaluation of different methods based on field observation*, Hydrology and Earth System Sciences, 10, s. 101-112
- Speer J.H., Jensen R.R., 2003, A hazards approach towards modeling Pandora moth risk, Journal of Biogeography 30, s. 1899-1906
- Suri M., Hofierka J., 2004, *A New GIS-based Solar Radiation Model and Its Application to Photovoltaic Assessments*, Transactions in GIS 8(2), s. 175-190
- Stockman A.K., Beamer D.A., Bond J.E., 2006, *An evaluation of a GARP model as approach to predicting the spatial distribution of non-vagile invertebrate species*, Diversity and Distributions 12, s. 81-89
- Stockwell J., Peters D., 1999, *The GARP modeling system: problems and solutions to automated spatial prediction*, International Journal of Geographic Information Science 13, s. 143-151
- Store, R., Jokimaki J., 2003, *A GIS-based multi-scale approach to habitat suitability modelling*, Ecological Modelling, 169(1), s. 1-15
- Tappeiner U., Tappeiner G., Aschenwald J., Tasser E., Ostendorf B., 2001, *GIS-based modeling of spatial pattern of snow cover duration in an alpine area*, Ecological Modeling 138, s. 265-275
- Taylor B., Skelly D., Demarchis L.K., Slade M.D., Galusha D., Rabinowitz M., 2005, Proximity to Pollution Sources and Risk of Amphibian Limb Malformation, Environmental Health Perspectives 113(11), s. 1497-1501
- Tsanis I.K., Gad M.A., 2001, A GIS precipitation method for analysis of storm kinematics, Environmental Modelling and Software 16, s. 273-281
- Tuan L.T., Shibayama T., 2003, *Application of GIS to evaluate long-term variation of sediment discharge to coastal environment*, Coastal Engineering Journal, 45(2), s. 275-293
- Turner, M. G. 1989, *Landscape ecology: the effect of pattern on process*, Ann. Rev. Ecol. Syst. 20, s.171-197
- Urbański J., 2001, Modelowanie kartograficzne strefy brzegowej morza, Wydawnictwo Uniwersytetu Gdańskiego, Gdańsk, s. 159
- Whitley T.G., Hicks L.M., 2003, *A Geographic Information Systems approach to understanding potential prehistoric and historic travel corridors*, Southeastern Archeology 22(1), s. 77-90
- Wyatt R.J., 2003, Mapping the abundance of riverine fish populations: integrating hierarchical Bayesian models with a geographic information system (GIS), Can. J. Fisf. Aquat. Sci. 60, s. 997-1006

- Valta-Hulkkonen K., Kanninen A., Pellikka P., 2004, Remote sensing and GIS for detecting changes in the aquatic vegetation of a rehabilitated lake, *International Journal of Remote Sensing* 25(24), s. 5745-5758
- Venteris E.R., Slater B.K., 2005, *A Comparison Between Contour Elevation Data Sources for DEM Creation and Soil Carbon Prediction*, *Transactions in GIS*, 9(2), s. 179-198
- Verburg P.H., Veldkamp A., 2005, *Introduction to the Special Issue on Spatial modeling to explore land use dynamics*, *International Journal of Geographical Information Science* 19(2), s. 99-102
- Verburg P.H., Overmars K.P., Huigen M.G.A., de Groot W.T., Veldkamp A., 2006, *Analysis of the effects of land use change on protected areas in the Philippines*, *Applied Geography* 26, s. 153-173
- Xu F., Tao S., Dawson R.W., Li B., 2001, *A GIS-based method of lake eutrophication assessment*, *Ecological Modelling* 144, s. 231-244
- Wyatt R.J., 2003, *Mapping the abundance of riverine fish populations: integrating hierarchical Bayesian models with a geographic information systems (GIS)*, *Can.J.Fish. Aquat.Sci.* 60, s. 997-1006
- Zhan X., Huang M., 2004, *ArcCN-Runoff: an ArcGIS tool for generating curve number and runoff maps*, *Environmental Modelling & Software*, 19, s. 875-879

