

Jacek WOLSKI

Polska Akademia Nauk
Instytut Geografii i Przestrzennego Zagospodarowania
Warszawa, Polska
e-mail: j.wolski@twarda.pan.pl

BŁĘDY I NIEPEWNOŚĆ W PROCESIE TWORZENIA MAP NUMERYCZNYCH

ERRORS AND UNCERTAINTY IN DIGITAL MAPPING

Słowa kluczowe: błędy, niepewność, tworzenie map numerycznych, jakość materiałów źródłowych, dane pierwotne i wtórne, GIS

Key words: errors, uncertainty, digital mapping, quality of the source materials, raw and secondary data, GIS

Streszczenie W pierwszej części artykułu omówiono błędy charakterystyczne dla etapów pozyskiwania danych pierwotnych (pomiar i badania terenowe) i przetwarzania ich do postaci wtórnej (prace kameralne), a następnie porównano wybrane kryteria oceny jakości materiałów źródłowych w ujęciu klasycznym (mapy i zbiory map „papierowych”) z cechami i standardami dokładności danych w GIS (dane numeryczne).

W drugiej części artykułu przedstawiono kolejne etapy tworzenia mapy numerycznej (wprowadzania danych), skupiając się przede wszystkim na zaletach i wadach poszczególnych metod, procedur czy modeli, ich przydatności w różnego typu badaniach oraz potencjalnych błędach i sposobach ich weryfikacji. W tym zakresie omówiono m.in.: skanowanie, kalibrację materiałów rastrowych, schematy pojęciowe (sposoby reprezentacji środowiska), wybór obiektów do badań porównawczych, wektoryzację i weryfikację topologii połączeń, generalizację graficzną i pojęciową oraz fazy normalizacji baz danych.

Abstract In first part of the article discussed specific errors for stages of collecting raw data (measurements and field studies) and processing them to the secondary forms. Then the chosen criteria of evaluation quality of the source materials („paper” maps collection) with the standards of the GIS data accuracy were compared.

In second part of the article, the next digital mapping stages (input data) were introduced. Mainly focus on advantages and defects of individual methods, procedures or models, their usefulness in the various researches as well as potential errors and their verification possibilities. It was described among others: scanning, raster calibration, environment representation methods (grid and vector models), the choice of objects to comparative studies, digitalization and vector topology verification, graphic and notional generalization and the database standardization.

WPROWADZENIE

Wykorzystanie Systemów Informacji Geograficznej w badaniach przyrodniczo-historycznych stało się już powszechne (Petit, 2002; Rumsey, Williams, 2002; Bender i in., 2005; Gregory, 2005, tam bogata literatura). Czasem jednak, zafascynowani możliwościami technologicznymi, zapominamy o najważniejszym w badaniach naukowych założeniu – informacja jest tylko wtedy użyteczna, kiedy jest wiarygodna i pełna. W staraniach o uzyskanie jak największej dokładności czy precyzji¹ pomija się fakt, że w systemach GIS nie można uzyskać wiernej „kopii” środowiska przyrodniczego, a jedynie jego lepszy lub gorszy model. Ponadto czym dalej sięgamy w przeszłość, tym pewność wyników zastępowana jest co najwyżej walorem ich prawdopodobieństwa.

Z drugiej jednak strony, w analizach przyrodniczo-historycznych bazujących zarówno na mapach sprzed epoki kartografii matematycznej, jak i tych bardziej współczesnych (XIX i XX w.), nie wolno zapominać o fundamentalnej zasadzie – *Wprowadź śmiecie, otrzymasz śmiecie* (z ang. GIGO – *Garbage In, Garbage Out*). Niska jakość materiałów źródłowych i niekontrolowana propagacja błędów na etapach zbierania i wprowadzania danych wpływają bezpośrednio na wyniki, a w konsekwencji na poprawność całego wnioskowania (por. Kienast, 1993). W artykule skupiono się więc przede wszystkim na źródłach błędów, związanych z „niedoskonałościami” materiałów i stosowanego warsztatu badawczego oraz uchybieniami samych badaczy.

Tytułem wstępu warto jeszcze wyjaśnić, co w świetle prezentowanego ujęcia problemu rozumiemy pod pojęciem mapy numerycznej. Z pewnością nie tylko prostą, wektorową lub rastrową, postać danych analogowych ani kartograficzną wizualizację danych cyfrowych. Wtedy bowiem cały świat GIS-u można by „zamknąć” w pracowniach DTP, ewentualnie przekazać w ręce użytkowników aplikacji CAD. Mówimy więc raczej o bazie danych, zawierającej logicznie powiązane i możliwe do opisanie programowalnym językiem zapytań atrybuty opisowe (nieprzestrzenne), która wraz z reprezentacją graficzną owych atrybutów w postaci obiektów o ściśle określonym charakterze geometrycznym, topologicznym i topograficznym tworzy komplementarną całość – model przystosowany do przetwarzania w systemach geoinformacyjnych.

BŁĘDY W NAUKACH ŚCISŁYCH I NAUKACH O ZIEMI

Słowo błąd w potocznym znaczeniu ma wydźwięk pejoratywny – sugeruje bowiem, że popełniono coś, co narusza przyjęte zasady. W sensie matematycznym, czy statystycznym, tzw. błąd prawdziwy oznacza różnicę między wartością zmierzoną, a rzeczywistą lub oczekiwaną (w rachunku błędów oblicza się także wiele jego pochodnych, m.in. błędy pozorne, średnie gaussowskie, graniczne czy względne).

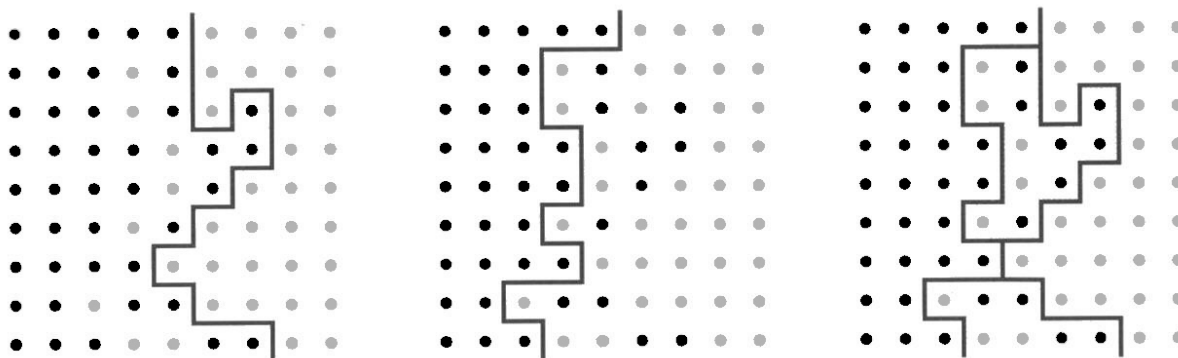
¹ Dostyc często oba terminy traktowane są jak synonimy. Jest to błąd, bowiem precyzja to stopień doskonałości przyrządów, metod i sposobów pomiarowych (dopuszczalne są błędy systematyczne), a także miara powtarzalności, natomiast dokładność to stopień doskonałości pomiaru, osiągnięty dzięki precyzji przyrządów, metod i sposobów pomiaru, a także miara zgodności z rzeczywistością.

Przyjęcie takiej definicji nie jest jednak możliwe w naukach przyrodniczych, bowiem błąd nie zawsze może być obliczony (często nie znamy ani wartości rzeczywistej, ani oczekiwanej).

