

Komitet Redakcyjny

Józef JACHIMSKI, Janusz KOTLARCZYK, Jakub SIEMEK,
Ryszard ŚLUSARCZYK, Ryszard TADEUSIEWICZ

Redaktor Naczelny

Kazimierz TWARDOWSKI

Sekretarze

Andrzej KRAWCZYK
Krystian PYKA

Zamieszczone w Roczniku *Geoinformatica Polonica* artykuły zostały pozytywnie zaopiniowane
przez Recenzentów wyznaczonych przez Komitet Redakcyjny Rocznika

Publikacja dofinansowana przez Stowarzyszenie Zbiorowego Zarządzania Prawami Autorskimi
Twórców Dziel Naukowych i Technicznych KOPIPOL w Kielcach

Adres Redakcji

Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica
Wydział Wiertnictwa, Nafty i Gazu
30-059 Kraków, al. Mickiewicza 30
tel. (012) 617-22-24, fax/tel. (012) 617-22-45
e-mail: twardows@agh.edu.pl
sztymar@agh.edu.pl

Adres Wydawnictwa

Polska Akademia Umiejętności – Wydawnictwo
31-016 Kraków, ul. Sławkowska 17
tel. (012) 424-02-12
e-mail: wydawnictwo@pau.krakow.pl

Zamówienia przyjmuje i realizuje (łącznie z wysyłką) Wydawnictwo

POLSKA AKADEMIA UMIEJĘTNOŚCI
PRACE KOMISJI GEOINFORMATYKI

GEOINFORMATICA POLONICA

7



KRAKÓW 2005

Redakcja tomu
Maria MICHAŁEWICZ

Copyright by Polska Akademia Umiejętności
Kraków 2006

Skład nakładu:
PAU, 31-016 Kraków, ul. Sławkowska 17

ISSN: 1642-2511

Złożono do druku: listopad 2005
Druk ukończono: sierpień 2006

Komputerowy Skład Tekstu „Firet”
Zbigniew Białko

Druk i oprawa
Wydawnictwo i Drukarnia „Secesja”
30-363 Kraków, ul. Rzemieślnicza 7
Objętość: ark. wyd. 15,00, ark. druk. 18,00, nakład: 300 egz.

SPIS TREŚCI

Artykuły

Tadeusz CHROBAK <i>Komputerowa redakcja kartograficzna wspomagana automatyczną generalizacją</i>	7
Aleksander CIANCIARA, Bogdan CIANCIARA, Ewa TAKUSKA-WĘGRZYN <i>Methods of tremor risk monitoring based on analysis of non-homogeneity of stream of registered seismo-acoustic emission</i>	15
<i>Sposób monitorowania zagrożenia wystąpieniem wstrząsów oparty na analizie stopnia niejednorodności strumienia rejestrowanej emisji sejsmoakustycznej</i>	
Tomasz DANEK <i>Obliczenia równoległe i klastry PC w modelowaniu sejsmicznego pola falowego</i>	25
Zbigniew KASINA <i>The effect of seismic signal parameters on results of first break picking realized by means of neural picker</i>	35
<i>Wpływ parametrów sygnału sejsmicznego na wyniki punktowania pierwszych wstąpień za pomocą pikera neuronowego</i>	
Leszek KOLONDRĄ <i>Fotogrametria – wiarygodne źródło danych w badaniach glaciologicznych Spitsbergenu</i>	45
Zdzisław KURCZYŃSKI <i>Synergia systemów obrazowania powierzchni Ziemi</i>	75
Sławomir MIKRUT <i>Wpływ skanowania i kompresji metodą JPEG na wykrywanie obiektów liniowych i punktowych na obrazach cyfrowych</i>	101
Stanisław MULARZ <i>Teledetekcyjny monitoring środowiska w rejonie wysadów solnych z wykorzystaniem obrazów satelitarnych systemu Landsat (ETM+)</i>	111
Krzysztof PYKA <i>Ocena działań administracji publicznej w kontekście wybranych problemów krajowej infrastruktury geoinformacyjnej</i>	131

Kronika

<i>Kronika prac Komisji Geoinformatyki PAU</i> (Janusz KOTLARCZYK, Ryszard ŚLUSARCZYK)	141
---	-----

CONTENTS

Papers

Tadeusz CHROBAK	
<i>Computer cartographic editing supported by automatic generalization</i>	7
Aleksander CIANCIARA, Bogdan CIANCIARA, Ewa TAKUSKA-WĘGRZYN	
<i>Methods of tremor risk monitoring based on analysis of non-homogeneity of stream of registered seismic-acoustic emission</i>	15
Tomasz DANEK	
<i>Parallel computing and PC clusters in seismic wave field modeling</i>	25
Zbigniew KASINA	
<i>The effect of seismic signal parameters on results of first break picking realized by means of neural picker</i>	35
Leszek KOŁONDRA	
<i>Photogrammetry – the authentic source of data for Spitsbergen glaciological research</i>	45
Zdzisław KURCZYŃSKI	
<i>Synergy of Earth surface imaging systems</i>	75
Stanisław MIKRUT	
<i>The influence of scanning and compression by using JPEG method on linear and points feature extraction of digital images</i>	101
Stanisław MULARZ	
<i>Environmental remote sensing monitoring over the salt domes using satellite Landsat (ETM+) imageries</i>	111
Krzysztof PYKA	
<i>The evaluation of Polish public administration activities in the context of selected national problems in development of spatial data infrastructure</i>	131

Cronicle

<i>Chronicle of the works of the Geoinformatics Commission PAU</i>	
(Janusz KOTLARCZYK, Ryszard ŚLUSARCZYK)	141

TADEUSZ CHROBAK¹

KOMPUTEROWA REDAKCJA KARTOGRAFICZNA WSPOMAGANA AUTOMATYCZNĄ GENERALIZACJĄ

Słowa kluczowe:

generalizacja kartograficzna, geoinformacja, wizualizacja, statystyka matematyczna

Abstrakt

W generalizacji spowodowanej zmianą skali, wyróżnione etapy pośrednie upraszczania krzywych prezentowanych na mapie, L. Ratajski (1989) nazwał progami generalizacji.

Tematem artykułu jest określenie parametrów dla upraszczanych krzywych, które dla redagowanej mapy w dowolnej skali określą progi generalizacji, jakimi są: upraszczanie krzywej łamanej, upraszczanie krzywej z wygładzaniem, symbolizacja lub eliminacja.

W uzyskaniu odpowiedzi wykorzystano: obiektywną metodę do upraszczania krzywych oraz własności statystyki matematycznej.

COMPUTER CARTOGRAPHIC EDITING SUPPORTED BY AUTOMATIC GENERALIZATION

Key words:

cartographic generalization, geoinformation, visualization, mathematical statistics

Abstract

In the paper there are discussed open and closed curves simplifying process, while the map scale is changing in optional scale interval (from greater scale to smaller). The method uses vertices hierarchy, relative extrema and the drawing recognizability, that is user dependent factors. Parameters defined in the simplifying process are scale and value 0.5 or 0.6, depending on the results presentation method (that is computer map or screen). The results presentation after generalization, thanks to specified generalization thresholds, is set automatically. Moreover, the method preserves after-generalization data accuracy, which GUGiK trade standards require.

¹ Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Geodezji Górniczej i Inżynierii Środowiska, Zakład Geodezji i Kartografii, Kraków.

1. Wstęp

Mapy należą do najbardziej wysublimowanych wytworów myśli ludzkiej. Znano je i oceniano już tysiące lat temu. Dowodem mogą być mapy pochodzące z Mezopotamii powstałe około III wieku p.n.e., jak też późniejsze stworzone w starożytnym Egipcie i Grecji. Wszystkie one zadziwiają bogactwem treści i rozwiązaniami graficznymi z głębokim przemyśleniem ich konstrukcji. Możliwe, że istniały jeszcze wcześniejsze przykłady „sztuki kartograficznej” pierwszych społeczności ludzkich pomyślane jako obrazy ich przestrzeni życiowej przeniesionej na płaszczyznę, często jako przedmioty codziennego użytku. Przy redakcji ich treści musiały być uwzględnione co najmniej dwie właściwości, a mianowicie: skala i generalizacja, czyli odpowiedni dobór szczegółów w wymiarze ograniczonym formatem mapy.

Generalizacja kartograficzna jest jednym z podstawowych elementów procesu tworzenia przedstawień kartograficznych dla różnych przeznaczeń oraz różnych skal. Jest ona niezbędna w prezentacji treści, gdy jej przedstawienie przekracza wymiary arkusza mapy. Wymaga to serii operacji począwszy od wyboru elementów ich uogólnienia w relacji do arkusza (skali) redagowanej mapy. Jest procesem wszechstronnym – dotyczącym elementów graficznych: punktowych, liniowych, powierzchniowych, jak również zjawisk stanowiących treść mapy.

W ostatnich latach uwaga kartografów została zwrócona na zintegrowaną metodę generalizacji automatycznej. Autorzy proponują różne rozwiązania procesu generalizacji:

- a) jakościowa i ilościowa (Ratajski, 1998)
 - generalizacja jakościowa daje w rezultacie zmiany symboli na formy bardziej abstrahujące,
 - generalizacja ilościowa opiera się na progresywnej redukcji zawartości mapy.
- b) struktura danych a generalizacja danych (Powitz, 1993)
 - projektowanie struktury danych (budowa topologii, ograniczenia ilości danych, sprawdzanie danych),
 - generalizacja danych (zmiany geometryczne).
- c) generalizacja statystyczna a generalizacja kartograficzna (Brassel & Weibel, 1988).

– generalizacja statystyczna jest ramą, zaprojektowaną dla analizy przestrzennej danych pod kontrolą statystyczną,

– generalizacja kartograficzna łączy problemy skali, symbolizacji i wizualizacji.

d) abstrahowanie informacji a generalizacja kartograficzna (Nyerges, 1991).

– abstrahowanie informacji polega na tworzeniu nowych baz danych zawierających inne elementy niż zawarte w źródłowej bazie danych,

– generalizacja kartograficzna zajmuje się geometrią i symbolizacją obiektów.

Dotychczas stworzono kilka całościowych modeli pojęciowych. Wiele z nich przeznaczonych jest do rozwiązywania kilku zadań w zakresie generalizacji. Jest nim np. model Nickersona i Freemana (1986 r.), który składa się z pięciu modułów służących do modyfikacji obiektów otrzymanych w procesie: eliminacji, upraszczania, scalania obiektów, symbolizacji i umieszczania napisów.

Innym koncepcyjnym modelem całościowym dla potrzeb generalizacji komputerowej jest model Brassela i Weibla (1988). Twórcy modelu zaproponowali, aby generalizacja kartograficzna była zdefiniowana jako wariant przestrzennego modelowania argumentując, że generalizacja powinna bazować na rozumieniu, a nie na wykonywaniu tylko ustalonych kroków przetwarzania. Inne przykłady całościowego spojrzenia na generalizację kartograficzną zaproponowali: (Mayer 1989) i (Powitz 1990), (Shea i McMaster 1989), które były pierwszymi zbiorczymi, pojęciowymi modelami opartymi na komputerowej teorii generalizacji.

W artykule omówiona zostanie metoda komputerowej generalizacji kartograficznej, która jest nie tylko algorytmem upraszczania. Metoda ta jest możliwa dzięki zdefiniowaniu, na drodze analitycznej, rozpoznawalności rysunku, która jest jedną z podstawowych cech rysunku. Własność ta przyczyniła się do opracowania metody obiektywnej upraszczania oraz eliminacji obiektów liniowych i powierzchniowych, (Chrobak 2001), którego rezultat zależy od skali mapy opracowywanej i prezentacji wyniku generalizacji – rysunku (monitor, wyplot), czyli czynników niezależnych od redaktora.

Opracowana metoda uwzględnia statystyczną interpretację oceny dokładności obiektów po generalizacji, dzięki czemu z bazy danych można w sposób automatyczny dokonać wyboru metody prezentacji kartograficznej przeprowadzonej generalizacji.

1. Upraszczenie krzywych metodą obiektywną

W metodzie upraszczania linii łamanych otwartych i zamkniętych jest zachowana hierarchia jej wierzchołków i ich topologia. Hierarchię ustala się na podstawie ekstremów lokalnych wyznaczonych w przedziałach zamkniętych (tworzonych z sąsiednich wierzchołków – niezmienników procesu przekształcenia) badanej krzywej. Znając podstawę trójkąta (utworzoną przez początek i koniec linii), trzeci wierzchołek wyznacza punkt spełniający w trójkącie następujące warunki:

1) długości boków są co najmniej równe najkrótszej długości e_j – trójkąta elementarnego,

2) rzędna wysokości ma największą długość w przedziale badanym.

Spełniając warunki, trzeci wyznaczony wierzchołek trójkąta stanowi w hierarchii kolejny (po początku i końcu linii) niezmiennik procesu upraszczania. W ten sposób otrzymujemy dwie pary niezmienników: początek – trzeci punkt i koniec – trzeci punkt (kolejność wyboru tzn. początek – trzeci, następnie koniec – trzeci lub odwrotnie, nie wpływa na wynik końcowy procesu). Postępując analogicznie tworzymy następne pary wierzchołków – niezmienników upraszczanej linii. Koniec etapu wyboru niezmienników krzywej nastąpi wtedy, gdy zachowując kolejność wynikającą z hierarchii wierzchołków sprawdzimy wszystkie punkty krzywej upraszczanej przy użyciu trójkąta. Zastosowany w procesie trójkąt pozwala zachować topologię wierzchołków krzywej, gdyż jej podstawę zawsze wyznaczają dwa wierzchołki – niezmienniki, a trzeci zachowuje sąsiedztwo względem wierzchołków – niezmienników linii pierwotnej.

W metodzie upraszczania krzywych (do określenia wierzchołków – niezmienników) jako wzorec zastosowano elementarny trójkąt, którego najkrótszą długość boku określa zależność:

$$e_j = s \cdot M_j, \quad (1)$$

gdzie: s – miara progowa rozpoznawalności rysunku (niezależna od skali mapy),

M_j – mianownik skali mapy redagowanej.

W ustalaniu wartości s uczestniczy:

a) rozpoznawalność rysunku linii pojedynczej o grubości 0,1 mm, zdefiniowana przez Saliszczewa,

b) wielkość piksela przyjęta przez Szwajcarskie Towarzystwo Kartograficzne,

c) dokładność II grupy szczegółów liniowych na mapie określonych normami branżowymi GUGiK.

Na podstawie określonych wartości w punktach „a”, „b” i „c”, ustalono miarę długości s_j :

$s_1 = 0,5$ mm dla rysunku mapy klasycznej (papierowej jako nośnika obrazu),

$s_2 = 0,6$ mm dla rysunku prezentowanego w monitorze komputera.

Po wyborze wierzchołków niezmienników krzywej pierwotnej, następnym etapem jest badanie przedziałów utworzonych z sąsiednich wierzchołków – niezmienników. W tych przedziałach badanie łańcuchów punktów krzywej pierwotnej ma na celu ich zastąpienie przez:

– cięciwę utworzoną przez początek i koniec przedziału,

– nowy punkt pośredni (nie będący niezmiennikiem) należący do jednego z boków krzywej pierwotnej i połączony z początkiem i końcem badanego przedziału. Metoda zapewnia jednoznaczne przekształcenie łańcucha punktów w badanym przedziale na cięciwę lub dodatkowy, nowy punkt.

W przypadku, gdy suma boków jest mniejsza od $2e_j$, po uproszczeniu łańcuch punktów reprezentuje cięciwa. Dla przypadku badanego przedziału, w którym suma jest równa lub większa od $2e_j$, jest możliwe utworzenie nowego punktu w procesie iteracyjnym, który to proces musi być zbieżny. W tym celu badamy przedział, czy wszystkie w nim zmienne niezależne przyrostów współrzędnych punktów sąsiednich mają stały znak. W przypadku różnych znaków przyrostów współrzędnych (proces rozbieżny), badany łańcuch punktów w badanym przedziale zastępuje cięciwa.

W metodzie obiektywnej końcowym etapem jest jej ocena dokładności. W tej ocenie są wykorzystane następujące fakty:

– wybór i usuwanie wierzchołków są zdefiniowane jednoznacznie,

– kształt krzywej pierwotnej w największej skali (źródłowej) różni się najmniej od kształtu jej w rzeczywistości, co odpowiada zmiennej losowej opisującej kształt krzywej na podstawie współrzędnych punktów,

– każde uproszczenie (uogólnienie) powoduje ubytek wierzchołków opisujących krzywą pierwotną,

– błędy pozorne procesu to najkrótsze odległości pomiędzy odrzucanymi punktami a pozostającymi wierzchołkami krzywej pierwotnej. W procesie długości te są określone jednoznacznie.

Wykorzystując prawo przenoszenia się błędów przy jednym stopniu swobody dla n odrzucanych wierzchołków, możemy określić średni błąd procesu upraszczanej krzywej. Znacząc dokładność danych przed upraszczaniem i błąd procesu można określić, zgodnie z prawem przenoszenia błędów, błąd danych po procesie.

2.1. Rozstęp skal a dokładność danych w redakcji mapy metodą obiektywną

Krzywe po uproszczeniu badano (metodą obiektywną), gdy zmiana skali następuje etapami, tj. 1:500 na 1:25 000 – na 1:100 000 – na 1:500 000, jak również przy innych rozstępach skal. Następnie dane źródłowe 1:500 (te same, co w badaniu poprzednim) poddano upraszczaniu wprost, tj. 1:500 do 1:500 000. Porównanie wyników przeprowadzono przez sprawdzenie liczby punktów uzyskanych po procesie upraszczania w obu sposobach (etapami i wprost), jak i weryfikację, czy są to te same punkty po generalizacji. Uzyskane wyniki (tab. 1) potwierdzają niezależność rezultatów:

– od rozstępu skal,

– skali danych przed generalizacją,

gdyż liczba punktów w obu sposobach jest porównywalna, a występujące różnice w liczbie punktów i ich najkrótszych odległościach są zaniedbywalne, gdyż tworzą trójkąty o bokach mniejszych od rozpoznawalności krzywych po upraszczaniu.

W metodzie obiektywnej skala nie wpływa na dokładność danych, gdyż w każdej skali dane są niezmiennie, jedynie zmienia się ich liczba. Skala wpływa na proces uogólnienia tj. kształt krzywej po upraszczaniu,

której miarą uogólnienia jest jej rozpoznawalność na mapie w opracowywanej skali.

Stosowanie rozstępu skal o dowolną ukierunkowaną wielkość w metodzie obiektywnej pozwala zachować zależność od potrzeb dokładność treści mapy. W przypadku danych dla potrzeb:

– projektowo-realizacyjnych – korzystamy z danych źródłowych (nie przetworzonych),

– poglądowych, porównawczych czy analiz – korzystamy z danych po generalizacji, gdyż zachowują one dokładność określoną normami branżowymi, wynikającą ze skali opracowania.

2.2. Zastosowanie statystyki matematycznej w ustalaniu progów generalizacji prezentowanych na mapie upraszczanych krzywych

W upraszczaniu krzywych obiektywną metodą usuwanie punktów zależy od ich hierarchii (wynikającej z ekstremów lokalnych) oraz rozpoznawalności rysunku, a zatem czynników obiektywnych.

W metodzie tej, liczba punktów odrzucanych nie zależy od redaktora mapy, stąd wynik procesu ma cechy rozkładu statystycznego. Gęstość rozkładu określa: wartość oczekiwana – $E(X)$, a rozrzut statystyczny wyników – odchylenie standardowe $\sigma(X)$.

Zgodnie z rozkładem normalnym prawdopodobieństwo uzyskania wartości zmiennej losowej X z niepewnością σ odpowiada 68%, co dla procesu upraszczania krzywych jest równoważne liczbie punktów pozostających po generalizacji n_i . Wykorzystując tę własność rozkładu określono zależność:

$$\left(100 \frac{n_i - c}{n_0} - \sigma\right) = K_i = \min c \in R \in [-5, 10] \wedge n_i \neq c, \quad (2)$$

gdzie:

n_0 – liczba punktów krzywej pierwotnej,

n_i – liczba punktów po generalizacji,

c – liczba punktów niezmienników procesu,

σ – odchylenie standardowe, równe 68%.

Wartości graniczne w przedziale zależności (2), ustalono na drodze empirycznej. Wartość granicy lewo-

Tabela 1. Statystyka upraszczania wierzchołków linii łamanej, gdy skala mapy zmienia się od 1:500 do 1:500 000
Table 1. Statistics of the reduction of broken line vertices when the map scale changes from 1:500 to 1:500 000

Zbiór danych dla skali Liczba punktów Pozyskanie danych	M ₁ Liczba pkt Zmienion. Usuniętych	M ₂ Liczba pkt Zmienion. Usuniętych	M ₁₀ Liczba pkt Zmienion. Usuniętych	M ₂₅ Liczba pkt Zmienion. Usuniętych	M ₅₀ Liczba pkt Zmienion. Usuniętych	M ₁₀₀ Liczba pkt Zmienion. Usuniętych	M ₂₅₀ Liczba pkt Zmienion. Usuniętych	M ₅₀₀ Liczba pkt Zmienion. Usuniętych	M ₁₀₀₀ Liczba pkt Zmienion. Usuniętych	M ₅₀₀₀ Liczba pkt Zmienion. Usuniętych
M ₁ = 1:500 161 pkt dane źródłowe	159 0 2	117 0 44	74 0 87	29 0 132	17 0 144	9 0 152	4 0 157	3 0 158	3 0 158	2 0 159
M ₂ = 1:2000 159 pkt dane przetworzone	– – –	117 0 42	74 0 85	29 0 130	17 0 142	9 0 150	4 0 155	3 0 156	3 0 156	2 0 157
M ₃ = 1:5000 117 pkt dane przetworzone	– – –	– – –	73 1 44	29 0 88	17 0 100	9 1 108	4 0 113	3 0 114	3 0 114	2 0 115
M ₁₀ = 1:10 000 74 pkt dane przetworzone	– – –	– – –	– – –	28 0 46	17 2* 57	9 1 65	4 1 70	3 0 71	3 1 71	2 0 72
M ₂₅ = 1:25 000 29 pkt dane przetworzone	– – –	– – –	– – –	– – –	16 1 13	9 1 20	4 1 25	3 1 26	2 0 27	2 0 27
M ₅₀ = 1:50 000 17 pkt dane przetworzone	– – –	– – –	– – –	– – –	– – –	8 1 9	4 1 13	3 0 14	2 0 15	2 0 15
M ₁₀₀ = 1:100 000 9 pkt dane przetworzone	– – –	– – –	– – –	– – –	– – –	– – –	4 1 5	3 0 6	2 0 7	2 0 7
M ₂₅₀ = 1:200 000 4 pkt dane przetworzone	– – –	– – –	– – –	– – –	– – –	– – –	– – –	3 0 1	2 0 2	2 0 2
M ₅₀₀ = 1:300 000 3 pkt dane przetworzone	– – –	– – –	– – –	– – –	– – –	– – –	– – –	– – –	2 0 1	2 0 1
M ₁₀₀₀ = 1:400 000 3 pkt dane przetworzone	– – –	– – –	– – –	– – –	– – –	– – –	– – –	– – –	– – –	2 0 1

2* – punkty zmienione znajdowały się w różnych miejscach krzywej upraszczanej

stronnej wynika stąd, że malejąca liczba punktów o więcej jak 5%, w procesie generalizacji, powoduje znaczącą różnicę w kształcie krzywych przed i po upraszczaniu. Nadmiar pozostających punktów (wartość granicy prawostronnej) nie rodzi tego zagrożenia, a nawet rosnąca wartość powiększa zgodność krzywych ze względu na ich kształt.

Próg dla krzywych łamanych

W celu ustalenia progu generalizacji oblicza się K_i z zależności (2), dla zmieniających się mianowników skal np. $M_1 = 1000$, $M_2 = 2000$, $M_3 = 3000$, ... procesu upra-

szczania. Mianownik skali, dla którego K_i spełnia zależność (2) jest progiem generalizacji (oznaczony jako M_{i+0}). Jest to granica przedziału, dla której stosuje się prezentację krzywych metodą krzywej łamanej. Metodą tą jest prezentowana krzywa pierwotna (przed generalizacją).

Próg wygładzania krzywych

W kolejnym progu generalizacji upraszczanej krzywej stosuje się metodę wygładzania krzywych (otwartych, zamkniętych). W celu ustalenia przedziału skal dla tej metody prezentacji wyników na mapie wykorzystano równanie (1). Znajac M_{i+0} i (e_{i+0} z równania (1)) dla

krzywej upraszczanej, szukaną granicę przedziału określa wartość $2\epsilon_0(M_{i+0})$, którą ustalono na drodze empirycznej.

Próg eliminacji krzywych otwartych i symbolizacji krzywych zamkniętych

Następnym progiem – ustalonym empirycznie – jest przedział skal $1:M_i$, gdzie spełniona jest nierówność: $2\epsilon_0(M_{i+0}) > 0$. Wówczas na mapie prezentuje się krzywe, metodą:

- eliminacji dla krzywych otwartych,
- symbolizacji dla krzywych zamkniętych.

Dla obszarów zamkniętych o wypełnionym wnętrzu obiektami pojedynczymi lub zwartymi kompleksami ustalono również próg prezentacji wyników po generalizacji. W celu jego określenia, oblicza się powierzchnie:

P_0 – obszaru zamkniętego,

P_i – obiektu pojedynczego lub zwartego kompleksu,

$\sum_{i=1}^n P_i$ – sumę obiektów P_i ,

a następnie oblicza się iloraz:

$$I_i = \frac{\sum_{i=1}^n P_i}{P_0}, \quad i = 1, 2, 3, \dots, n, \quad (3)$$

Wartość ilorazu maleje wraz z eliminowanymi obiektami w procesie generalizacji (zmniejszających się skal), przy zachowaniu ich hierarchii. Podobnie jak związek (2), próg dla obszarów zamkniętych wypełnionych obiektami wyznacza zależność:

$$(100I_i - \sigma) = B_i = \min \in R \in [-5, 10], \quad (4)$$

gdzie:

σ – współczynniki jak w zależności (2).

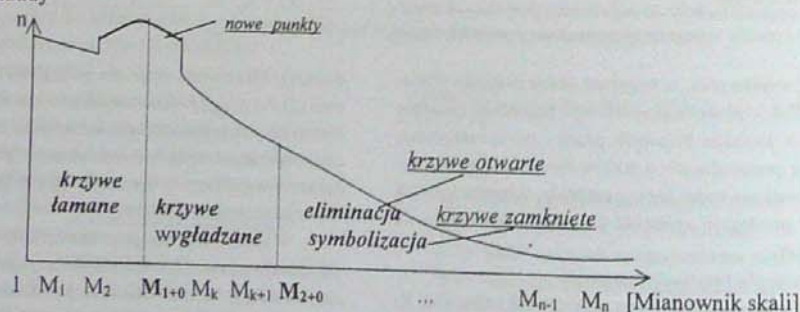
Z wzoru (4), ustala się próg do prezentacji obiektów na mapie:

- obszaru z obiektami, gdy spełniona jest zależność (4),
- eliminację obiektów, gdy nie spełniona jest zależność (4).

Tak, więc wartość oczekiwana zmiennej losowej – $E(X)$ (określona liczbami punktów: n_0 – krzywej pierwotnej, n_i – krzywej po generalizacji, c – punktów niezmienników procesu), σ – odchylenie standardowe i $\epsilon_0(M_{i+0})$, to parametry wyboru metody prezentacji kartograficznej krzywych upraszczanych metodą obiektywną, gdy zmienia się skala mapy.