B. Spis akronimów

ABM	agent-based model (model autonomicznych elementów)
AOI	area of interest (obszar zainteresowania)
BLUE	best linear unbiased estimator (najlepszy liniowy nieobciążony estymator)
CCA	canonical corespondence analysis
CN	SCS Curve-Number method
DEM	digital elevation model
DTED	digital terrain elevation data
DTM	digital terrain model
EEA	European Environment Agency
ESDA	exploratory spatial data analysis (eksploracyjna analiza danych przestrzennych)
EVRS	European Vertical Reference System
FD	fractal dimension (wymiar fraktalny)
GAM	generalised additive model
GARP	genetic algorithm for rule-set production
GCS	Geographic Coordination System (układ współrzędnych geograficznych)
GeoTIFF	Geographic Tag Image File Format
GIS	geographic(al) information system (geograficzny system informacyjny)
GIScience	geographic(al) information science (geomatyka, geoinformacja, geoinformatyka)
GLM	generalised linear model
GPS	Global Positioning System (globalny system określania pozycji)
GUI	graphic user interface (graficzny interfejs użytkownika)
IDW	inverse distance weighted (odwrotnych odległości – metoda interpolacji)
ITRS	International Terrestrial Reference System
KML	Keyhole Markup Language
LAEA	Lambert Azimuthal Equal Area (wiernopowierzchniowe azymutalne Lamberta)
LCC	Lambert Conformal Conical (konformicznego stożkowe Lamberta)
LMC	linear model of coregionalization
LS	LS-Factor
LUT	look-up-table
LWM	length weighted mean
MAT	medial axis transformation
MCE	multi-criteria evaluation

MPHP Komputerowa Mapa Podziału Hydrograficznego Polski
MrSID Multiresolution Seamless Image Data
NAP Normal Amsterdam Peil
NASA National Aeronautics and Space Administration
NGA National Geospatial – Intelligence Agency
NIR near infrared
NMT numeryczny model terenu
PCA principal component analysis (analiza czynnikowa)
PCC percent correctly classified (procent klas poprawnych)
RGB Red, Green, Blue
RMS root mean-square error (średni błąd kwadratowy)
RS remote sensing (teledetekcja)
SAGA System for Automated Geoscientific Analyses
SHP shape file
SQL Structured (Standard) Query Language
SPI Stream Power Index
SRAD Solar RADiation
SRTM Shuttle Radar Topographic Mission
SWAT Soil Water Assessment Tool
SWIR short wavelength infrared
TIN triangulated irregular network (sieć nieregularnych trójkątów)
TOPMODEL TOPography-based hydrological MODEL
TPS thin plate spline
TWI Topographic Wetness Index
UPS Universal Polar Stereographic (uniwersalne biegunowe stereograficzne)
USLE Universal Soil Loss Equation
UTM Universal Transverse Merkator (uniwersalne poprzeczne Merkatora)
VAT Value Attribute Table
VBA Visual Basic For Applications
WIMP windows, icons, menu, pointer)
WGS84 World Geodetic System of 1984

C. Indeks

- analiza krajobrazu, 181
 - fragmentacja, 184, 198
 - gęstość liczby klas, 186
 - granice i kontrast, 197
 - izolacja, 194
 - kształt, 190
 - liczba klas, 186
 - łączność, 201
 - modele danych, 181
 - modele koncepcyjne, 183
 - powierzchnia klas, 185
 - poziomy analizy, 183, 200
 - procentowy udział klas, 185
 - równomierność, 189
 - różnorodność, 184, 187
 - strefy centralne, 191
- analiza rastrowa
 - algebra map, 130
 - alokacja, 142, 145
 - crosstabulacja (COMBINE), 128
 - dystans, 140
 - funkcje globalne, 140
 - funkcje lokalne, 126
 - funkcje sąsiedztwa, 132
 - funkcje strefowe, 136
 - grupa, 128, 135
 - reklasyfikacja, 127
 - statystyka blokowa (block), 134
 - statystyka lokalna, 129
 - statystyka ruchomego okna (focal), 133
 - statystyka stref (zonal), 137
 - strefa, 128, 136
 - wizualizacja, 122
- analiza terenu, 150, 156
 - atrybuty topograficzne, 156
 - ekspozycja, 159
 - krzywizna, 159
 - LS, 165
 - nachylenie, 157
 - promieniowanie słoneczne, 166
 - SPI, 164
 - TWI, 163
 - wizualizacja, 154
- analiza wektorowa
 - agregacja (DISSOLVE), 118
 - buforowanie, 110
 - ekstrakcja danych, 106
 - klasyfikacja (wizualizacja), 93
 - łączenie tablic, 99
 - nakładanie (UNION), 115
 - nakładanie warstw, 112
 - obliczenia (atrybuty), 96
 - palety, 93
 - pomiary kształtu, 101
 - przecinanie (INTERSECT), 113
 - selekcja atrybutowa, 94
 - selekcja przestrzenna, 103
 - sumaryzacja (atrybuty), 99
 - symbolizacja, 91
 - wizualizacja, 89
 - wycinanie (CLIP), 112
- ANUDEM, 70, 153
- ArcGIS
 - ArcHydro Tools, 175
 - Hawth's Analysis Tools, 60, 84, 107, 118, 138
 - ModelBuilder, 210
 - program, 7
 - rozszerzenia, 17, 126, 157, 167, 175, 249
- autokorelacja przestrzenna, 17
- binarne mapy (bitmapy), 54
- błąd
 - propagacja, 86
 - proporcji, 87
 - średni kwadratowy (RMS), 77, 87
 - współczynnik kappa, 88
- błąd położenia, 85
- błędy pomiarowe, 84
- dane. *Patrz anal. wekt.agregacja*
 - digitalizacja ekranowa, 81
 - generalizacja, 16, 22, 117
 - NoData (rastrowe), 121
 - pierwotne, 59
 - pozyskiwanie, 59
 - przestrzenne, 11
 - rejestracja, 16, 76, *Patrz rejestracja skanu*
 - struktura, 11
 - wektorowe dopasowanie, 79
 - wizualizacja, 17
- datum. *See układ odniesienia*
- DEM, 21, 151
 - geomorfologia, 20
 - hydrologia, 23
 - linie szkieletowe, 151