Podobnie „zero-jedynkowe” podejście prezentuje logika formalna, na prawach której bazuje teoria zbiorów klasycznych, charakteryzujących się jednoznacznie zdefiniowanymi granicami i przynależnością obiektów wynikającą z teorii prawdopodobieństwa. W sukurs przychodzi dopiero logika wielowartościowa, uwzględniająca sens ilościowy i ciągłą zmienność zjawiska w przestrzeni. Na jej prawach bazuje teoria zbiorów rozmytych, charakteryzujących się brakiem jednoznacznie zdefiniowanych granic i przynależnością obiektów wynikającą z teorii możliwości. Jednak i w tym przypadku podejmowanie decyzji o zaliczeniu elementu do zbioru obarczone jest niepewnością, bowiem: 1. definicja zbioru może być niejednoznaczna, 2. definicja elementu może być niejednoznaczna, 3. może nie być wystarczających przesłanek do zaliczenia elementu do zbioru.

Termin niepewność jest właśnie poszukiwanym pomostem łączącym nauki ścisłe i przyrodnicze. W tych drugich błąd nie jest bowiem synonimem „pomyłki”, ale oznacza niemożliwą do uniknięcia niepewność, którą można zdefiniować jako świadomość badacza, że istnieje różnica między zgromadzonymi informacjami o środowisku (danymi), a „realnym” środowiskiem. Związana jest ona zarówno z naturą danych (nie wiemy dokładnie co obserwujemy lub mierzymy), jak i z regułami, kiedy nie jesteśmy pewni wyciągniętych wniosków (Prokop, 1998). Ponadto niepewność może mieć różne oblicza:

- nieokreśloność (nieprecyzyjność) – niewyraźne granice jednostek przestrzennych i brak obiektywnych kryteriów ich wydzielenia (ryc. 1),
- niejednoznaczność – różne możliwości wyboru np. wskaźników opisujących zjawisko.



Ryc. 1. Klasyczny przykład niepewności: którądy poprowadzić granice?

Źródło: wg Longley i in., 2008, zmienione.

Fig. 1. Standard example of uncertainty: which way we need draw border line?

Source: according to Longley et al., 2008, changed.

BŁĘDY W DANYCH PIERWOTNYCH I WTÓRNYCH

Źródła danych w Systemach Informacji Geograficznej dzielimy na:

- pierwotne: wyniki kartowania terenowego, pomiary geodezyjne i GPS, zdjęcia lotnicze, obrazy satelitarne i radarowe (w postaci „surowej”),
- wtórne: mapy topograficzne i tematyczne (papierowe i cyfrowe), tematyczne bazy danych, inne materiały w postaci przetworzonej (np. ortofotomapy, obrazy satelitarne po korekcji i klasyfikacji).

Nie będzie nadużyciem stwierdzenie, że wszystkie powyższe źródła (zwłaszcza wtórne) są, lub przynajmniej mogą być, obarczone błędami. W najmniejszym stopniu dotyczy to „surowych” materiałów fotogrametrycznych – w tym przypadku można mówić raczej o niedoskonałościach czy brakach utrudniających ich wykorzystanie lub interpretację, np. o zbyt dużym zachmurzeniu (obrazy satelitarne) czy niekompletnych informacjach o nalocie (stare zdjęcia lotnicze).

Wyniki badań terenowych obarczone są zarówno niepewnością badacza, jak i jego nieświadomymi pomyłkami, a nawet świadomymi zaniedbaniami. W praktyce najczęściej związane są one z:

- rozmieszczeniem punktów lub transektów pomiarowych – ich liczba, gęstość i lokalizacja mogą bardzo mocno wpłynąć na wynik kartowania,
- identyfikacją, interpretacją i klasyfikacją zjawisk i obiektów – nawet duże doświadczenie badacza okazuje się czasem niewystarczające w konfrontacji ze zróżnicowaniem i naturalną zmiennością danych,
- kartowaniem w sensie graficznym – ważny jest odpowiedni dobór skali i rodzaju podkładu topograficznego,
- precyzją przyrządów pomiarowych – zaniedbania w zakresie kalibracji lub brak odpowiedniego przeszkolenia mogą skutkować pomiarami dokładnymi, ale mało precyzyjnymi lub odwrotnie – precyzyjnymi o wątpliwej dokładności.

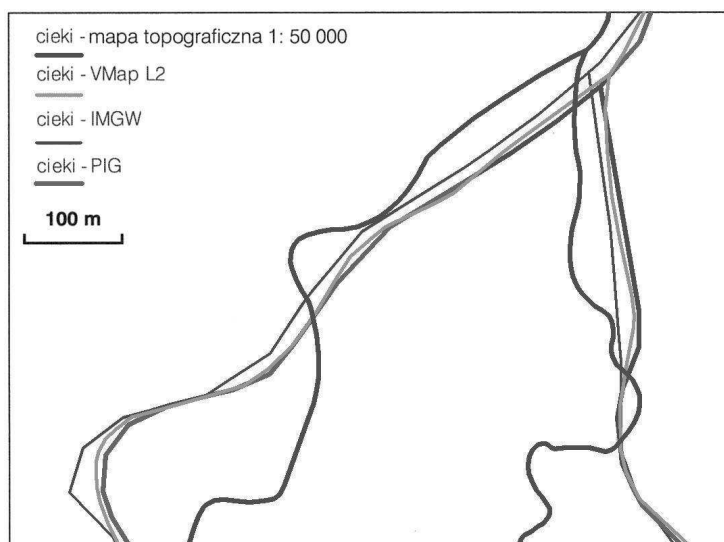
W przypadku materiałów wtórnych (zwłaszcza map) można natomiast mówić m.in. o błędach położenia punktów sytuacyjnych, złym doborze znaków umownych (sygnałów punktowych, liniowych i powierzchniowych), nieprawidłowej generalizacji, błędach w nazewnictwie (zwłaszcza na mapach wykonywanych przez zaborców), niedokładnościach kameralnego kreślenia i w końcu zbyt niskiej jakości samego druku. Wbrew pozorom owe niedoskonałości dotyczą się nie tylko dawnych map, ale także współczesnych materiałów o charakterze referencyjnym, których wzajemna zgodność jest daleka od ideału (ryc. 2). Inną kategorią, wykraczającą nawet poza ramy świadomych zaniedbań, jest celowe fałszowanie treści (więcej w dalszej części tekstu). Arsenal jest obszerny, a wraz z zagłębianiem się w przeszłość wzbogacają go jeszcze wszelkie niedokładności związane z ówczesnym stanem wiedzy oraz precyzją przyrządów, metod i sposobów pomiarowych.

Ryc. 2. Przykład braku zgodności między współczesnymi materiałami referencyjnymi.

Źródło: wg Gotliba i in., 2007, zmienione.

Fig. 2. The example of no compatibility between present reference materials.

Source: according to Gotlib et al., 2007, changed.



JAKOŚĆ DANYCH ŹRÓDŁOWYCH – UJĘCIE KLASYCZNE A GIS

Ocena jakości zgromadzonych danych źródłowych to faza „zerowa” każdego procesu tworzenia od podstaw mapy numerycznej. Oczywiście musi ją poprzedzać analiza potrzeb kartograficznych, czyli sprecyzowanie celów projektu określających obszar, skalę przestrzenną i czasową, a w konsekwencji rodzaj potrzebnych danych przestrzennych. Zgodnie z normą PN 87/N-02260 („Kartografia. Opracowanie map. Terminologia”) do cech klasycznej mapy świadczących o jej jakości zalicza się: dokładność, kartometryczność, wierność, pełność treści, czytelność i aktualność. W dużym stopniu cechy określające jakość map papierowych i danych cyfrowych są podobne (tab. 1).