Liczby punktów n_i krzywych upraszczanych dla zmieniających się skal $1:M_i$ w procesie upraszczania, porównano z progiem generalizacji określonym równaniem (2). Otrzymane wyniki: (tab. 2, 3) potwierdzają, że skala pierwszego progu określona z równania (2), odpowiada skali, dla której dodano największą liczbę punktów w procesie upraszczania. Potwierdza to poprawność sposobu ustalenia progu generalizacji, gdyż celem punktów dodanych jest optymalne dopasowanie kształty krzywych przed i po generalizacji. Uzyskane jednakowe wartości granicy przedziału progu generalizacji różnymi metodami, dodatkowo potwierdzają metodę krzywej łamanej do prezentacji wyników na mapie.

Przykłady



Rys. 1. Usuwanie punktów, gdy zmniejsza się skala mapy.
Fig. 1. Points removing while map scale is being changed.

Tabela 2. Tabela progów generalizacji.
Table 2. Table of generalisation thresholds.

Lp.	Skala 1:M _i	n ₀ /c	Pkt dodane	Pkt po upr.	Suma pkt n _i	K _i	ε ₀ [m]	2ε ₀ [m]	Progi gen
1									
	1:1000	133/16	0	0	133	20	0,5		
	1:2000		1	1	133	20	1,0		
	1:3000		1	1	133	20	1,5		
	1:4000		2	2	133	20	2,0		
	1:5000		16	52	97	7	2,5		1
	1:6000		12	72	73		3,0		
	1:7000		5	83	55		3,5		
	1:8000		1	92	42		4,0		
	1:9000		0	94	39		4,5		
	1:10 000		1	105	29	0	5,0	5,0	2
	1:25 000				16				
	1:50 000				16				
	1:100 000				16				
2									
	1:1000	157/16	0	0	157	22	0,5		
	1:2000		0	0	157	22	1,0		
	1:3000		0	0	157	22	1,5		
	1:4000		6	6	157	21	2,0		
	1:5000		40	74	123	0	2,5		1
	1:6000		13	90	80	-25	3,0		
	1:7000		2	94	65		3,5		
	1:8000		3	112	48		4,0		
	1:9000		0	112	45		4,5		
	1:10 000		1	121	37		5,0	5,0	2
	1:25 000		0	141	16				c = n _i
	1:50 000		0	141	16				c = n _i
	1:100 000		0	141	16				c = n _i
3									
	1:1000	155/20	0	0	155	19	0,5		
	1:2000		0	0	155	19	1,0		
	1:3000		0	0	155	19	1,5		
	1:4000		0	0	155	19	2,0		
	1:5000		37	58	134	5	2,5		1
	1:6000		21	87	89	24	3,0		
	1:7000		0	87	68		3,5		
	1:8000		0	109	46		4,0		
	1:9000		0	109	46		4,5		
	1:10 000		1	117	39		5,0	5,0	2
	1:25 000		0	135	20				c = n _i
	1:50 000		0	135	20				c = n _i
	1:100 000		0	135	20				c = n _i

Wnioski

- W metodzie obiektywnej upraszczania krzywych:
1. Dokładność danych nie zależy od skali opracowywanej mapy, gdyż rozstęp skali (zawsze od większej do mniejszej) jest dowolny, a użytkownik ma zawsze dostęp do bazy danych źródłowych i danych po generalizacji.
 2. Dokładność kształtu krzywej po generalizacji zależy od rozpoznawalności rysunku, a jego miarą zachowuje dokładność norm branżowych GUGiK.
 3. Progi generalizacji do wizualizacji treści mapy są ustalane w sposób automatyczny z uwzględnieniem najkrótszej długości trójkąta elementarnego – s_j i własności statystyki matematycznej.
 4. We wszystkich przytoczonych przykładach (w artykule zamieszczono ich niewielki procent), stwierdzono zgodność granicy progów dla σ , z przedziałem skal, w którym dodawane są nowe punkty. Zgodność ta potwierdza poprawność sposobu ustalania granicy progów generalizacji, gdyż dodane nowe punkty (automatyczne w metodzie obiektywnej), w przedziale wielokoskalowym, optymalnie dopasowują kształt krzywej po generalizacji do jej pierwotnej postaci.

Bibliografia

- Brassel K., Weibel R., 1988, *A review and conceptual framework of automated map generalization*, International Journal of Geographical Information Systems, 2 (3), p. 229–244.
- Chrobak T., 1999, *Badanie przydatności trójkąta elementarnego w komputerowej generalizacji kartograficznej*, WN-DAGH, s. 89.
- Chrobak T., 2001, *Budowa struktury bazy danych przestrzennych dla obiektów liniowych-sieciowych, których kształt podlega uogólnieniu*, Z.N. AGH, Geodezja, t. 8, z. 1, s. 32–38.
- Meyer U., 1989, *Generalisierung der Siedlungsdarstellung in digitalen Situationsmodellen*. Praca doktorska, Uniwersytet w Hanowerze, s. 112.
- Nickerson B. G., Freeman H. 1986, *Development of rule-based system for automatic map generalization*, Proceedings, Second International Symposium on Spatial Data Handling, Seattle, Washington, p. 537–556.
- Nyerges T., 1991, *Map generalization*, chapter Representing geographical meaning, p. 59–85.
- Powitz B. M. 1990, *Automationsgestützte Generalisierung*, Kartographische Nachrichten, s. 97–101.
- Powitz B. M., 1993, *Zur Automatisierung der Kartographischen Generalisierung topographischer Daten in Geo-Informationssystemen*, Institut für Kartographie – Universität Hannover, ISSN 0174-1454 Nr 185.
- Ratajski L., 1998, *Metodyka kartografii społeczno-gospodarczej*, Warszawa, PPWK, s. 198–214.
- Shea K. S., McMaster R. B., 1989, *Cartographic generalization in a digital environment: When and How to generalize*, Proceedings Auto Carto 9. Ninth International Symposium on Computer-Assisted Cartography, Baltimore, Maryland.
- Szydlowski H., 1991, *Teoria pomiarów*, PWN Warszawa, s. 110–238.

ALEKSANDER CIANCIARA, BOGDAN CIANCIARA, EWA TAKUSKA-WĘGRZYN¹

METHODS OF TREMOR RISK MONITORING BASED ON ANALYSIS OF NON-HOMOGENEITY OF STREAM OF REGISTERED SEISMOACOUSTIC EMISSION

Key words:

tremors, rock cracking, seismoacoustic emission, seismoacoustic effects, stream of events, non-homogeneity degree, extent of processes, time intervals between effects, rock-burst risk

Abstract

A method of tremor-risk monitoring based on the analysis of the non-homogeneity of rock fracturing processes is presented in this paper. In the periods preceding tremors, the cracks tend to increase, thereby resulting in an increase in the non-homogeneity. Cracking of rocks of course can be represented in the form of seismoacoustic emissions that can be monitored (recorded). Hence, the degree of non-homogeneity of the cracking process can be evaluated on the basis of a statistical analysis of the registered stream of seismoacoustic emissions. In this monitoring method, the statistical analysis is based on the time intervals between the incidence of the emissions. However, practice shows that the registered emissions generate a non-stationary and non-homogeneous stream of events. Therefore, information about the energy (magnitude) of these effects is necessary for a full description of the process. This methodical disadvantage can be eliminated using the theoretical possibility of indirectly inferring about energy levels on the basis of the assumed relations between energy logarithms and the time intervals between the effects. Relevant models describing the non-homogeneities levels of the cracking process are presented in the paper. Treated as index functions, these values enable quantitative linking of the discussed non-homogeneity with the degree of rock-burst risk. The results obtained were used to develop a system for rock-burst risk-monitoring in underground mines using standard seismoacoustic equipment. The equipment was made available to the researchers for making tests in operational coal mining conditions.

SPOSÓB MONITOROWANIA ZAGROŻENIA WYSTĄPIENIEM WSTRZĄSÓW OPARTY NA ANALIZIE STOPNIA NIEJEDNORODNOŚCI STRUMIENIA REJESTROWANEJ EMISJI SEJSMOAKUSTYCZNEJ

Słowa kluczowe:

wstrząsy górnicze, pękanie skał, emisja sejsmoakustyczna, zjawiska sejsmoakustyczne, strumień zdarzeń, stopień niejednorodności, rozmiary zjawisk, odstępy czasu między zjawiskami, zagrożenie tąpnięmami

¹ Akademia Górniczo-Hutnicza – University of Science and Technology, Faculty of Geology, Geophysics and Environmental Protection, Department of Informatics Geosciences, Kraków, Poland.

Abstrakt

W pracy przedstawiono propozycję sposobu monitorowania zagrożenia wystąpieniem wstrząsów, opartego na analizie stopnia niejednorodności procesów pęknięcia skał. W okresach poprzedzających momenty wystąpienia wstrząsów występują tendencje w kierunku powiększania się rozmiarów pęknięć, powodując wzrosty omawianego stopnia niejednorodności. Wiadomo, że pęknięcie skał jest odwzorowywane w formie emisji sejsmoakustycznej, którą możemy obserwować (rejestrować). Wynika stąd, że stopień niejednorodności procesu pęknięcia może być oceniany na podstawie analizy statystycznej rejestrowanego strumienia emisji sejsmoakustycznej. W przedstawionym tutaj sposobie monitorowania, z uzasadnionych względów, analiza statystyczna prowadzona jest na podstawie odstępów czasu między zjawiskami omawianego strumienia emisji. Jednak, jak wiadomo z praktyki, rejestrowana emisja stanowi niestacjonarny i niejednorodny strumień zdarzeń. Dlatego do jej pełnego opisu konieczna jest informacja o energiach (rozmiarach) zjawisk. Aby ominąć tę trudność, skorzystano z teoretycznej możliwości pośredniego wnioskowania o energii dzięki przyjęciu zależności łączącej logarytmy energii z odstępami czasu między zjawiskami. W pracy przedstawiono odpowiednie modele miar opisujących wielkość niejednorodności procesu pęknięcia. Miary te traktowane jako funkcje wskaźnikowe umożliwiają jakościowe powiązanie omawianej niejednorodności ze stopniem zagrożenia tąpnięciami. Uzyskane wyniki zostały wykorzystane do opracowania systemu monitorowania zagrożenia tąpnięciami (wystąpieniem wstrząsów) w kopalniach podziemnych, pracującego na bazie standardowej aparatury sejsmoakustycznej. Został on przekazany do testowania w warunkach ruchowych kopalni.

1. Introduction

Monitoring of rock-burst risks in underground mines still awaits a satisfactory solution. The theoretical foundation for one such solution is presented in this paper. The monitoring system discussed is based on the identification of the rock cracking processes taking place in the rock mass. The authors make use of seismoacoustic emissions, by means of which the cracking processes can be represented, and which is one of the main sources of information about the geomechanical state of the rock mass (Cianciara, 1999). Identification of the cracking process is generally carried out only on the basis of time intervals between seismoacoustic emission-stream events. In general, the seismoacoustic emission constitutes a non-stationary and non-homogeneous stream of events. Therefore, to provide a full description it is necessary to know the magnitude of the events. This difficulty can be eliminated by using the dependence between the events magnitude (energy) logarithms and the time intervals between these events (Cianciara, 2004). The magnitudes of these events can be represented by: energy or the so-called *spectral dimensions*. This dependence has a linear form and is derived from the general laws governing

seismic emission (Cianciara, 2000). As inferences about the cracking processes are based only on the analysis of the time intervals between these events, the emission can be registered by means of standard seismoacoustic equipment, providing optimum detection conditions. Therefore, a measuring system with relatively high dynamics is recommended. The theoretical bases of the proposed monitoring system are based on the observation that in the periods preceding tremors the stress values increase. They characterise the behaviour of the cracking processes taking place in the rock mass. Cracking processes generated by the increasing stresses have formed the subject of numerous *in situ* and laboratory researches (Brace 1960, Marcak 1985, Kwaśniewski 1986, Goszcz 1999, Cianciara 2000). Cracking of the rock mass preceding tremors is described by a number of hypotheses and theories (Brace 1960, Bieniawski 1967, Jaeger, Cook 1969, Nur 1975, Marcak 1995). These theories created bases for the elaboration of a measurement method for the non-homogeneity of the cracking processes (seismoacoustic process emission), which is fundamental for the evaluation of the tremor (rock-bursts) risk in the monitoring system.

It is natural to assume that the cracking of the rock mass has a stochastic form. This also refers to the evoked seismoacoustic emission created by it (Cianciara, 2000). Therefore, the statistical qualities of the discussed emission lay theoretical bases for the monitoring system. Statistical analysis of emissions is carried out solely on the basis of the time intervals between seismoacoustic effects. The analysis is based on the aforementioned dependence between the effect magnitude logarithms and time intervals between the events. In practice, without this dependence, it is not possible to fully identify the registered emission stream; in general, such an emission is described by models of non-homogeneous streams of events, the so-called Cox processes (Kowalenko, et al. 1989). In the homogeneous case, the emissions is described by a model depending only on the activity parameter λ . Non-homogeneous cases, modelled by the Cox processes, are described by at least two parameters, but remaining closely related to the activity and magnitude of the events. Statistical distributions describing the emission streams are estimated on the basis of time intervals between the effects registered in the seismoacoustic emission stream. On this basis, models of measures of rock-bursts or, to be more precise, tremor risk can be defined. Consequently, tremor-risk monitoring is carried out through the statistical analysis of recorded emissions. Hence, an estimation of statistical distributions is obtained in compliance with theoretical models. Then they are compared with parameters describing the state of the rock mass.

2. Theoretical bases of the monitoring system

Seismoacoustic emission registered in underground mines can be modelled in the form of a non-homogeneous stream of events, depending on two parameters (Cianciara, 2000). This stream is described by a random variable U representing time intervals between the events. Statistical distribution models of the random variable were heuristically described, using measurement data registered in various geological-mining conditions (Cianciara, 2000). Time intervals between successive events (u_k), are determined from the times (t_k) of the appearance

of the successive events, i.e. $u_k = t_k - t_{k-1}$, $t_k > t_{k-1}$, ($k = 0, \dots, N$). The non-homogeneity of the emission process is demonstrated by the varied magnitude of events caused by the time-changed state of stresses. Therefore, in the general (non-homogeneous) case, the seismoacoustic emission stream may be described by two random variables, representing time intervals between events U and the magnitude of events D . To compensate for the lack of direct information about the magnitude of events, a hypothesis was propounded that in the case of a seismoacoustic emission the random variables U and D are statistically correlated (Cianciara 2000):

$$\frac{u_k}{u_0} - 1 = \beta + \alpha \log \frac{d_k}{d_0} + \eta_k \quad (k = 1, 2, \dots) \quad (2.1)$$

Where: d_k – magnitude of events, u_k – time intervals between events, α, β – parameters, η_k – random numbers, u_0 and d_0 – reference values.

Seismoacoustic verification of this dependence is hindered because of basic problems in obtaining suitable comparative material. However, statistical analyses made on the material available show a relatively high value of correlation coefficient, thus adequately describing the discussed dependence.

2.1. Statistical description of seismoacoustic emissions

As already noted, dependence (2.1) creates theoretical bases for a full description of seismoacoustic emissions in the form of a non-homogeneous stream of events, using only a single random variable U . When the emission stream is non-homogeneous, the model describing the distribution function of random variable U can assume the following form (Cianciara 2000):

$$F(v) = \begin{cases} 1 - \exp[-b \cdot v^\gamma] & \text{for } v \geq 0 \\ 0 & \text{for } v < 0 \end{cases} \quad (2.2)$$

The density of probability distribution it is described by (Lehmann 1991):

$$f(v) = b \cdot \gamma \cdot v^{\gamma-1} \exp(-b \cdot v^\gamma) \quad \text{for } v \geq 0 \quad (2.3)$$

Where: $v = \frac{u}{u_0} - 1$, b and γ – distribution parameters, $b \geq 0$, $\gamma = 1 - e$, $0 \leq e < 1$.

The parameter γ is the so-called coefficient of *shape of distribution* (Cohen, 1965) and can be a measure of the non-homogeneity of the stream of events (Cianciara, 1999). When $e = 0$, then the distribution (2.3) describes the homogeneous case of emission, i.e. a simple Poisson stream of events (Cianciara, 2000). For $0 < e < 1$, the model (2.2), is a literature-known Weibull distribution (Lasocki, 1993). The parameters of this distribution can be estimated from a registered stream of emissions based on the highest reliability principle. In a general case, when the emission is a non-stationary process, its description should be referred to a specific time interval T , the so-called „information window”, assuming that the process is locally stationary during this interval. This makes the discussed stream locally identifiable in the window T . The notion „identification” denotes identification of elements of a set of events when detecting seismoacoustic events and estimation of distribution (2.2). As a result, the emission can be described in the window T , with the use of parameters b and γ , estimated on the basis of time intervals between the successive events. Shifting the discussed window T by a definite step Δ , and repeating the calculation process, we obtain a description of the emission stream as a function of time.

The calculation data can be collected from time windows T , or quantitative parameters N , the window T constitutes a period in which N events were registered. Note that the volume of data N was sufficiently high to provide adequate conditions for estimations. Practice shows that the number of data N should not be less than 30. Thus, time windows should be selected so as to provide a suitable number of events. Having assumed the equivalence of models describing the seismoacoustic emission and rock mass cracking, a description of the cracking processes also emerges.

2.2. Method of estimating the parameters of the statistical distribution of random variable U

As already mentioned in the introduction, the description of the seismoacoustic emission in a specific time interval T („information window”) can be made

through the identification of the statistical distribution. Such identification lies in the evaluation of parameters describing a model of the distribution function (2.2). Parameters (b, γ) are defined from time intervals between the successive events of the registered emission stream in a time window $T \{v_k\}$, $(k=1, \dots, N)$, based on the highest reliability principle.

This method lies in determining such values of the distribution parameters which give a maximum of the reliability function $L(b, \gamma)$. By assuming that individual v_k (measurement values) are random and independent of each another, the reliability function for the purposes of this paper will be defined as joint probability which will assume the following form (Lehmann, 1991):

$$\ln L(b, \gamma) = N \ln b + N \ln \gamma + (\gamma - 1) \sum_{k=1}^N \ln v_k - b \sum_{k=1}^N v_k^\gamma \quad (2.4)$$

Where: $\{v_k\}$, $(k=1, \dots, N)$ – values of random variable U .

On the basis of the reliability function (2.4), estimators of $\hat{b}, \hat{\gamma}$ parameters are defined. These parameters are selected so as to make the function $\ln L(b, \gamma)$ reach its maximum.

It follows from the mathematical analysis that the necessary condition for this maximum is attained at a zero gradient of logarithm of the function $\ln L(b, \gamma)$ with respect to the parameters b, γ .

In the example analysed, this leads to a system of non-linear equations:

$$\frac{N}{b} - \sum_{k=1}^N v_k^{\gamma-1} = 0 \quad \frac{N}{\gamma} + \sum_{k=1}^N \ln v_k - b \sum_{k=1}^N v_k^\gamma \ln v_k = 0 \quad (2.5)$$

The system can be solved using the following similarity:

$$d_l = \frac{\sum_{k=1}^N \frac{1}{v_k^{d_{l-1}}} \ln v_k}{\sum_{k=1}^N \frac{1}{v_k^{d_{l-1}}}} - c \quad (l=1, \dots, L) \quad (2.6)$$

Where: $c = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \ln v_k$, $\{v_k\}$, $(k=1, \dots, N)$ – series of measurement data, N – number of data, L – number of iterations.

The iteration process starts at d_0 . Calculations are carried out as long as the differences between the progressive steps are smaller than the decided accuracy δ , i.e.: $|d_{l-1} - d_l| < \delta$. Practice reveals that the recurrence process generally converges fairly rapidly. The estimators of statistical distribution parameters (2.2) assume the form:

$$\hat{b} = \frac{N}{\sum_{k=1}^N v_k^{\hat{\gamma}}}, \quad \hat{\gamma} = \frac{1}{d_L} \quad (2.7)$$

3. Description of a tremor-risk monitoring system

The presented monitoring system operates on the basis of a standard „ARES” seismoacoustic apparatus manufactured by EMAG Centre. This system can be easily adapted to co-ordinate operation with any other equipment meeting certain defined requirements. Times of registration of individual seismoacoustic signals are the input data, which must be registered continuously. Then the registered stream of emission is identified on the basis of this data, i.e. times of individual seismoacoustic effects are defined in a given window T (time interval), followed by an evaluation of the statistical distribution (2.2), describing the discussed stream (estimation of the parameters $\hat{b}, \hat{\gamma}$). It should be stressed that parameters are estimated only on the basis of time intervals between the successive events. However, to fully describe the seismoacoustic emission, it is also necessary to know the statistical distribution of the energy (magnitude) of events as in the majority of cases it forms a non-homogeneous stream. Such information can be obtained by assuming a statistical dependence (2.1) linking the pre-determined time intervals with the energy logarithm. As follows from the dependence (2.1), the anticipated value of the energy logarithm is proportional to the expected time intervals. Shifting the window T by a finite step Δ and repeating the calculation, a description of the emission stream as a function of time is obtained. Statistical models describing seismic emission and rock mass cracking are assumed to be equal (Cianciara, 1999). This means that the above-presented identification also refers to the process of rock-mass cracking.

The next step is to determine appropriate measures for estimating tremor risk. As already noted, models describing these measures are defined on the basis of the statistical distributions of times between the events. The interpretation of these measures conforms with geo-mechanical theories describing processes preceding the occurrence of tremors (Jaeger, Cook, 1969, Barton, 1972, Goszcz, 1999, Marczak, 1985). According to these theories, in the periods preceding tremors the cracks tend to increase their magnitude and the movements in the rock mass are arrested, resulting in drops of emission levels. These are represented by an increase of non-homogeneity of the emission process. The non-homogeneity degree is evaluated locally in a time window T , with the ascribed time equal to the moment of the right edge of the window. The magnitude of the window depends on the rate of geodynamic processes in the rock mass. It is established empirically. Its value ranges from hours to tens of hours. Shifting the selected window by a finite step Δ the progress of the homogeneity in time is obtained.

The measure describing the non-homogeneity can be described in the form of a predictable (magnitude) of events. As follows from the dependence (2.1), the expected value of the energy logarithm is proportional to the expected value of time intervals between these events. As a consequence, the measure of non-homogeneity of cracking processes can be expressed as expected time intervals between the events, i.e.:

$$W_t = \frac{1}{\hat{\gamma}} \Gamma\left(\frac{1}{\hat{\gamma}}\right) \hat{b}^{-\frac{1}{\hat{\gamma}}} \quad (3.1)$$

Where: $\hat{b}, \hat{\gamma}$ – parameters of statistical distribution of time intervals between events (2.2) estimated in a time interval $(t - T, t)$, $\Gamma(\bullet)$, Euler gamma-function.

The measure of non-homogeneity can also be defined as the parameter V_t describing reference of a specific emission process to the homogeneous (Poisson) process. This parameter can assume the form:

$$V_t = \hat{\lambda}_t \cdot W_t \quad (3.2)$$

Where: W_t – expected value of intervals (3.1), $\hat{\lambda}_t$ – activity of emission, determined in the time interval $(t - T, t)$.

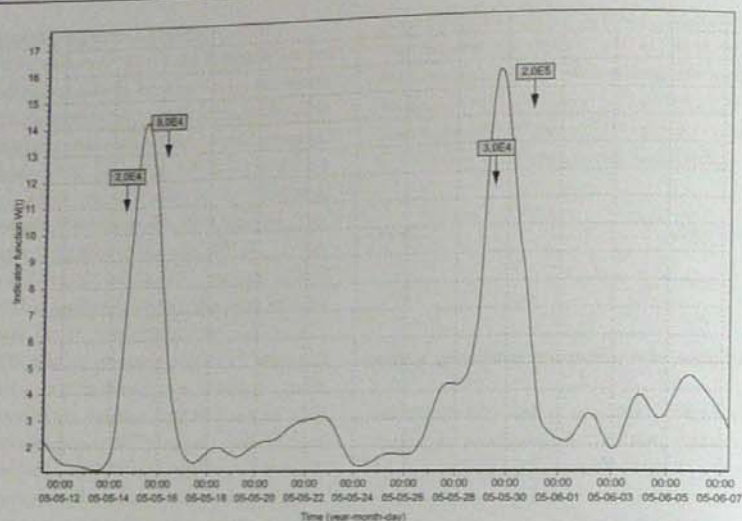


Fig. 1. Plot of index function W of tremor risk monitoring system in the „BIELSZOWICE” coal mine.

Rys. 1. Wykres obrazujący przebieg funkcji wskaźnikowej W , systemu monitorowania zagrożenia wystąpieniem wstrząsów w KWK „BIELSZOWICE”.

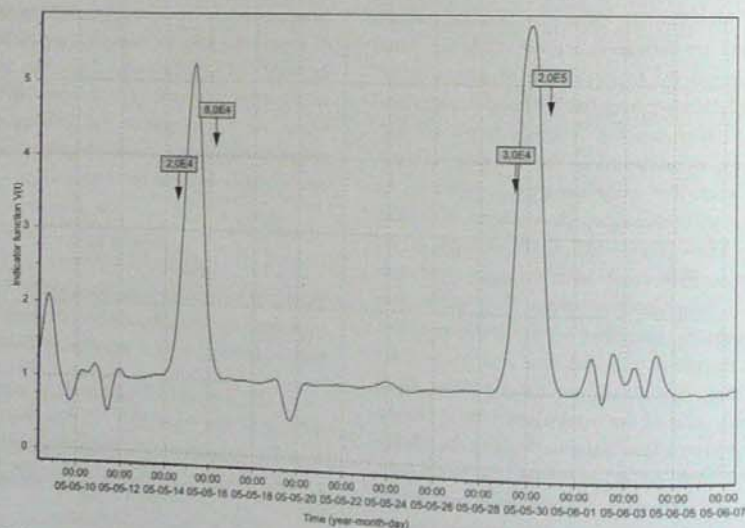


Fig. 2. Plot of index function V of tremor risk monitoring system in the „BIELSZOWICE” coal mine.

Rys. 2. Wykres obrazujący przebieg funkcji wskaźnikowej V , systemu monitorowania zagrożenia wystąpieniem wstrząsów w KWK „BIELSZOWICE”.

The measures of non-homogeneity of seismoacoustic emission activity represent the state of tremor risk and are treated as index functions in the monitoring system. The tremor risk is assessed on the basis of the progress of these functions. The evaluation criteria should be empirically elaborated for each region because the discussed risk depends significantly on local conditions in the workings. Figures (1) and (2) show the plots of index functions estimated on the basis of emission registered in the „Bielszowice” coal mine.

