

Andrzej AFFEK

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

KALIBRACJA MAP HISTORYCZNYCH Z ZASTOSOWANIEM GIS

GEOREFERENCING OF HISTORICAL MAPS USING GIS

Słowa kluczowe: GIS Historyczny (HGIS), kalibracja map, I i II wojskowe zdjęcie Galicji

Key words: *historical GIS (HGIS), georeferencing, I and II military survey of Galicia*

Streszczenie Mapy archiwalne są nieocenionym źródłem informacji o stanie środowiska geograficznego. Stanowią podstawowy materiał badawczy do analizy zmian charakterystyk przestrzennych środowiska. Warunkiem koniecznym rzetelnego przeprowadzenia analiz jest dokładne dopasowanie map archiwalnych do współczesnych materiałów kartograficznych oraz oszacowanie błędu tego dopasowania. Możliwości takie obecnie dają aplikacje komputerowe będące składowymi Systemów Informacji Geograficznej (GIS).

Celem pracy jest prezentacja i omówienie metod kalibracji archiwalnych map papierowych z zastosowaniem GIS, mających na celu precyzyjne porównanie ich z aktualnymi warstwami referencyjnymi. Wyróżniono dwa warianty postępowania stosowane odpowiednio do map stworzonych w oparciu o osnowę geodezyjną i bez niej. Metody przetwarzania map archiwalnych omówione są na przykładzie dwóch serii map wojskowych zdjęć topograficznych Galicji opracowanych przez austriacki MGI (Militärgeographisches Institut), ukończonych odpowiednio w roku 1783 i 1863.

Abstract *Archival maps are an invaluable source of information about the state of geographical environment. They are the primary research material for the analysis of changes in spatial characteristics of the environment. A prerequisite to carry out a reliable analysis is an exact match between archival maps and contemporary cartographic materials and to estimate the error of that match. The most effective way to do it nowadays is to use GIS software.*

The aim of the work is to present and discuss georeferencing methods of archival paper maps using GIS, in such a way as to allow precise comparison with contemporary reference layers. Two alternative georeferencing methods for the maps based and not based on a geodetic network are described. Georeferencing of archival maps is discussed on the example of two Austrian military map series of Galicia conducted by the MGI (Militärgeographisches Institut) and completed in 1783 and 1863 respectively.

WPROWADZENIE

GIS Historyczny (ang. *Historical GIS, HGIS*) to nowe podejście do badania przeszłości oparte na technologii Systemów Informacji Geograficznej (ang. *Geographic information systems – GIS*) (Knowles, 2008). Wg Knowles jest to nie tyle metoda badawcza, co naukowa praktyka coraz częściej uznawana za interdyscyplinarny kierunek badawczy na pograniczu geografii historycznej, geoinformacji i geoekologii. Zmiany użytkowania ziemi i gospodarki przestrzennej, a także odtwarzanie historycznych krajobrazów i granic administracyjnych należą do podstawowych problemów badawczych HGIS.

Badania w podejściu HGIS wymagają baz danych mających wymiar przestrzenny. Bazy takie tworzy się korzystając ze źródłowych materiałów archiwalnych opisowych (np. spisy ludności, operaty podatkowe) i kartograficznych (np. mapy katastralne, wojskowe, plany miast). Kluczowym etapem prac, od którego zależy użyteczność bazy i późniejsza siła wnioskowania naukowego jest proces przekształcenia starych map z postaci papierowej do postaci cyfrowej w formacie wektorowym. Proces ten składa się z trzech etapów: skanowania, kalibracji i wektoryzacji (Gregory, Ell, 2007).

Terminologia dotycząca przetwarzania map z postaci papierowej do numerycznej nie jest precyzyjna. W języku angielskim powszechnie stosuje się termin *georeferencing*, czasami tłumaczony na język polski jako „nadawanie georeferencji”. Na potrzeby tej pracy stosowany będzie termin kalibracja, popularny wśród użytkowników systemu GPS, zdefiniowany jako proces przekształcania zeskanowanego obrazu rastrowego mapy do numerycznej mapy rastrowej o określonych współrzędnych geograficznych we współczesnym układzie odniesienia.

Celem niniejszej pracy jest prezentacja i omówienie optymalnych metod kalibracji starych map papierowych z zastosowaniem GIS na przykładzie map I i II wojenskowego zdjęcia topograficznego Galicji.

W pracy zastosowano, poza wyjątkami opisanymi w tekście, aplikację ArcMap 10 firmy ESRI.

Dane pozyskane z map według terminologii GIS są danymi wtórnymi (ang. *secondary data*) (Gregory, Ell, 2007). Na mapie nie są przedstawione wyniki bezpośredniego pomiaru rzeczywistości, lecz oparte na interpretacji kartografa zgodny z instrukcją kartowania model rzeczywistości dostosowany do skali mapy i jej zastosowania (Paślawski i in., 2010). Nie jest jednak możliwe zgromadzenie nieprzetworzonych danych przestrzennych dotyczących krajobrazu sprzed stu i więcej lat, takich jak zobrazowania satelitarne czy zdjęcia lotnicze, ponieważ technologia niezbędna do ich wykonania nie była jeszcze znana. Wtórny charakter danych automatycznie powoduje, że wartość informacyjna tych danych z założenia nie może być wyższa niż danych źródłowych. Profesjonalnie przeprowadzony proces przekształcenia starej mapy papierowej do formy cyfrowej podnosi jej wartość użytkową (kartometryczność) i minimalizuje nieuchronne straty wartości informacyjnej.

W porównaniu do kalibracji map obecnie powstających, kalibracja starych map jest znacznie bardziej skomplikowana. Współczesne mapy papierowe najczęściej mają ogólnie znane parametry odwzorowania, oparte są na globalnym układzie odniesienia związanym ze środkiem Ziemi, a siatka geograficzna i prostokątna są naniezione na mapę. Jeśli druk oryginału i skanowanie zostało wykonane poprawnie (skalibrowany skaner wielkoformatowy, odpowiednia rozdzielczość i format zapisu obrazu), wystarczy wprowadzić współrzędne geograficzne wybranych dwóch narożników ramki wewnętrznej mapy i przy pomocy transformacji Helmerta (przesunięcie, obrót, zmiana skali) zarejestrować obraz. Należy jedynie zwrócić uwagę, aby układ odniesienia i odwzorowanie ramki danych (ang. *Data Frame*) w aplikacji GIS były takie jak kalibrowanej mapy.