W klasycznej kartografii najczęściej analizowaną cechą map jest dokładność. Wykorzystuje się w tym celu metody ilościowe (np. pomiary współrzędnych geograficznych, odległości, azymutów i kątów), graficzne (siatkę zniekształceń, porównanie położenia miejscowości i przebiegu obiektów liniowych) i ilościowo-graficzne, jak np. modele lokalnej zmienności skali (Pietkiewicz, 1975, 1980; Szeliga, 1993; Konias, 2000). Należy jednak mieć na względzie, że część tych metod jest już nieco przestarzała, zaś niektóre wzbudzają od dawna kontrowersje. Są to m.in. pomiary odległości, kątów i azymutów (nieliniowość zniekształceń), siatka zniekształceń (wpływ różnej dokładności lokalizacji elementów) czy pomiary skali globalnej na dawnych mapach, które de facto są modelami zmienności skalowej (ryc. 3), co utrudnia wnioskowanie o rzeczywistych stosunkach metrycznych (por. Krzywicka-Blum, 1994; Jankowska, Lisiewicz, 1998).

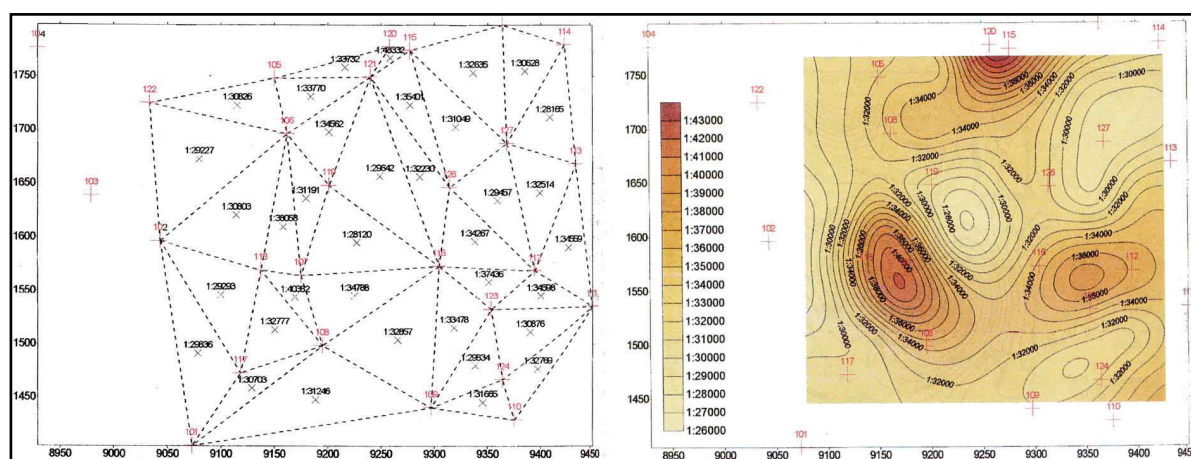
Tab. 1. Cechy opisujące jakość danych źródłowych

Tab. 1. Features of quality of the source materials

Cechy mapy papierowej	Cechy mapy numerycznej
Dokładność – średni błąd położenia punktów na mapie	Dokładność – jak największa zgodność z wartością prawdziwą
Kartometryczność – zgodność odległości, kątów i powierzchni z ich wielkościami rzeczywistymi po uwzględnieniu cech odwzorowania i nieliniowego skurczu papieru	Precyzja (w pewnym sensie) – zdolność dokładnego przedstawiania wielkości i miara powtarzalności
Wierność – zgodność treści mapy (liczby, wielkości, kształtu i charakterystyk jakościowych i nazw własnych elementów) ze stanem rzeczywistym po uwzględnieniu generalizacji	Wiarygodność – zgodność (w granicach dopuszczalnych błędów pomiarowych) między informacją uzyskaną na podstawie danych systemu a stanem rzeczywistym w momencie pobrania danych
Pełność treści – zbiór przedmiotów i/lub zjawisk, które ze względu na przeznaczenie mapy i generalizację treści powinny się na niej znaleźć	Kompletność – stosunek liczby danych zawartych w systemie do liczby danych o określonym typie obiektów występujących w rzeczywistości
Czytelność – możliwość łatwej i szybkiej percepcji treści zgodnej z przeznaczeniem mapy	Komunikatywność – stopień zrozumienia przez użytkownika systemu znaczenia danych zawartych w systemie
Aktualność – możliwość ścisłego datowania informacji umieszczonej na mapie	Aktualność – różnica czasu pomiędzy momentem zmiany wartości atrybutu w rzeczywistości a momentem wprowadzenia tej nowej wartości do systemu

Źródło: na podstawie Saliszczew, 1984; Kistowski, Iwańska, 1997; Jankowska, Lisiewicz, 1998.

Source: based on Saliszczew, 1984; Kistowski, Iwańska, 1997; Jankowska, Lisiewicz, 1998.



Ryc. 3. Model lokalnej zmienności skali autorstwa E. Krzywickiej-Blum.

Źródło: wg Koniasa, 2000, zmienione.

Fig. 3. Model of the local map scale variation by E. Krzywicka-Blum.

Source: according to Konias, 2000, changed.

Dodatkowe cechy, opisujące w głównej mierze lub wyłącznie jakość danych cyfrowych, to: powtarzalność (zgodność wartości na wejściu i wyjściu z systemu i/lub równoważność danych przy powtórnym wczytaniu), rozdzielczość (minimalna różnialna wielkość obiektu przestrzennego), zmienność (czas, w którym następuje zmiana wartości danego atrybutu w rzeczywistości), dostępność (czas, w którym można uzyskać dane z systemu), wartość (korzyści wynikające z uzyskania danych z systemu w stosunku do innych metod pozyskania informacji), pochodzenie (historia danych), koszt pozyskania i własność.

Innym przykładem kompleksowego podejścia jest *Digital Cartographic Data Standard Task Force*. Są to wytyczne, uznawane za oficjalny standard oceny baz numerycznych w USA (Chrisman, 1999), przyjęte w części krajów Europy Zachodniej (Kraak, Ormeling, 1998), a także dosyć często cytowane w naszym kraju (Urbański, 1997; Janowska, Lisiewicz, 1998; Prokop, 1998). *DCDSTF* obejmuje dokładność pozycji i atrybutu, logiczną spójność, kompletność i pochodzenie, zaś od 10 lat także dokładność semantyczną (Servigne i in., 2000).

W przypadku analiz prowadzonych w kolejnych przedziałach czasowych sytuacja się dodatkowo komplikuje, bowiem mamy do czynienia z oceną jakości zbioru map. Duża zbieżność cech wpływa korzystnie na jednorodność informacji kartograficznej o przebiegu zmian danego zjawiska w czasie, przy czym w niektórych przypadkach ową jednorodność bada się szczególnie dokładnie w zakresie wybranych cech lub kategorii obiektów. Do oceny zbioru map można podejść bardzo formalnie i wykorzystać np. miary podobieństwa lub po prostu użyć... zdrowego rozsądku. Niewątpliwie fundamentalnym jest warunek porównywalności skal, zwłaszcza w badaniach historycznych zmian krajobrazu. Niestety w wielu opracowaniach porównuje się ze sobą mapy w skalach np. 1:25 000 i 1:100 000 i formułuje na tej podstawie bardzo szczegółowe wnioski – bez żadnej refleksji na temat wpływu generalizacji graficznej i pojęciowej na zróżnicowanie liczby, kształtu, powierzchni, kategorii, a czasem nawet położenia obiektów.