4. Conclusions

In the paper the concept of tremor-risk monitoring is discussed. It is based on parameters of the rock mass cracking processes using statistical analysis methods (seismic risk). Seismoacoustic emission is known as a basic method to mirror the cracking processes, the continuity of registration of emissions is provided by seismoacoustic systems used in underground mining, e.g. „ARES” or „ARAMIS-A” systems (Isakow, Cianciara, 2000). The statistical distribution describing the seismoacoustic emission is assumed also to describe rock mass cracking. This also refers to both discussed processes, among others their non-homogeneity level. On the other hand, the seismoacoustic emission or cracking processes can be modelled as streams of events. The theory of stochastic processes (Kowalenko et al. 1989) reveals that changes of non-homogeneity are related with trends in the magnitude of events (effects). This obviously has a geomechanical interpretation, according to which in the periods preceding tremor-occurrence the stress values increase; this in turn makes the cracking more extensive – an increase of the cracking process. Two models for measuring the non-homogeneity are considered for the discussed monitoring method. These measures are estimated from seismoacoustic emissions registered in the time interval $(t-T, t)$, i.e. the so-called information window, with the local stationarity assumed. Shifting window T by step Δ , the course of discussed measures in time is obtained. They are treated as index functions in the monitoring system. Values of these functions, determined for the time preceding the tremor occurrence

may form a chronology of the process describing the development of tremor risk and constitute a basis for predictive models. Taking into consideration geodynamic models, describing the development of rock mass cracking before the tremor incidence (Jaeger, Cook, 1969), it is possible to work out precise criteria for estimation or even prediction of tremor risk. In practice, there are two typical behaviours of the discussed function in time preceding tremors incidence, i.e. tremor occurs in the moment when index functions are close to maximum, or when an increase followed by a drop of its value to a specific value takes place. Two basic models of geodynamic processes describing the cracking-tremor processes correspond to the courses of index functions (Marcak, 1985). An exemplary illustration of the monitoring results is presented in Figures (1) and (2). Calculations were made on the basis of data registered in the „Bielszowice” coal mine with the use of an ARAMIS-A measurement system with sensors placed in boreholes 10 m long on the top rocks of the working. Plots of index functions with indicated moments of tremor occurrences and their energy are annotated. The discussed prediction methods, based on the analysis of index functions, have a qualitative character. To obtain quantitative evaluations it is necessary to elaborate criteria of risk prediction, corresponding to specific geological-mining conditions. It should be stressed that the efficiency of monitoring strongly depends on measurement emission continuity. The measured emission also contain disturbances that are not related to rock mass cracking, and are generated electrically or mechanically. Therefore it is crucial to apply appropriate ways to eliminate their influence. Most of the disturbances can be eliminated at the stage of estimation of parameters, as their statistical distributions significantly vary from the distribution of the cracking process (as described with the model (2.2)). Additionally, statistics of maximum values and special filtration methods are used for the elimination of disturbances.

Part of a statutory research program of the Department of Informatics Geosciences Faculty of Geology, Geophysics and Environmental Protection, AGH-UST nr 11.11.140.144.

References

- Barton N. R., 1972: *A model study of rock-joint deformation*, Int. Journ. Rock Mech. Min. Sci., No. 9 p. 579-602.
- Bieniawski Z. T., 1967: *Mechanism of brittle fractures of rock*, Int. J. Rock, Mech. Min. Sci., Z. 4.
- Brace W. F., 1960: *An extension of Griffith theory of fracture to rocks*, Journ. Geoph. Res., Vol. 65, No. 10.
- Cianciara A., 2000: *System monitorowania zagrożenia wystąpieniem silnych wstrząsów w oparciu o analizę emisji sejsmoakustycznych*. [System of Monitoring Strong Tremor Occurrences on the Basis of Analysis of Seismo-acoustic Emissions]. The doctor's dissertation, Library of AGH Kraków.
- Cianciara A., Cianciara B., Takuska-Węgrzyn E. 2004: *A method of evaluating the threat of tremors on the basis of an analysis of the degree of non-homogeneity of the seismoacoustic emission process*, Archives of Mining Sciences, Vol. 49, 1 3, s. 405-416.
- Cianciara B., 1999: *Emisja sejsmiczna jako nośnik informacji o rozwoju procesu pęknięcia górotworu*. [Seismic emission as a carrier of information on the development of the rock-mass fracturing process], Geoinformatica Polonica, 1, Kraków.
- Cohen A. C., 1965: *Maximum likelihood estimation in the Weibull distribution based on complete and on censored samples*, Technometrics 7, 579-588.
- Goszcz A., 1999: *Elementy mechaniki skal oraz tapania w polskich kopalniach węgla i miedzi*. [Elements of geomechanics and rock-bursts in polish coal and copper mines], PAN IGSMiE Kraków (in Polish).
- Isakow Z. Cianciara B. 2000: *Effects of EMAG Centrum for the assesment of rock burst risks and control of the influence of underground exploitation on the mining areal surfaces*, Mechanizacja i Automatyzacja Górnictwa. Nr 9-10 (358) Katowice (in Polish).
- Jaeger C., Cook N. G. W. 1969: *Fundamentals of rock mechanics*. London Chapman and Hall.
- Kowalenko I. N., Kuzniecowa N. J., Szurienkow W. M.: 1989, *Procesy stochastyczne. Poradnik*. [Stochastic processes. Handbook], PWN Warszawa.
- Kwaśniewski M., 1986: *Dylatacja jako zjawisko zniszczenia skal. Cz. 1. Fizyczna istota zjawiska dylatacji*. [Dilatancy as a phenomenon of rock destruction. Part 1. Physical meaning of dilatancy phenomenon], Przegląd Górniczy, nr 2, s. 42-49.
- Lasocki S., 1993: *Weibull distribution as a model for a sequence of seismic events induced by mining*, Acta Geophys. Pol. 41, No. 2.
- Lehmann, E. L., 1991: *Theory of point estimation*, Warszawa PWN (in Polish).
- Marcak H., 1985: *Geofizyczne modele rozwoju procesu niszczenia górotworu poprzedzające tąpnięcia i wstrząsy w kopalniach*. [Geophysical models of the destruction process in rock-masses preceding rock-bursts and tremors in underground Mines], Pubs. Inst. Geophys. Pol. Ac. Sc. M-6 (176), s. 317-332.
- Marcak H., 1995: *Geophysical models of rock-mass destruction preceding rock-bursts and shocks in underground mines*, Pubs. Inst. Geophys., M-6 (176).
- Nur A., 1975: *A Note of the constitutive law for dilatancy*, Pageoph. Vol. 113.

Streszczenie

W pracy tej przedstawiono jedną z wielu możliwych koncepcji sposobu monitorowania zagrożenia wystąpieniem wstrząsów. Sposób ten oparty jest na badaniu własności procesów pęknięcia górotworu metodą analizy statystycznej (hazardu sejsmicznego). Jak wiadomo emisja sejsmoakustyczna stanowi naturalne odwzorowanie procesów pęknięcia. Z kolei ciągłą rejestrację emisji zapewniają systemy sejsmoakustyczne stosowane w górnictwie podziemnym, np. systemy „ARES” lub „ARAMIS-A” (Isakow, Cianciara, 2000). Przyjmuje się, że rozkład statystyczny opisujący strumień emisji sejsmoakustycznej opisuje jednocześnie pęknięcie górotworu. Odnosi się to również do własności statystycznych obydwu omawianych procesów, między innymi do ich stopnia niejednorodności. Z kolei, emisja sejsmoakustyczna, czy też procesy pęknięcia mogą być modelowane w formie strumienia zdarzeń. Jak wynika z teorii procesów stochastycznych (Kowalenko et al. 1989), zmiany stopnia niejednorodności związane są z występowaniem tendencji w rozmiarach zdarzeń (zjawisk). Ma to oczywiście interpretację geomechaniczną, zgodnie z którą w okresach przed wystąpieniem wstrząsów muszą mieć miejsce wzrosty stanu naprężeń, powoduje to wzrost rozmiarów pęknięć, a w konsekwencji wzrost stopnia niejednorodności procesu pęknięcia. W omawianym sposobie monitorowania rozważane są dwa, przedstawione wyżej, modele miary stopnia niejednorodności. Miary te estymowane są na podstawie emisji sejsmoakustycznej rejestrowanej w przedziale czasu $(t-T, t)$ tzw. oknie informacyjnym, zakładając w nim jej lokalną stacjonarność. Przesuwając okno T z krokiem Δt uzyskamy przebieg omawianych miar w czasie. Są one traktowane w systemie monitorowania jako funkcje wskaźnikowe. Wartości tych funkcji, wyznaczone dla momentów czasu poprzedzających wystąpienie wstrząsu, mogą tworzyć historię procesu opisującego rozwój zagrożenia i stanowić podstawę do budowy modeli predykcyjnych. Dołączając do tego modele geodynamiczne, opisujące rozwój pęknięcia górotworu przed wystąpieniem wstrząsu (Jaeger, Cook, 1969), istnieje możliwość opracowania precyzyjnych kryteriów oceny zagrożenia, a nawet predykcji czasu wystąpienia wstrząsu. W praktyce można zaobser-

wować dwa typowe zachowania się przebiegów omawianych funkcji w czasie poprzedzającym momenty wystąpienia wstrząsów, a mianowicie: wstrząs występuje w momencie, gdy funkcje wskaźnikowe osiągną wartości bliskie maksimum, lub następuje jej wzrost a następnie spadek do określonego poziomu. Przebiegom funkcji wskaźnikowych odpowiadają dwa podstawowe modele procesów geodynamicznych opisujące przebiegi pęknięcia prowadzące do wstrząsów (Marcak, 1985). Przykładową ilustrację wyników monitorowania przedstawiono na rysunkach (1) oraz (2). Obliczenia prowadzono na podstawie danych zarejestrowanych w KWK „Bielszowice” za pomocą systemu pomiarowego „ARAMIS-A”. Czujniki były zamocowane w skałach stropowych chodnika w otworach o długości 10 m. Na rysunkach tych wykreślono przebiegi funkcji wskaźnikowych, oraz zaznaczono momenty wystąpienia wstrząsów z zaznaczoną ich energią. Omawiane tutaj sposoby predykcji, oparte na analizie funkcji wskaźnikowych, mają charakter jakościowy. Dla uzyskania ocen ilościowych konieczne jest opracowanie kryteriów oceny zagrożenia odpowiadających określonym warunkom monitorowania. Należy nadmienić, że czynnikami mającymi istotny wpływ na efektywność monitorowania są zakłócenia procesu emisji sejsmoakustycznej. Zakłócenia te stanowią zjawiska nie związane z pękaniem górotworu, a wytwarzane na drodze elektrycznej lub oddziaływania mechanicznego. Dlatego niezwykle ważnym zagadnieniem jest zastosowanie właściwych sposobów ich eliminacji. Jednak jest możliwa znaczna eliminacja zakłóceń już na poziomie estymacji parametrów, ponieważ ich rozkłady statystyczne różnią się istotnie od rozkładu procesów pęknięcia (opisywanych modelem (2.2)). Dodatkowo, w omawianym systemie monitorowania do eliminacji zakłóceń zastosowano statystyki wartości maksymalnych, oraz specjalne sposoby filtracji.

TOMASZ DANEK¹

OBLICZENIA RÓWNOLEGLE I KLASTRY PC W MODELOWANIU SEJSMICZNEGO POŁA FALOWEGO

Słowa kluczowe:

obliczenia równoległe, klastry PC, sejsmika

Abstrakt

Jednym z zagadnień obliczeniowych, których efektywne wykorzystanie przekracza możliwości nawet najnowocześniejszych komputerów jednoprocessorowych, jest modelowanie sejsmicznych pól falowych w złożonych ośrodkach geologicznych. Ograniczenia związane z pamięcią i taktowaniem procesorów powodują, że niezbędne staje się wykorzystanie obliczeń równoległych. Do niedawna jedyną możliwością zastosowania tego rodzaju technologii stwarzały niezwykle kosztowne superkomputery. Jednak wraz z rozwojem szybkich sieci komputerowych pojawiła się możliwość łączenia tanich maszyn typu PC w wydajne i efektywne klastry.

PARALLEL COMPUTING AND PC CLUSTERS IN SEISMIC WAVE FIELD MODELING

Key words:

parallel computing, PC clusters, seismic

Abstract

Seismic wave field modeling in complex geological media is one of the problems which are very difficult even for modern one processor computers. Limitations of memory and processor resources force us to use parallel computing methods. In the past only expensive supercomputers were able to provide enough computational power. Fortunately, recent achievements in network technology made cheap PC clusters as effective as expensive multi-processor machines.

¹ Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Geologii, Geofizyki i Ochrony Środowiska, Zakład Informatyki w Naukach o Ziemi, Kraków.

Wstęp

W ostatnich latach obserwuje się ogromny wzrost zapotrzebowania na moce obliczeniowe w wielu dziedzinach związanych z zastosowaniem komputerów. O ile jeszcze kilka lat temu postęp w rozwoju technologii produkcji krzemowych układów scalonych nadążał za kolejnymi problemami numerycznymi, o tyle teraz jedynym sposobem sprostania wyzwaniom współczesnych problemów obliczeniowych jest zastosowanie obliczeń równoległych. Jednym z problemów, który jeszcze niedawno stał na drodze rozwoju tej technologii były ogromne ceny maszyn wieloprocesorowych. Dodatkowo komputery tego typu cechuje stosunkowo wysoka awaryjność i wysokie koszty serwisu, związane z krótkimi seriami produkcyjnymi superkomputerów. Alternatywnym rozwiązaniem jest zastosowanie do obliczeń wielu zwykłych komputerów typu PC i zapewnienie komunikacji pomiędzy nimi poprzez podłączenie ich do możliwie wydajnej sieci. Nowoczesne rozwiązania sprzętowe i informatyczne powodują, iż klastry PC nie odbiegają wydajnością od superkomputerów. Jednocześnie są one wielokrotnie tańsze i łatwiejsze w obsłudze, co jest szczególnie ważne w złożonych i czasochłonnych obliczeniach o charakterze naukowym, takich jak na przykład modelowanie pełnego sejsmicznego pola falowego. Modelowania takie stanowią niezwykle istotną pomoc na wszystkich etapach badań sejsmicznych poczynając od projektowania akwizycji, poprzez processing, aż do interpretacji. Niestety ich ogromna czasochłonność powodowała, że jeszcze do niedawna nie znajdowały szerszego zastosowania. W ostatnich latach właśnie użycie klastrów PC pozwoliło uczynić modelowanie pełnych pól falowych narzędziem stosowanym w praktyce.

Klastry PC

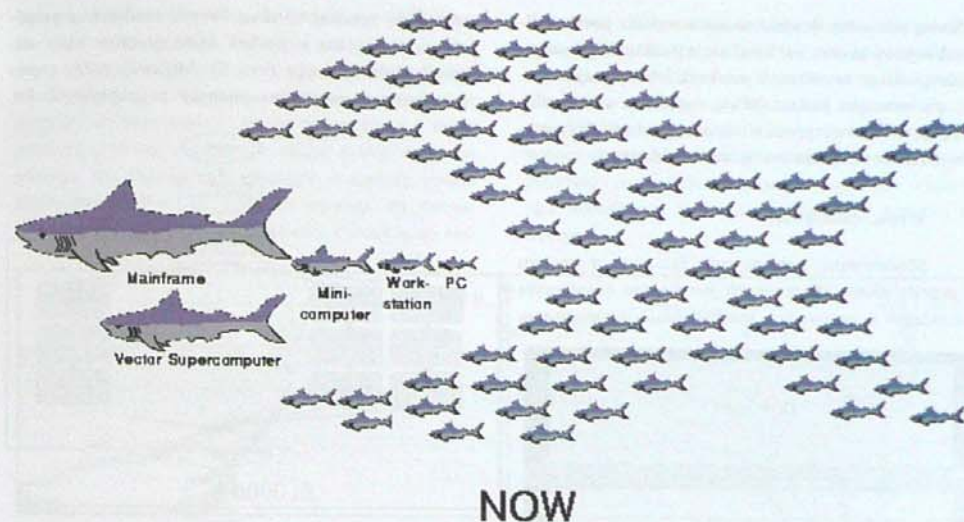
Idee klastrów PC doskonale obrazuje logo projektu NOW (Network of Workstations) realizowanego na uniwersytecie w Berkeley (rys. 1). Odpowiednio połączona sieć komputerowa i dobrze skonfigurowana duża liczba komputerów osobistych może swobodnie dorównać zasobami obliczeniowymi nawet naj-

wiejszym superkomputerom. Jednocześnie rozwiązania takie są wielokrotnie tańsze zarówno na etapie zakupu sprzętu, jak i jego eksploatacji i serwisowania. Oczywiście, konieczność komunikacji między poszczególnymi węzłami klastra ogranicza jego możliwości, ale przy obecnej przepustowości sieci komputerowej, a także przy zastosowaniu odpowiednich algorytmów nie stanowi to istotnego problemu.

Klastry PC mogą być konstruowane na bardzo wiele sposobów, co czyni to rozwiązanie niezwykle elastycznym (rys. 2). W przypadku naprawdę ogromnej liczby węzłów sięgającej setek czy tysięcy, najczęściej stosuje się klastry złożone z jednostek obliczeniowych zamontowanych w szafach. Dla mniejszej liczby komputerów bardziej opłacalne jest wykorzystanie zwykłych komputerów pochodzących na przykład z akademickich laboratoriów komputerowych, czy wręcz osobistych komputerów stojących na biurkach pracowników uczelni czy firmy. Rozwiązaniem pośrednim jest zestawienie komputerów typu PC, ale pozbawionych wszystkich poza kartą sieciową urządzeń wejścia i wyjścia, na specjalnych regałach.

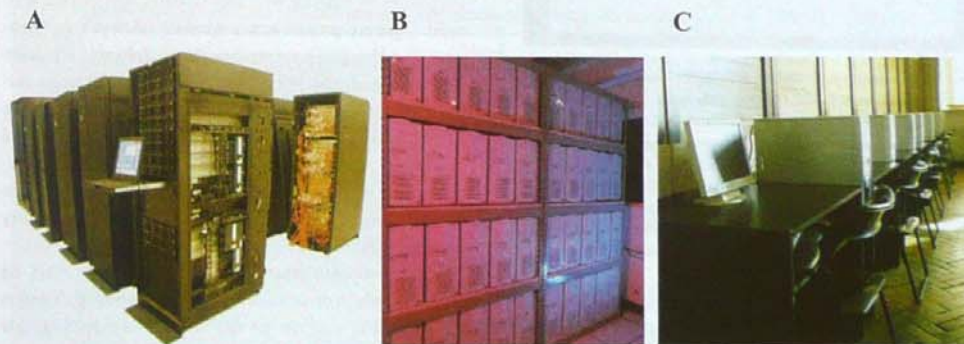
Równoległość obliczeń

W przypadku ogólnym równoległość obliczeń może być realizowana poprzez dekompozycję algorytmu bądź poprzez dekompozycję danych (Karniadakis & Kirby 2003). W pierwszym przypadku różne komputery klastra realizują różne elementy całego procesu obliczeniowego. W drugim przypadku wszystkie komputery należące do klastra prowadzą obliczenia według tego samego algorytmu, ale dla różnych danych wejściowych. W przypadku modelowań sejsmicznych, realizowanych na bazie metody różnic skończonych, najlepiej jest wykorzystywać drugi wariant. Obliczenia mogą być wtedy prowadzone dla pojedynczego punktu strzałowego na wszystkich komputerach, przy równomiernym podziale siatki obliczeniowej pomiędzy wszystkie maszyny klastra. Podział taki nazywa się dekompozycją domenową (rys. 3). Alternatywnym rozwiązaniem może być prowadzenie modelowań dla różnych punktów strzałowych na różnych komputerach (rys. 4). Oznacza to, że jedną



Rys. 1. Logo projektu NOW.

Fig. 1. Project NOW logo.



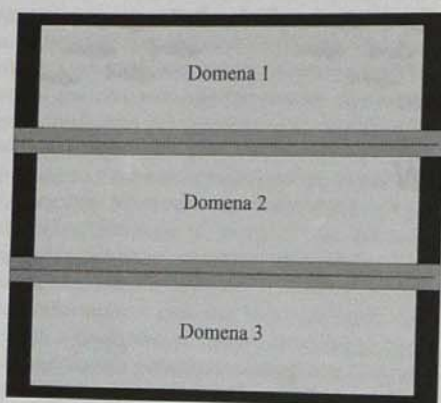
Rys. 2. Różne typy klastrów PC: A – Klaster Linuxowy CLX – centrum komputerowe CINECA – Bolonia; B – Klaster Avalon – Los Alamos National Laboratory; C – Laboratorium komputerowe 229 – Wydział Geologii, Geofizyki i Ochrony Środowiska AGH.

Fig. 2. Different types of PC clusters: A – Linux cluster CLX – CINECA computer center – Bologna IT; B – Cluster Avalon – Los Alamos National Laboratory; C – Computer laboratory 229 – Faculty of Geology, Geophysics and Environmental Protection UCT-AGH.

różnicą pomiędzy danymi wejściowymi dla poszczególnych węzłów klastra jest lokalizacja punktu strzałowego. Zaletą takiego rozwiązania jest brak intensywnej komunikacji wewnątrz klastra. Wadą – niepełne wykorzystanie jego mocy w przypadku niepodzielności liczby punktów strzałowych przez liczbę węzłów klastra.

Wyniki modelowań

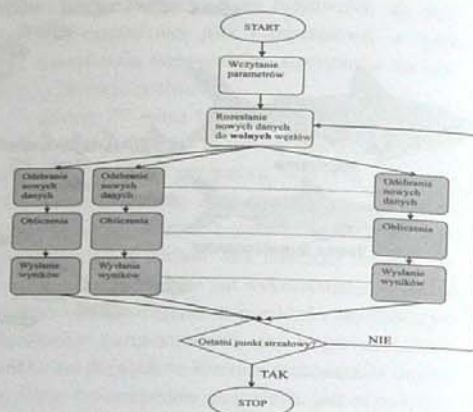
Modelowanie pełnego pola falowego w oparciu o metodę różnic skończonych jest bardzo użytecznym narzędziem o ogromnych możliwościach zastosowania



Rys. 3. Dekompozycja domenowa. Kolor jasno szary oznacza części siatki, dla których obliczenia realizowane są na różnych komputerach (domeny), a kolor ciemno szary oznacza strefy wymiany informacji pomiędzy domenami. Na czarno zaznaczono obszary warunków brzegowych.
Fig. 3. Domain decomposition. Light gray color pointed part of grid distributed to different computers (domains). Grid points which have to be exchanged are in dark gray color. Area for border conditions are in black.

na wszystkich etapach badań sejsmicznych (Alford et al. 1974, Kelly et al. 1976, Villareal & Scales 1997 i inni). Niestety metoda ta ma ogromne wymagania co do mocy obliczeniowej i dostępnej pamięci. W zamian za to oferuje możliwość dokładnego śledzenia wszystkich aspektów propagacji fali przez ośrodki skalne, a co za tym idzie daje możliwość identyfikacji zjawisk, których rozpoznanie jedynie na podstawie polowych rejestracji byłoby

trudne czy wręcz niemożliwe. Wyniki modelowań przedstawia się zwykle w postaci sejsmogramów bądź migawek pola falowego (rys. 5). Migawki pola, często przedstawiane w postaci animacji propagujących fal,



Rys. 4. Schemat blokowy dekompozycji jeden PC – jeden punkt strzałowy. Kolor szary oznacza węzły robocze a kolor biały węzeł zarządzający klastrem komputerów PC.

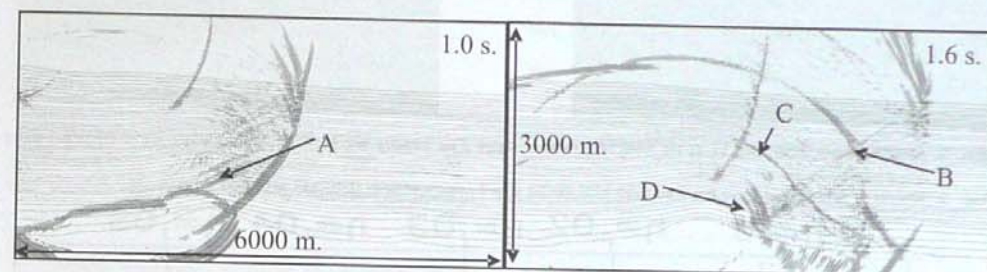
Fig. 4. Block scheme of homogeneous decomposition. Gray fields denote slave nodes while white denote master node.

pozwalają w bardzo wygodny sposób wychwycić moment i genezę powstawania zjawisk falowych rejestrowanych później na powierzchni Ziemi. Zebranie wyników w postaci kolekcji wspólnego punktu strzałowego pozwala natomiast na obserwowanie wyników w formie bardzo podobnej do polowych rejestracji, co może być bardzo przydatne na etapie planowania zdjęcia sejsmicznego, a także może stanowić źródło danych dla dalszego przetwarzania i interpretacji sekcji po składaniu czy migracji (rys. 6).

W ostatnich latach coraz popularniejsze stają się modelowania w ośrodkach anizotropowych (np. Yang et al. 2002). Ze względu na ich większe skomplikowanie obliczeniowe, a także ogromne zapotrzebowanie na pamięć, konieczne staje się nie tylko stosowanie rozwiązań sprzętowych (w tym wypadku klastrów będących źródłem mocy obliczeniowej i pamięci), ale także algorytmów pozwalających na ograniczenie czasu obliczeń, na przykład poprzez redukcję rozmiarów siatki obliczeniowej.

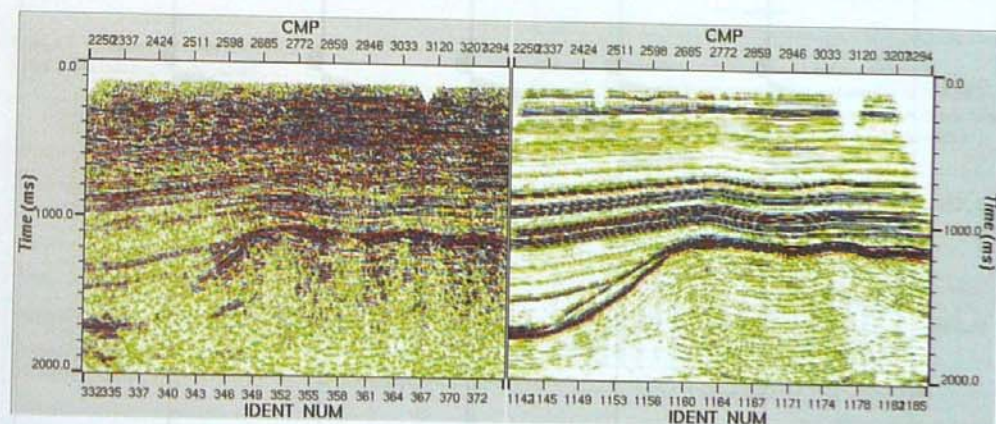
Jednym z takich rozwiązań jest algorytm FCT (*flux corrected transport*) (Fei & Lerner 1993). Efekty działania tego algorytmu przedstawiono na rysunku 7. Jak widać algorytm ten w znacznym stopniu usuwa efekt dyspersji na zbyt rzadkiej siatce obliczeniowej a także pozwala uniknąć uciążliwego efektu rotacji fazy, typowego dla modelowań opartych o metodę różnic skończonych (rys. 8). Niestety wymaga on dobrania odpowiedniej wartości parametru dyfuzji η , co nie-

stety musi odbywać się metodą prób i błędów. Ponadto algorytm ten na jednym z etapów realizacji wymaga przeskanowania danych w poszukiwaniu obszarów, w których należy zadać odpowiednią poprawkę. Powoduje to dodatkowe komplikacje wpływające szczególnie na efektywność dekompozycji domenowej, szczególnie wrażliwej na operacje wymagające dodatkowej komunikacji pomiędzy węzłami roboczymi.



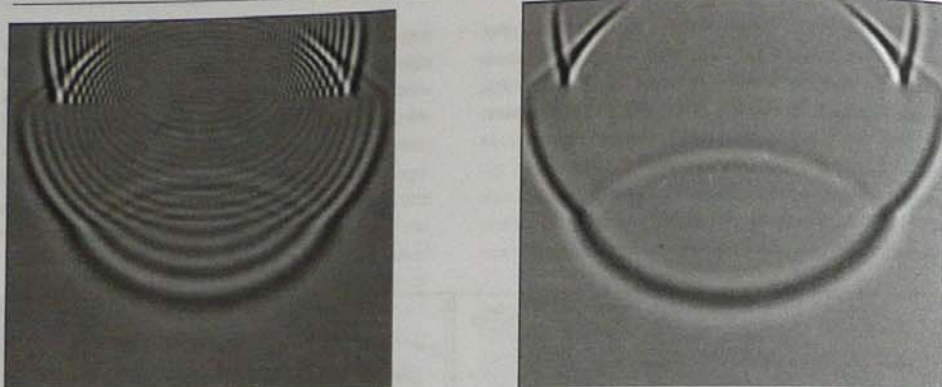
Rys. 5. Obrazy pola falowego. A – fale przemiennie przechodzące; B – fala podłużna odbita; C – fala przemienna odbita od podłoża; D – fale przechodzące A odbite od podłoża.