W przypadku map historycznych postępowanie uzależnione jest od tego, czy dana mapa była wykonana w oparciu o geodezyjną osnowę pomiarową, definiowaną jako sieć odpowiednio dobranych i stabilizowanych punktów terenowych, których wzajemne relacje przestrzenne ustala się drogą pomiarów geodezyjnych (Paślawski i in., 2010).

KALIBRACJA MAP NIEOPARTYCH NA OSNOWIE GEODEZYJNEJ

Do końca XVIII wieku nie tworzą map opartych na szczegółowych pomiarach geodezyjnych (Paślawski i in., 2010). Odległości i kąty były jedynie szacowane. Udało się natomiast przeważnie przedstawić prawidłowo wzajemne względne położenie obiektów (np. młyn stoi na zachód od drogi, las rozciąga się od karczmy do kościoła itp.). Mapy niespełniające powyższego wymogu nie nadają się do kalibracji.

Przykładem mapy nieopartej na osnowie geodezyjnej jest I wojskowe zdjęcie topograficzne Galicji (niem. *Originalaufnahme des Königreiches Galizien und Lodomerien*) powstałe w latach 1779-1783 w skali 1: 28 800, będące częścią I zdjęcia topograficznego Monarchii Habsburgów zwanego józefińskim (niem. *Erste (Josephinische) Landesaufnahme*) (Konias, 2000). Pierwsze zdjęcie Galicji nie spełnia wymogów kartometryczności, definiowanej jako cecha mapy oznaczająca, że obraz mapy może być wykorzystywany do przeprowadzania pomiarów w celu określenia cech ilościowych prezentowanych zjawisk i obiektów (Karaszkievicz, 2000). Na terenie Galicji jedynie główne punkty były pomierzone trygonometrycznie. Opracowanie szczegółów wykonywano korzystając z busoli, liniału i stolika mierniczego, dla terenów mniej istotnych z wojskowego punktu widzenia stosowano jedynie metodę *à la vue* (ocena wzrokowa). Szkice polowe wykonywano objeżdżając teren konno, obliczając odległość na podstawie średniego kroku konia (Konias, 2000). Nie zachowały się materiały, które jednoznacznie określałyby matematyczne wzory zastosowanego odwzorowania. Badacze współcześni wskazują na podobieństwo do odwzorowania Cassiniego (Podobnikar, 2009). Maksymalny błąd położenia obiektów przekracza 1 km (Podobnikar, 2009; Timár, 2009). Mimo oczywistych wad zdjęcie józefińskie uważane jest za najbardziej szczegółowe i najwyższej jakości dzieło kartograficzne powstałe do końca XVIII wieku (Podobnikar, 2009).

Do kalibracji mapy nieopartej na podstawie geodezyjnej wymagana jest warstwa referencyjna, czyli mapa wzorcowa o satysfakcjonującej dokładności. Zanim jednak rozpocznie się dopasowywanie starej mapy do warstwy referencyjnej, należy przywrócić zeskanowanym arkuszom ich pierwotny kształt geometryczny. W przypadku map I zdjęcia Galicji ramki wewnętrzne arkuszy mają kształt prostokątny o boku poziomym i pionowym długości odpowiednio 24 i 16 cali wiedeńskich¹ (63,2 i 42,1 cm) (Konias, 2000). Obrazy rastrowe wpasowuje się przy pomocy punktów narożnych w oczka siatki centymetrowej o wymiarach odpowiadających wymiarom ramki wewnętrznej, korzystając z transformacji *adjust* naciągającej arkusz dokładnie do zadanych wymiarów (ESRI, 2011). W sytuacji, gdy obszar zainteresowań wychodzi poza jeden arkusz, przeprowadza się mozaikowanie obrazów rastrowych, polegające na przycięciu skanów do ramki wewnętrznej mapy i połączeniu ich w jeden obraz rastrowy. Przed przejściem do kolejnego etapu, rektyfikuje się nowy obraz, czyli dopasowuje dotychczasowy układ pikseli do nowego kształtu mapy (proces ten nazywany jest próbkowaniem pikseli – ang. *resampling*). Zalecaną techniką powtórnego próbkowania pikseli jest interpolacja dwusześcienna (*cubic convolution w ArcGIS*), dająca najlepsze efekty, ale angażująca znaczne zasoby pamięci operacyjnej (ESRI, 2011).

Następnym etapem kalibracji jest dopasowanie otrzymanego obrazu do warstwy referencyjnej. Najlepszą referencją dla mapy nieopartej na podstawie geodezyjnej jest skalibrowana najstarsza kartometryczna mapa danego regionu w jak największej skali i w odwzorowaniu jak najbardziej zbliżonym do prawdopodobnego odwzorowania mapy kalibrowanej. Im krótszy odstęp czasu między powstaniem obu map, tym więcej szczegółów pokrycia terenu znajdzie swoje odpowiedniki. Do kalibracji omawianej serii map zastosowano jako warstwę referencyjną wcześniej skalibrowane arkusze II wojskowego zdjęcia topograficznego Galicji i Bukowiny z 1863 roku.