W przypadku dawnych materiałów zalecane są także szczegółowe studia literaturowe, obejmujące zarówno same mapy (założenia kartograficzne, przebieg i dokładność prac topograficznych, sposób druku, zakres aktualizacji kolejnych wydań itd.), jak i czasy, w których powstawały, w tym m.in. przeznaczenie map wpływające na ich zawartość (cywilne, wojskowe, podatkowe), różnorodność systemów miar, językoznawcze podstawy nazewnictwa i in. Zapoznanie się z autorskimi monografiami poszczególnych serii map, znacznie dokładniejszymi i bardziej przystępnymi od oficjalnych instrukcji, pozwoli uniknąć licznych błędów interpretacyjnych. Głównym źródłem informacji o mapach powojennych stały się natomiast wytyczne techniczne oraz wzory i objaśnienia znaków umownych, wydawane przez odpowiednie służby geodezyjno-kartograficzne. Obecnie, do materiałów pozyskiwanych od razu w postaci cyfrowej, dołączane są zazwyczaj pliki zawierające metadane („dane o danych”). Ich zawartość jest bardzo zróżnicowana – od podstawowych metryk opisujących ortofotomapy, aż po rozbudowane objaśnienia znaków oraz słowniki nazw i atrybutów, bez których zrozumienie kodowania zawartości byłoby wręcz niemożliwe (np. VMap Level 2).

SCHEMAT TWORZENIA MAPY NUMERYCZNEJ

Skanowanie

Proces skanowania, będący pierwszym krokiem na drodze do ucyfrowienia danych analogowych, niemal zawsze powoduje zniekształcenia oryginalnego obrazu. Nawet w profesjonalnych, wielkoformatowych skanerach rolkowych istnieje niebezpieczeństwo przesunięcia materiału i tzw. jałowego poślizgu rolek, zwłaszcza w przypadku folii. Ponadto na wielkość i rozkład zniekształceń znaczący wpływ mają liczba i sposób rozmieszczenia kamer CCD, które powinny podlegać okresowej rektyfikacji za pomocą wzorca kalibracyjnego (Gościewski i in., 1999). Ważna jest także dobrze dobrana do dokładności graficznej opracowania rozdzielczość – za duża prowadzi do nieefektywnego zwiększania wielkości pliku, za mała zaś do utraty informacji. Ta ostatnia zachodzi również podczas stosowania trybu binarnego do materiałów w odcieniach szarości, niewłaściwego ustawienia parametrów tzw. dynamicznego progowania (ang. *dynamic threshold*), czy zbyt „agresywnej” filtracji szumu pikselowego.

Wybór sposobu reprezentacji środowiska

W początkowej fazie tworzenia map numerycznych bardzo ważny jest przemyślany wybór jednego z dwóch schematów pojęciowych, czyli odpowiedniej metody cyfrowej reprezentacji danych przestrzennych – przez obiekty dyskretne (model wektorowy) lub pola (model rastrowy).

Generalnie modele wektorowe przeznaczone są do prezentacji zjawisk dyskretnych i granic obiektów (głównie na mapach średnio- i wielkoskalowych). Cechują je, z jednej strony, zdolność wiernego odtwarzania położenia i kształtu obiektów oraz możliwości zachowania topologii połączeń, prezentacji linii nieciągłości, łatwej aktualizacji danych oraz dokonywania transformacji geometrycznych i edycji, zaś z drugiej – złożona struktura danych oraz utrudnione modelowanie i nakładanie warstw tematycznych.

Modele rastrowe predestynowane są do prezentacji zjawisk ciągłych i wewnątrz obiektów (głównie na mapach mało- i średnioskalowych). Charakteryzują się prostym sposobem matematycznego definiowania (dwuwymiarowa macierz) oraz łatwością nakładania i agregowania warstw tematycznych, prowadzenia analiz przestrzennych, modelowania i wizualizacji. Kwantyfikacja i prezentacja zjawisk przyrodniczych w postaci jednakowych, geometrycznych pól odniesień ma jednak istotne ograniczenia, do których zaliczyć należy m.in. mniejszą precyzję lokalizacji oraz deformację długości, obwodów i powierzchni obiektów, brak topologii połączeń, trudności z bezstratną zmianą odwzorowania, stosowaniem linii nieciągłości i prowadzeniem analiz wymagających informacji metrycznej lub topologicznej (Widacki, 1997; Werner, 2004)

Właściwy wybór modelu jest istotny, bowiem późniejsza konwersja (zarówno wektoryzacja, jak i rasteryzacja) związana jest zawsze z utratą informacji. Należy wziąć pod uwagę m.in. cel opracowania, sposób zbierania informacji, docelową skalę opracowania, naturę samych danych, a także metody ich dalszych analiz oraz

możliwego stopnia generalizacji. O ile bowiem np. wybór rastra do analiz zjawisk klimatycznych i wektora do prezentacji zabudowy w skali jednostki osadniczej jest dosyć oczywisty, to sposób kwantyfikacji użytkowania ziemi już taki nie jest i zależy od powyższych uwarunkowań.

Kalibracja obrazów rastrowych

Kolejny etap, czyli kalibracja, służy do usuwania zniekształceń geometrycznych obrazów rastrowych (błędy skanowania, deformacja papieru spowodowana kurcliwością) oraz nadania im nominalnych rozmiarów. Cały proces składa się z dwóch kroków:

1. obliczenia metodą najmniejszych kwadratów macierzy przekształceń na podstawie współrzędnych wektorów wskazujących wielkość i kierunek przesunięcia oraz wykonania właściwej transformacji geometrycznej, w której podstawą są punkty dostosowania²,
2. interpolacyjnego próbkowania (ang. *resampling*) zniekształconego obrazu do nowego rastra o regularnej wielkości, czyli tzw. redystrybucji pikseli (ang. *rubbersheeting*).

W zależności od typu zniekształceń, rodzaju materiałów czy ich przeznaczenia wykorzystuje się różne modele kalibracji, które podzielić można w uproszczeniu na dwie grupy: transformacje liniowe pierwszego stopnia (równoskalowa Helmerta, różnoskalowa afiniczna) oraz nieliniowe drugiego i wyższych stopni – biliniowa, bikwadratowa i bikubiczna (więcej patrz *ERDAS Field Guide*, 1998). Kalibracja to często niezbędny etap prac i bardzo użyteczne narzędzie, którego stosowanie wymaga jednak odpowiedniej wiedzy.

- Metoda kalibracji powinna być zawsze dobierana do jakości i rodzaju danych³.
- Należy bezwzględnie unikać wielokrotnej kalibracji tego samego rastra – takie działanie prowadzi do niekontrolowanych zmian geometrii obrazu, szczególnie niekorzystnych w przypadku analiz prowadzonych w kilku przekrojach czasowych.
- Niezbędny jest równomierny rozkład i odpowiednia liczebność punktów kontrolnych, zwłaszcza podczas transformacji za pomocą wielomianów wyższych stopni – braki lub zbyt mała gęstość punktów dopasowania prowadzi do lokalnych, wtórnych deformacji obrazu.

² Punkty dostosowania (dopasowania) to elementy odniesienia, których położenie nie uległo zmianie w kolejnych przekrojach czasowych. Punkty odniesienia natomiast, traktowane w literaturze często (i błędnie) jako synonimy, to elementy występujące w materiałach źródłowych we wszystkich przekrojach czasowych, których położenie może jednak ulegać zmianie.