Fig. 5. Wave field snapshots. A – transmitted converted waves; B – reflected P wave; C – reflected converted wave; D – transmitted waves A reflected from basement.



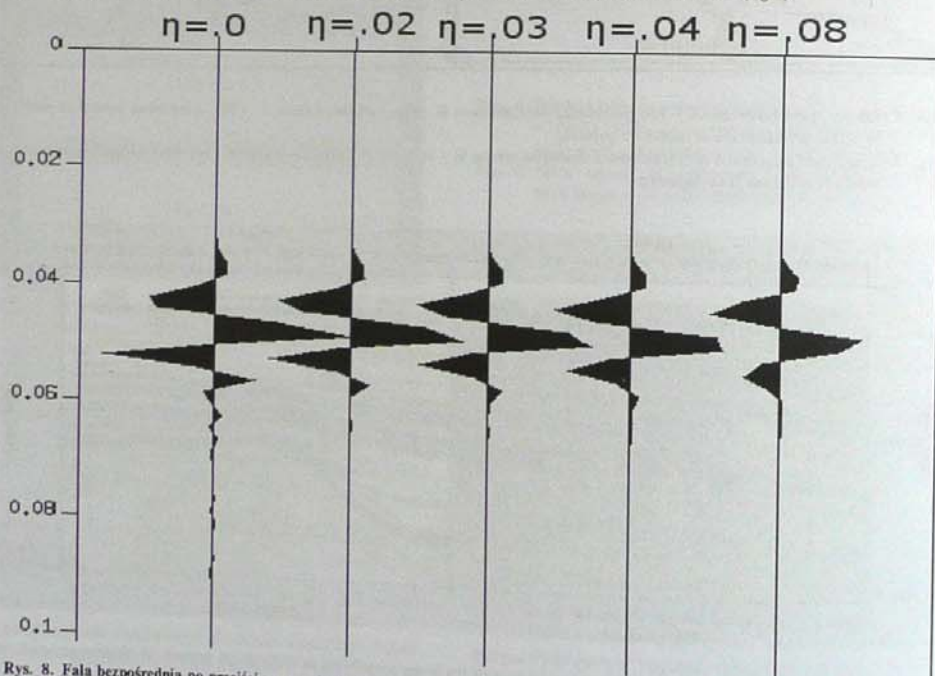
Rys. 6. Porównanie wyników rzeczywistych badań sejsmicznych (po lewej) z wynikami modelowań (po prawej). W obydwu przypadkach zastosowano te same procedury przetwarzania.

Fig. 6. Comparison between real (left) and modeled seismic section (right). In both cases the same processing procedures were used.



Rys. 7. Efekt działania algorytmu FCT. Po lewej obliczenia w siatce 2 na 2 metry bez FCT. Po prawej obliczenia w tej samej siatce z zastosowaniem FCT i $\eta=0,4$.

Fig. 7. Results of modeling in three layer medium with spatial step 2 meters without (left) and with FCT (right).



Rys. 8. Fala bezpośrednia po przejściu przez siatkę obliczeniową dla różnych wartości parametru η . Dla $\eta=0$ widać silną rotację fazy, podczas gdy dla $\eta=0,3$ efekt całkowicie zanika.

Fig. 8. Phase rotation effect for different values of FCT parameter. For $\eta=0$ phase rotation is strong, whereas for $\eta=0.3$ this effect is removed.

Ocena wydajności

W ocenie wydajności rozwiązań zarówno od strony sprzętowej, jak i programowej najważniejszym parametrem jest czas obliczeń T . Dodatkowo na bazie uzyskanych czasów można zdefiniować dodatkowe parametry takie jak przyspieszenie i efektywność. Są one opisane następującymi wzorami:

$$S(P) = \frac{T(1)}{T(P)}$$

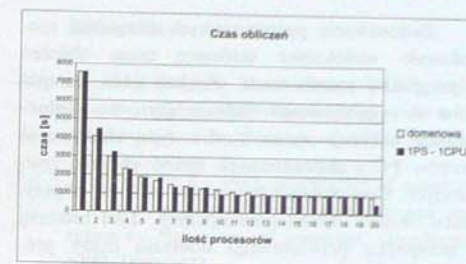
$$e(P) = \frac{T(1)}{P \cdot T(P)}$$

gdzie P oznacza liczbę procesorów, $T(P)$ czas obliczeń na P procesorach a $T(1)$ czas obliczeń na jednym procesorze.

Oceny wydajności klastrów PC w modelowaniu sejsmicznych pól falowych dokonano dla przypadku prostego, dwuwarstwowego modelu ośrodka geologicznego i dwudziestu punktów strzałowych. Szczegółowo parametry obliczeniowe zostały przedstawione w tabeli 1.

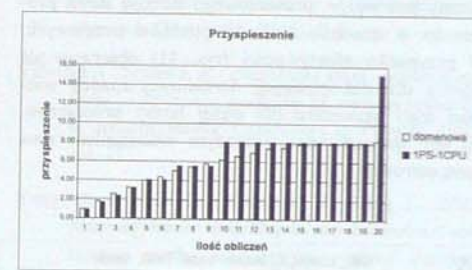
Tabela 1. Parametry modelu testowego
Table 1. Parameters of the model

Parametry	Wartości
Wymiary ośrodka [m]	500 × 500
Krok obliczeń (odległość między kolejnymi węzłami siatki) [m]	1
Głębokość granicy odbijającej [m]	250
Prędkość fali w nadkładzie v_1 [m/s]	1000
Prędkość fali w warstwie dolnej v_2 [m/s]	2000
Współrzędne pierwszego punktu strzałowego [m]	$X=200$, $z=20$
Odległości między punktami strzałowymi [m]	10
Ilość punktów strzałowych	20
Czas końcowy [s]	0,5
Krok próbkowania [s]	0,002



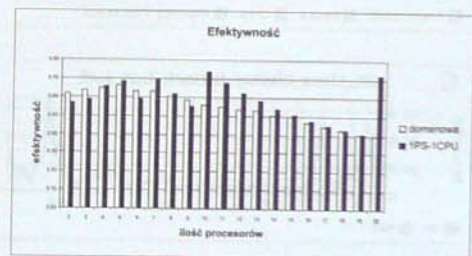
Rys. 9. Czas obliczeń dla modelu z tabeli 1 w zależności od ilości procesorów.

Fig. 9. Relation between time of computations and number of computers. White bars represent domain decomposition; black bars represent one PC – one shoot point decomposition.



Rys. 10. Zależność przyspieszenia od ilości procesorów.

Fig. 10. Relation between acceleration and number of computers. White bars represent domain decomposition; black bars represent one PC – one shoot point decomposition.



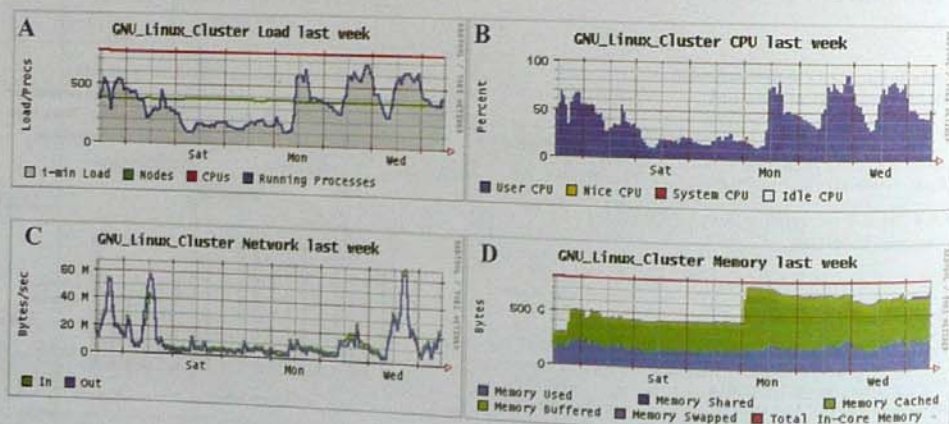
Rys. 11. Efektywności wykorzystania procesorów pojedynczych maszyn w zależności od ilości węzłów klastra.

Fig. 11. Relation between effectivity and number of computers. White bars represent domain decomposition; black bars represent one PC – one shoot point decomposition.

Zastosowanie proponowanych rozwiązań spowodowało wielokrotne skrócenie czasu obliczeń w przypadku zastosowania większej ilości komputerów do pojedynczego zadania (rys. 9.). Jednocześnie wskazuje to na bardzo dużą efektywność klastrów PC i zastosowanych metod obliczeń równoległych. Czas obliczeń jest bardzo zbliżony w przypadku obydwu metod dekompozycji. Tym niemniej w przypadku prawidłowego dobrania liczby procesorów do liczby punktów strzałowych, efekty dekompozycji jeden PS – jeden PC są wyraźnie lepsze (przypadek 20 punktów strzałowych obliczanych na 20 procesorach). Do podobnych wniosków prowadzi analiza wykresu zależności przyspieszenia od ilości procesorów (rys. 10), tutaj jednak wyraźniej widoczny jest wpływ prawidłowego doboru ilości procesorów w stosunku do ilości punktów strzałowych. W przypadku efektywności (rys. 11) obserwuje się typowy dla dekompozycji domenowej spadek wartości tego parametru dla dużej liczby procesorów, co jest spowodowane rosnącym obciążeniem sieci komputerowej.

Kontrola klastra

Praktyczne zastosowanie klastrów PC do intensywnych obliczeń numerycznych, takich jak na przykład opisane powyżej modelowania, poza odpowiednim kolejkowaniem zadań użytkowników i przydzielaniem im odpowiednich zasobów, wymaga stałej kontroli wielu komputerów PC. Z reguły dokonuje się tego poprzez specjalne procesy działające na wszystkich maszynach i dostarczające informacji do zbiorczej bazy danych. Jednym z najpopularniejszych rozwiązań tego typu jest Ganglia Cluster Monitoring Toolkit, będący zestawem narzędzi pozwalającym na spojrzenie na system zarówno od strony pojedynczych komputerów, jak również w sposób całościowy. Pozwala to na bardzo szybkie wychycenie problemów związanych ze sprzętem komputerowym, siecią, oprogramowaniem kolejującym i poszczególnymi procesami uruchomionymi przez użytkowników. Przykładowe wykresy stanu klastra wygenerowane przez Ganglię dla klastra CLX z centrum obliczeniowego CINECA w Bolonii przedstawiono na rysunku 12.



Rys. 12. Wykresy przedstawiające stan klastra w ciągu tygodnia. A – obciążenie klastra na tle ilości dostępnych procesorów i ilości węzłów; B – wykorzystanie wszystkich procesorów w zależności od typu procesorów. Widać wyraźnie, że większość obciążenia pochodzi od procesorów użytkowników; C – obciążenie sieci; D – zużycie pamięci.

Fig. 12. Cluster condition during one week time. A – load, number of processors and nodes; B – CPU utilization by different type of processes; C – network report; D – memory report.

Wnioski

Przeprowadzone dotychczas prace, a w szczególności liczne eksperymenty numeryczne oraz realizowane coraz częściej modelowania dla potrzeb przemysłowych i naukowych, skłaniają do wyciągnięcia następujących wniosków:

- Klastry PC stanowią wydajną i ekonomiczną alternatywę dla superkomputerów.
- Zastosowanie klastrów PC w modelowaniu pełnych obrazów falowych pozwoliło uczynić tę metodę praktycznym narzędziem w badaniach sejsmicznych.
- Pełne wykorzystanie mocy obliczeniowej klastra nie jest możliwe bez szczegółowej analizy zastosowanych rozwiązań sprzętowych i programistycznych.

Bibliografia

- Alford R. M., Kelly K. R., & Boore D. M., 1974, *Accuracy of finite-difference modeling of the acoustic wave equation*, Geophysics, 39(6), 834–842.
- Fei T., and Lerner K., 1993, *Elimination of numerical dispersion in finite-difference modeling and migration by flux-corrected transport*, Geophysics, 60(6), 1830–1842.
- Karniadakis G. E., Kirby R. M., 2003, *Parallel scientific computing in C++ and MPI*, Cambridge University Press, pp. 696.
- Kelly K. R., Ward R. W., Treitel S., Alford R. M. 1976, *Synthetic seismograms: A finite-difference approach*, Geophysics, 41(1), 2–27.
- Villareal A., Scales J. A.: *Distributed three – dimensional finite – difference modeling of wave propagation in acoustic media*, Computers in Physics, 1997, vol. 11.
- Yang D. H., Liu E., Zhang Z. J., Teng J., 2002, *Finite-difference modelling in two-dimensional anisotropic media using a flux-corrected transport technique*, Geophys. J. Int., 148, 320–328.

Summary

In this paper parallel computing methods and PC clusters possibilities in seismic wave field modeling were presented. In first part of the paper main ideas of PC clustering and its hardware side were briefly described. All important advantages (price and reliability) and disadvantages (bandwidth limitations) were pointed out.

In the second part two kinds of parallelization of wave field modeling – domain decomposition and one PC – one shoot point decomposition were presented. In both cases decreasing of computation time with increasing of numbers of processors was observed and the differences between obtained results were small. Finally one PC – one shoot point method were chosen because the domain decomposition is much more error prone. Problems with one computer slow down the whole cluster while during one PC – one shoot point decomposition even shutdown of some of computers can not stop the others. Of course advantages of one

PC – one shoot point decomposition are important only when we have to calculate many shoot points along seismic profile. When we want to model one wave field, domain decomposition is better solution.

In the third part some results of modeling were presented as snapshots, stacked seismic sections and separated traces. Possibilities of seismic modeling in all stages of seismic investigations were described. Problem of quality of FDM results were analyzed and effects of grid dispersion and phase rotation removal algorithm based on flux corrected technique were presented.

In the last part of paper problems connected with effective administration and controlling of big PC clusters were discussed. Some of Ganglia Cluster Monitoring Toolkit features and its web front-end results were presented.

Acknowledgment. The work has been performed under the Project HPC-EUROPA (RII3-CT-2003-506079), with the support of the European Community – Research Infrastructure Action under the FP6 „Structuring the European Research Area” Programme.

ZBIGNIEW KASINA¹

THE EFFECT OF SEISMIC SIGNAL PARAMETERS ON RESULTS OF FIRST BREAK PICKING REALIZED BY MEANS OF NEURAL PICKER

Key words:

neural networks, seismics, first break picking, neural picker

Abstract

In the presented paper the effectiveness of first break picking using neural picker has been analysed. The model and field data were used in the analysis and one variant of Artificial Neural Network learning strategy named the *Cascade-Correlation Learning Architecture* was applied. The analysis was performed in seismic processing system *ProMAX*. The effect of seismic signal parameters as well as the effect of neural picker parameters was estimated on results of first break picking of synthetic and field seismic records. It was stated that among many tested parameters the greatest effect on effectiveness of picking using neural picker had the width of time gate and the choice of signal phase.

WPLYW PARAMETRÓW SYGNAŁU SEJSMICZNEGO NA WYNIKI PUNKTOWANIA PIERWSZYCH WSTĄPIEŃ ZA POMOCĄ PIKERA NEURONOWEGO

Słowa kluczowe:

sieci neuronowe, sejsmika, punktowanie pierwszych wstąpień, picker neuronowy

Abstrakt

W prezentowanej pracy dokonano analizy efektywności punktowania pierwszych wstąpień za pomocą pikera neuronowego. Do analizy wykorzystano dane modelowe i polowe oraz jeden z wariantów strategii uczenia sztucznych sieci neuronowych zwany *architekturą kaskadowo-korelacyjnego uczenia*. Analizę przeprowadzono w systemie przetwarzania danych sejsmicznych *ProMAX*. Oszacowano wpływ parametrów sygnału sejsmicznego oraz parametrów pikera neuronowego na wyniki punktowania pierwszych wstąpień na syntetycznych i polowych rekordach sejsmicznych. Stwierdzono, że spośród wielu analizowanych parametrów największy wpływ na efektywność punktowania za pomocą pikera neuronowego wywarła szerokość okna czasowego oraz dobór fazy sygnału.

¹ Akademia Górniczo-Hutnicza – University of Sciences and Technology, Faculty of Geology, Geophysics & Environmental Protection, Kraków, Poland.

1. Introduction

In geophysical seismic investigations we record, process and interpret big sets of data saved in binary form. Many procedures of seismic data processing engage big expenditure of interactive work of geophysicists essentially increasing processing time and its costs.

The application of neural networks in seismic data processing (McCormack 1991; Murat, Rudman 1992; McCormack et al. 1993; Leggett et al. 1996; Dai, McBeth 1994; Wang, Mendel 1992; Calderon-Macias et al. 1997; Calderon-Macias et al. 1998; Bodau 1998; Buffenmyer et al. 2000; An et al. 2001; Glinsky et al. 2001; Meldahl P. et al. 2001) makes it possible to shorten processing time considerably, to improve its results and to limit the costs of interactive work.

First Break Picking is one of the most time-consuming – beside trace editing and velocity analysis – interactive processing procedure preceding the process of defining static corrections. It is used also to define the wave traveltimes in seismic tomography applied to the reconstruction of velocity fields. The correct picking of first breaks on seismic records is the base of defining exact statics determining effectiveness of all data processing in common depth point (CDP) method. This effectiveness determines the reliability of geological information recovered from seismic sections. The correct picking of first breaks in seismic tomography realized in the variant of well-to-well measurements or in the vertical seismic profiling (VSP) determines the reliability of velocity field reconstruction which is the base of the interpretation in reservoir and engineering geophysics.

The standard method of first break picking, used all the time in production practice, is based on interactive picking first breaks on selected traces of field record and on automatic filling this process for all remaining traces by means of *crosscorrelation function*. This process, repeated for each record, is very time-consuming and in the case of 3-D seismics increases considerably processing time and costs. The application of neural networks makes it possible to shorten this process significantly because the interactive participation of the geophysicist in the process of picking is limited only to not many representative records of field data. And although some new solutions

of the picking process have been proposed (Boschetti in 1996; Yung, Ikelle 1997; Glinsky et al. 2001) in the commonly used processing systems (e.g. seismic processing systems ProMAX and OMEGA in Poland) two techniques are used: technique based on *crosscorrelator picker* and technique based on *neural picker*. The first technique is commonly used in production processing whereas the effectiveness of neural pickers has been more than once questioned. The basic objection was raised to the limited ability of fast learning of neural pickers and to the essential effect of signal parameter variations on the correctness of picking. These aspects of the application of neural pickers to first break picking are considered in the presented paper. The neural first break picker in processing system ProMAX was subjected to an analysis.

2. Selected aspects of Artificial Neural Network (ANN) theory

The neural picker uses an *Artificial Neural Network* (ANN) for the process of first break picking. An ANN is made up of a number of simple, highly interconnected processing elements. These processing elements are usually simple units that do little more than take weighted sums of all their inputs, and produce appropriate responses. These units are tightly connected, with varying *weights* assigned to each connection. Each of these processing elements, commonly referred to as a *node*, receive a number of input signals, and, based on those signals, generates a single output signal. This output signal is sent as an input signal to other processing elements via the network's interconnections. The nodes in a neural network are usually ordered in layers, with each layer having one or more nodes. The output of one layer provides the input to the subsequent layer. The first layer is referred to as the *input layer*. The nodes in this layer simply pass on the inputs to the nodes in the next layer. The last layer is commonly called the *output layer*; the outputs of the nodes in this layer are the output of the network. The layer(s) between the input and the output layers are called the *hidden layer(s)*. A neural network processes information by its dynamic state response to external inputs. Knowledge in a neural net

is stored both in the ways the units are connected, and in the weights of those connections. The network learns to solve a problem by adjusting its interconnection weights. Eventually, if the problem can be learned, a stable state of weights adaptively evolves, and the net will be able to produce the correct outputs when presented with a given set of inputs.

There are a variety of training paradigms that are commonly used to train neural networks. The most common training method is the *Back Propagation* (BP) algorithm. In BP technique, the weights of the connections between nodes in the net are initially set to small random values. To train the net, a dataset containing sample input parameters with corresponding results is presented to the net. The data set used for training can be obtained using historical problem data in which the outcomes are known, or by creating sample problems and solutions with the help of experts. These input values are forward propagated through the net to the output nodes. The net's outputs, which are the values of the nodes in the output layer, are calculated. These outputs are then compared with the desired or correct outputs. An error value, which is simply the difference between the desired output and the obtained output, is computed for each of the output nodes. These error values are back propagated all the way to the input nodes, and the weights of the connections are slightly adjusted, in order to move the activation values of the output nodes closer to the desired outputs. For this adjustment process, the net performs a gradient descent in the weight space, in order to minimize the error function in the output space. When the net's performance satisfies some preset criterion (typically defined as a small margin that represents the accepted range of error), the weights are frozen. These weights represent the knowledge of the net. If the net has acquired sufficient training, it will be able to generalize, that is it will be able to find the correct, or close to optimal, solution, when given input patterns that has never been presented before. However, the BP algorithm can be extremely slow, and is prone to getting trapped in a local minimum during the training. In addition, the optimum size of the network cannot be predetermined. Since BP is a fixed-size net training algorithm, the art of determining the size of a network is still a black

box, where researchers usually rely on intuition, past experience, and, most of the time, trial and error.

The process of Neural Network Training applied in ProMAX system uses an alternative learning strategy called the *Cascade-Correlation Learning Architecture*. Instead of adjusting the weights in a network of fixed topology, the Cascade-Correlation begins with a minimal network with no hidden nodes at all. The connections between the input and the output nodes are trained to minimize the error, that is the difference between the desired output and the obtained output. When no further improvement is possible, hidden nodes are added, one by one, to reduce the residual error. The added node is selected from a pool of candidate nodes. Each of these candidate nodes receives weighted connections from the input nodes, and other hidden nodes already installed in the net. However, the connections from these candidate nodes to the output nodes are not established immediately. The candidate nodes are trained, in parallel, to maximize the correlation between their outputs and the residual error that the network is trying to eliminate. When no further progress is being made, the candidate whose correlation score is the best is installed, and its weights are frozen. This new node then becomes a permanent feature detector in the network, available for producing outputs, or for creating other, more complex feature detectors. Once it is installed, all the weights to the output nodes, including the connections to the new hidden unit, are retrained. New hidden units are added until the residual error is within a small margin.

3. The neural first break picker in processing system ProMAX

There are two neural procedures available in processing system ProMAX to perform the process of first break picking:

- Neural Network First Break Pick Training (NN FB Pick Training),
- Neural Network First Break Picker (NN FB Picker).

Using the first procedure (*Neural Network First Break Pick Training*) a training dataset must be first created by manually picking the first breaks on several

records and saved to a database file. A choice how the picks will be shifted down in time must be made. Choosing pick polarity as *peak* shifts the pick down to the nearest peak below the actual first break pick. Shifting improves pick consistency in noisy data, and decreases the number of locations for the network to consider as potential picks, thus improving speed and accuracy. Additionally, the length of the leading and trailing windows used to analyze the characteristics of each of the example peaks must be established. It is recommended that the gate length be approximately 3 times the dominant period of the data. After finishing the process of training the network's weight matrix is saved in a file. Parameter window of *NN FB Pick Training* procedure contains:

- the neural network training mode (*train a new network or retrain a trained network*),
- the name of the weight matrix file (*weight file*),
- the name of the database file containing *manual picks*,
- the signal and noise *gate length* (in ms),
- pick polarity (options: *peak*, *trough*, *pos. zero crossing*, *neg. zero crossing*),
- the name of *time gate* file; in this gate the network searches a pick.

In the second procedure (*Neural Network First Break Picker*) the program starts picking at a specified offset. The starting offset should be a region in the data which has minimal noise. The part of the trace analysed by the neural network to find the first break is further constrained by two other parameters supplied in the parameter window of the procedure. These are the maximum trace-to-trace static value and a median arrival time prediction. The time prediction is derived by fitting a line to a number of previous picks using the slope of the top gate. Thus, the window in which the network considers a pick can be restricted to a relatively small range about the predicted arrival time of the first break. The first break picks can be written to the either the trace headers, or a database file, or both the trace headers and a database file. Parameter window of *NN FB Picker* contains:

- the name of weight matrix file, generated during network training,

- number of traces in median line fit,
- maximum trace to trace static defining the maximum static deviation from the predicted first break time,
- starting offset to determine first break slope,
- the name of file with time gate defined interactively (e.g. in *Trace Display* procedure).

4. The analysis of the effectiveness of neural picker in the case of model data

The model data were generated in processing system ProMAX using procedure named *Synthetic Trace Generation*. The procedure makes it possible to generate synthetic traces for the following parameters: t_0 traveltimes for assumed reflected waves, velocities defining the curvature of hodographs, the type of seismic signal and its parameters (frequency bandpass, signal length, phase spectrum), maximum signal amplitudes, reflector dip, spread parameters. The parameter selection was done after wave pattern analysis performed on field records. The analysis of first break apparent velocities was performed as well as the frequency analysis using interactive procedure named *Interactive Spectral Analysis*. Finally the following parameters of first breaks were selected:

- first branch: $t_0 = 130$ ms, $V = 1740$ m/s, Ormsby signal (4-10-50-80),
- second branch: $t_0 = 420$ ms, $V = 2350$ m/s, Ormsby signal (4-8-40-60).

The parameters of the synthetic record were the same as in the case of field data: six split-spreads, 121 channels, receiver interval 50 m, spread length 6000 m. The wave pattern of generated record with the broad time gate marked (two periods before and two periods after the first break) is shown in Fig. 1. In the analysis the narrow time gate (two periods before and one period after the first break) was used too.

In the undertaken analysis the differentiation of the first break signal parameters was taken into consideration. This differentiation was caused by:

- the differentiation of frequency content of signals (as a function of offset),

- different signal to random noise ratio,
- the manner of amplitud controlling (AGC),
- parameters of frequency filtering applied before the process of picking,
- the interference of signals in the zone of apparent velocities change.

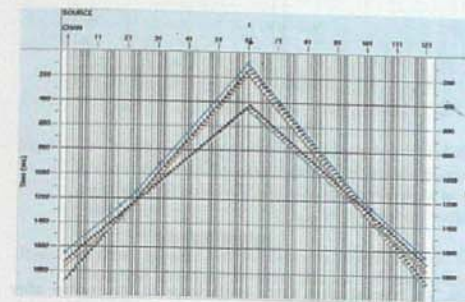


Fig. 1. Synthetic record with the broad time gate marked; horizontal axis – seismic channel number.

Rys. 1. Sejsmogram syntetyczny z zaznaczoną szeroką bramką czasową; oś pozioma – numer kanału sejsmicznego.

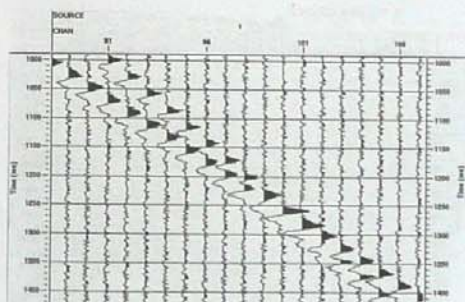


Fig. 2. Enlargement of a segment of a selected record with noise; horizontal axis – seismic channel number.