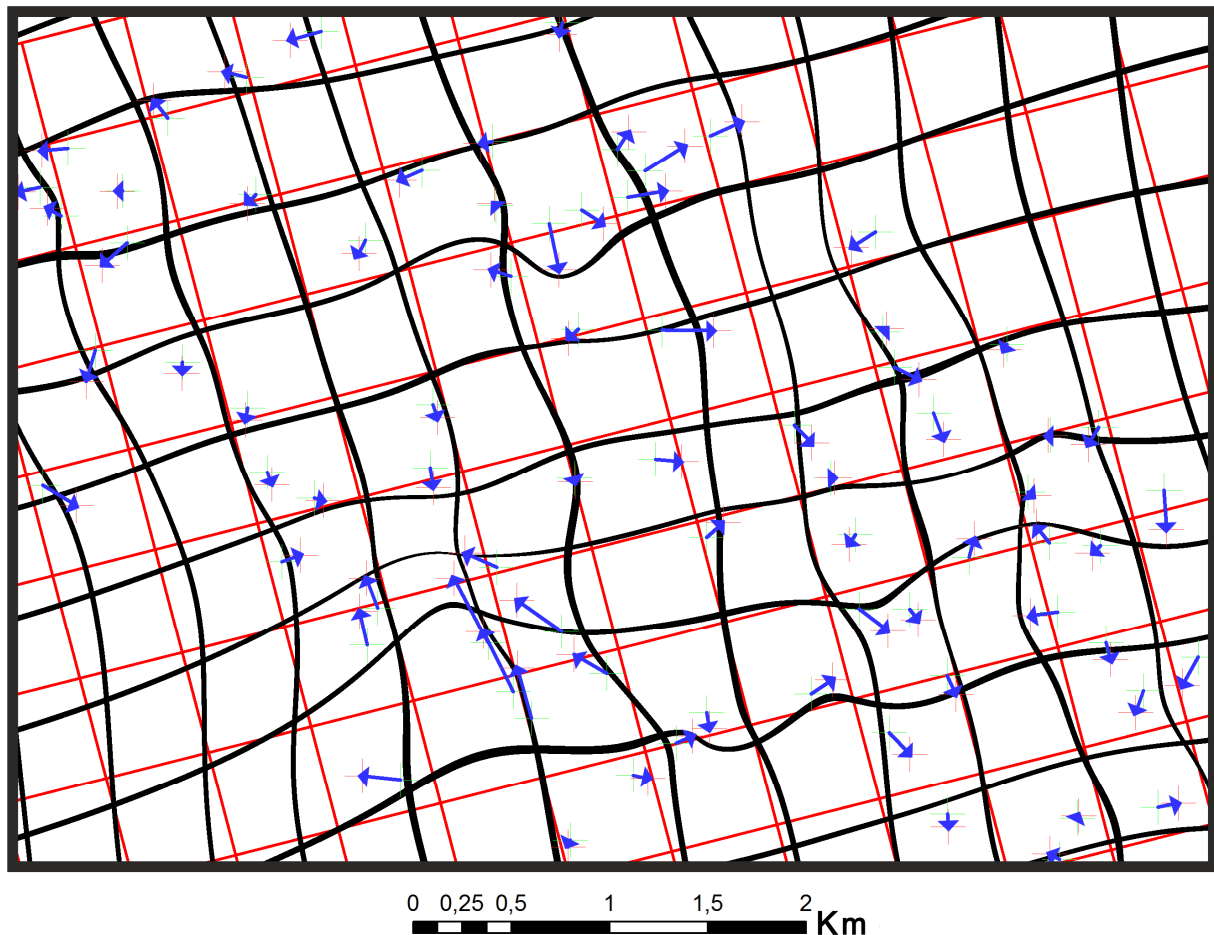
Mapy nieoparte na podstawie geodezyjnej kalibruje się przy pomocy punktów kontrolnych (ang. *Ground Control Points – GCPs*) umieszczanych na charakterystycznych obiektach przedstawionych na obu mapach. Najlepsze do tego celu obiekty to kościoły, mosty, skrzyżowania dróg, wieże, znaczące wylesione szczyty i zbiegi potoków (Podobnikar, 2009). Im więcej punktów zostanie wskazanych, tym dokładniejszy będzie efekt transformacji. Przy dużych niedokładnościach mapy warto stawiać punkty nawet w mniej jednoznacznych miejscach, o ile różnica między położeniem danego obiektu na obu mapach znacznie przewyższa potencjalną nieprecyzyjność oznaczenia położenia danego obiektu (np. szczyt typu kopułowego). Do map niespełniających wymogu kartometryczności stosuje się transformację typu *rubbersheeting*, polegającą na zniekształcaniu obrazu rastrowego w taki sposób, aby punkty kontrolne idealnie pokrywały się z punktami na warstwie referencyjnej (Podobnikar, 2009). Wówczas błąd dopasowania punktów wynosi zero lub prawie zero. Na bazie GCPs algorytm tworzy nieregularną siatkę trójkątów (ang. *Triangular Irregular Network –*

¹ 1 cal wiedeński = 2,63401 cm (Konias, 2000).

TIN) opartą na triangulacji Delone'a (Delaunay'a) i transformuje według oddzielnego wzoru obszar każdego trójkąta (ESRI, 2011). W oprogramowaniu ESRI dostępna jest transformacja *spline* typu *rubbersheeting* oparta na tzw. funkcji sklejaney, złożonej z różnych funkcji wielomianowych, posiadającej pochodną także w miejscach „sklejania” (przejścia między obszarami trójkątów są maksymalnie płynne) (ESRI, 2011).

DYSKUSJA DOTYCZĄCA KALIBRACJI MAP NIEOPARTYCH NA OSNOWIE GEODEZYJNEJ

Przy takiej procedurze pojawia się problem dobroci otrzymanego dopasowania. Nie można go wyrazić poprzez średni błąd dopasowania (ang. *Root Mean Square Error – RMSE*), ponieważ punkty kontrolne na mapie kalibrowanej i mapie referencyjnej dokładnie się pokrywają. Jenny i Hurni (2011) proponują wizualną metodę oszacowania zniekształceń geometrycznych map historycznych opartą na obserwacji wektorów przemieszczeń punktów kontrolnych i siatki zniekształceń, umożliwiającą analizę przestrzennego zróżnicowania błędów dopasowania (ryc. 1).



Ryc. 1. Siatka zniekształceń fragmentu mapy I zdjęcia Galicji po transformacji *spline* na tle tej samej siatki przed transformacją, uzupełnionej o wektory przemieszczeń punktów kontrolnych.

Fig. 1. Distortion grid of a piece of map of the I military survey of Galicia after *spline* transformation on the background of the same grid before the transformation supplemented with displacement vectors of control points.

Wyrazem precyzji dopasowania będącego efektem transformacji typu *rubbersheeting* może być gęstość punktów kontrolnych na cm² mapy. Z drugiej strony jednak można wyobrazić sobie sytuację, w której wprowadzimy tak dużo punktów, że faktycznie otrzymamy mapę tożsamą z mapą referencyjną, co nie jest efektem pożądanym, ponieważ najczęściej jednym z celów kalibracji danej mapy jest porównanie jej z warstwą referencyjną i wychwycenie różnic. Dlatego też proces kalibracji map nieopartych na osnowie geodezyjnej mającej na celu podniesienie jej walorów kartometrycznych nie może być przeprowadzany automatycznie i wymaga przede wszystkim dobrej znajomości terenu objętego zasięgiem mapy i jego historii (Jenny, Hurni, 2011). Przy ocenie wartości kartometrycznej starych map trzeba pamiętać o generalnej prawidłowości, że odwzorowanie terenów otwartych i obszarów zabudowy jest znacznie dokładniejsze, niż terenów porośniętych lasem i wysokogórskich (Konias, 2000).