³ Przykładowo w przypadku nakładkowych map zasadniczych, kiedy jednym z priorytetów jest geometryczna spójność nakładek, stosować należy transformację Helmerta, która nie ingeruje w macierz rastra, a jedynie zmienia nagłówek odpowiedzialny za skalę, umiejscowienie w układzie współrzędnych i orientację w przestrzeni wektorowej. Ta sama transformacja wykorzystana do korekty zdeformowanych map, silnie skrzywionych zdjęć lotniczych czy obrazów radarowych, czyli materiałów cechujących się znacznymi zniekształceniami nieliniowymi, byłaby nieefektywna – należy wtedy zastosować kalibrację wykorzystującą wielomiany wyższych stopni.

- Konieczny jest dynamiczny podgląd wektorów przemieszczeń, siatek zniekształceń oraz wartości cząstkowych i całkowitych średnich błędów kwadratowych RMS (ang. *root mean square error*) – monitorowanie efektów transformacji umożliwia zmianę jej rodzaju czy weryfikację punktów dopasowania.
- Wskazane jest ustalenie pewnej tolerancji błędów RMS, zależnej m.in. od celu opracowania, skali i dokładności materiałów źródłowych – jest to postępowanie znacznie bardziej korzystne, niż stosowanie transformacji coraz wyższych stopni mające na celu maksymalne dopasowanie geometryczne treści.

Rejestracja obrazu rastrowego

Prawidłowo przygotowany raster należy następnie zarejestrować („osadzić”) w zdefiniowanym układzie współrzędnych. W zależności od przyjętego schematu działań czy wykorzystywanego oprogramowania może być to ostatnia faza procesu kalibracji lub zupełnie niezależny etap. Często także, jeszcze podczas kalibracji, mapy rastrowe rejestruje się wstępnie w ich natywnych układach współrzędnych, a następnie transformuje do docelowego układu za pomocą formuł odwzorowawczych zaimplementowanych w oprogramowaniu GIS. W przypadku pracy z różnymi seriami map kluczową decyzją jest wybór właściwego, docelowego odwzorowania i układu współrzędnych, zależny m.in. od położenia geograficznego, wielkości obszaru badań, przeznaczenia mapy, zakresu treści i skali opracowania.

Badacz, analizując powyższe uwarunkowania, musi pamiętać o dodatkowych ograniczeniach wynikających z braku uogólnionego zapisu matematycznego powierzchni topograficznej Ziemi, czego konsekwencją są kolejne aproksymacje bryły naszej planety (geoida => globalne i lokalne elipsoidy obrotowe spłaszczone). To powoduje, że każdy punkt na Ziemi, wbrew powszechnemu mniemaniu, można opisać kilkoma różnymi parami współrzędnych. Mamy bowiem współrzędne geograficzne astronomiczne tzw. naturalne (ϕ , λ) oraz wtórne w stosunku do nich – geograficzne geodezyjne tzw. elipsoidalne (B, L, H). Do tego te drugie mają różne wartości w zależności od przyjętej elipsoidy odniesienia – przykładowo współrzędne punktu pomiarzone GPS-em (WGS-84) i naniesione na mapę w układzie i odwzorowaniu bazującym na elipsoidzie Krasowskiego będą różnić się od rzeczywistego położenia o 1” szerokości i długości geodezyjnej (w Warszawie odpowiednio 30 i 130 m).

Panaceum wydawać się mogą układy współrzędnych prostokątnych płaskich (X, Y, Z), charakteryzujące się jednoznacznie określonym położeniem punktów, ściśle zdefiniowanymi parametrami, wielkościami i rozkładem zniekształceń geometrycznych oraz związkami analitycznymi, umożliwiającymi dowolną transformację. Tutaj jednak dotykamy kwestii zupełnie innego rodzaju, czyli polityki władz PRL-u dotyczącej wszelkich edycji cywilnych map topograficznych. Celowe deformacje i skażenia treści („powiatówki”), skrócenie i nierównomierne przesunięcie siatki geograficznej (GUGIK-80) czy problemy na stykach związane z pięcioma strefami odwzorowawczymi („1965”) to tylko niektóre, dobrze znane przykłady.

Wybór obiektów

Do szczegółowych badań porównawczych powinno wybierać się tylko kategorie wspólne, możliwe do jednoznacznej identyfikacji i poprawnej interpretacji na wszystkich mapach. W praktyce jednak często mamy do czynienia z dwoma zjawiskami:

1. problemem różnych znaków legendy opisujących te same obiekty czy zjawiska, związanym z okresem powstania mapy, jej skalą, przeznaczeniem czy wykonawcą,
2. problemem innego dawniej znaczenia pozornie tych samych znaków legendy, związanym z odmienną kategoryzacją czy interpretacją obiektów lub zjawisk.

Aby ustrzec się poważnych błędów interpretacyjnych, w przypadku map z XIX w. i starszych konieczne są, wspomniane już wcześniej, studia literaturowe – zwłaszcza w zakresie zawartości i rysunku treści. Do wyboru obiektów z map wydanych w XX w. za niezbędne minimum należy uznać zestawienia objaśnień poszczególnych sygnatur, wykonane na podstawie kluczy znaków topograficznych.

Projektowanie i normalizacja bazy danych

Kolejnym krokiem jest zaprojektowanie bazy danych atrybutowych. W GIS najczęściej wykorzystuje się modele relacyjne⁴ (georelacyjne), ewentualnie rozwiązania hybrydowe (bazy relacyjno-obiektowe). Ze względu na liczne ograniczenia nie stosuje się, dziś już mocno archaicznych i predestynowanych do innych zastosowań, modeli hierarchicznych i sieciowych. Tworzenie bazy danych obejmuje trzy etapy: analizy wymagań, modelowania i normalizacji.

1. Etap analizy wymagań, w przypadku realizacji własnych badań naukowych, a nie tworzenia baz o charakterze aplikacyjnym dla odbiorcy zewnętrznego, można pominąć lub bardzo ograniczyć (znamy bowiem swoje wymagania i potrzeby).
2. Etap modelowania obejmuje:
 - ustalenie rodzaju i zakresu potrzebnych i/lub możliwych do pozyskania danych,
 - utworzenie zrębów struktury nowej bazy danych, czyli zaprojektowanie tzw. diagramów związków encji; w praktyce chodzi o stworzenie podziału na tabele, które można będzie przeszukiwać za pomocą języka zapytań SQL, a po nadaniu obiektom unikalnych identyfikatorów – łączyć relacyjnie,
 - stworzenie słownika zawierającego zbiór, uprzednio zdefiniowanych, nazw, klas i cech atrybutów oraz identyfikatorów (kluczy podstawowych i obcych).

⁴ W modelu relacyjnym (georelacyjnym) dane przechowuje się w tabelach, składających się z rekordów (wierszy zawierających encje, czyli wszystko, co istnieje realnie lub w wyobraźni) oraz pól (kolumn zawierających atrybuty), których fizyczna kolejność nie ma znaczenia. Każdy rekord jest wyróżniany przez pole zawierające unikatową wartość (klucz podstawowy), która wraz z kluczem obcym służy do tworzenia relacji, czyli powiązania pomiędzy parą tabel. Bazy relacyjne charakteryzują się dużą elastycznością, łatwością implementacji, możliwością bezpośrednich powiązań informacji atrybutowych z obiektami przestrzennymi oraz rozbudowanymi możliwościami przeprowadzania operacji selekcji, łączenia itp. za pomocą operatorów logicznych i teorii zbiorów.