Rys. 2. Powiększenie wycinka jednego z sejsmogramów z szumem; oś pozioma – numer kanału sejsmicznego.

The wave pattern of the individual records was differentiated by adding random noise generated in ProMAX system using procedure *Additive Noise and Spikes*. The S/N ratio was changing in the range 0.88–1.0. The enlargement of segment of selected record with noise is illustrated in Fig. 2. The enlargement of segment of the

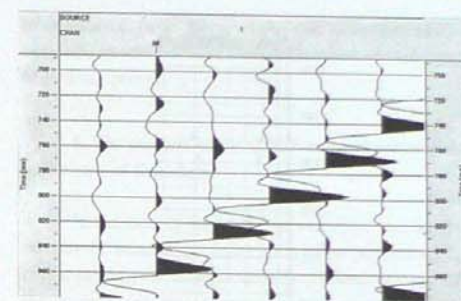


Fig. 3. Enlargement of a segment of a selected record with noise after the application of the bandpass Ormsby filter (2-8-55-85); horizontal axis – seismic channel number.

Rys. 3. Powiększenie wycinka jednego z sejsmogramów z szumem po zastosowaniu pasmowego filtra Ormsbyego (2-8-55-85); oś pozioma – numer kanału sejsmicznego

same record after the application of the bandpass Ormsby filter (2-8-55-85) is shown in Fig. 3.

The process of network learning was accomplished using manual picks saved in database in the version of sparse picking (Fig. 4a) and after adding manual picks (Fig. 4b) mainly in the zone of interference. The results of picking using neural picker on the record with noise before frequency filtering for the starting offset 2650 m (channel 114), narrower time gate, pick polarity zero (–/+), sparse manual picks are showed in Fig. 5. We can observe many deviations from the line of first breaks. After the application of the bandpass filtering (Fig. 6) the results of picking were considerably better. After adding manual picks in the zone of errors and the application of second training the results of picking were improved. The graph of picking quality available in database is illustrated in Fig. 7. Increasing of the function values should be correlated with decreasing pick reliability. All the picking errors were marked in decreasing pick reliability.

In the next step pick polarity was changed from zero to peak, keeping the same phase of manual picking (phase zero). The results of picking in the case of broad time gate and record number 2 are showed in Fig. 8a. We can observe further picking improvement. At the end the phase peak was used during manual picking (Fig. 8b) bringing the best – practically faultless – picking results.

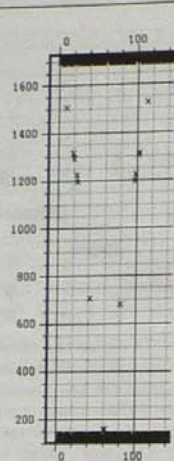


Fig. 4a. Manual picks saved in database in the version before adding manual picks mainly in the zone of interference; horizontal axis – trace number, vertical axis – time in ms.

Rys. 4a. Wyniki ręcznego punktowania zapisane w bazie danych w wersji przed dodaniem pików ręcznych głównie w strefie interferencji; oś pozioma – nr trasy, oś pionowa – czas w milisekundach.

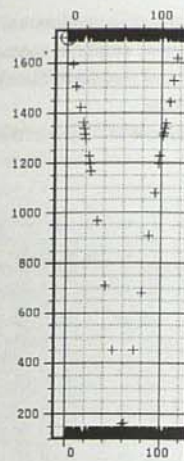


Fig. 4b. Manual picks saved in database in the version after adding manual picks mainly in the zone of interference; horizontal axis – trace number, vertical axis – time in ms.

Fig. 4b. Wyniki ręcznego punktowania zapisane w bazie danych w wersji po dodaniu pików ręcznych głównie w strefie interferencji; oś pozioma – nr trasy, oś pionowa – czas w milisekundach

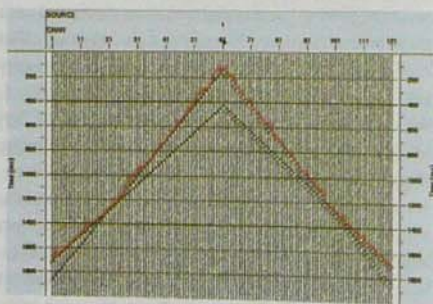


Fig. 5. The results of picking using neural picker on the record with noise before frequency filtering for the starting offset 2650 m (channel 114), narrower time gate, pick polarity zero (-/+), sparse manual picks; horizontal axis – seismic channel number.

Rys. 5. Wyniki punktowania z zastosowaniem pikera neuronowego na sejsmogramie z szumem przed filtracją częstotliwościową dla offsetu startowego 2650 m (kanał 114), węższej bramki czasowej, polaryzacji zero (-/+) i rzadkiego punktowania ręcznego; oś pozioma – numer kanału sejsmicznego.

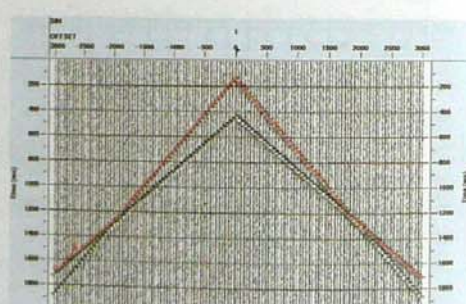


Fig. 6. The results of picking using neural picker on the record with noise after frequency filtering for the starting offset 2650 m (channel 114), narrower time gate, pick polarity zero (-/+), sparse manual picks; horizontal axis – seismic channel number.

Rys. 6. Wyniki punktowania z zastosowaniem pikera neuronowego na sejsmogramie z szumem po filtracji częstotliwościowej dla offsetu startowego 2650 m (kanał 114), węższej bramki czasowej, polaryzacji zero (-/+) i rzadkiego punktowania ręcznego; oś pozioma – numer kanału sejsmicznego.

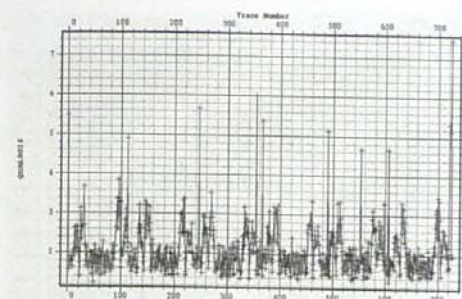


Fig. 7. The graph of picking quality for the records 1–6 available in database after the application of the second network training on first records after adding manual picks in the zone of errors; horizontal axis – trace number, vertical axis – quality function.

Rys. 7. Wykres jakości punktowania dla sejsmogramów 1–6 z szumem dostępny w bazie danych po zastosowaniu powtórnego treningu sieci na pierwszym sejsmogramie po dodaniu ręcznych pików w obszarze błędów; oś pozioma – numer trasy, oś pionowa – funkcja jakości punktowania.

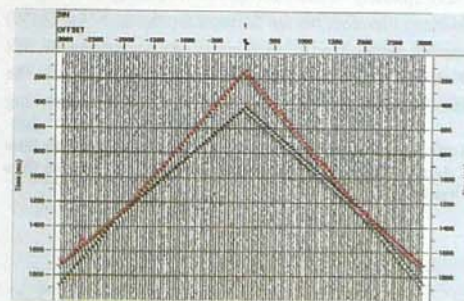


Fig. 8a. The results of picking in the case of broad time gate, pick polarity peak, zero phase of manual picking; horizontal axis – offset in meters.

Rys. 8a. Wyniki punktowania w przypadku szerokiej bramki czasowej, polaryzacji punktowania maksimum, fazy zero punktowania ręcznego; oś pozioma – offset w metrach.

of values of these parameters had – in the case of discussed model data – no essential effect on the results of picking process.

5. The analysis of the effectiveness of neural picker in the case of field data

In the case of field data the attention was fixed on records of seismic dynamite data. The process of first break picking of these records is realized not only for the purpose of the improvement of static correction estimation but also to prepare input data to head wave and turning ray tomography. The main goal of tomographic inversion in this case is to achieve better velocity recognition of shallow layers before the construction of velocity fields for depth migration before stack.

The first procedure applied before first break picking was zerophase bandpass filtering (Ormsby filter 4-8-60-80) and two variants of automatic gain control (AGC): AGC with *centered* option (operator length –

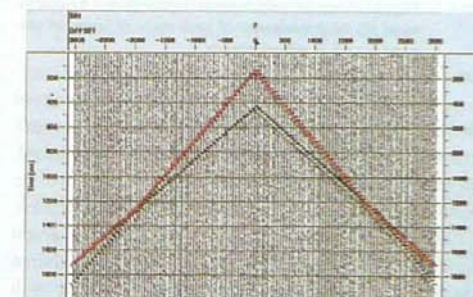


Fig. 8b. The results of picking in the case of broad time gate, pick polarity peak, peak phase of manual picking; horizontal axis – offset in meters.

Rys. 8b. Wyniki punktowania w przypadku szerokiej bramki czasowej, polaryzacji punktowania maksimum, fazy maksimum punktowania ręcznego; oś pozioma – offset w metrach.

In the analysis of picking results the effect of other parameters was taken into consideration. The analysed parameters included: number of traces in median line fit, maximum trace to trace static, starting offset to determine first break slope. However, the variations

500 ms, scale variant – *MEAN*) and AGC with *trailing* option (operator length – 200 ms, scale variant – *MEAN*). In the case of first option (*centered*) AGC procedure applies calculated gain to central sample of sliding time window and in the case of second option (*trailing*) – to

the first sample. The wave patterns of the dynamite record (SP 400) after bandpass filtering and application of two variants of AGC were very similar. It seemed that oscillations before strong first break were smaller in the case of AGC with the option *centered* and this option was used in further analysis.

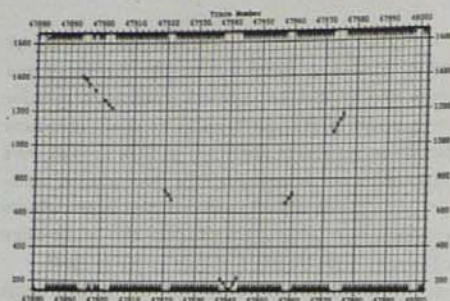


Fig. 9. Manual picks of dynamite record for phase minimum (through); horizontal axis – trace number, vertical axis – time in ms.

Rys. 9. Wyniki ręcznego punktowania sejsmogramu dynamitowego dla fazy minimum; oś pozioma – nr trasy, oś pionowa – czas w milisekundach.

In the next step the time gate was designed including first breaks and parameters of network training and picking procedure were established. Several individual picks were manually defined on both branches of first breaks before training process. These manual picks are shown on database graph in Fig. 9. The phase minimum (through) was chosen during manual picking. The results of picking with neural picker after first training with starting offset 2650 m are shown in Fig. 10. Resulting picks are correct with the exception of the zone of small positive offsets. Increasing the number of trainings to 10 and then to 70 didn't change the picking results. The main improvement was achieved after narrowing the time gate. The application of the picker to pick consecutive five records gave compact and generally correct set of first breaks picks. Several picking errors (of cycle skipping type) marked increased values of picking quality graph and generally appeared in the zone of changing offset sign.

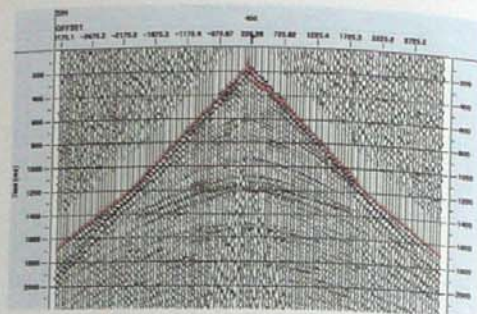


Fig. 10. The results of picking of dynamite record with neural picker after first training with starting offset 2650 m; horizontal axis – offset in meters.

Rys. 10. Wyniki punktowania sejsmogramu dynamitowego za pomocą pikera neuronowego dla offsetu startowego 2650 m; oś pozioma – offset w metrach.

To estimate the influence of variations of the first break signal spectrum on picking effectiveness the records – starting from the second one – were filtered using spatially variant zerophase frequency filtering. In relation, therefore, to the frequency passband (4-8-60-80) applied previously to all records the narrowing of this passband was done with offset in accordance with the specification included in Tab. 1. The variations of picking

Table 1. The frequency spectrum of spatially variant Ormsby filter
Tabela 1. Widmo częstotliwościowe zmiennego w przestrzeni filtru Ormsby'ego

Offset (m)	Frequency spectrum of the Ormsby filter (Hz)
0	4-8-50-80
-1850	4-8-30-50
1850	4-8-30-50
-3175	4-8-20-40
3175	4-8-20-40

results due to spatially variant filtering were considerable. We can observe somewhat greater values of picking quality function. The number of cycle skipings was somewhat greater. Generally we can state that the neural picker showed the resistance to introduced variations of signal spectrum.

6. Conclusions

The analysis of the results of the neural picker effectiveness testing realized in the processing system ProMAX on model and field data makes it possible to draw the following conclusions:

- the application of bandpass frequency filtering to the synthetic records with added broadband noise significantly improved the effectiveness of neural picker,
- increasing manual picks in the zone of offset sign variation and in the zones of interference significantly improves the effectiveness of neural picker,
- the choice of phase maximum (peak) instead of phase zero improved effectiveness of picking records with noise,
- effectiveness of picking dynamite records was estimated as good; picking errors in most cases appeared in the zone of offset sign variation;
- among many tested parameters the greatest effect on effectiveness of picking using neural picker had the width of time gate; modification of other parameters (signal and noise gate length, number of traces in median line fit, maximum trace to trace static, starting offset) didn't bring essential improvement of picking,
- training of network in the range of 70 trainings didn't improve the results of picking,
- analysed variations of the signal shape after spatially variant filtering didn't bring essential decreasing of picking effectiveness.

The paper was prepared within the Committee of Scientific Research (KBN) project No. 1111.140.06

Bibliography

- An P., Moon W. M., Kalantzis F., 2001, *Reservoir characterization using seismic waveform and feed-forward neural networks*, Geophysics, vol. 66, no. 5, 1450–1456.
- Buffenmyer V., Poulton M., Johnson R., 2000, *Identification of seismic crew noise in marine surveys by neural networks*, The Leading Edge, vol. 19, no. 4, 370–376.
- Boadu F. K., 1998, *Inversion of fracture density from field seismic velocities using artificial neural networks*, Geophysics, vol. 63, no. 2, 534–545.
- Boschetti F., Dentih M. D., List R. D., 1996, *A fractal-based algorithm for detecting first arrivals on seismic traces*, Geophysics, vol. 61, no. 4, 1095–1102.
- Calderon-Macias C., Sen M. K., Stoffa P. L., 1997, *Hopfield neural networks, and mean field annealing for seismic deconvolution and multiple attenuation*, Geophysics, vol. 62, no. 3, 992–1002.
- Calderon-Macias C., Sen M. K., Stoffa P. L., 1998, *Automatic NMO correction and velocity estimation by a feedforward neural network*, Geophysics, vol. 63, no. 5, 1696–1707.
- Calderon-Macias C., Sen M. K., Stoffa P. L., 2000, *Artificial neural networks for parameter estimation in geophysics*, Geophysical Prospecting, vol. 48, 21–47.
- Dai H., MacBeth C., 1994, *Split shear-wave analysis using an artificial neural network*, First Break, vol. 12, no. 12, 605–613.
- Glinsky M. E., Clark G. A., Cheng Z. P., Sandhya Devi K. R., Robinson J. H., and Ford G. E., 2001, *Automatic event picking in prestack migrated gathers using a probabilistic neural network*, Geophysics, vol. 66, no. 5, 1488–1496.
- Leggett M., Sandham W. A., Durrani T. S., 1996, *3D horizon tracking using artificial neural networks*, First Break, vol. 14, no. 11, 413–418.

- Michael D., McCormack D., 1991, *Neural computing in geophysics*, The Leading Edge, vol. 10, no. 1, 11–15.
- McCormack M. D., Zaucha D. E., Duschek D. W., 1993, *First-break refraction event picking and seismic data trace editing using neural networks*, Geophysics, vol. 58, no. 1, 67–78.
- Meldahl P., Heggland R., Bril B., de Groot P., de Groot B., 2001, *Identifying faults and gas chimneys using multiattributes and neural networks*, The Leading Edge, vol. 20, no. 5, 474–482.
- Murat M. E., Rudman A. J., 1992, *Automated first arrival picking: A neural network approach*, Geophysical Prospecting, vol. 40, 587–604.
- Wang L., Mendel J. M., 1992, *Adaptive minimum prediction-error deconvolution and source wavelet estimation using Hopfield neural networks*, Geophysics, vol. 57, no. 4, 670–679.
- Yung S. K., Ikelle L. T., 1997, *An example of seismic time picking by third-order bicoherence*, Geophysics, vol. 62, no. 6, 1947–1951.

Streszczenie

W prezentowanej pracy dokonano analizy efektywności punktowania pierwszych wstępień na sejsmogramach za pomocą pikera neuronowego. Do analizy wykorzystano sejsmogramy syntetyczne wygenerowane w systemie przetwarzania ProMAX i odwzorowujące podstawowe parametry danych polowych. Sejsmogramy syntetyczne zróżnicowano na drodze dodania zmiennego od sejsmogramu do sejsmogramu szumu przypadkowego. Przedmiotem analizy były także wybrane sejsmogramy polowe sejsmiki dynamitowej. W procesie punktowania wykorzystano dostępny w systemie ProMAX wariant strategii uczenia sztucznych sieci neuronowych zwany *architekturą kaskadowo-korelacyjnego*

uczenia. Oszacowano wpływ zmiany parametrów sygnału sejsmicznego oraz parametrów pikera neuronowego na wyniki punktowania pierwszych wstępień. W podjętej analizie uwzględniono zróżnicowanie parametrów sygnałów pierwszych wstępień uwarunkowane: zróżnicowaniem składu częstotliwościowego sygnałów (m.in. w funkcji offsetu), różnym stosunkiem S/N sygnału do zakłóceń przypadkowych, sposobem wyrównywania (regulacji) amplitud (AGC), parametrami filtracji częstotliwościowej aplikowanej przed procesem punktowania, interferencją sygnałów w strefie zmiany prędkości pozornych. Analiza uzyskanych wyników testowania efektywności pikera neuronowego w systemie przetwarzania ProMAX – przeprowadzona na danych modelowych i polowych – pozwoliła na sformułowanie następujących wniosków:

- zastosowanie pasmowej filtracji częstotliwościowej do sejsmogramów syntetycznych z szumem istotnie poprawiło efektywność pikera neuronowego;
- zwiększenie liczby pików ręcznego punktowania w strefie zmiany znaku offsetu oraz w strefach interferencji istotnie poprawiło efektywność pikera neuronowego;
- wybór fazy maksimum zamiast fazy zero poprawił efektywność punktowania sejsmogramów z szumem;
- efektywność testowania sejsmogramów dynamitowych oceniono jako dobrą, nieliczne błędy punktowania pojawiały się w większości przypadków w strefie zmiany znaku offsetu;
- spośród wielu testowanych parametrów największy wpływ na efektywność punktowania za pomocą pikera neuronowego wywarła szerokość bramki czasowej oraz dobór fazy punktowania, modyfikacja pozostałych parametrów nie przyniosła istotnej poprawy punktowania;
- trenowanie sieci w zakresie do 70 treningów nie poprawiło wyników punktowania;
- analizowane zmiany kształtu sygnału z offsetem po filtracji zmiennej w przestrzeni nie przyniosły istotnego obniżenia efektywności punktowania.

LESZEK KOLONDRĄ¹

FOTOGRAMETRIA – WIARYGODNE ŹRÓDŁO DANYCH W BADANIACH GLACJOLOGICZNYCH SPITSBERGENU

Słowa kluczowe:

Spitsbergen, glaciologia, fotogrametria, kartografia, ortofotomapa, numeryczny model terenu, teledetekcja

Abstrakt

Artykuł, na przykładzie prac fotogrametrycznych wykonywanych w ostatnim 70-leciu, przedstawia możliwości metody w zakresie pozyskiwania danych dla potrzeb badań glaciologicznych. Nowe technologie powstałe w ostatnim dwudziestolecu (GPS, cyfrowe techniki komputerowej obróbki obrazu a przede wszystkim teledetekcyjne sposoby pozyskiwania danych z pulapu lotniczego i satelitarnego rejestrowanych w różnych pasmach widma elektromagnetycznego) wypierają klasyczne metody pomiaru i opracowania. Czy fotogrametria wzbogacona o możliwości cyfrowego sposobu pozyskiwania danych i ich dalszej cyfrowej obróbki może być nadal wiarygodnym i optymalnym sposobem dostarczania danych niezbędnych glaciologom – oto kwestia, na którą autor stara się odpowiedzieć.

PHOTOGRAMMETRY – THE AUTHENTIC SOURCE OF DATA FOR SPITSBERGEN GLACIOLOGICAL RESEARCH

Key words:

Spitsbergen, glaciology, photogrammetry, cartography, orthophotomap, digital terrain model, remote sensing

Abstract

The paper outlines, on the example of photogrammetric works carried out during last 70 years on Spitsbergen, the possibility of photogrammetric methods in data acquisition for glaciological research. The increased evolution of new technologies in the last 20 years period (Global Positioning System, elaboration of raster pictures by means of digital methods and first of all the remote sensing methods of collecting data from aerial and space platforms in a various parts of electromagnetic spectrum) is the reason of elimination of classic surveying methods. Is photogrammetry, together with new digital methods of data acquisition and elaboration, still a serious source for glaciology? – It is the challenge for the author to answer this question.

¹ Uniwersytet Śląski, Wydział Nauk o Ziemi, Katedra Geomorfologii, Zakład Teledetekcji Środowiska, Sosnowiec.

Wprowadzenie

Lodowce na Ziemi zajmują powierzchnię ok. 16 mln km² co stanowi 11% obszaru lądów. Ponad 96% tego obszaru zajmują dwa największe lądolody: Antarktyda (85,7%) oraz Grenlandia (10,9 %). Pozostałe obszary zlodowalone to mniejsze czapy lodowe w wysokich szerokościach (2,1%) oraz lodowce górskie



Rys. 1. Szkic usytuowania badanych przez autora rejonów na Spitsbergenie.

Fig. 1. Situation of researched areas by author on Spitsbergen.

(1,3%). Zlodowalone obszary Svalbardu stanowią jedynie 0,2% obszarów zlodowalonych Ziemi (Jania, 1997). Autor miał możliwość prowadzenia pomiarów i opracowania ich wyników tylko na znikomej części Svalbardu (rys. 1).

Archipelag Svalbard pokryty jest lodowcami (rys. 2.) w około 60%, a ogólna ich objętość szacowana jest na 11 tys. km³ (Hagen i in., 1993) i jest jednym z najbardziej zlodowalonych obszarów Arktyki Euro-



Rys. 2. Svalbard, Norwegia – zobrazenie wykonane 12.08.2002 roku sensorem MODIS satelity TERRA – źródło: www.visibleearth.nasa.gov

Fig. 2. Svalbard, Norge – MODIS image in true colour acquired on 12 August, 2002, by the TERRA satellite, source: www.visibleearth.nasa.gov

azjatyckiej obok Ziemi Franciszka Józefa, Ziemi Północnej i Nowej Ziemi. Na Svalbardzie stwierdzono występowanie różnych typów morfologicznych lodowców od rozległych lodowców sieciowych z trudnymi do zdefiniowania lododziałami i rozległych czap lodowych (o setkach kilometrów kwadratowych powierzchni) do niewielkich rozmiarów lodowców cyrkowych i stokowych (zwanych fartuchowymi).

Warunki atmosferyczne (średnia temperatura powietrza ok. 5°C, silny wiatr wiejący z prędkością dochodzącą do 30 m/s, mgły i zamglenia) wymuszają na wykonawcy polowych pomiarów fotogrametrycznych zastosowania zmodyfikowanych technologii pomiaru. Średnie miesięczne i roczne temperatury powietrza dla dziesięciolecia 1988–1998 z rejonu stolicy prowincji Longyearbyen przedstawiono w tabeli 1.

Tabela 1. Średnie miesięczne i roczne temperatury powietrza [°C] w Adventdalen (na wschód od Longyearbyen) w latach 1988–1998 na podstawie danych ze strony internetowej: www.svalbard.com.

Table 1. Mean monthly and annual air temperature in Adventdalen (east from Longyearbyen) in the period 1988–1998, after: www.svalbard.com.

	Styczeń	Luty	Marzec	Kwiec.	Maj	Czerw.	Lipiec	Sierp.	Wrześ.	Paźdz.	Listop.	Grudz.	ROK
1988	−16,9	−14,7	−19,8	−18,2	−2,6	2,9	6,8	5,5	−1,5	−9,4	−16,9	−22,5	−8,9
1989	−18,4	−19,4	−15,0	−8,1	−1,5	2,4	5,4	4,7	1,3	−5,6	−9,4	−15,2	−6,6
1990	−6,2	−10,0	−15,4	−8,2	−4,0	2,8	6,5	5,6	5,2	−2,5	−11,9	−9,0	−3,9
1991	−12,3	−9,2	−8,7	−11,9	−3,9	2,6	5,6	6,2	0,7	−5,3	−11,6	−12,9	−5,1
1992	−12,7	−17,7	−11,5	−6,6	−2,6	3,2	6,0	4,6	3,0	−8,2	−6,2	−12,2	−5,1
1993	−17,0	−16,5	−16,5	−14,6	−3,6	2,4	7,8	6,5	−0,1	−8,8	−2,1	−11,3	−6,1
1994	−16,8	−16,3	−9,5	−6,6	−3,9	3,1	5,2	3,5	0,5	−8,6	−14,2	−8,0	−6,0
1995	−16,4	−14,0	−15,3	−6,8	−2,5	3,3	6,4	5,4	2,2	−6,3	−14,3	−14,4	−5,0
1996	−9,7	−17,3	−7,0	−9,5	−4,8	2,4	5,4	5,0	0,8	−3,9	−4,8	−16,0	−5,0
1997	−17,8	−15,9	−12,1	−13,8	−3,2	2,6	5,3	4,7	0,6	−4,9	−8,2	−9,9	−6,1
1998	−20,0	−20,2	−13,3	−12,6	−5,5	2,7	8,3	6,9	0,3	−3,9	−5,3	−11,7	−6,2

Jednym z podstawowych zagadnień glaciologii – interdyscyplinarnej dziedziny wiedzy zajmującej się lodowcami – jest wyznaczenie bilansu masy lodowca: zestawienie akumulacji i ubytków masy lodowca w określonym przedziale czasowym (zwykle roku), przy użyciu porównywalnych jednostek. Do wyznaczenia kilku niezbędnych ku temu wielkości wykorzystywane są metody fotogrametryczne.

1. Cele i zadania – stosowane metody pomiarów

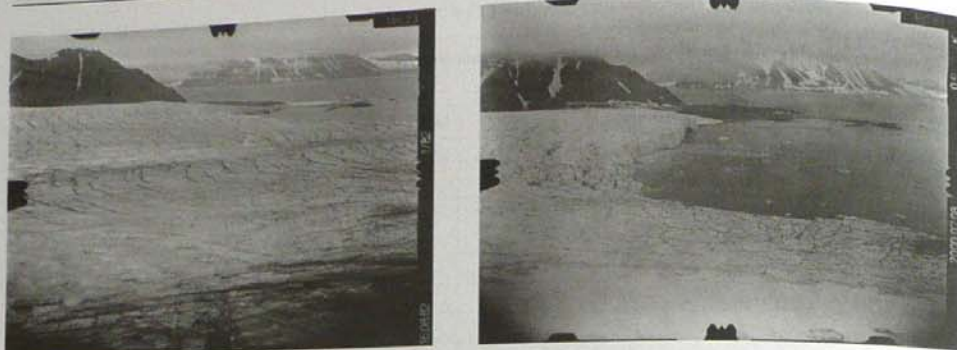
1.1. Typowe obiekty i zjawiska badane fotogrametrycznie dla potrzeb glaciologii

Oprócz podstawowych materiałów kartograficznych opisujących lodowce i ich otoczenie w postaci map topograficznych w różnych skalach od 1 : 2000 do 1 : 100 000



Rys. 3. Lodowiec Hans – klif (z półwyspu Baranowskiego) i strefa marginalna (ze stałego stanowiska fotogrametrycznego 107 na wschodnim stoku Fugleberget) – sierpień 2000 r.