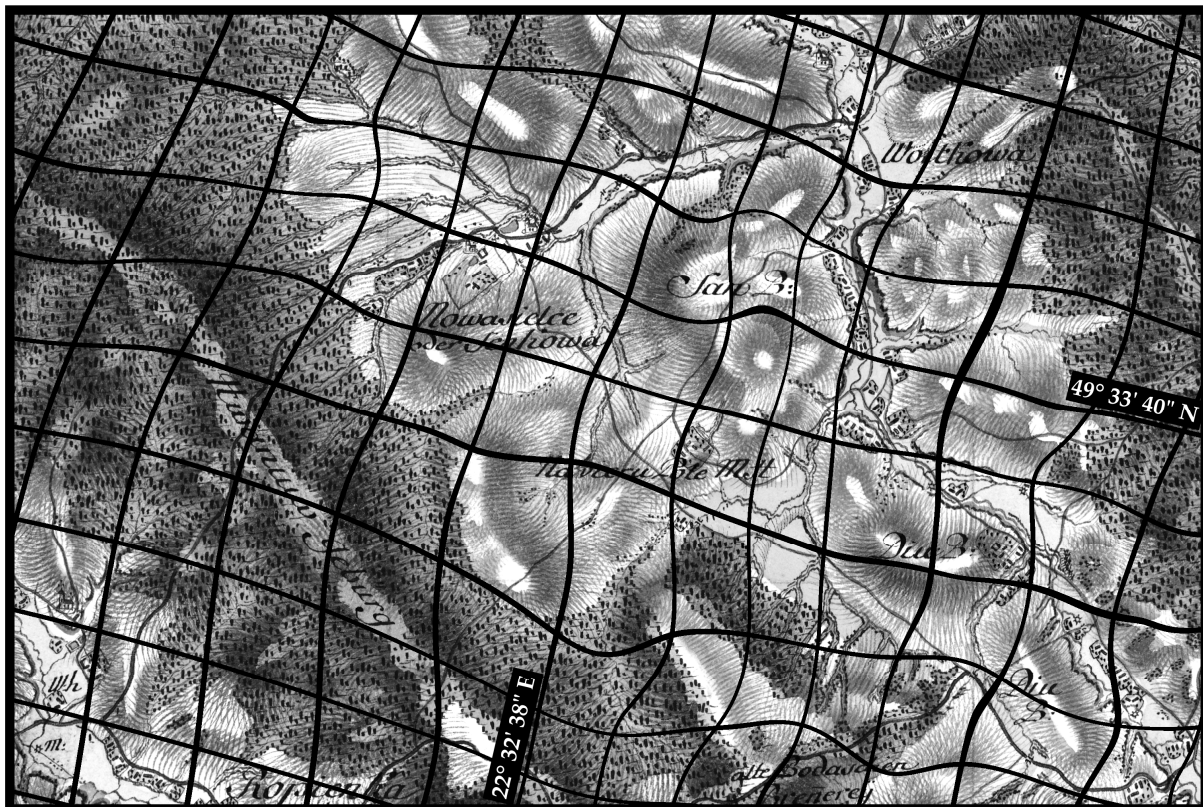
Tradycyjna metoda badania starych map historycznych polegała na nakładaniu na kopię mapy zniekształconej siatki współrzędnych wrysowywanej na podstawie przesunięcia znaczących obiektów w stosunku do mapy współczesnej (ryc. 2). Metoda kalibracji map z użyciem transformacji typu *rubbersheeting* zniekształca mapę i dostosowuje ją do prawidłowego kształtu siatki geograficznej umożliwiając nakładanie i bezpośrednie porównywanie zmian w czasie (ryc. 3).

KALIBRACJA MAP OPARTYCH NA OSNOWIE GEODEZYJNEJ

Pierwsze mapy oparte na szczegółowych pomiarach trygonometrycznych powstały na początku XIX wieku i charakteryzowały się znacznie wyższą dokładnością, niż wcześniejsze mapy. Przykładem takiej mapy jest II wojskowe zdjęcie topograficzne Cesarstwa Austro-węgierskiego nazywane franciszkowskim (niem. *Zweite (Franzische) Landesaufnahme*). Powstałe w latach 1806-1869 w ośmiu niezależnych układach współrzędnych arcydzieło kartograficzne składa się z 2628 arkuszy w skali 1:28 800 (Timár, 2009). Jedyne oryginalne rękopiśmienne arkusze tej serii przygotowane na potrzeby planowania strategicznego cesarza, podobnie jak mapy zdjęcia józefińskiego, przechowywane są w Archiwum Wojennym (*Kriegsarchiv*) w Wiedniu.

Do prawidłowej kalibracji mapy opartej na osnowie geodezyjnej niezbędna jest znajomość matematycznych i geodezyjnych podstaw jej wykonania. Na terenie obecnej Polski znajdują się fragmenty dwóch układów: lwowskiego dla Prowincji Galicji wraz z Bukowiną i wiedeńskiego, m.in. dla Prowincji Śląska i Moraw (Murzewski, 1936). Obie te serie powstały ze zgeneralizowanych map katastralnych. Kalibracja zostanie omówiona na przykładzie wojskowego zdjęcia Galicji i Bukowiny (niem. *Militär Aufnahme von Galizien und der Bukowina*).

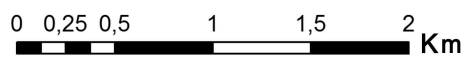
Punktem początkowym lwowskiego układu współrzędnych płaskich była Góra Zamkowa we Lwowie, mapy powstały w uproszczonym odwzorowaniu Cassiniego-Soldnera walcowym poprzecznym równoodległym, stosowanym wcześniej przez Cassiniego do kartowania Bawarii (Słomczyński, 1933).



Skala zmienna *Various scale.*



Układ PUWG92



Ryc. 2. Fragment mapy I zdjęcia Galicji przed transformacją z nałożoną zniekształconą siatką geograficzną (metoda tradycyjna). *Źródło:* Opracowanie własne, skan mapy pochodzi z Kriegsarchiv w Wiedniu (sygnatura AT-OeStA/KA KPS KS).

Fig. 2. Piece of map of the I military survey of Galicia before transformation covered by distorted geographic network (traditional method). *Source:* own study, scanned map from the Kriegsarchiv in Vienna (signature AT-OeStA/KA KPS KS).

Ryc. 3. Fragment mapy I zdjęcia Galicji po transformacji *spline* typu *rubbersheeting* z nałożoną siatką geograficzną (cienkie linie) i siatką zniekształceń obrazu rastrowego w wyniku transformacji (grube linie). *Źródło:* opracowanie własne, skan mapy pochodzi z Kriegsarchiv w Wiedniu (sygnatura AT-OeStA/KA KPS KS).

Fig. 3. A piece of map of the I military survey of Galicia after *spline* *rubbersheeting*-type transformation covered by geographic network (thin lines) and distortion grid (fat lines). *Source:* own study, scanned map from the Kriegsarchiv in Vienna (signature AT-OeStA/KA KPS KS).