3. Etap normalizacji polega na weryfikacji poprawności struktury i spójności modelu, a co za tym idzie – integralności samych danych. Obejmuje sprawdzenie:

- konfliktów w relacjach między tablicami,
- prawidłowości powiązań danych przestrzennych z atrybutami,
- stabilności struktur (atrybuty encji muszą wynikać tylko z ich właściwości, a nie wymagań aplikacji, języka programowania czy sprzętu),
- obecności niepotrzebnych lub dublujących się wpisów,
- poprawności nazw,
- adekwatności formatu oraz poprawności precyzji zapisu (zbyt wysoka – niepotrzebna, zbyt niska – błędna) i obliczeń liczb przybliżonych (reguły Kryłowa-Bradisa),
- właściwej lokalizacji wartości absolutnych i względnych.

Faza normalizacji powinna być realizowana „w locie” już podczas wprowadzania danych (w czasie wektoryzacji). Niestety praktyka pokazuje, że bardzo często jest ona zaniechywana całkowicie lub realizowana pobieżnie – dotyczy to nawet odpłatnych baz danych wykonywanych przez wyspecjalizowane w tym zakresie jednostki (np. GUS, IMGW).

Powyższe działania powinny uwzględniać także dwa bardzo ważne aspekty funkcjonowania bazy – możliwość aktualizacji (co nie wymaga komentarza) oraz wersjonowania, czyli przechowywania danych w różnych wersjach w obrębie tej samej struktury. Ta druga funkcjonalność umożliwia nie tylko tworzenie map o różnym stopniu generalizacji i dla różnych celów, ale także jednoczesną edycję tych samych danych przez wielu użytkowników realizujących odmienne scenariusze (tzw. wielodostępne bazy danych).

Wektoryzacja

W przypadku map wektorowych kolejnym krokiem etapu wprowadzania danych jest ich wektoryzacja. W czasach digitizerów stołowych należało uwzględnić parametry konkretnego urządzenia (rozdzielczość, powtarzalność, stabilność, dokładność) – łączny błąd digitalizacji był sumą błędów cząstkowych. Obecnie praktykuje się niemal wyłącznie wektoryzację bezpośrednio na ekranie monitora. Jej jakość zależy więc przede wszystkim od samego operatora: jego dokładności oraz wiedzy i doświadczenia niezbędnych do prawidłowej identyfikacji obiektów i interpretacji zjawisk.

Najczęściej stosuje się wektoryzację ręczną lub półautomatyczną (tzw. śledzenie linii), przy czym ta druga wymaga ciągłego nadzorowania, a do tego jej efekty stanowią wypadkową wprowadzonych przez operatora parametrów i „czułości” samego algorytmu śledzenia linii na obecność wszelkich artefaktów. Procedury w pełni automatyczne wykorzystywane są bardzo rzadko, pozostając raczej domeną systemów CAD. W zależności od potrzeb i posiadanego oprogramowania należy także zdecydować, czy informacje przestrzenne dyskretyzować w postaci modelu prostego

(tzw. spaghetti), czy topologicznego⁵. Budowa topologii na późniejszym etapie nie zawsze jest możliwa, a co najmniej może być źródłem kolejnych błędów, trudnych do weryfikacji (zwłaszcza gdy operujemy na dużych warstwach, złożonych z tysięcy obiektów i milionów węzłów).

Podczas wektoryzacji niemal zawsze popełnia się błędy (najczęściej graficzne) i absolutnie konieczna jest ich weryfikacja. Zazwyczaj wykorzystuje się do tego zaimplementowane w oprogramowaniu procedury naprawy topologii połączeń lub dodatkowe narzędzia geometrii analitycznej (wykrywanie nakładania, przecinania i odstępow, dociąganie węzłów, usuwanie lub przyłączanie poligonów szczątkowych, domykanie, wygładzanie itd.). Wymagają one jednak ustawienia prawidłowych parametrów – użytkownik bez odpowiedniej wiedzy może uzyskać obraz pozornie ładny i czysty, ale w praktyce niezgodny z wymaganą precyzją geometryczną danych. Należy pamiętać, że wszystkie pominięte lub źle poprawione błędy wektoryzacji mogą bardzo utrudnić nakładanie warstw, operacje z wykorzystaniem algebry boolowskiej i znacząco zafałszować wyniki analiz przestrzennych czy geostatystycznych.

Generalizacja (graficzna i pojęciowa)

W wielu przypadkach cel opracowania wymusza wykonanie generalizacji – graficznej (łączenie, wybór, przesunięcie, przewiększenie, uproszczenie) i/lub pojęciowej (łączenie, selekcja, uwypuklenie, reklasyfikacja atrybutów, symbolizacja). Można to robić po zakończeniu wektoryzacji (wraz z weryfikacją błędów), w trakcie jej trwania, ale także wcześniej – zwłaszcza na etapie wyboru obiektów (Bojarowski, Wolak, 1997).

Trudno byłoby przedstawiać szczegółowo potencjalne błędy generalizacji, bowiem problematyka jest tak obszerna, że wykracza poza ramy nie tylko tego artykułu, ale nawet całego tomu. Nie bez przyczyny niemiecki kartograf E. Sydow nazwał ją jedną z trzech największych raf kartografii (obok sposobów przedstawienia sferoidalnej powierzchni Ziemi na płaszczyźnie i rzeźby terenu na mapie). Niewątpliwie Systemy Informacji Geograficznej rzuciły nowe światło na zagadnienie. Stworzono od podstaw lub zaimplementowano istniejące już metody i algorytmy – zarówno w zakresie grafiki wektorowej (np. metoda globalna upraszczania linii Douglasa-Peuckera, analiza fraktalna), jak i rastrowej (np. zmiana rozdzielczości obrazu, filtracje globalne o charakterystyce liniowej lub nieliniowej). Wciąż jednak niezmiennym pozostaje fakt, że immanentną cechą każdego procesu generalizacji jest jej subiektywizm, będący wypadkową wiedzy i doświadczenia człowieka.