Fig. 3. Hans Glacier – ice cliff (from Baranowski Peninsula) and marginal zone (from the permanent photogrammetric survey station No 107, situated on the eastern slope of Fugleberget) – August 2000.



Rys. 4. Dwa zdjęcia fotogrametryczne strefy marginalnej lodowca Hans wykonane z tego samego stanowiska (Nr 107) i tej samej orientacji zewnętrznej; lewe 16 sierpnia 1982 r., prawe 8 lipca 2000 r. Widoczna znaczna recesja klifu (około 600 m).

Fig. 4. The marginal zone of Hans Glacier on photogrammetric photos taken from the same station (No 107) and with identical elements of external orientation; the upper on 16 August, 1982, and the lower on 8 July, 2000. The notable change of cliff (ca. 600 m) is visible.



Rys. 5. Spitsbergen, Plateau Amundsenisen, (Ziemia Wedeła Jarlsberga) ukośne zdjęcia lotnicze wykonane w 1936 roku [Np/Oslo, 1936]. Zdjęcia obejmują rejon, w którym pracowała Polska Wyprawa na Spitsbergen w 1934, wykonując na nieskartowanym dotąd obszarze (ponad 260 km²) pomiary triangulacyjne i terofotogrametryczne, w efekcie których powstała mapa 1:50 000. W centrum środkowego zdjęcia Plateau Amundsenisen z Górą Kopernika, za nim dwa duże lodowce Zawadzkiego i Polaków, między nimi Góry Pilsudskiego z pasmami górskimi i szczytami: Belvederetoppen, Warszawaryggen, Ostra Bramatoppen, Waweltoppen, Biernawski, Różycki i Wilno. Na zdjęciu lewym (2717) także Staszefjellet i Stanisławskikammen, a na prawym (2715): Curie-Skłodowskafjellet i Polakkfjellet. Nazwę „Amundsenisen” także zaproponowali Polacy. Mianownik skali tych zdjęć (wykonanych z wysokości ok. 2700 m nad terenem przy pochyleniu osi kamery $\omega = \text{ok. } -30^\circ$), zmienia się od 20 000 na przednim planie, poprzez 50 000 (środek zdjęcia) do 133 000 na dalekim, jeszcze interpretowalnym planie. Wprawny obserwator, może oba modele postrzegać stereoskopowo. Oba stereogramy posłużyły do próby weryfikacji wyników z wykorzystaniem dostępnych aktualnie metod cyfrowej obróbki obrazów (na stereo-digitizerze VSD-AGH).

Fig. 5. Spitsbergen, Amundsenisen (Wedel Jarlsberg Land) – high oblique photogrammetric photos taken in 1936 by Norwegian Polar Institute. In this region, the Polish Expedition worked in 1934. After triangulation and terrestrial photogrammetric surveys carried on the area over 260 sq. km, the topographic map at scale 1:50 000 was elaborated. This map contains Polish names of different topographic places. The name „Amundsenisen” was also proposed by the Polish explorers. The scale of photos taken from an altitude of 2700 m above terrain and the angle of ca 30 degrees, is changeable from 1:20 000 to 1:133 000 at far away, yet visible details.

oraz najnowszej formy danych kartograficznych w postaci ortofotomapy, glaciolodzy oczekują od geodetów dostarczenia wiarygodnych danych o n/w obiektach i zjawiskach:

- klif lodowca (rys. 3.) – zmiany położenia;
- czoło lodowca – zmiany położenia;
- wielkie pola firnowe (rys. 5.) – zmiany ich geometrii (przede wszystkim miąższości);
- wielkość ruchu powierzchniowego lodowca (rys. 4.) w różnych interwałach czasu;
- makro-, mezo- i mikroformy glacialne;
- wieloletnie płyty śnieżne i małe lodowczyki (dot. obszarów nie zlodowacanych stale).

1.2. Stosowane metody pomiarów i opracowań dla pozyskania danych metrycznych

Klasyczne metody geodezyjne (stolik topograficzny, niwelacja trygonometryczna lub geometryczna, przestrzenne wcięcie w przód) stosowane są bardzo rzadko. Wykorzystywane są jedynie na małych obszarach w pracach aktualizujących bądź pomiarach uzupełniających. Do niedawna, jedynie metoda kątownego przestrzennego wcięcia wstecz była stosowana do określania współrzędnych punktów osnowy fotogrametrycznej bądź też nawet większej ilości punktów pomiarowych na powierzchni lodowca.

Prace terofotogrametryczne prowadzone były na Spitsbergenie od końca XIX wieku. Wpiew stosowaną metodą była fotogrametria naziemna z graficznym opracowywaniem wyników (fotogrametria stolikowa). Wraz z postępem i rozwojem coraz doskonalszego instrumentarium fotogrametrycznego (polowego i kameralnego) metody fotogrametryczne stały się głównym źródłem danych kartograficznych w badaniach glaciologicznych. Metoda aerofotogrametryczna zastosowana została na Spitsbergenie dopiero w latach trzydziestych XX wieku.

Nowe metody geodezyjne (GPS, wykorzystanie tachimetrow elektronicznych typu *total station*) są coraz szerzej stosowane z uwagi na szereg zalet, między innymi konkurencyjny, w porównaniu do metod fotogrametrycznych, czas uzyskania wyników. Nie są one jednak pozbawione wad – do mierzonego punktu trzeba dotrzeć z anteną odbiornika bądź lustrem dalmierza, co nie

zawsze jest możliwe i bezpieczne, a przede wszystkim dostarczają tylko informacji punktowych. Technologia GPS z odpowiednim zapleczem logistycznym (helikopter) jest natomiast bezkonkurencyjną w zagęszczaniu osnowy fotogrametrycznej dla potrzeb aerotriangulacji.

Metody teledetekcyjne z pulapu satelitarnego (zobrazowania i rejestracje o różnej rozdzielczości pozyskiwane w różnych pasmach widma elektromagnetycznego) i lotniczego (altimetria laserowa) są coraz śmiej wykorzystywane w badaniach tych trudno dostępnych obszarów. Ich dominującą zaletą jest możliwość pozyskania danych w stosunkowo krótkim czasie na olbrzymim obszarze. Dane tak zebrane są jednorodne, niejednokrotnie nie ma innej alternatywy w ich pozyskaniu.

Wybór metody opracowania kameralnego jest uzależniony głównie od sposobu pozyskania danych. Metody analogowe w opracowaniach fotogrametrycznych obecnie są w zaniku. Powszechnie stosowaną jest cyfrowa obróbka obrazów. Jeżeli zdjęcia fotogrametryczne wykonane były w technice srebrowej zamienia się ich postać na zapis cyfrowy, by skorzystać z dobrodziejstw cyfrowej obróbki przy wykorzystaniu autokorelacji obrazu rastrowego. Najbardziej żmudną i pracochłonną metodą stosowaną w opracowaniach terofotogrametrycznych jest metoda paralaks czasowych przy określaniu wielkości ruchu powierzchniowego lodowców. Same obliczenia można ująć w prosty algorytm i skorzystać z techniki komputerowej, natomiast obserwacje modeli czasowych są trudne (zwłaszcza dla okresów kilkuletnich lub rejestrujących wielkie zmiany typu szarży lodowej) i raczej nie do wycelowania w tradycyjny sposób. Rozwiązaniem tego problemu może być tylko wykorzystanie odpowiednich zobrazowań radarowych poddanych obróbce interferencyjnej (In SAR), aczkolwiek i ta metoda nie jest pozbawiona wad (brak koherencji obrazów przy większych interwałach czasowych lub znacznych zmianach geometrii badanego lodowca).

Zastosowanie metody cyfrowej obróbki obrazów w opracowaniach fotogrametrycznych znacznie uprościło pozyskiwanie danych do utworzenia numerycznego modelu terenu – ten zaś jest niezbędny do wygenerowania ortobrazów służących do opracowania ortofotomap. Ortofotomapa, posiadając wszelkie cechy kartometryczne mapy, nie jest skażona żadną interpretacją

w przedstawieniu treści przez obserwatora ani generalizacją podczas redakcji. Uzupełniona rysunkiem poziomiej jest doskonałym materiałem studialnym, aczkolwiek moim zdaniem, jeszcze lepszym źródłem jest model przestrzenny postrzegany na monitorze fotogrametrycznej stacji cyfrowej z odpowiednim do tego oprogramowaniem, po wykonaniu niezbędnych operacji strojenia modelu. Dostępne są wtedy także narzędzia ułatwiające wiele pomiarów (pomiarów odległości 3-D, powierzchni, objętości, spadków i inne) czy analiz interpretacyjnych (klasyfikacji obszarów). Utworzony numeryczny model terenu i wygenerowane ortoobrazy stwarzają możliwości uzyskania niemal dowolnych widoków badanego obszaru z wirtualnym włączaniem.

2. Spitsbergeńskie polonica fotogrametryczne

W roku 1934 uczestnicy Polskiej Wyprawy na Spitsbergen, sporządzili metodą terofotogrametryczną mapę w skali 1:50 000 obejmującą nieskartowane obszary płn. części Ziemi Wedel Jarlsberga (rejon plateau Amundsenisen) – rys. 5. Na oficjalnej mapie norweskiej w skali 1:100 000 (arkusz Torellbreen) widnieją do dziś toponomastyczne polonica (Góra Kopernika, Góra Staszica, szczyt Curie-Skłodowska, Góra Polaków, Stanisławskikammen, Góry Piłsudskiego z pa-smami górskimi i szczytami: Belvederetoppen, Warszawyrggen, Bernadzikiewiczjellet, Ostra Bramatoppen, Waweltoppen, Waly Hetmanskiefjellet, dwa duże lodowce: Zawadzkiego i Polaków oraz kilka mniejszych lodowców: Zagrajskiego, Siedleckiego, Mogilnickiego, Biernawskiego, Różyckiego i Wilno), (Zagrajski, Zawadzki, 1935–1936, 1936), (NPI, 1953–1994, 1991) – (rys. 5.).

W roku 1957, przy okazji prac związanych z II Międzynarodowym Rokiem Geofizycznym, powstaje Polska Stacja Polarna przy fiordzie Hornsund. W latach 1957–1959 zostały zebrane dane służące do opracowań kartograficznych lodowców: Werenskiöld (mapa części marginalnej 1:5000), Penck (morena czołowa w unikalnej skali 1:2000), (Lipert, 1961), (KMWG PAN, i in., 1996) i Hans (zmiany zasięgu klifu), (Dąbrowski, Lipert, 1984).

Po reaktywowaniu pracy Polskiej Stacji Polarnej w 1979 roku, kolejne prace fotogrametryczne doprowadziły do wydania drukiem kolejnych pozycji kartograficznych:

- mapa otoczenia Polskiej Stacji Polarnej w skali 1:5000 *Spitsbergen, Polska Stacja Polarna oraz Mapa Polskiej Stacji Polarnej w Hornsundzie* w skali 1:500, (IGiK, 1984a, 1984b);
- mapy topograficzne *Spitsbergen* w skali 1:25 000 otoczenia fiordu Hornsund (ze zdjęć lotniczych z lat 1960–1961), 10 arkuszy, (I.G.i K. i in., 1987);
- mapa rzeźby strefy marginalnej lodowca Werenskiöld 1:5000, (Mechliński, i in., 1979);
- seria szkiców fotogeologicznych w skali 1:1000 opracowanych analogowo, w uproszczony sposób na podstawie czarno-białych zdjęć lotniczych wykonanych w skali 1:50 000 w latach 1960–1961:
 - *Photogeological map of the Bungebreen forefield (West Spitsbergen)*;
 - *Photogeological map of the Slaklidalen region (Sorkapp Land, Spitsbergen)*;
 - *Mapa fotogeologiczna przedpola Lodowców Nann i Torella (SW Spitsbergen)*;
 - *Photogeological map of the Renardbreen, Scottbreen and Blomlibreen forefield, (Wedel Jarlsberg Land)*;
 - *Photogeological map of Hansbreen – Sofiekammen region, (Wedel Jarlsberg Land)*;
 - *Photogeological map of the Hilmarfjellet region, (Sorkapp Land)*;
 - *Photogeological map of Treskelen – Hyrneffjellet – Kruseryggen area (Wedel Jarlsberg Land)*;
 - *Photogeological map of the interlobal zone of Torellbreen.*

przez zespoły pracowników Uniwersytetu Warszawskiego, Instytutu Geologicznego i Uniwersytetu UMCS w Lublinie;

- mapy topograficzne 1:25 000 z barwnych IR zdjęć lotniczych z 1990 roku: *Hans Glacier* oraz *Amundsenisen*, (U.Ś.L. i in., red. Jania, Kolondra, 1992), (U. Ś.L., NPI Oslo, red. Jania, Kolondra, 1994);
- ortofotomapa 1:25 000 *Werenskiöldbreen and Surrounding Areas* (red. Jania, Kolondra, 2002), wraz z kilkoma innymi w pojedynczych egzemplarzach: *Raudfjellet and Surrounding Areas 1:10 000, Surrounding areas of Polish Polar Station 1:5000, Dūneyane 1:10 000, East Side Moraine of Hansbreen 1:5000* – wszystkie z w/w zdjęć z 1990 r. (niepublikowane prace własne L. Kolondra).

ding areas of Polish Polar Station 1:5000, Dūneyane 1:10 000, East Side Moraine of Hansbreen 1:5000) – wszystkie z w/w zdjęć z 1990 r. (niepublikowane prace własne L. Kolondra).

Poza wymienionymi pozycjami opracowań kartograficznych istnieją jeszcze wydane drukiem mapy tematyczne: geomorfologiczne i geologiczne nie będące wynikiem prac fotogrametrycznych, a także szereg drobnych opracowań fotogrametrycznych – pełniejsze ich zestawienie zawiera praca doktorska (Kolondra, 2002b).

3. Wyniki pomiarów

3.1. Klify i czoła lodowców – zmiany położenia

Gromadzone od 1982 do 2000 roku dane fotogrametryczne zawierające informacje o zmianach położenia klifów lub czoł lodowców Hans, Werenskiöld,

Torell (austre) oraz zebrane w 1984 roku dane o lodowcach środkowej części fiordu: Körber, Paierl, Mülbacher, Wibe i Kvalfangar były sukcesywnie opracowywane i publikowane (Jania, Kolondra, 1982), (Jania i in., 1983), (Kolondra, 1984, 1985, 1986), (Jania, 1986), (Jania i in., 1986), (Jania, Kolondra, 1984a, 1984b, 1988), (Jania, 1988a, 1988b), (Bukowska-Jania i in., 1988), (Kolondra, Jania, 1988), (Kolondra, Pulina, 1988), (Kolondra, 1991, 2000).

Najwięcej serii pomiarowych dotyczy zmian położenia klifu lodowca Hans. Tabela 2 informuje o danych wykonania cykli pomiarowych tegoż klifu. Wszystkie dane zostały opracowane analitycznie przez autora (układ współrzędnych płaskich UTM na elipsoidzie ED 50).

Analizie poddane były także klify i czoła innych n/w lodowców otoczenia fiordu Hornsund:

Tabela 2. Daty miesięczne cykli pomiarowych rejestrujących zmiany położenia klifu lodowca Hans opracowanych analitycznie. Table 2. Hans Glacier – the monthly dates of measured and elaborated cycles for registration of the cliff position change.

ROK	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
1982								26				
1983								12				
1984								12,30				
1985									04			
1986		27	31	30		05,27	20	23	21			
1987		20			19							
1988								07,31		07	02	
1989						27						
1990					17							
1991							24	14	04,18	23		
1992			01,20	23	10	14						
1993							24		03	03		
1994				01	31			27	21	13		
1995			19		30			30	25	17		
1996					30							
1997					?							
1998							16	01				
1999												
2000							08					

- HANSBREEN (58 cykli pomiarowych obejmujących lata 1900–2000);
- WERENSKIOLDBREEN (9 cykli pomiarowych obejmujących lata 1936–2000);
- TORELLBREEN (4 cykle pomiarowe obejmujące lata 1960–1990);
- KÖRBERBREEN (2 cykle pomiarowe obejmujące lata 1960–1984);
- PAIERLBREEN (4 cykle pomiarowe obejmujące lata 1960–1996);

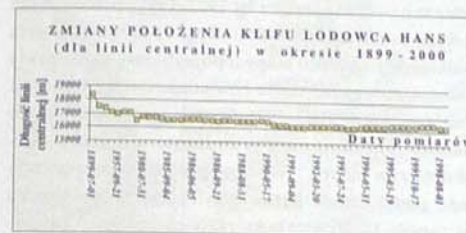
- MÜLBACHERBREEN (4 cykle pomiarowe obejmujące lata 1960–1996);
- KVALFANGARBREEN (2 cykle pomiarowe obejmujące lata 1960–1984);
- WIBEBREEN (2 cykle pomiarowe obejmujące lata 1960–1984).

Wyniki 14 wybranych cykli pomiarowych z lat 1936–2000 ilustrujących zmiany położenia klifu lodowca Hans zawiera rys. 6. Pełne dane o zmianie położenia klifu lodowca Hans wyrażone w funkcji



Rys. 6. Zmiany zasięgu klifu lodowca Hans w okresie 1936–2000 roku na podstawie wybranych cykli pomiarowych autora oraz danych archiwalnych.
Fig. 6. Hans Glacier – the change of cliff position in the period 1936–2000 on the ground of selected cycles surveyed by the author and other archival materials.

długości jego linii centralnej (od lododziału Vrangpeiset) w okresie od 1899 do 2000 roku przedstawiono graficznie na rys. 7. Nawet pobieżna analiza wyników zmian położenia klifu pozwala stwierdzić, że w ostatnim stuleciu lodowiec Hans jest w stanie recesji. O poszczególnych dekadach XX wieku trudno się wypowiadać z uwagi



Rys. 7. Zmiany położenia klifu lodowca Hans dla jego linii centralnej w okresie 1899–2000.

Fig. 7. Hans Glacier – changes of cliff position as function of the length of its central line in the period 1899–2000.

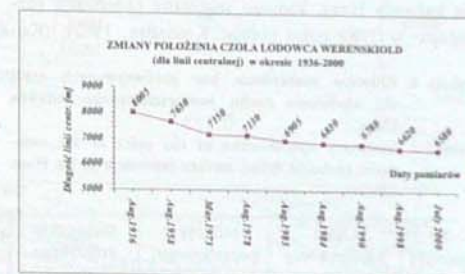
na brak wiarygodnych i pełnych danych. Właściwie to dopiero ostatnie dwie dekady są miarodajnym materiałem pozwalającym na przeprowadzenie analiz dotyczących zmian geometrii lodowca. I tak, z analizy danych dot. okresu 1982–2000 można wnioskować o oscylacyjnym charakterze zmian sezonowych i kilkuletnich. Pojedyncze ekstremum dotyczące odosobnionej obserwacji z roku 1973 nie może być zweryfikowane innymi obserwacjami – takowych brak. Bardzo przemawiającym obrazem zmian położenia klifu lodowca Hans w ostatnich dwóch dekadach są dwa zdjęcia fotogrametryczne (rys. 4.) wykonane z tego samego stanowiska, przy tej samej orientacji dla rejestracji ruchu powierzchniowego w roku 1982 i 2000 (Kolondra, 2002b).

Tabela 3. Wielkość recesji [m] klifów lodowców w odniesieniu do stanu w roku 1936

Table 3. Value of regression [m] of glacier cliff with reference to its position in 1936 year

Lodowiec Glacier	1960 zdj. lotnicze	1982 zdj. naziem.	1983 zdj. naziem.	1984 zdj. naziem.	1990 zdj. lotnicze	1996 altim. laser.
Torell	–760	–1500	–1410		–2250	
Körber	–190			–300		
Paierl	–1125			–1625	–2325	–2975
Mülbacher	–3125			–3375	–4125	–4450

Podobnie jak lodowiec Hans, zachowują się w ostatnich latach także pozostałe lodowce regionu. Drugim pod względem ilości obserwacji geodezyjnych jest lodowiec Werenskiöld, różniący się głównie od poprzedniego tym, że jego czoło kończy się na lądzie. Graficzne wyniki, ilustrujące zmiany położenia czoła tego lodowca, odnotowane na linii centralnej jezora południowego, której początek przyjęto na lododziałowej Przełęczy Kosiby, zawiera rys. 8. W okresie 64 lat lodowiec wycofał się



Rys. 8. Zmiany położenia czoła lodowca Werenskiöld (dla linii centralnej południowego jezora z początkiem na Przełęczy Kosiby) w okresie 1936–2000.

Fig. 8. Werenskiöld Glacier – changes of the front position as function of the length of its central line (for the southern part with the beginning at Kosiba Pass) in the period 1936–2000.

o ponad 1400 m, co daje uśrednioną wielkość rzędu 22 m/rok – podobną do wcześniejszego wyliczenia, z krótszego okresu obserwacyjnego, Baranowskiego (1975) – 25 m/rok.

Informacje o wielkości recesji klifów innych obserwowanych lodowców otoczenia fiordu Hornsund zamieszczono w tabeli 3. Klify lodowców Kvalfanger i Wibe

obserwowane w 1984 roku nie wykazały prawie żadnych zmian w odniesieniu do stanu z 1960 roku. Lodowiec Kvalfanger w 1936 roku nie uchodził jeszcze do zatoki Burgerbukta – stanowił boczny jezioro lodowca Mülbacher.

3.2. Wyznaczenie ruchu powierzchniowego lodowca

Pomiary ruchu powierzchniowego dotyczą głównie lodowca Hans, którego regularne obserwacje rozpoczęto w 1982 roku (Jania, Kolondra, 1982), (Kolondra, 2002b).

Tabela 4. Zbiorcze zestawienie par porównywanych cykli dla określenia ruchu powierzchniowego lodowca Hans.

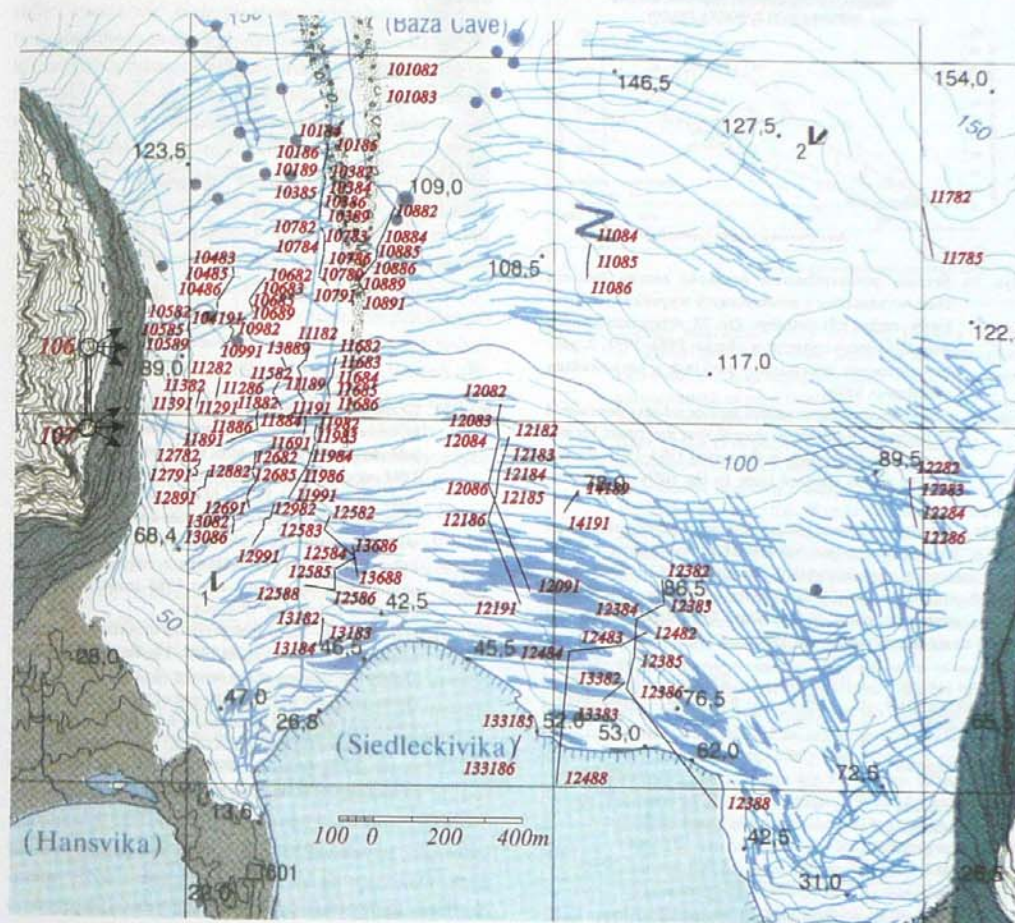
Table 4. Summary specification of the pairs of the compared cycles to define surface movement of the Hans Glacier.

Nr pomiaru	Okres porównawczy	Data cyklu początkowego	Data cyklu końcowego
0	10 dni	1982.08.16	1982.08.25
1	1 rok	1982.08.16	1983.08.10
2	2 tygodnie	1983.08.10	1983.08.27
3	1 rok	1983.08.10	1984.08.15
4	1 dzień	1984.08.15	1984.08.16
5	2 dni	1984.08.15	1984.08.17
6	3 dni	1984.08.15	1984.08.18
7	4 dni	1984.08.15	1984.08.19
8	5 dni	1984.08.15	1984.08.20
9	1 rok	1984.08.15	1985.09.26
10	1 rok	1985.09.20	1986.08.06
11	7 dni	1986.06.29	1986.07.05
12	12 dni	1986.06.29	1986.07.10
13	16 dni	1986.06.29	1986.07.14
14	18 dni	1986.06.29	1986.07.16
15	39 dni	1986.06.29	1986.08.06
16	2 lata	1986.08.06	1988.08.07
17	3 lata	1986.08.06	1989.08.08
18	3 lata	1988.08.07	1991.09.04
19	2 lata	1989.08.08	1991.09.04
20	1 rok	1988.08.07	1989.08.08

londra, 2002b). Z założonych na wschodnim stoku Fugleberget stałych stanowisk (płyty autocentrujące) wykonywano cykliczne obserwacje przy użyciu fototeodolitu PHOTEO 19/1318 do roku 2000. Obserwacje prowadzono z różną częstotliwością: jednego dnia, kilku dni, tygodni, miesięcy i kilku lat. W tabeli 4 zamieszczono pełne zestawienie danych z lat 1982–1991 opracowanych metodą paralaks czasowych. Rys. 9, na półtonowym podkładzie fragmentu mapy topograficznej, przedstawia zbiorcze zestawienie ruchu powierzchniowego Lodowca Hansa w okresie 1982–1991 dla tych reprezentatywnych punktów, które były możliwe do zaobserwowania w okresie dłuższym niż rok. W liczbowym oznaczeniu mierzono punktu, dwie ostatnie cyfry informują o roku (w zapisie skróconym), którego obserwacja dotyczy. Średnią roczną prędkość powierzchniową dla tego okresu, określoną dla zachodniej strefy brzegowej i części centralnej lodowca, ilustruje rys. 10. Kolejny rys. 11 zawiera wyniki ruchu powierzchniowego strefy marginalnej lodowca Hans dla okresów krótszych: jedno- i kilkunastodniowych w sierpniu 1983 roku. Średnie prędkości dobowe wyznaczone z obserwacji dobowych, tygodniowych i rocznej w 1982 i 1983 zawiera tabela 5.