- tworzenie, 151
- usuwanie wgłębień, 168
- wypalanie rzek, 169
- dynamiczna segmentacja, 58
- ekologia, 24, 181
- ekstrakcja danych (z rastra), 105
- format
 - DXF (AutoCad), 52
 - E00 (ArcInfo export), 52
 - GeoTIFF, 54
 - GRID, 54
 - IMG, 54
 - MrSID, 54
 - shape file, 51
- FRAGSTATS, 184, 203
- fraktalny wymiar, 102, 191
- geobaza, 15
- geoida, 33
- geoinformacja, 6
- geomorfologia, 20
- geostatystyka, 221
 - ESDA, 225
 - kokriging, 246
 - kriging - rodzaje, 223
 - kriging - teoria, 240
 - kriging blokowy, 243
 - kriging indykatowy, 244
 - kriging zwyczajny, 242
 - modelowanie wariogramu, 235
 - semiwariogram, 229
 - symulacja, 221
 - trend, 227
 - wariogram eksperymentalny, 232
 - wariogram powierzchniowy (mapa), 233
 - wariogram surowy, 231
 - zmienna zregionalizowana, 222
 - zmienność przestrzenna, 228
- geotechnologia, 6
- GIS
 - historia, 8, 14
 - nauka, 19
 - zadania, 7
- gleboznawstwo, 20
- GLM, 26
- GPS, 6, 61
- hydrologia, 22, 167
- interpolacja, 16, 221
 - deterministyczna, 144
 - ekstrapolacja, 146
 - geostatystyczna. *Patrz geostatystyka*
 - IDW, 145
 - NATURAL NEIGHBOR, 145
 - SPLINE, 145
- klasyfikacja, 182
 - największego prawdopodobieństwa, 182
- klimatologia, 21
- kompozyt, 125
- kompresja danych, 55
- konwersja danych, 146
 - liniowe, 147
 - powierzchniowe, 148
 - punktowe, 146
- krajobraz, 29
- krętość linii, 101
- mapa
 - analogowa, 9
 - numeryczna, 9
 - przydatności, 211
 - skala, 9
 - tematyczna, 10, 125, 127
 - wrażliwości, 211
- metadane, 15, 86
- meteorologia, 21
- model
 - regresji, 22, 207
 - rzeczywistości, 10, 205
- model danych, 48
 - liniowa referencja, 58
 - rastrowy, 53, 120
 - TIN, 58, 151
 - topologia, 51
 - wektorowy, 50
 - wektorowy model sieci, 56
- model GIS, 18, 130, 205
 - autonomicznych elementów, 207
 - bilansu masy, 23
 - deterministyczny, 208
 - diagram blokowy, 208
 - dopływu światła do dna, 215
 - dynamiczny, 207
 - kalibracja, 218
 - komórkowy, 207
 - model regresji, 24, 28
 - modelowanie kartograficzne, 206
 - ochrony wód, 212
 - promieniowanie, 22
 - przestrzenne występowanie, 25
 - przestrzenny, 206, 215
 - regresyjny, 206, 218
 - stabilność, 218