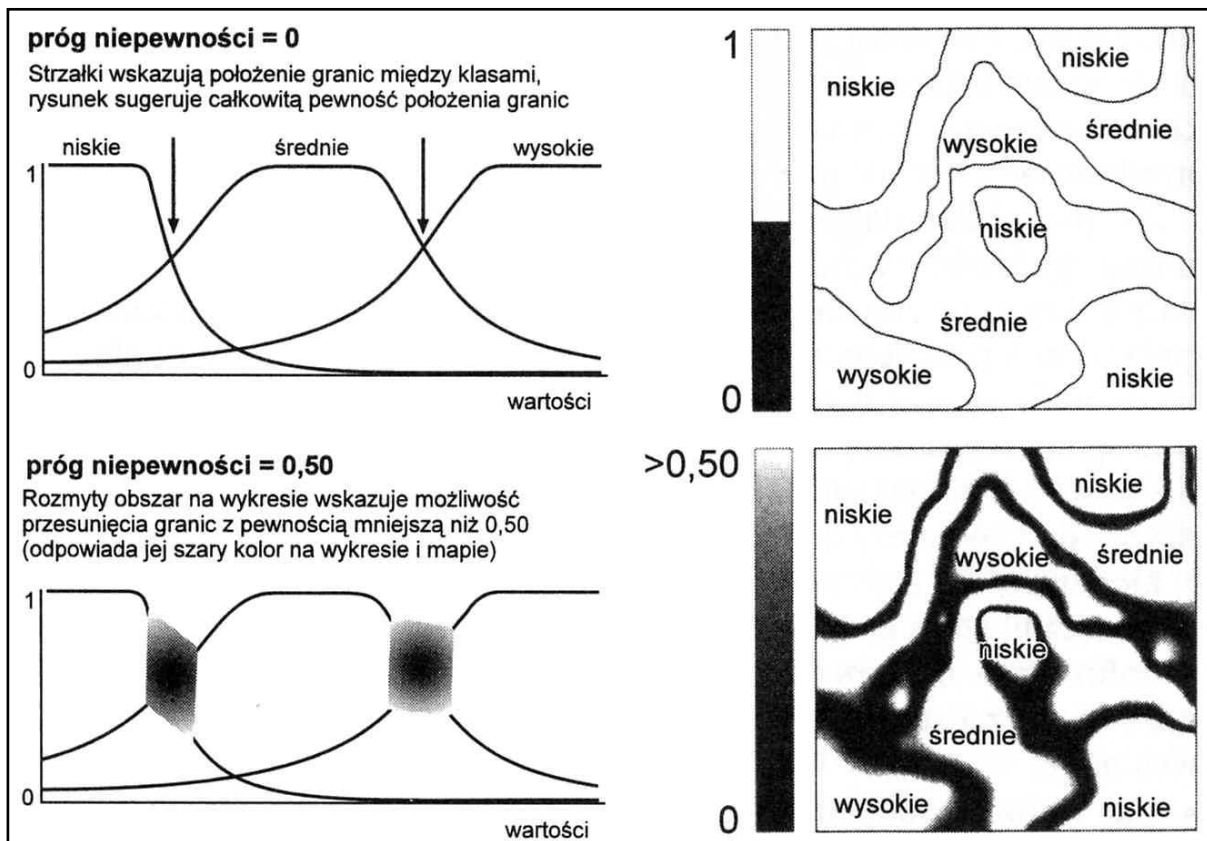
⁵ W modelu spaghetti punkty, linie i poligony zapisywane są niezależnie przez kodowanie ciągów par współrzędnych. Główną zaletą tego modelu jest jego prostota i bezpośrednio obrazowanie obiektów terenowych, zaś wadą fakt, że współrzędne punktów wspólnych, należących do dwóch lub więcej obiektów, muszą być identyczne i zapisywane w każdym z nich. W modelu topologicznym, oprócz informacji geometrycznych definiujących położenie i kształt obiektów, zawarte są również zapisywane w sposób jawny informacje o wzajemnym sąsiedztwie i powiązaniu (wiadomo, które jednostki przestrzenne graniczą ze sobą, jakie linie są wspólne w wielobokach, które punkty wyznaczają przebieg granicy itp.).

Niektórzy idą jeszcze o krok dalej – przykładowo według R. Weibela (1991, za Gotlibem i in., 2007) generalizacji w ogóle nie powinno się traktować jako procedury upraszczania geometrycznego, lecz jako proces poznania rzeczywistości geograficznej i jej opisu na różnych poziomach uogólnienia (tzw. „proces oparty na zrozumieniu”). „Istotą generalizacji w tym ujęciu nie jest analiza struktury graficznej elementów występujących na mapie, lecz poznanie struktury obiektów i zjawisk geograficznych, które są przedmiotem modelowania kartograficznego. Zrozumienie semantycznej istoty obiektów i zjawisk reprezentowanych w bazie danych przestrzennych oraz łączących je relacji pozwala na poprawne modelowanie fragmentu przestrzeni geograficznej na dowolnie zdefiniowanym poziomie uogólnienia” (Gotlib i in., 2007, s. 41).

Ocena jakości danych i błędów

Szacowanie niepewności wyników, zarówno cząstkowe, jak i końcowe, wymaga z jednej strony wiedzy o jakości danych przestrzennych, a z drugiej zastosowania odpowiedniej metody weryfikacji (wewnętrznej lub zewnętrznej, opartej na niezależnych zbiorach danych). Jak już wspomniano na początku celem artykułu było przedstawienie potencjalnych źródeł błędów, dlatego też na zakończenie wymieniono jedynie hasłowo wybrane metody ich weryfikacji (Kraak, Ormeling, 1998; Longley i in., 2008; Urbański, 2008):

- mapy stref niepewności wyznaczenia granic klas (ryc. 4), prawdopodobieństwa czy współczynnika stabilności danych (ryc. 5);
- mapy odchyłeń położenia punktów dostosowania (wielkość i rozkład RMS – ryc. 6, krosvalidacja współrzędnych punktów kontrolnych);
- błąd proporcji i procent klas poprawnych PCC;
- macierz błędów (tabela rozbieżności klasyfikacji) i autokorelacja przestrzenna;
- analiza stabilności z wykorzystaniem metody Monte Carlo (symulacja wpływu zmian parametrów modelu na wyniki z zastosowaniem metod losowych);
- analiza niepewności (ewolucja błędów w sekwencji operacji analitycznych);
- współczynniki nieuporządkowania (chaosu) i rozmycia.

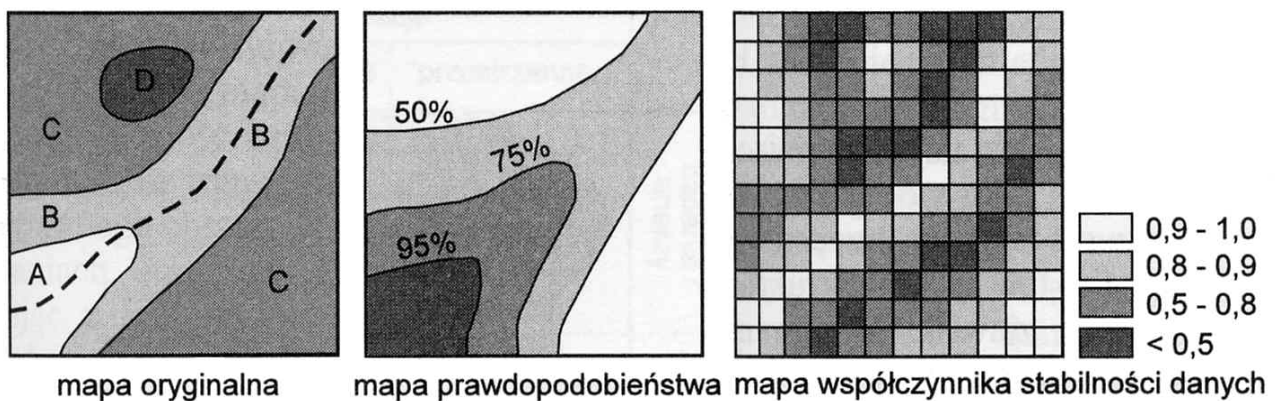


Ryc. 4. Mapy stref niepewności wyznaczenia granic klas.

Źródło: wg Kraak, Ormeling, 1998, zmienione.

Fig. 4. The zones of the uncertainty maps of delimitation of the classes borders.

Source: according to Kraak, Ormeling, 1998, changed.

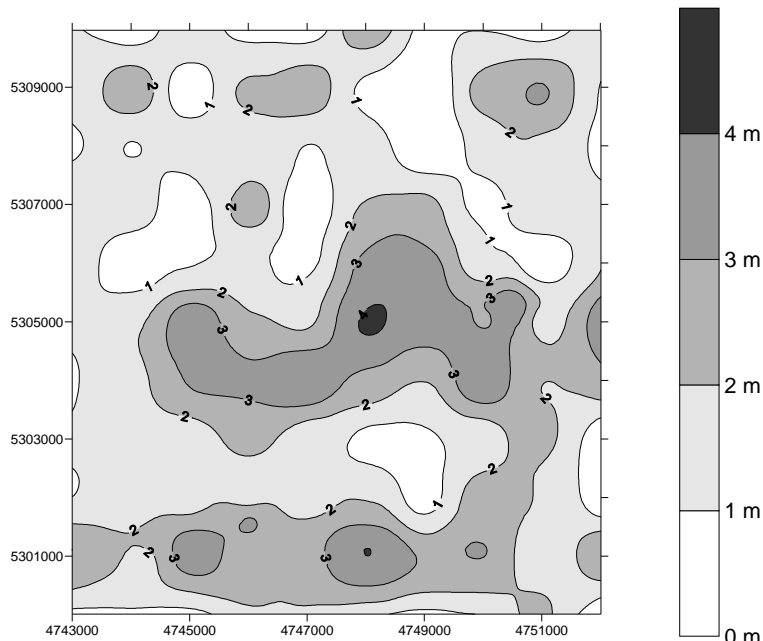


Ryc. 5. Mapy prawdopodobieństwa i współczynnika stabilności danych.