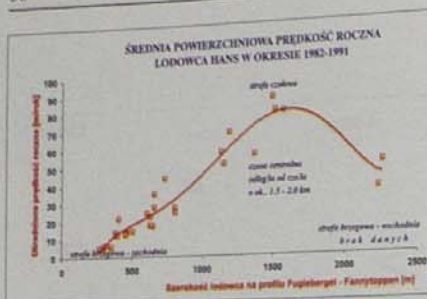
Analiza uzyskanych wyników pozwala wysnuć poniższe wnioski (dot. lodowca Hans i wynikające tylko z układu i wielkości wektorów, bez wnikania w ich genezę glaciologiczną):

1. Rozkład prędkości powierzchniowej w profilu poprzecznym wykazuje jej stopniowy wzrost od brzegu zachodniego do części centralnej. Spadek prędkości we wschodniej strefie brzegowej jest mniej wyraźny. Bardziej wiarygodnemu określeniu tej ostatniej wielkości przeszkadza topografia lodowca (przy takim usytuowaniu stanowisk fotogrametrycznych) i zbyt duża odległość od tej partii lodowca.
2. Większa prędkość (3–4 krotna) partii czołowej niż strefy oddalonej od czoła o ok. 1,5–2,0 km, rozciągającej się wzdłuż linii centralnej lodowca.
3. Średnie prędkości dobowe odnotowywane z krótkookresowych obserwacji w sierpniu są niższe od prędkości dobowych określanych z obserwacji długookresowych – rocznych lub dłuższych.



Rys. 9. Zbiorcze zestawienie trajektorii wektorów ruchu powierzchniowego lodowca Hans w okresie 1982–1991. Skala wektorów równa skali mapy podkładowej (fragment arkusza mapy topograficznej HANS GLACIER, 1:25 000 ze zdjęć lotniczych z 1990 roku). Dwie ostatnie cyfry w oznaczeniu mierzonych punktu informują o roku, którego obserwacja dotyczy. Warto zwrócić uwagę na wyraźne zmiany zwrotów wektorów w strefie ruchu tensyjnego w pobliżu klifu lodowca.

Fig. 9. Hans Glacier – the graphical result of surface movements in the period 1982–1991. The scale of the vector is the same as the topographic map (fragment of topographic map HANS GLACIER, 1:25 000, elaborated after aerial photos taken in 1990). The last digits of the name surveyed points mean the year of the observation. In the marginal part of the cliff, notable changes in direction of vectors are visible.



Rys. 10. Średnia powierzchniowa prędkość roczna lodowca Hans wyznaczona z sumarycznych wypadkowych wektorów ruchu kilkuletniego dla 33 reprezentatywnych punktów obserwowanych w okresie 1982-1991. Z analizy odrzucono informacje o punktach w bezpośrednim sąsiedztwie klifu.

Fig. 10. Hans Glacier – mean annual surface velocity determined as summary resultant of several year movement vectors for 33 measured points in the period 1982-1991. Results for the points situated close to the cliff were rejected.

Tabela 5. Średnie wielkości dobrego ruchu powierzchniowego [$\text{cm} \cdot \text{d}^{-1}$] strefy marginalnej lodowca Hans wyznaczone z obserwacji dobowych, tygodniowych i rocznej w 1982 i 1983 roku. Table 5. Marginal zone of Hans Glacier – the mean value of daily surface movements [$\text{cm} \cdot \text{d}^{-1}$] determined from daily, weekly and annual observations during the 1982 and 1983.

Data porównawczych cykli pomiarowych	16-25.08.1982 10 dni	29.06-6.08.1986 18 dni	16.08.1982-10.08.1983 360 dni
Część brzegowa zach.	0-6	0-4	1-5
Część centralna	6-20	8-14	7-19
Część brzegowa wschodnia	0-7	0-6	0-11

4. W bezpośrednim sąsiedztwie czoła kierunki wektorów ruchu są różne, odmienne od kierunku wytyczonego przez linię centralną. Zmiany kierunku wektorów występują okresowo także w innych partiach lodowca.

3.3. Określenie względnych zmian miąższości lodowca

Metoda bezpośredniego pomiaru jest najczęściej stosowanym przez glaciologów sposobem pozyskiwania danych ujmujących względne zmiany miąższości pokryw



Rys. 11. Graficzne wyniki pomiaru ruchu powierzchniowego strefy czołowej lodowca Hans, mierzonego w interwałach jednodniowych (pozycje A, B, C i D) od 16 do 19 sierpnia 1984 roku. Cały wektor (pozycja E) ilustruje ruch strefy czołowej w okresie 12 dni (do 28 sierpnia). Wykorzystano mapę podkładową – fragment autorskiego opracowania topograficznego HANS GLACIER [U. Śl., 1994], która przedstawia stan lodowca z roku 1990. Z tego powodu wektory ruchu z roku 1984 znalazły się poza zasięgiem lodowca w 1990 roku.

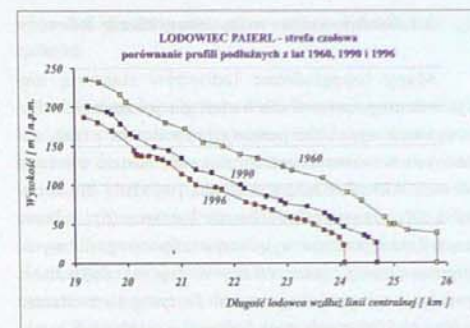
Fig. 11. Hans Glacier – the graphical results of surface movement of marginal zone in August 1984. The letter A, B, C and D show the position of the measured point day after day (from Aug. 16th to 19th). The end of vector (E) indicates position of this point after twelve days (up to Aug. 28th). The map used (HANS GLACIER) was elaborated after aerial photos taken in 1990 – that is why the vectors of movements from 1984 are outside the ice.

lodowych, zwykle wzdłuż wybranych linii profili podłużnych. Dokonuje się go mierząc odcinek między wierchołkiem wierzchołkowej (wtopionej lub wbitej) uprzednio w lodowiec tyczki, o znanej długości, a powierzchnią śniegu (lodu) na lodowcu. Pomiar taki wykonywany okresowo, przed okresem akumulacji, w czasie jego trwania i po zakończeniu procesu ablacji, dostarcza informacji niezbędnych do określenia bilansu masy lodowca. Najcenniejsze są, gdy prowadzi się je przez wiele lat. Pomiar taki, zwłaszcza na dużych obszarach, są uciążliwe (zwłaszcza latem), a często niebezpieczne. Pomiar bilansu masy wykonywany taką metodą, na odpowiedniej do powierzchni lodowca ilości tyczek,

są uważane za najbardziej dokładne. Bardziej nowatorskim wariantem technologicznym takiego pomiaru bezpośredniego może być wykorzystanie techniki GPS, która oprócz dostarczania informacji o zmianach współrzędnych X, Y, (ruch lodowca) może informować o aktualnych wysokościach bezwzględnych współrzędnej Z w ustalonym układzie odniesienia. Informacje tego typu mogą być pozyskiwane metodami pośrednimi, w tym także fotogrametrycznymi. Oprócz najzwyklejszego sposobu polegającego na sporządzeniu profilu podłużnego z dostępnych map, przeważnie sporządzanych metodami fotogrametrycznymi, (które nie są niestety tak często aktualizowane na terenach glacialnych) można wykorzystywać dostępne zdjęcia lotnicze lub wykonywać doraźnie, dla mniejszych obszarów, zdjęcia terrofotogrametryczne. Próba taka, polegająca na sporządzeniu numerycznego modelu fragmentu kopuły lodowej Amundsenisen ze zdjęć terrofotogrametrycznych i porównaniu go z numerycznym modelem odtworzonym z rysunku warstwicowego mapy sporządzonej ponad 50 lat wcześniej, była wykonana w trakcie opracowywania materiałów wyprawy na Spitsbergen w 1990 roku (Kolondra, 1991), (Kolondra, i in., 1994). Metoda może dostarczyć informacji o zmianach powierzchniowych (odróżnieniu od punktowych w bezpośrednim pomiarze klasycznym) poprzez prosty sposób określenia zmiany objętości masy lodowca na badanej powierzchni. Przytaczając wyniki ostateczne wspomnianych wyżej publikacji można stwierdzić, że w okresie od sierpnia 1934 roku do kwietnia 1990 roku na powierzchni 1 km^2 (ograniczonej współrzędnymi „starego” układu G-K :

$$\begin{aligned} X_{\min} &= 80\,000 \text{ m} & X_{\max} &= 81\,000 \text{ m} \\ Y_{\min} &= 115\,000 \text{ m} & Y_{\max} &= 116\,000 \text{ m} \end{aligned}$$

ubytek objętości masy lodowca (plateau Amundsenisen) wyniósł: $16,78 \text{ mln m}^3$, co po uwzględnieniu różnic średniej gęstości śniegu (z tytułu różnej pory wykonania zdjęć) oraz średniej wielkości ablacji letniej daje równowartość ok. $10-12 \text{ m}$ obniżenia powierzchni w tym rejonie. Wspomniana wyżej metoda określenia zmian wysokościowych powierzchni lodowców poprzez sporządzenie profili podłużnych – z istniejących opracowań



Rys. 12. Zmiany miąższości strefy czołowej lodowca Paierl w okresie 1960-1990-1996. Dane dla lat 1960-1990 zaczerpnięto z map topograficznych w skali 1:25 000 opracowanych ze zdjęć lotniczych (IGF PAN, red. Barna i in., 1987) oraz (U.Śl. – red. Jania, Kolondra, 1992). Dane z roku 1996 pozyskane zostały w wyniku obróbki materiałów (Kolondra, Jania, 1998) pozyskanych metodą altimetrii laserowej z pulapu lotniczego w kwietniu 1996 roku przez NASA. Wyniki dokumentują zmiany grubości w strefie czołowej lodowca rzędu $1,6 \text{ m} \cdot \text{rok}^{-1}$ w okresie 1960-1990 oraz ok. $2,8 \text{ m} \cdot \text{rok}^{-1}$ w okresie 1990-1996. Recesję lodowca potwierdzają zmiany położenia jego klifu – 1250 m oraz 650 dla analogicznych okresów. Oznacza to znaczne przyspieszenie deklacji tego obszaru w ostatniej dekadzie XX wieku.

Fig. 12. Paierl Glacier – changes of the thickness of marginal zone in the periods 1960-1990-1996. Data for the years 1960 and 1990 were taken from the topographic maps at scale 1:25 000 (after aerial photos) – (IGF PAN, red. Barna, et al., 1987) and (U.Śl. – red. Jania, Kolondra, 1992). Data for 1996 were collected after elaboration (Kolondra, Jania, 1998) as a results from airborne laser altimetry carried by NASA on April 1996. The annual changes of ice thickness in marginal zone are ca. $1,6 \text{ m}$ in the period 1960-1990 and ca. $2,8 \text{ m}$ in the period 1990-1996. The recession of glacier is confirmed by changes position of its cliff – 1250 m and 650 m for the analogous periods.

kartograficznych w powiązaniu z innym sposobem pozyskiwania takich danych (altimetria laserowa z pulapu lotniczego) – została wykorzystana także do określenia zmian wysokości kilku lodowców regionu (Paierl, Mülbacher, austre Torell i Amundsenisen). Przykład wykorzystania takich danych dla wyznaczenia zmian miąższości lodowca Paierl zamieszczono w poniższym wykresie – rys. 12.

3.4. Średnioskalowe mapy topograficzne lodowców

Mapy topograficzne lodowców stanowią niezwykle istotny materiał dla badań glaciologicznych. Porównywanie wysokości powierzchni lodowca z map wykonanych w różnych latach pozwala śledzić ewolucję lodowca. Aktualne mapy stanowią podkłady dla zestawienia terenowych pomiarów na lodowcu (np. bilansu masy). Zatem precyzja wykonania map topograficznych, zarówno sytuacji, jak i rzeźby rzutu na dokładność wyników prac glaciologicznych. Dotyczy to zwłaszcza studiów nad bilansem masy lodowców, w których punktowe pomiary akumulacji i ablacji ekstrapoluje się na strefy wysokościowe lodowca, a ich powierzchnie oblicza się na podstawie map topograficznych. Podobnie, znajomość aktualnej powierzchni lodowca jest podstawą ze-

stawienia wyników radarowych badań miąższości lodu oraz pomiarów struktury termicznej (np. grubości warstwy lodu zimnego lub poziomu wody w lodzie o temperaturze punktu topnienia pod ciśnieniem). W odniesieniu do tych potrzeb glaciologicznych wniosłem czynny wkład w opracowanie i wydanie drukiem dwóch topograficznych map średnioskalowych 1:25 000 „HANS GLACIER” oraz kopuły śnieżnej „AMUNDSENISEN” (U.Śl., 1992, 1994). Opracowanie fotogrametryczne wykonane zostało jeszcze tradycyjną metodą analogową na przyrządzie stereofotogrametrycznym TOPOKART firmy C. Zeiss Jena. Mapy opracowano w „nowym”, przyjętym przez Norwegów na Svalbardzie, układzie odniesienia ED-50 oraz odwzorowaniu – UTM (południk osiowy 15° East Greenwich, słup 33, pas X). Zastosowano cięcie warstwicowe: 10 m dla obszarów ląd-



Rys. 13. Fragment autorskiej mapy topograficznej HANS GLACIER w skali 1:25 000 opracowanej na podstawie zdjęć lotniczych wykonanych w sierpniu 1990 roku przez Norweski Instytut Polarny.
Fig. 13. The fragment of topographic map of HANS GLACIER, at scale 1:25 000 processed from aerial photos taken by Norwegian Polar Institute in August 1990.

3.6. Kartowanie makro- mezo- i mikroform glacialnych

Kartowanie form powierzchni lodowca dla badania ich charakterystyki, rozmieszczenia i morfometrii wykonane było poprzez analizę przestrzenną na stereomodelach zdjęć lotniczych dla dwóch Lodowców: Hans i Werenskiöld (Kolondra, Pulina, 1998; Pulina i in., 1999). Podstawą kartowania form rzeźby powierzchniowej lodowca Hans, (rys. 3) oraz lodowca Werenskiöld była szczegółowa, stereoskopowa analiza modelu przestrzennego.

Zakładając *a priori*, minimalną wielkość odofotografowanego szczegółu powierzchni lodowca na ok. 0,020–0,030 mm (w skali zdjęcia lotniczego), można było oczekiwać poprawnej interpretacji pojedynczych detali (przede wszystkim studnie lodowcowe) o wielkości 1,0–1,5 m. Obiekty liniowe (szczeliny, potoki lodowcowe) o mniejszej szerokości (do ok. 60%) są także możliwe do zinterpretowania pod warunkiem poprawnej jakości fotograficznej obrazu. Podczas szczegółowej interpretacji modelu przestrzennego, połączonej z analizą zjawisk zachodzących na i pod powierzchnią lodowca, możliwym okazało się wydzielenie form rzeźby, których wcześniej na tej mapie nie zinterpretowano. Na Lodowcu Hansa, poczynając od form największych, do wyróżnienia były możliwe:

formy powierzchniowe:

granice zlewni powierzchniowej w strefie ablacyjnej lodowca:

- w centralnej części lodowca,
- w marginalnej części lodowca,
- w centralnej części lodowców bocznych,
- w marginalnej części lodowców bocznych,
- przy nunatakach;

duże depresje kriokrasowe:

- bez potoku powierzchniowego,
- z lokalną siecią hydrograficzną,
- z lokalną i tranzytową siecią hydrograficzną,
- ze zbiornikiem wodnym;

depresje kriokrasowe średniej wielkości:

- bez sieci hydrograficznej,
- ze studnią odprowadzającą lokalną sieć hydrograficzną,

wych oraz 5 m dla lodowców. Oprócz podstawowej treści, typowej dla opracowań topograficznych, mapy zawierają informacje glaciologiczne: położenie klifu lodowca, szczeliny lodowcowe, potoki supraglacialne, studnie lodowcowe, moreny oraz usytuowania pomiarowych stacji i punktów badawczych. Arkusz mapy „AMUNDSENISEN” obejmuje znaczną część terenu pomierzonego i opracowanego kartograficznie przez uczestników Polskiej Wyprawy Polarnej w 1934 roku – wydany został w 60 rocznicę tego wydarzenia z okolicznościową adnotacją. W niniejszej pracy prezentowany jest tylko fragment pierwszej z wymienionych map – rys. 13.

3.5. Wielkoskalowe opracowania małych fragmentów obszarów zlodowaczonych

Wielkoskalowe opracowania topograficzne obszarów zlodowaczonych niosą informacje ilościowe o sytuacji i rzeźbie terenu pokrytego lodowcami, strefy marginalnej, jak i peryglacialnego sąsiedztwa. Od precyzji wykonania tego typu opracowań fotogrametrycznych zależy wiarygodność ilościowej analizy zjawisk i procesów glacialnych. Opracowań takich obszarów w skalach od 1:500 do 1:5000 wykonałem kilkanaście. Większość z nich powstała jeszcze w manierze analogowej. Dwa z nich (wschodni stok pasma górskiego Wurmbrandegga oraz zachodni stok pasma Tsebysjovfiellet – Sørkapp), (Kolondra, 1979, 1980) oprócz rzutu poziomego posiadały także opracowane widoki w rzucie na płaszczyznę pionową prostopadłą do osi układu fotogrametrycznego. Unikalnym opracowaniem tego typu, wydanym drukiem jest mapa moreny czołowej lodowca Penck w skali 1:2000 (Komitet Międzynarodowej Współpracy Geofizycznej PAN, Wojskowa Służba Topograficzna, 1966). Na wzmiankę zasługują także, moim zdaniem, udane próby wykorzystania cyfrowych amatorskich aparatów fotograficznych do pozyskania zdjęć przydatnych do sporządzenia map niewielkich obszarów (np. pole należące na przedpolu lodowca, fragmenty terenu wysokogórskiego) opracowanych w skalach 1:500–1:2000. Więcej szczegółów zawiera praca doktorska (Kolondra, 2002).

- ze studnią odwadniającą lokalną i tranzytową sieć hydrograficzną;
- deprese kriokrasowe powyżej linii równowagi formy podziemne;
- otwory studni lodowcowych:
 - stwierdzone;
 - eksplorowane;
- podmorskie wypływy wód lodowcowych;
- źródła wód lodowcowych.

Na lodowcu Hans, spośród licznych typów mezo i makroform kriokrasowych wyróżniono przede wszystkim liczną generację depresji kriokrasowych. Podzielono je na depresje:

- duże (o średnicy > 0,8 km i powierzchni > 0,5 km²);
- średnie (o średnicy rzędu 0,4 km i powierzchni 0,2–0,5 km²); i
- pojedyncze (stanowią w większości strefy ponorowe dla potoków powierzchniowych lub powstały na drodze grawitacyjnej).

Wydzielono ich w sumie: 3 wielkie depresje, 9 średnich i 31 małych zagłębień. Przedstawiono również na mapie lokalizację studni lodowcowych. Lodowiec Weren-skiolod jest uboższy (niż lodowiec Hans) w makroformy, także mezoform jest mniej. Treść mapy lodowca Weren-skiolod została uzupełniona o dane z bezpośredniego pomiaru (Řehák, 1998) wykonanego nawigacyjnym odbiornikiem GPS, a dotyczącego położenia stwierdzonych czynnych i zasklepionych studni lodowych. Na całym obszarze lodowca zinventaryzowano aż 132 studni.

Przedstawiony inwentarz form o określonych cechach morfologicznych jest możliwy do identyfikacji nie tylko w trakcie bezpośrednich badań terenowych, ale również metodami teledetekcyjnymi (zdjęcia lotnicze, satelitarne). Pozwala to na kartowanie tych form zarówno na mapach średnioskalowych (np. 1:25 000), czy mapach o skalach mniejszych. Naniesienie na mapy topograficzne granic dużych form występujących w częściach ablacyjnych lodowców niewątpliwie wzbogaci takie mapy, na których dotąd przeważały puste powierzchnie. Opracowany przeze mnie szczegółowy inwentarz form kriokrasowych pozwala na sporządzenie map geomorfologiczno-hydrologicznych powierzchni lodowców. Rozmieszczenie depresji kriokrasowych i związa-

nych z nimi indywidualnych zlewni odwadnianych przez system drenażu wewnątrz- i podlodowcowego ma duże znaczenie w rozpoznaniu wielu zjawisk i procesów glacialnych. Ze wstępnych studiów nad mapą glacio-morfologiczną lodowca Hans wynika, iż taka analiza pozwoli na wyjaśnienie wielu zagadnień związanych z modelem odpływu wód roztopowych z powierzchni lodowca.

3.7. Numeryczne modele powierzchni lodowców i ich otoczenia

Numeryczny model terenu (NMT) znacznie poszerza możliwości i ułatwia wykonanie niezbędnych prac redakcyjnych podczas tworzenia mapy (generowanie rysunku warstwicowego z dowolnym cięciem i dowolnej skali oraz sporządzenia cieniowanego rysunku rzeźby przy wybranych parametrach oświetlenia). Ma też wielkie znaczenie, przy wykorzystaniu odpowiedniego oprogramowania, w szybszym przeprowadzeniu szeregu analiz numerycznych niezbędnych do kompleksowego, interdyscyplinarnego badania środowiska geograficznego. Proste czynności z obliczeniem spadku terenu, wyznaczeniem profilu podłużnego czy poprzecznego stają się jeszcze prostsze, zaś obliczenie objętości między dwoma odpowiednio określonymi powierzchniami (lub powierzchnią i płaszczyzną na danym obszarze), bądź np. wykonanie analiz związanych z nasłonecznieniem terenu z uwzględnieniem otaczającego horyzontu fizycznego w dowolnej porze roku i dowolnym okresie czasu są możliwe do precyzyjnego określenia przy znacznie mniejszym nakładzie pracy i nieporównywalnie krótszym czasie niż tradycyjnie. Numeryczny model terenu to zbiór informacji o powierzchni terenu w postaci zbioru współrzędnych X, Y, Z punktów (w różnym zapisie) wiernie ten teren opisujący poprzez:

- linie szkieletowe (grzbiety, ciekły);
- linie nieciągłości (urwiska, granice skarp);
- punkty charakterystyczne terenu (ekstrema lokalne);
- granice wyłączeń obszarów płaskich (morze, jeziora, zbiorniki wodne);
- granice wyłączeń obszarów o jednolitym spadku (szerokie rzeki);

– punkty rozproszone lub tworzące siatkę regularnych kwadratów wraz z algorytmem umożliwiającym odtworzenie kształtu powierzchni w określonym obszarze.

Najczęściej stosowanym obecnie sposobem pozyskiwania danych do NMT jest cyfrowa obróbka steromodelu na fotogrametrycznej stacji cyfrowej z wykorzystaniem funkcji automatycznej korelacji obrazu (bądź pod nadzorem obserwatora). Dokładność tak pozyskanego modelu jest najwyższa z dotąd stosowanych metod a szybkość, z jaką jest tworzony, też dotąd bezkonkurencyjna. Wynik automatycznego opracowania NMT musi jednak być poddany kontroli, gdyż współczesne systemy nie są niezawodne – w generowanych wartościach wysokości punktów mogą pojawić się błędy (nie zawsze usunięte na drodze wewnętrznej filtracji). Dokładność pozyskania danych wysokościowych metodą aerofotogrametryczną przy użyciu kamer normalno- i szerokokątnych (czyli dla formatu zdjęć 23 × 23 cm i stałej kamery $c_k = 300$ lub 152 mm, odpowiednio) zwykło się określać jako iloczyn wysokości lotu (nad terenem) oraz współczynnika k uzależnionego od stopnia trudności terenu i dokładności osnowy fotogrametrycznej.

$$M_{Z \text{ foto.}} = H_l \cdot k = c_k \cdot M_{sk} \cdot k$$

gdzie:

- $M_{Z \text{ foto.}}$ – śr. błąd pomiaru fotogrametrycznego współrzędnej Z,
- H_l – wysokość lotu nad terenem,
- c_k – stała kamery,
- M_{sk} – mianownik skali zdjęcia lotniczego,

k – współczynnik ustalony empirycznie przez wielu autorów i przyjmowany w wielkości:

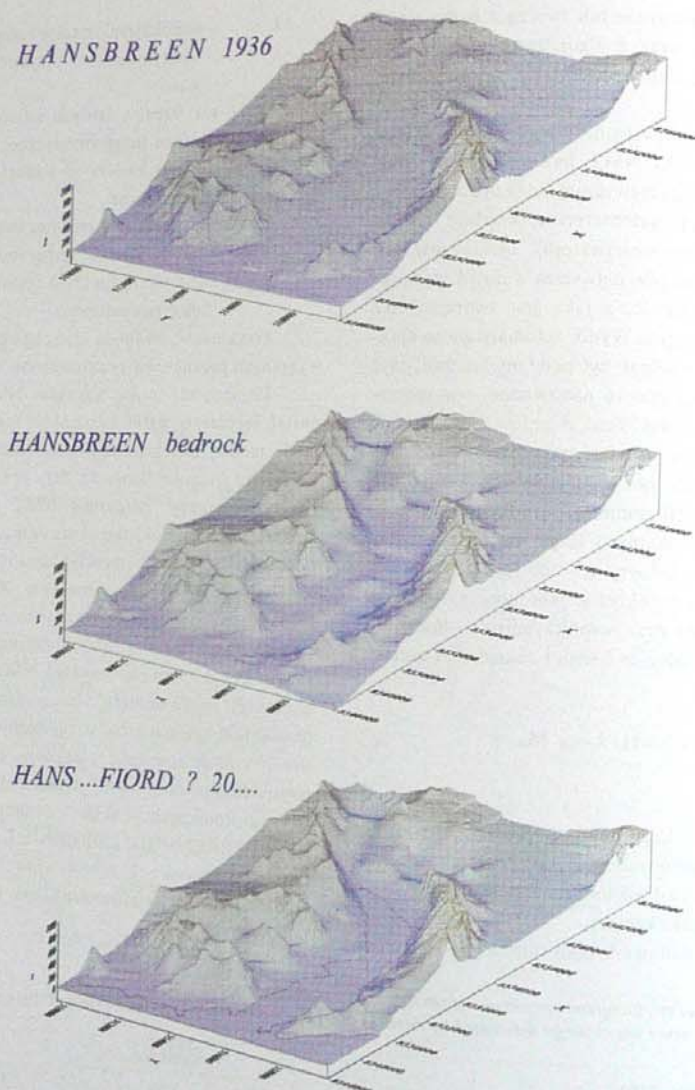
- 0,10% dla terenów łatwych i bardzo dokładnej osnowie fotogrametrycznej,
- 0,15% dla terenów łatwych i dobrej osnowie fotogrametrycznej,
- 0,20% dla terenów o średnim stopniu trudności i dobrej osnowie fotogrametrycznej,
- 0,30% dla terenów trudnych i poprawnej osnowie fotogrametrycznej.

Przykładowe wielkości średniego błędu $M_{Z \text{ foto.}}$ dla wybranych parametrów przedstawiono w tabeli 6.