Do dokładnej kalibracji mapy historycznej opartej na podstawie geodezyjnej niezbędna jest informacja dotycząca zastosowanego tzw. lokalnego układu odniesienia (ang. *Map Datum*) i użytego odwzorowania. Układy odniesienia map powstałych w XIX wieku nie są domyślnie wprowadzane do aplikacji GIS, jednak aplikacje te dają możliwość ręcznego wpisania wymaganych parametrów.

Pełny opis zastosowanego układu odniesienia wymaga podania 2 z 3 parametrów elipsoidy (wielka półoś, odwrotność spłaszczenia, mała półoś), południka zerowego i jednostki kątowej (tab. 1).

Tab. 1. Parametry lokalnego układu odniesienia (*Map Datum*) II wojskowego zdjęcia topograficznego Cesarstwa Austrowęgierskiego

Tab. 1. Parameters of the local reference system (*Map Datum*) of the II military survey of the Austro-Hungarian Empire

PARAMETR PARAMETER		WARTOŚĆ VALUE	ŹRÓDŁO SOURCE
Jednostka kątowa	Stopień	1° = 0,0174533 radianów	-
Południk zerowy	Ferro austriackie	17° 39' 37.5'' W od Greenwich wg Bradley'a*	(Instruction., 1845)
Elipsoida austriacka (1810)	Wielka półoś (a)	6 376 033 m	(Słomczyński, 1933)
	Mała półoś (b)	6 356 354 m	
	Odwrotność spłaszczenia (1/f)	324	

* południk zerowy Greenwich wyznaczony przez Bradley'a w połowie XVIII wieku przebiega o 5,61 sekund kątowych (arcsec) na zachód od współczesnego południka Greenwich stosowanego w układzie WGS84.

Pełny opis odwzorowania Cassiniego-Soldnera wymaga podania współrzędnych geograficznych punktu początkowego układu zgodnego z wprowadzonym układem odniesienia, skali odwzorowania w punkcie początkowym oraz ewentualnie wartości

przesunięcia poziomego i pionowego (*False Easting, False Northing*) punktów zero-
wych osi układu współrzędnych płaskich, a także jednostki odległości (tab. 2).

Różnice między współrzędnymi prostokątnymi punktów obliczonymi wg peł-
nych i uproszczonych wzorów Cassiniego-Soldnera są zależne od odległości od
punktu początkowego układu i sięgają 60 m na obszarze Galicji. Słomczyński (1933)
podaje pełne i uproszczone wzory oraz metodę przeliczania współrzędnych płą-
skich, którą warto zastosować do kalibracji arkuszy przedstawiających obszar znacz-
nie oddalony od Lwowa.

Tak przygotowana ramka danych (ang. *Data Frame*) pozwala na rozpoczęcie pro-
cesu wyznaczania punktów kontrolnych. Przyjmuję się, że obrazy rastrowe omawia-
nej serii map są zniekształcone poprzez skurcz papieru i niedoskonałości procesu
skanowania, jednak oryginały spełniały wymóg kartometryczności.

Tab. 2. Parametry odwzorowania II wojskowego zdjęcia topograficznego Galicji
i Bukowiny

Tab. 2. Projection parameters of the II military survey of Galicia and Bukovina

PARAMETR PARAMETER	WARTOŚĆ VALUE
False Easting (FE)	0
False Northing (FN)	0
Współczynnik skali	1
Szerokość geograficzna punktu początkowego	49° 50' 57'' N
Długość geograficzna punktu początkowego	41° 42' 32,19'' E od Ferro austriackiego
Jednostka odległości (<i>sążeń wiedeński</i>)	1,896315 m

Źródło: opracowanie własne na podstawie Słomczyńskiego (1933).

Source: own elaboration based on Słomczyński (1933).

Transformacją polecaną do tego typu map jest transformacja afiniczna zachowu-
jąca linie proste, a prostokąty zamieniająca na równoległoboki (ESRI, 2011). Wykonać
ją można na podstawie współrzędnych narożników arkuszy ewentualnie uzupełnio-
nych dodatkowo punktami trygonometrycznymi o znanych współrzędnych. W przy-
padku II zdjęcia Galicji i Bukowiny ramka wewnętrzna arkuszy ma kształt kwadratu
o boku 20 cali wiedeńskich (52,7 cm) przedstawiającego obszar o boku 8000 sążni
wiedeńskich². Punkt początkowy (Góra Zamkowa) wypada na styku 4 arkuszy (Ko-
nias, 2000). Każdy arkusz ma przypisaną kolumnę i rząd, w związku z tym wylicze-
nie współrzędnych prostokątnych narożników nie jest skomplikowane. Na mapie nie
ma nałożonej żadnej siatki, a narożniki ramki wewnętrznej (poza prawym górnym)
wypadają na zgięciach papieru i nie da się ich precyzyjnie określić (Timár, 2004).
Naniesione są natomiast znaki punktów trygonometrycznych triangulacji katastral-
nej I, II i III rzędu, których współrzędne możemy odczytać z Katalogu punktów

² 1 sążeń wiedeński = 1,896315 m (Słomczyński, 1933).

trygonometrycznych z 1932 roku (Michałowski, Sikorski, 1932). Na arkusz przypada średnio 9 takich punktów. Autor uzyskał średni błąd RMSE wpasowania wybranych czterech arkuszy do ramki danych równy 8,27 m, czyli 0,29 mm w skali mapy (!), świadczący o dużej precyzji nanoszenia znaków punktów trygonometrycznych, oraz o niewielkim zniekształceniu obrazu rastrowego map, dającym się skorygować transformacją afiniczną.

Kolejnym krokiem kalibracji map opartych na osnowie geodezyjnej jest transformacja historycznego lokalnego układu odniesienia do współczesnego globalnego układu odniesienia opartego na powszechnie stosowanej elipsoidzie WGS84 (układ WGS84), lub w praktyce równoznacznej z nią elipsoidzie GRS80 (układy PUWG92, PUWG2000, UTM). Wielu badaczy zapomina o tym. Efektem pominięcia tego etapu jest często kilkusetmetrowe przesunięcie względem współczesnego układu odniesienia, które to niejednokrotnie składane jest na karb niedokładności starych map.

Poza transformacją układów współrzędnych ze względu na różny kształt elipsoid, należy także wziąć pod uwagę ich wzajemne przesunięcie w przestrzeni. Środki elipsoid globalnych układów odniesienia są przyłożone do środka Ziemi wyznaczonego na podstawie pomiarów satelitarnych. Historyczne elipsoidy lokalnych układów odniesienia odtwarzające jedynie wycinek globu miały punkt przyłożenia do powierzchni Ziemi.