- statyczny, 207
- stochastyczny, 208
- tworzenie, 208
- wskaźnikowy, 206, 211
- zanieczyszczeń bakteryjnych, 217
- model kolorów, 122
- modelowanie hydrologiczne, 167
 - mapa akumulacji spływu, 172
 - mapa kierunku spływu, 170
 - mapa sieci rzecznej, 173
 - wydzielanie zlewni, 174
 - zagrożenie powodziowe, 177
 - zlewnia, 167
 - zlewnie sprzężone, 176
- Monte Carlo, 28, 87, 218
- niepewność, 18, 84
- ochrona środowiska, 28, 199, 206
- odwzorowanie kartograficzne, 37
 - Gaussa-Krügera, 42
 - LAEA (*Lamberta*), 43
 - LCC (stożkowe *Lamberta*), 44
 - Merkatora, 40
 - parametry, 38
 - podział, 37
 - sprowadzanie do wspólnego, 39
 - UPS, 42
 - UTM, 40
 - Winkel Tripel, 39
 - zniekształcenia, 38
- palety, 93, 123
- Polska (mapy cyfrowe)
 - Corine2000 (pokrycie terenu), 64, 67
 - lotnicze zdjęcia, 75
 - MPHP (hydrografia), 64, 65
 - numeryczna mapa terenu, 68, 152
- południk, 34
- południk zerowy, 34
- próbkiowanie, 16, 60, 225
- pseudokolory, 122
- R, 219
- rejestracja skanu
 - błąd RMS, 77, 260
 - georeferencja, 78
 - rektyfikacja, 78
 - resampling, 78
- rozdzielczość przestrzenna, 55
- SAGA, 161
- satelitarne zdjęcia, 71
 - GeoCover, 71
 - Google Earth, 72
 - Landsat, 72
- shape file, 51
- siatka geograficzna, 35
- skala badań, 150
- skaner, 75
- SQL, 95
- statystyczne powierzchnie, 52
- tablica LUT, 123, 259
- teledetekcja, 6
- Thiessena poligony, 53, 58, 142
- Toblera prawo, 6
- TOPMODEL, 23, 163
- triangulacja, 32
- triangulacja Delanuy, 58
- układ
 - GUGIK-1980, 1965, 1942, 46
 - odniesienia (pionowy), 37
 - odniesienia (poziomego), 35
 - współrzędnych prostokątnych, 31
 - współrzędnych geograficznych, 34
- USLE (RUSLE), 165
- VAT (tab. atrybutowa), 120
- VBA, 98
- WGS84, 33
- zacienienie topograficzne, 166
- zbiory rozmyte, 85
- Ziemia
 - elipsoida, 32
 - kształt historia, 31
- zmiennie, 11

D. Spis ramek

- 1.1 Oprogramowanie GIS (ArcGIS firmy ESRI)
- 3.1 Konwersja zapisu DD/DMS w kalkulatorze systemu Windows
- 3.2 Shape file (SHP) — format wektorowy w ArcGIS
- 3.3 Formaty rastrowe w GIS
- 3.4 Próbkowanie w ArcGIS z wykorzystaniem Hawth's Analysis Tools
- 3.5 Komputerowa mapa podziału hydrograficznego Polski (MPHP)
- 3.6 Cyfrowa mapa pokrycia terenu Polski — Corine 2000
- 3.7 Numeryczna mapa terenu Polski (DTED 2, SRTM)
- 3.8 Zdjęcia satelitarne Polski — Landsat (GeoCover)
- 3.9 Google Earth
- 3.10 Hawth's Analysis Tools — konwersja punkty–linie (SHP)
- 3.11 Błąd pomiarowy
- 3.12 Metadane
- 4.1 SQL w ArcGIS
- 4.2 Tworzenie wyrażeń obliczeniowych w Visual Basic
- 4.3 Obliczenia za pomocą skryptu (programu) w Visual Basic for Applications (VBA)
- 4.4 Pomiar kształtu obiektów wektorowych w ArcGIS (9.1)
- 4.5 Sposób przypisywania atrybutów za pomocą relacji przestrzennych w ArcGIS (9.1)
- 4.6 Hawth's Analysis Tools — generalizacja linii
- 5.1 Wartość „NoData” na mapach rastrowych w ArcGIS
- 5.2 Wyrażenia obliczeniowe algebry map w ArcGIS
- 5.3 Obliczanie statystyk w strefach za pomocą funkcji Zonal Statistics (++) w Hawth's Analysis Tools
- 6.1 Tworzenie DEM dla Polski z DTED 2 i MPHP w ArcGIS
- 6.2 Program SAGA
- 6.3 ArcHydro Tools (rozszerzenie ArcGIS do analizy hydrologicznej)
- 7.1 Program FRAGSTATS
- 8.1 ModelBuilder w ArcGIS
- 8.2 R — program naukowy do analizy danych
- 9.1 Programy geostatystyczne