Źródło: wg Kraak, Ormeling, 1998, zmienione.

Fig. 5. Mapy prawdopodobieństwa i współczynnika stabilności danych.

Source: wg Kraak, Ormeling, 1998, zmienione.



Ryc. 6. Interpolacja rozkładu błędów średnich kwadratowych (RMS) punktów dostosowania po kalibracji bikubicznej na przykładzie arkusza mapy topograficznej w skali 1:25 000; wartości w metrach.

Źródło: wg Wolskiego, 2007.

Fig. 6. Interpolation of the root mean square errors schedule (RMSE) of the adaptation points after bicubic calibration; example of the topographical map sheet 1:25 000; the value in metres.

Source: according to Wolski, 2007.

PODSUMOWANIE

Opisany w artykule szacunek jakości danych i niepewności wyników, mimo że nie ma charakteru kompleksowej i sformalizowanej oceny matematycznej ani postaci algebraicznego modelu probabilistycznego, pozwala uniknąć niekontrolowanej propagacji błędów wykraczającej poza przyjęty poziom dokładności. Musimy pogodzić się z myślą, że nie istnieją doskonałe dane (w każdym przypadku powinniśmy ocenić ich jakość, przynajmniej w priorytetowych dla opracowania zakresach) oraz że wszystkie etapy procesu tworzenia mapy numerycznej są, lub przynajmniej mogą być, obciążone błędami. Najważniejsza jest jednak świadomość popełnianych błędów. Określenie zakresu niepewności nie jest przyznaniem się do niewiedzy, ale jest wyrazem odpowiedzialności autora i określa wartość opracowania.

LITERATURA

- Bender O., Boehmer H.J., Jens D., Schumacher K.P., 2005: Using GIS to analyse long-term cultural landscape change in Southern Germany, *Landscape and Urban Planning*, 70: 111-125.
- Bojarowski K., Wolak B., 1997: Wybrane problemy generalizacji w procesie tworzenia map numerycznych [w:] *Polskie Towarzystwo Informacji Przestrzennej, VII Konferencja Naukowo-Techniczna Systemy Informacji Przestrzennej*, 4-5 czerwca 1997, Warszawa: 109-117.
- Chrisman N.R., 1999: The error component in spatial data [w:] P.A. Longley, D.J. Maguire, M.F. Goodchild, D.W. Rhind (red.), *Geographical Information Systems. Principles, Techniques, Applications and Management*, 2 Volume Set, John Wiley & Sons: 165-174.

- ERDAS Field Guide. Przewodnik geoinformatyczny, 1998, GEOSYSTEMS Polska, Warszawa.
- Gościewski D., Głuchowska I., Jagiełło A., 1999: Ocena wpływu konstrukcji i warunków eksploatacji skanerów na rozkład zniekształceń obrazów rastrowych [w:] J. Gaździcki, E. Musiał (red.), Systemy Informacji Przestrzennej, IX Konferencja Naukowo-Techniczna, Polskie Towarzystwo Informacji Przestrzennej, Warszawa: 189-198.
- Gotlib D., Iwaniak A., Olszewski R., 2007: GIS – obszary zastosowań, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa.
- Gregory I.N., 2005: A place in history: A guide to using GIS in historical research, Centre for Data Digitisation and Analysis, Queens University, Belfast.
- Jankowska M., Lisiewicz S., 1998: Kartograficzne i geodezyjne metody badania zmian środowiska, Wydawnictwo Akademii Rolniczej, Poznań.
- Kienast F., 1993: Analysis of historic landscape patterns with GIS – a methodological outline, *Landscape Ecology*, 8, 2: 103-118.
- Kistowski M., Iwańska M., 1997: Systemy informacji geograficznej, Bogucki Wydawnictwo Naukowe, Poznań.
- Konias A., 2000: Kartografia topograficzna Śląska Cieszyńskiego i zaboru austriackiego od II połowy XVIII wieku do początku XX wieku, Wydawnictwo Uniwersytetu Śląskiego, Katowice.
- Kraak M.-J., Ormeling F., 1998: Kartografia – wizualizacja danych przestrzennych, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa.
- Krzywicka-Blum E., 1994: Nowa metoda analizy i prezentacji zmienności skali dawnych map dużych obszarów, *Polski Przegląd Kartograficzny*, 26, 2: 75-85.
- Longley P.A., Goodchild M.F., Maguire D.J., Rhind D.W., 2008: GIS. Teoria i praktyka, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa.
- Petit C.C., Lambin E.F., 2002: Impact of data integration technique on historical land-use/land-cover change: Comparing historical maps with remote sensing data in the Belgian Ardennes, *Landscape Ecology*, 17, 2: 117-132.
- Pietkiewicz S., 1975: Austriackie topograficzne mapy Tatr i Przedtatrza od końca XVIII do końca XIX stulecia i ich dokładność, *Prace i Studia IG UW*, 16: 95-109.
- Pietkiewicz S., 1980: Studia nad dokładnością dawnych map ziem polskich, *Studia i Materiały z Dziejów Nauki Polskiej, seria C*, 24: 37-116.
- Prokop P., 1998: Jakość danych a błąd i niepewność w systemach informacji geograficznej z punktu widzenia badań środowiska przyrodniczego [w:] M. Kistowski (red.), Systemy informacji geograficznej w badaniach środowiska przyrodniczego, *Problemy Ekologii Krajobrazu*, 4: 33-42.
- Rumsey D., Williams M., 2002: Historical Maps in GIS [w:] A.K. Knowles (red.), *Past Time, Past Place: GIS for History*, ESRI Press, Redlands, California: 1-18.
- Saliszczew K.A., 1984: Kartografia ogólna, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa.
- Servigne S., Ubeda T., Puricelli A., Laurini R., 2000: A Methodology for Spatial Consistency Improvement of Geographic Databases, *GeoInformatica*, 4, 1: 7-34.

- Szeliga J., 1993: Metody i stan dokładności badań dawnych map z obszaru Polski [w:] J. Janczak, W. Wernerowa (red.), *Dorobek polskiej historii kartografii*, Z *Dziejów Kartografii*, 6: 51-67.
- Urbański J., 1997: *Zrozumieć GIS. Analiza informacji przestrzennej*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa.
- Urbański J., 2008: *GIS w badaniach przyrodniczych*, Wydawnictwo Uniwersytetu Gdańskiego, Gdańsk.
- Weibel R., 1991: *Amplified Intelligence and Rule-base Systems* [w:] B. Buttenfield, R. McMaster (red.), *Map Generalization: Making Rules for Knowledge Representation*, Longman, London: 172-186.
- Werner P., 2004: *Wprowadzenie do systemów geoinformacyjnych*, WGiSR UW, Warszawa.
- Widacki W., 1997: *Wprowadzenie do Systemów Informacji Geograficznej*, IG UJ, Kraków.
- Wolski J., 2007: *Przekształcenia krajobrazu wiejskiego Bieszczadów Wysokich w ciągu ostatnich 150 lat*, *Prace Geograficzne*, IGiPZ PAN, 214.