W przypadku II zdjęcia Galicji punkt przyłożenia elipsoidy austriackiej do powierzchni Ziemi znajdował się na Górze Zamkowej we Lwowie (Słomczyński, 1933). Do pełnego uwzględnienia różnic w zastosowanych układach współrzędnych niezbędne jest wykonanie matematycznej transformacji przez podobieństwo (zwanej transformacją Helmerta) z siedmioma parametrami (dx , dy , dz – przesunięcie środka układu współrzędnych; $d\alpha$, $d\beta$, $d\gamma$ – skręcenie układu, s – parametr skali). Na potrzeby kalibracji map topograficznych wystarczające jest zastosowanie uproszczonej transformacji z trzema parametrami (dx , dy , dz) z wykorzystaniem wzorów Mołodieńskiego (NIMA, 2000; ESRI, 2011).

Parametry te wprost nie są dostępne i trzeba je wyliczyć stosując odwrotne wzory Mołodieńskiego (np. korzystając z rozszerzenia *Inverse Molodensky* bezpłatnej aplikacji GIS ILWIS:

http://www.itc.nl/ilwis/downloads/tools/geodeticTools.asp#ilw_inv_molodensky). Do wykonania obliczeń niezbędna jest znajomość parametrów elipsoidy historycznej i współrzędnych geograficznych co najmniej jednego punktu styczności (najlepiej kilku) w dwóch układach: historycznym i współczesnym, oraz ich wysokości elipsoidalnych, czyli odległości mierzonych od powierzchni elipsoidy do punktu na fizycznej powierzchni Ziemi. Współrzędne historyczne punktów trygonometrycznych odczytuje się z Katalogu punktów trygonometrycznych (pamiętając o przeliczeniu współrzędnych płaskich na geograficzne – formuły podaje Słomczyński (1933)) lub z wpasowanych już w ramkę danych arkuszy (niższa precyzja). Dla historycznego lokalnego układu można przyjąć zerową odległość geoidy od elipsoidy (Timár, 2004; 2009), czyli wysokość elipsoidalną równą wysokości naniesionej na mapie. Średnia odległość geoidy od elipsoidy WGS84 dla obszaru Polski wynosi 34 m (od 27 m do 44 m)

i tę wartość dodaje się do wysokości punktu nad poziom morza. Do dokładniejszych obliczeń można zastosować program TRANSPOL, do którego GUGIK wprowadził model quasigeoidy z dokładnością do kilku cm (GUGIK, 2001). Dobrą alternatywą w przypadku kalibracji map poza granicami Polski jest serwis internetowy „WGS 84 Geoid Calculator” uruchomiony przez National Geospatial-Intelligence Agency, służący obliczaniu odległości geoidy od elipsoidy WGS84 niemalże na całym świecie (http://earth-info.nga.mil/GandG/wgs84/gravitymod/wgs84_180/intptW.html). Współczesne współrzędne punktów trygonometrycznych osnowy poziomej pierwszej i drugiej klasy (zgeneralizowane z precyzją 1 m) można uzyskać z warstwy WMS (*Web Map Service*) centralnego banku osnów (CBO) z serwisu www.geoportal.gov.pl (http://sdi.geoportal.gov.pl/wms_osnowy/request.aspx).

Autor uzyskał na podstawie kilkunastu punktów styczności średnie wartości parametrów przesunięcia układu odniesienia II wojskowego zdjęcia topograficznego Galicji i Bukowiny względem układu WGS84 równe:


$$dx = 2168,5 \text{ m} \qquad dy = 345,6 \text{ m} \qquad dz = -299,4 \text{ m},$$

które mogą być stosowane do kalibracji tej serii map na obszarze Polski (tab. 3, ryc. 4).


Tab. 3. Statystyki opisowe parametrów przesunięcia elipsoidy lokalnej względem WGS84

Tab. 3. Descriptive statistics of displacement parameters between local and WGS84 ellipsoid

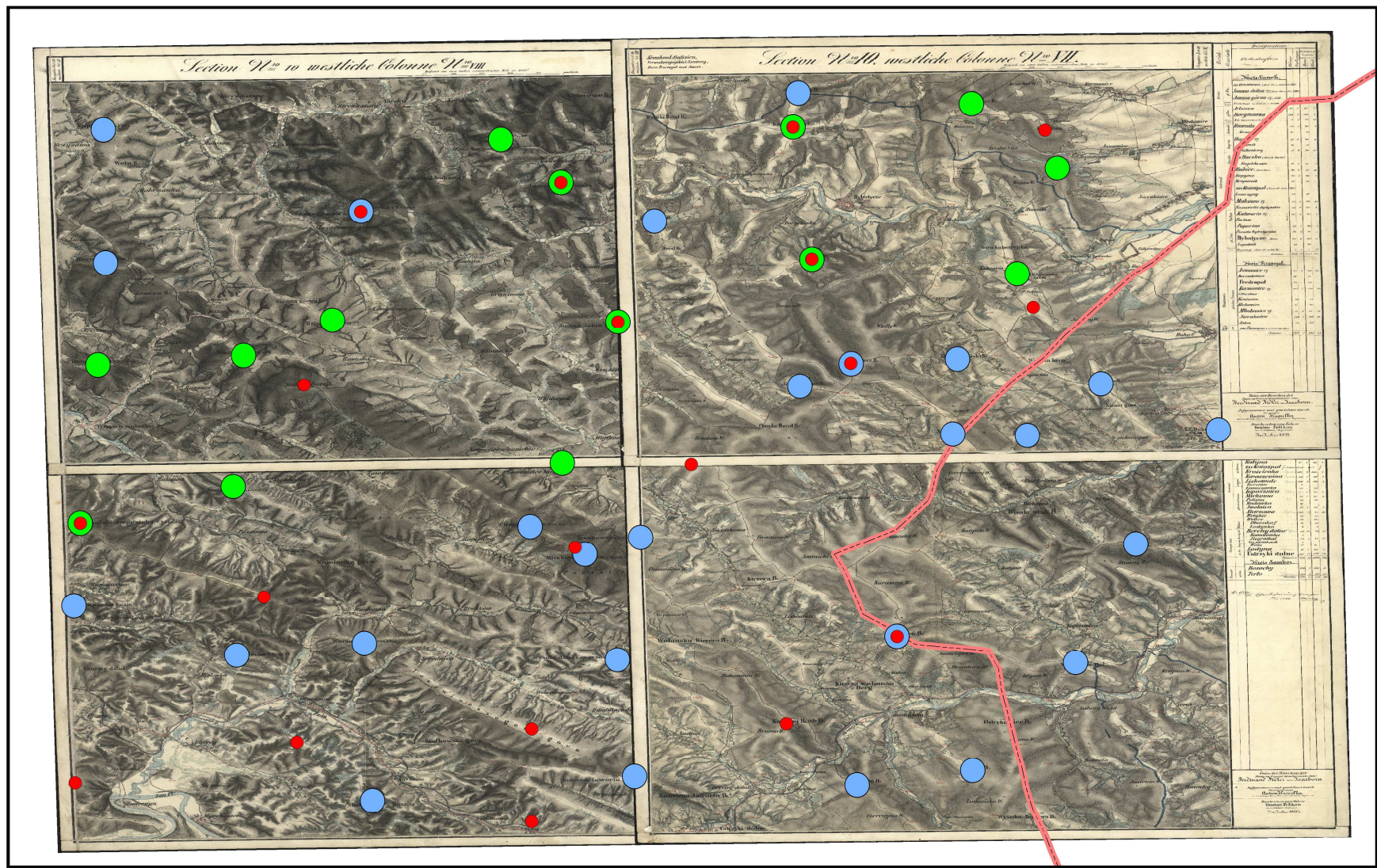
PARAMETR PARAMETER	LICZBA PUNKTÓW NUMBER OF POINTS	ŚREDNIA MEAN	MINIMUM MINIMUM	MAKSIMUM MAXIMUM	ODCHYLENIE STANDARD. STANDARD DEVIATION
dx	14	2168,5 m	2165 m	2171 m	2,0 m
dy	14	345,6 m	342 m	350 m	2,9 m
dz	14	-299,4 m	-303 m	-296 m	2,5 m

Ryc. 4. Arkusze II wojskowego zdjęcia Galicji w układzie WGS84 z naniesionymi punktami trygonometrycznymi triangulacji katastralnej I, II i III rzędu z lat 1819-1851 (wykorzystanymi (●) i niewykorzystanymi (○) do transformacji lokalnego układu odniesienia) i współczesnymi punktami osnowy poziomej I klasy (●).  – obecna granica Polski.

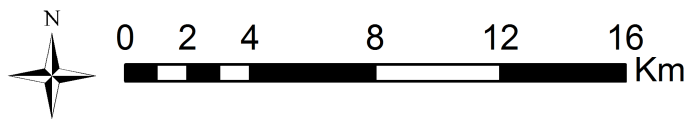
Źródło: opracowanie własne na podstawie skanu mapy z *Kriegsarchiv* w Wiedniu (sygnatura AT-OeStA/KA KPS KS), warstwy WMS centralnego banku osnów portalu www.geoportal.gov.pl i *Katalogu punktów trygonometrycznych* (Michałowski, Sikorski, 1932).

Fig. 4. Sheets of the II military survey of Galicia in WGS84 system with marked trigonometric points of I, II and III order cadastral triangulation of the years 1819-1851 (used (●) and not used (○) to transform the local reference system) and contemporary points of geodetic horizontal first class network (●).  – Polish border.

Source: own study based on a scanned maps from *Kriegsarchiv* in Vienna (signature AT-OeStA/KA KPS KS), the geodetic networks central bank's WMS layer from www.geoportal.gov.pl and the *Catalogue of trigonometric points* (Michałowski, Sikorski, 1932).



Uklad WGS84



Parametry przesunięcia kilkuset lokalnych układów odniesienia względem układu WGS84 używanych w XX wieku obliczone metodą Mołodieńskiego można znaleźć w opracowaniu amerykańskiej agencji NIMA (2000).

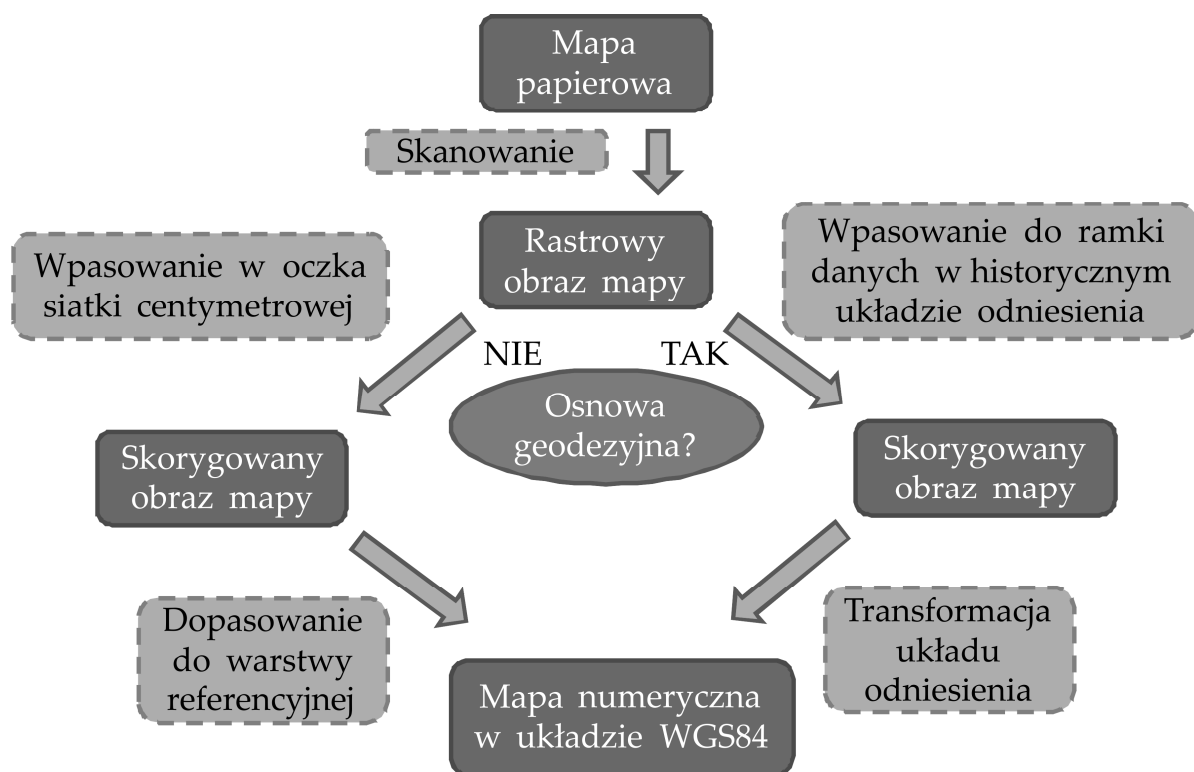
DYSKUSJA DOTYCZĄCA KALIBRACJI MAP OPARTYCH NA OSNOWIE GEODEZYJNEJ

Do kalibracji archiwalnych map w skalach przeglądowych i mniejszych, oraz całych serii map wielkoskalowych opartych na osnowie geodezyjnej omówioną powyżej metodą nie ma dobrej alternatywy. Inaczej sytuacja wygląda w przypadku kalibracji pojedynczych arkuszy map szczegółowych w dużej skali, powyżej 1:50 000, obejmujących swym zasięgiem niewielki obszar. Wówczas niewiele tracąc na dokładności procedurę można uprościć, ponieważ różnice wynikające z zastosowania różnych elipsoid są często mniejsze niż niedokładności samych map. Wychodząc z założenia, że dwa obrazy płaskie tej samej sieci trójkątów, odniesionej do dwóch różnych elipsoid, w granicach do 600 km od środka sieci i pod warunkiem użycia do odwzorowania jednego prawa pozostają niezmiennione (przy dokładności decymetra) (Słomczyński, 1933), można skorzystać z warstwy referencyjnej w jednakowym odwzorowaniu, tym samym zbliżając postępowanie do metody kalibracji map nieopartych na osnowie geodezyjnej.

PODSUMOWANIE

Optymalizacja procesu kalibracji leży u podstaw rozwoju i powodzenia dopiero wykrywalizowanej się nowej metody badawczej, jaką jest GIS historyczny. Dwie metody kalibracji prezentowane w tym artykule odpowiednio dobrane do materiału wejściowego umożliwiają maksymalne wykorzystanie informacji zawartych w mapach historycznych. Metoda kalibracji bazująca na transformacji układów odniesienia zachowuje wysoką dokładność odwzorowania powierzchni terenu charakterystyczną dla map opartych na osnowie geodezyjnej, natomiast metoda bazująca na transformacji typu *rubbersheeting* podnosi wartość kartometryczną mniej dokładnych map nieopartych na osnowie geodezyjnej. Tak skalibrowane mapy po wektoryzacji stają się użyteczne dla badaczy wykorzystujących precyzyjne dane liczbowe dotyczące odległości, powierzchni i kształtu obiektów na nich przedstawionych. Umożliwiają m.in. wyliczenie metryk krajobrazowych i wymierne ujęcie zmian w czasie (np. pokrycia terenu, podziałów własnościowych i administracyjnych).

Proponowany schemat przetwarzania map historycznych z postaci papierowej do numerycznej we współczesnym układzie odniesienia przedstawia rycina 5. W tabeli 4. ujęte są podstawowe różnice między omawianymi wyżej metodami kalibracji.



Ryc. 5. Schemat przetwarzania papierowych map historycznych do postaci numerycznej.

Fig. 5. Scheme of processing historical paper maps into digital form.

Tab. 4. Podstawowe różnice w procesie kalibracji map opartych i nieopartych na osnowie geodezyjnej

Tab. 4. Basic differences in the calibration process between maps based and not based on geodetic network

MAPY NIEOPARTE NA OSNOWIE GEODEZYJNEJ MAPS NOT BASED ON GEODETIC NETWORK	MAPY OPARTE NA OSNOWIE GEODEZYJNEJ MAPS BASED ON GEODETIC NETWORK
wpasowanie w oczka siatki centymetrowej	wpasowanie do ramki danych w historycznym układzie odniesienia
transformacja typu <i>rubbersheeting</i>	transformacja afiniczna
potrzebna warstwa referencyjna	niepotrzebna warstwa referencyjna

Podziękowania

Projekt został sfinansowany ze środków narodowego centrum nauki

LITERATURA

- ESRI, 2011: ArcGIS Resource center. ArcGIS 10 Desktop Help, <http://help.arcgis.com/en/arcgisdesktop/10.0/help/index.html>.
- Gregory I. N., Ell P. S., 2007: *Historical GIS: Techniques, methodologies and scholarship*. Cambridge University Press: Cambridge.
- GUGIK, 2001: Wytyczne techniczne G-1.10. Formuły odwzorowawcze i parametry układów współrzędnych. Wydanie drugie zmienione. Warszawa
- Instruction für die bei der astronomisch-trigonometrischen Landesvermessung und im Calcul-Bureau des K. K. Militair Geografischen Institutes angestellten Individuen, 1845, Wien.
- Jenny B., Hurni L., 2011: Studying cartographic heritage: Analysis and visualization of geometric distortions [w:] *Computers & Graphics*, 35: 402-411.
- Karaszewicz W., 2000: Odwzorowania kartograficzne współczesnych map topograficznych [w:] K. Okła (red.), *System informacji przestrzennej w Lasach Państwowych*. Podręcznik użytkownika leśnej mapy numerycznej, Warszawa.
- Knowles A. K., 2008: *Placing history: how maps, spatial data, and GIS are changing historical scholarship*. Redlands: ESRI Press.
- Konias A., 2000: *Kartografia topograficzna Śląska Cieszyńskiego i zaboru austriackiego od II połowy XVIII wieku do początku XX wieku*. Wydawnictwo Uniwersytetu Śląskiego, Katowice.
- Michałowski J., Sikorski T., 1932: *Katalog punktów trygonometrycznych w granicach Rzeczypospolitej Polskiej*. Biblioteka Służby Geograficznej, Tom 8, Warszawa.
- Murzewski W., 1936: *Rozwój triangulacji na południu Polski* [w:] *Wiadomości Służby Geograficznej*, 2: 208-238.
- NIMA (National Imagery and Mapping Agency), 2000: *Department of Defense World Geodetic System 1984 – Its Definition and Relationships with Local Geodetic Systems*. Technical Report 8350.2. Wydanie trzecie. St. Louis, Missouri, USA.
- Pasławski J., Ostrowski W., Siwek J., Kowalski P., Korycka-Skorupa J. i in., 2010: *Wprowadzenie do kartografii i topografii*, wydanie II. Nowa Era, Warszawa.
- Podobnikar T., 2009: *Georeferencing and quality assessment of Josephine Survey maps for the mountainous region in The Triglav National Park*: *Acta Geodaetica et Geophysica Hungarica*, 44, 1: 49-66.
- Timár G., 2004: *GIS integration of the second military survey sections – a solution valid on the territory of Slovakia and Hungary* [w:] *Kartografické listy*, 12:119-126.
- Timár G., 2009: *System of the 1:28 800 scale sheets of the Second Military Survey in Tyrol and Salzburg* [w:] *Acta Geod. et Geophysica Hungarica*, 44, 1: 95-104.
- Słomczyński J., 1933: *Uzgodnienie triangulacji na obszarze Polski* [w:] *Wiadomości Służby Geograficznej*, 4: 313-351.