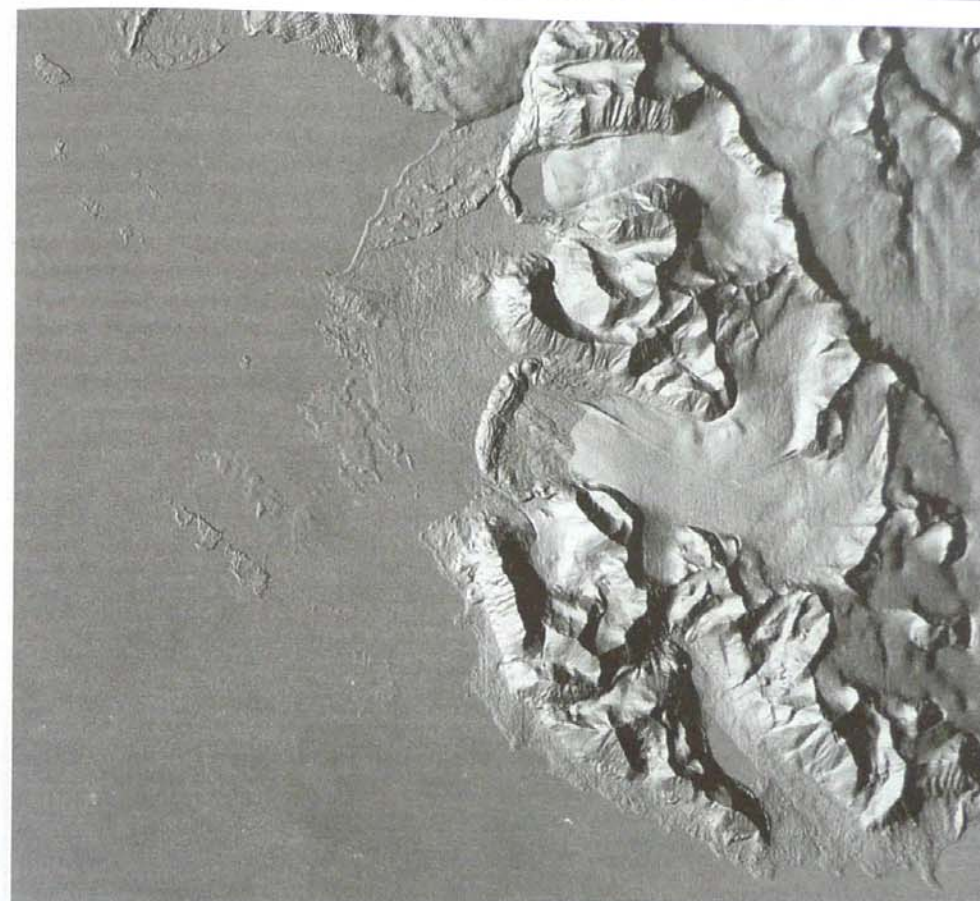
Generowany przez algorytm NMT może mieć postać regularnej siatki kwadratów (ang. GRID) lub dokładniejszej, nieregularnej siatki trójkątów (ang. TIN – Triangular Irregular Network). Przy opracowaniu cyfrowej ortofotomapy, znajomość NMT jest warunkiem koniecznym. Jego dokładność ma bezpośredni wpływ na poprawność procesu ortorektifikacji materiału źródłowego, podczas tworzenia ortoobrazu. Rys. 14 jest przykładem wizualizacji terenu z wynikami radiosondażu (Glazovski i in., 1991) oraz modelowaniem wyci czasowej. Rys. 15 stanowi przykład NMT w postaci cieniowanego reliefu obszaru, którego dane wysokościowe (ponad 700 tys. punktów w regularnej siatce kwadratów 20 × 20 m oraz linie szkieletowe i punkty charakterystyczne) zebrane zostały ze stereogramów barwnych IR zdjęć lotniczych w skali 1:50 000 w ramach projektu „WERENSKIOLDBREEN”. Dane te posłużyły do wygenerowania 7 ortoobrazów, z których sporządzona została ortofotomapa (rys. 16), (Jania, Kołondra, 2002).

Tabela 6. Średni błąd [m] fotogrametrycznego pomiaru wysokości w funkcji wysokości lotu.
Table 6. The mean errors [m] of height determined by means of photogrammetric methods as the function of flight altitude.

Stopień trudności terenu Jakość osnowy fotogrametr.	k [%]	Wysokość lotu [m]						
		500	750	1500	2500	3500	5000	7500
Teren łatwy, osnowa b. dobra	0,10	0,050	0,075	0,150	0,250	0,350	0,500	0,750
Teren łatwy, osnowa dobra	0,15	0,075	0,112	0,225	0,375	0,525	0,750	1,125
Teren średni, osnowa dobra	0,20	0,100	0,150	0,300	0,500	0,700	1,000	1,500
Teren trudny, osnowa dobra	0,30	0,150	0,225	0,500	0,750	1,050	1,500	2,250



Rys. 14. Numeryczne modele lodowca Hans i otoczenia: A – stan z roku 1936, wg mapy 1:50 000 [NPI Oslo, 1966]; B – podłoże lodowca witym ustąpieniu lodowca Hans.
 Fig. 14. DTM of Hans Glacier and surrounding areas: A – according to topographic map at scale 1:50 000 (from 1936 aerial photos), [NPI Oslo, 1966]; B – bedrock according to radio-echo-sounding taken in 1989 year and bathymetry; C – future vision of the bay after... total melting of glacier.



Rys. 15. Cieniowany relief numerycznego modelu terenu pozyskanego ze zdjęć lotniczych w skali 1:50 000 dla potrzeb projektu WERENSKIOLDBREEN.

Fig. 15. The shaded relief of DTM collected from the aerial photos taken at scale 1:50 000 in the project WERENSKIOLDBREEN.

Możliwości analityczne i wizualne NMT: poprawnie stworzony numeryczny model terenu – jaki musi być uprzednio opracowany, żeby powstała cyfrowa ortofotomapa – stwarza szereg możliwości przeprowadzenia analiz i obliczeń numerycznych. Prawdopodobnie zebrane informacje przestrzenne o terenie stwarzają w glaciologii ogromne możliwości ich wykorzystania w postaci:

- generowania izolinii o cięciu warstwicowym niemal dowolnym (pod warunkiem stworzenia poprawnego, o odpowiedniej szczegółowości NMT);
- wizualizacji perspektywicznych terenu (także wirtualnych) oraz różnorodnych widoków reliefu w postaci rysunku cieniowanego z „renderingiem” włącznie (nałożenie na blokdiagram widoku perspektywicznego powierzchni, jego naturalnych walorów tonalnych



Rys. 16. Lodowiec WERENSKIÖLD z otoczeniem – ortoobraz zmozaikowany z 7 barwnych IR zdjęć lotniczych.
Fig. 16. WERENSKIÖLD Glacier and surrounding areas – the orthomosaic mosaiced from 7 false color IR aerial photos.

pobrane z fotografii lotniczej lub satelitarnej) i wielu innych uzależnionych od potrzeb i możliwości programowych;

- przeprowadzenia analiz morfometrycznych rzeźby terenu i powierzchni lodowca o dużym stopniu dokładności (mapa spadków, mapa ekspozycji, wysokości względnych – amplitudy rzeźby);
- określenia powierzchni stref wysokościowych lodowca dla analiz hipsometrycznych oraz obliczeń powierzchniowego bilansu masy;
- zastosowanie powyższych map dla sporządzenia powierzchniowego modelu bilansu radiacyjnego całego lodowca;
- przeprowadzenia analiz mikrorzeźby powierzchni lodowca i otaczającego go terenu;
- przyrodniczej interpretacji treści tonalnej, której wyniki mogą być przedstawione w sposób kartometryczny na podkładzie ortofotomapy.

3.8. Cyfrowa ortofotomapa lodowców i ich otoczenia

Ortofotomapa jest kartometryczną, tonalną postacią zdjęcia lotniczego (lub zobrazowania satelitarne), przetworzonego z rzutu środkowego do projekcji ortogonalnej w określonej skali, w przyjętym układzie odniesienia. Dynamiczny rozwój sprzętu komputerowego i oprogramowania, a w ostatnich latach, także cyfrowych metod obróbki obrazów, znacznie wpłynął na wzrost ilości opracowań fotogrametrycznych, w tym także w zakresie pozyskiwania niezbędnych danych (elementy orientacji zdjęć i numeryczny model terenu – NMT) do tworzenia ortofotomapy. Dokładność cyfrowej ortofotomapy uzależniona jest przede wszystkim od dokładności NMT niezbędnego do przeprowadzenia procesu ortorektifikacji. Na dokładność położenia elementów sytuacyjnych ortofotomapy wpływają błędy wysokościowe NMT, skala ortofotomapy, stała c_k kamery

Tabela 7. Maksymalne błędy położenia elementów sytuacyjnych na ortofotomapie [mm] jako funkcja błędów wysokości NMT dla różnych skal i dwóch wielkości stałej kamery c_k .
Kolumny i wiersze, dla argumentów których błędy położenia są mniejsze lub równe 0,3 mm (dokładność graficzna mapy) zaznaczono grubą czcionką.

Table 7. Max. errors in situation of elements on an orthophotomap [mm] as function of DTM height errors with reference to various scales and a typical focal length of camera.

Columns and lines for which the position errors are equal or smaller than 0.3 mm (graphical accuracy of map) are in bold type.

Błąd wysok. NMT [m.]	Skala ortofotomapy									
	1:1000		1:2000		1:5000		1:10 000		1:25 000	
	Stała kamery c_k [mm]									
	152	300	152	300	152	300	152	300	152	300
0,5	0,5	0,2	0,2	0,1	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1,0	0,9	0,5	0,5	0,2	0,2	0,1	0,1	0,0	0,0	0,0
2,0	1,8	0,9	0,9	0,5	0,4	0,2	0,2	0,1	0,0	0,0
3,0	2,8	1,4	1,4	0,7	0,6	0,3	0,3	0,1	0,1	0,0
4,0	3,7	1,9	1,8	0,9	0,7	0,4	0,4	0,2	0,1	0,0
5,0	4,6	2,3	2,3	1,2	0,9	0,5	0,5	0,2	0,2	0,1
7,5	6,9	3,5	3,4	1,8	1,4	0,7	0,7	0,4	0,3	0,1
10,0	9,2	4,7	4,6	2,3	1,8	0,9	0,9	0,5	0,5	0,2
12,5	11,5	5,8	5,8	2,9	2,3	1,2	1,2	0,6	0,5	0,3
15,0	13,8	7,0	6,9	3,5	2,8	1,4	1,4	0,7	0,6	0,3
20,0	18,4	9,3	9,2	4,7	3,7	1,9	1,8	0,9	0,7	0,4

lotniczej. Orientacyjne wielkości błędów położenia elementów sytuacyjnych dla kilku typowych wartości wymienionych argumentów podaje tabela 7. Podane tam wielkości błędów są maksymalnymi – dotyczą partii ortorektyfikowanego zdjęcia w największym oddaleniu od punktu głównego (140 mm na zdjęciu formatu 23 × 23 cm) i zostały obliczone wg wzoru:

$$M_{\text{ort}} = r \cdot M_z / c_k \cdot M_{\text{ort}}$$

gdzie:

- M_{ort} – maksymalny błąd sytuacyjny na ortofotomapie w jej skali,
- r – maksymalny promień radialny ($r = 140$ mm),
- M_z – błąd wysokościowy punktu wykorzystanego NMT,
- M_{ort} – skala ortofotomapy,
- c_k – stała kamery lotniczej.

Na dokładność ortofotomapy mają wpływ także inne czynniki (błędy katowe elementów orientacji zewnętrznej i współrzędne środków rzutów przyjęte do procesu ortorektyfikacji oraz współczynnik przeskalowania, tzn. stosunek skali zdjęć do skali ortofotomapy). I tak, rozpatrując ortofotomapę w skali 1:10 000, opracowaną przy niższych założeniach mają:

- błąd wyznaczenia współrzędnych środków rzutu rzędu 10 m,
- błąd określenia kątów orientacji zewnętrznej ψ, ω, κ rzędu 3',
- współczynnik przeskalowania 5-krotny (przy wykorzystaniu zdjęć wykonanych bardziej „wrażliwą” na błędy kamerą normalnokątną ze stałą $c_k = 300$ mm, można stwierdzić, że największy błąd nie jest większy od 1,5 mm w najbardziej niekorzystnym przypadku, dla każdego z wymienionych czynników. Pełna analiza dokładnościowa jest dobrze znana i standardowo wykorzystywana (GUGiK, 2001), jednakże badaczom lodowców nie zawsze jest znana. Opracowanie cyfrowej ortofotomapy jest konkurencyjne pod wieloma względami (zwłaszcza ekonomicznym i czasowym), tak w stosunku do ortofotomapy wytwarzanej poprzednio metodą przetwarzania różniczkowego na specjalnych przystawkach do analogowych instrumentów fotogrametrycznych, jak i do tradycyjnej mapy topograficznej (tworzonej analogowo lub numerycznie).

Mapa topograficzna zawiera zgeneralizowany obraz terenu w postaci znaków umownych lub ustalonych w legendzie wydzieleni. Cyfrowa ortofotomapa wraz z niezbędnym do jej wytworzenia numerycznym modelem terenu oraz dodatkową treścią (hipsometria, toponomastyka) może być źródłem danych, w wielu dziedzinach badań środowiska geograficznego, jakich nie zawsze można się dopatrzeć na tradycyjnej mapie tematycznej. Ortofoto-mapa i NMT mogą być wykorzystywane na wiele różnych sposobów, na przykład dla ilościowego określania zmian zasięgu i objętości lodowców, a w połączeniu z sondowaniami radarowymi ich grubości i struktury wewnętrznej dla tworzenia pełnych trójwymiarowych modeli systemów lodowcowych.

Widząc niezaprzeczalne zalety fotogrametrycznego, cyfrowego opracowania topograficznego, w Katedrze Geomorfologii Uniwersytetu Śląskiego, przy współpracy Norsk Polarinstittut w Tromsø, podjęto prace nad wydaniem kolejnego arkusza serii map topograficznych (w skali 1:25 000) lodowców rejonu fiordu Hornsund ze zdjęć lotniczych wykonanych w 1990 roku. Przedmiotem zainteresowania był tym razem lodowiec Werenskiöld z najbliższym otoczeniem. Opracowanie (Kolondra, 2002a) zawiera skrótowy opis technologii i etapów opracowania mapy topograficznej oraz tworzonych ortofotomap lodowców Werenskiöld i Nann z ich szerokim otoczeniem, a także specyficznych form krioskowych związanych z tektoniką lodu na wschodnie morenie bocznej lodowca Hans. Opracowano obszar o powierzchni ponad 500 km² (łącznie z sąsiadującym otoczeniem szczytu Raudfjellet). Ortofoto-mapę w skali 1:25 000 (rys. 16) wydano drukiem (Jania, Kolondra, 2002). Zaletą cyfrowej postaci ortofotomapy, przy odpowiednio dobranej wielkości piksele terenowego, jest możliwość tworzenia ortofotomap pochodnych w nieco większej skali. Kilka takich ortofotomap (wyszczególnionych w p. 2) tego obszaru powstało w skalach 1:5000 oraz 1:10 000.

4. Fotogrametria czy inne metody?

Zagadnienie wykorzystania, aktualnie dostępnych, nowych technologii służących pozyskiwaniu danych w badaniach glaciologicznych pojawiało się w powyższych

rozważaniach parokrotnie. Jestem zagorzałym zwolennikiem stosowania metod fotogrametrycznych, ... ale tylko wszędzie tam, gdzie się one konkurencyjnymi wobec innych rozwiązań. Trzeba z pokorą, w pewnych uzasadnionych przypadkach, uznać wyższość nowych technologii i z nich korzystać. Poniżej, w sposób niemal hasłowy, zasygnalizowane zostaną możliwości wykorzystania nowych technologii do pozyskiwania danych o środowisku geograficznym.

4.1. Metody satelitarne

Sensory teledetekcyjne w jakie wyposażone są współczesne satelity działają w 5 zasięgach spektralnych promieniowania elektromagnetycznego wykorzystywanych przez niższe wymienione typy systemów, (w nawiasach zakres długości fali λ promieniowania):

- fotografia wielospektralna (0,4–1,5 μm),
- skanery wielospektralne (0,4–20 μm),
- skanery i radiometry termalne (8–14 μm),
- urządzenia mikrofalowe (1,0–1000 mm),
- systemy radarowe bocznego wybierania (0,6–5000 mm).

Bardziej szczegółowe informacje o aktualnie orbitujących satelitach i pracujących na nich detektorach można znaleźć w literaturze (np. Ciołkosz, Kęsik, 1989; Sitek, 1997), bądź na stronach internetowych właścicieli, bądź zarządzających agencji.

Skanery satelitarne posiadają możliwość rejestrowania szerokiego zakresu promieniowania elektromagnetycznego – od słabo „oświetlonych” ciemnych powierzchni mórz i oceanów, czy obu stref biegunowych po obszary pustynne lub zaśnieżone i obficie oświetlone charakteryzujących się dużym współczynnikiem albedo. Zalety cyfrowej, wizualnej korekcy obrazu poprzez modyfikację histogramu (czy komputerowych technik graficznych polegających na rozciąganiu kontrastu, wzmacnianiu krawędzi, wyostrażaniu, wygładzaniu i manipulowaniu skalą jasności) stwarzają dla analizującego zobrazowanie większe możliwości interpretacyjne (Sitek, 1997). Rozdzielczość zobrażeń satelitarnych mieści się obecnie w przedziale 0,6–250 m (i mniejsze). Wysokorozdzielcze zobrażenia nie są aktualnie dostępne dla

regionów okołobiegunowych (ze stałe orbitujących satelitów) z uwagi na brak w tych rejonach stacji odbioru.

Większość dostępnych zobrażeń satelitarnych charakteryzuje się rozdzielczością terenową od 15 do 250 m. Wielkości te dyktują zakres możliwości wykorzystania ich do określonych zadań badawczych. Zobrazowania takie są zwykle przydatne do interpretowania zjawisk na dużych obszarach czy rozległych obiektów z ich otoczeniem. Przykładów tego typu zobrażeń można mnożyć bez liku – temat pracy i szczupłość miejsca nie pozwala na ich szersze tutaj przedstawienie.

4.2. Altimetria laserowa z pulapu lotniczego

Jeden przykład wykorzystania danych pozyskanych z pulapu satelitarnego metodą altimetrii laserowej omówiono już w podrozdziale 3.3. W maju 1996 roku NASA wykonywała rejestracje profili podłużnych metodą altimetrii laserowej dla wybranych lodowców Spitsbergenu. Dwie z zaprojektowanych osi nalotów zostały wykonane „na życzenie” polskich badaczy, tak aby umożliwić określenie zmian wysokości wzdłuż profili pomierzonych techniką GPS w 1991 roku. Oś przebiegająca nad Amundsenisen idealnie korelowała z osią wyznaczoną przez punkty pomiarzone 5 lat wcześniej – zapewnione to zostało przez jednorodny układ współrzędnych stosowany w obu pomiarach. System lotniczego skaningu laserowego dostarcza danych o rzeźbie terenu (także jego pokryciu) poprzez kombinację i integrację danych z trzech zaawansowanych sensorów: dalmierza laserowego LRF (Laser Range Finder), odbiorników satelitarnego systemu GPS oraz inercyjnego systemu nawigacyjnego INS (Inertial Navigation System). Błąd określenia rzędnych wysokościowych terenu nie jest większy niż 10 cm. Pomiary tą metodą wykonywane są od ponad dziesięciu lat (Thomas, i in., 1995; Krabil, i in., 1995a, 1995b, 1999; Sohn, i in., 1998; Favay i in., 2000). Metoda ta jest konkurencyjną wobec metod aerofotogrametrycznych, tym bardziej że wyniki uzyskać można bardzo szybko, w zautomatyzowanym systemie. W przypadku otwartych przestrzeni arktycznych (bez żadnego pokrycia terenu) wyniki nie wymagają korekcy – filtracja danych (np. odbicia od przelatującego ptactwa) przeprowadzana jest automatycznie.



Rys. 17. Wizualizacja perspektywiczna terenu dla którego sporządzony był numeryczny model terenu oraz wygenerowana ortofotomapa („WERENSKIOLDBREEN and surrounding areas”). Nieporównanie większe, dynamiczne możliwości analizowania terenu, przy pozyskaniu w/w danych, stwarza technika komputerowa z odpowiednim do tego celu oprogramowaniem.

Fig. 17. Rendering of terrain model by means of orthophotomap on the example project „WERENSKIOLDBREEN and surrounding areas”. Computer technics with proper software give much more, dynamic possibility in collecting data and analyse 3-D model gives computer technics with proper software.

5. Wnioski

1. Metody fotogrametryczne są ważnym i nadal szeroko stosowanym sposobem pozyskiwania danych ilościowych w badaniach glaciologicznych. Dotyczy to zarówno fotogrametrii naziemnej, jak i lotniczej. Fotogrametria naziemna ma większe znaczenie dla regularnego, cyklicznego rejestrowania zmian małych obiektów (np. małe, strome lodowce górskie, lodowczyki, czoła i klify lodowców). Aerofotogrametria odgrywa dużą rolę przy sporządzaniu dokładnego numerycznego modelu terenu oraz wielko- i średnioskalowych map topograficznych oraz ortofotomap.
2. Przy wykorzystaniu standardowych zdjęć lotniczych (w przypadku Svalbardu: skala zdjęć 1:50 000 oraz stała kamery 152 mm) do wyznaczenia zmian wysokościowych powierzchni lodowców należy – uwzględniając możliwe do uzyskania finalne dokładności wpasowania stereomodeli w pomierzoną osnowę fotogrametryczną, oraz spodziewane (lub znane) przeciętne wielkości zmian geometrii badanych lodowców – tak zaplanować częstotliwość ponawiania nalotów, by

sumaryczna dokładność opracowania nie była większa od wielkości określanego w danym czasie zjawiska. Dla badanych lodowców Spitsbergenu, w ostatnim okresie, wielkości zmian hipsometrycznych powierzchni charakteryzowały się ubytkiem rzędu 1,5 m/rok. Możliwą do uzyskania dokładność wyrównania bloku aerotriangulacji dla współrzędnej wysokościowej oceniam na $\pm 1,0$ m. Uwzględniając możliwości interpretacyjne modelu oraz kłopoty z tym związane należy stwierdzić, że nie należy wykonywać (do tego celu) nalotów fotogrametrycznych częściej niż 2–3 lata.

3. Granice dokładności wyznaczenia dynamiki ruchu lodowców, przy wykorzystaniu zdjęć naziemnych i metody paralaks czasowych, zależą od wielu czynników (sposobu sygnalizacji badanych punktów, odległości fotogrametrycznej do badanego punktu, dynamiki lodowca). Dla uniknięcia błędnego ocenienia zjawisk dynamicznych zachodzących na lodowcu (spowodowanego interpretacją wyników obarczonych błędem większym od wielkości samego zjawiska), należy każdorazowo przeprowadzić wstępną analizę dokładnościową, uwzględniającą w/w czynniki w od-

niesieniu do konkretnych warunków (wielkości bazy fotogrametrycznej, kątów zwrotu zdjęć, skali określanego zjawiska, dokładności pomiaru paralaksy podłużnej).

4. Postęp technologiczny wprowadzony w ostatnich latach do kameralnych opracowań fotogrametrycznych (cyfrowa obróbka obrazu) stworzył możliwości szybkiego udostępniania nowego źródła danych o środowisku glacialnym w postaci cyfrowej ortofotomapy – znakomitego nośnika informacji, jakich nie można znaleźć na żadnej mapie topograficznej. Taka forma danych jest bardzo przydatna w studiach nad lodowcami i może być szeroko stosowana.
5. Szczególnie ważnym i wyjątkowym źródłem informacji (pozyskiwanych w komfortowych warunkach kameralnych) o badanym środowisku jest stereoskopowa analiza modelu przestrzennego na fotogrametrycznej stacji cyfrowej. Sposób ten nie wyklucza jednak zupełnie trudnych i często niebezpiecznych badań terenowych.
6. Numeryczny zapis wyników opracowania fotogrametrycznego ułatwia przeprowadzenie w sposób bardziej zautomatyzowany szeregu analiz, obliczeń, wizualizacji statycznych (rys. 17) oraz dynamicznych przy wykorzystaniu dostępnego oprogramowania.
7. Coraz łatwiej dostępne zobrażenia satelitarne pozyskiwane w różnych zakresach promieniowania elektromagnetycznego są ważnym i dobrym źródłem pozyskiwania danych w badaniach glaciologicznych i to nie tylko w skali makro. Wysokorozdzielcze zobrażenia stają się rywalem tradycyjnie pojmowanych metod fotogrametrycznych.
8. Przewaga metody InSAR (interferencyjna obróbka danych radarowych) nad innymi sposobami, np. fotogrametrycznymi polega na pozyskiwaniu jednorodnych danych o dynamice ruchu dla całej powierzchni lodowca lub znacznej jego części. Nie istnieją dla niej problemy z „white out” białych powierzchni lodowców, znane z analizy stereoskopowych zdjęć lotniczych; pod względem otrzymywanych dokładności, komfortu prac terenowych i czasu opracowania wyników jest bardzo wygodna. Posiada jednak pewne ograniczenia i uzależnienia (np. mogący się pojawić brak koherencji obrazów, krótki interwał czasowy zarejestrowanego ruchu, brak danych z powodu awarii satelitów, jak to miało miejsce np. z satelitą ERS-2).

Bibliografia

- Baranowski S., 1975, *Glaciological Investigations and Glaciomorphological Observations made in 1970 on Werenkiold Glacier and its Forefield*, [in:] *Results of Investigations of the Polish Scientific Spitsbergen Expeditions 1970–1974*, vol. 1, Uniwersytet Wrocławski, Wrocław, s. 69–94.
- Bukowska-Jania E., Jania J., 1988, *Zmiany geometrii czołowej części lodowca Werenkiold (Spitsbergen) w latach 1957–1983*, [w:] *Wyprawy Polarne Uniwersytetu Śląskiego 1980–1984, Prace Naukowe Uniwersytetu Śląskiego*, nr 910, Katowice, s. 64–91.
- Ciołkosz A., Kęsik A., 1989, *Teledetekcja satelitarna*. PWN, Warszawa, ss. 295.
- Dąbrowski S., Lipert C., 1984, *Dynamika lodowca Hansa (Spitsbergen Zachodni) w latach 1936–1980*, [w:] *Prace Instytutu Geodezji i Kartografii*, vol. 31, no 1, s. 71–80.
- Glazovskiy A. F., Kolondra L., Moskalevskiy M. Y., Jania J., 1991, *Issledovaniya prilivnogo lednika Hansa na Spitsbergenie*, [w:] *Materiały glaciologicznych issledovaniy*, no 71, 1991, s. 143–149, Moskwa, (item: *Resaerch into the Hansbreen, a Tidewater Glacier in Spitsbergen*, [in:] *Polar Geography and Geology*, vol. 16, no. 3, Moscow, 1992, p. 243–252).
- Główny Urząd Geodezji i Kartografii, 2001 – *Wyręczne Techniczne K-2. 8. Zasady wykonywania ortofotomap w skali 1:10 000*, Warszawa, ss. 65 (+1 mapa i krążek CD-R).
- Hagen J. O., Liestol O., Roland E., Jørgensen T., 1993, *Glacier Atlas of Svalbard and Jan Mayen*. Norsk Polarinstitut, Meddelelser, Nr 129, Oslo, pp. 141+23 maps.
- Instytut Geodezji i Kartografii (red. Dąbrowski i in., 1984a, *Spitsbergen, Polska Stacja Polarna w Hornsundzie mapa 1:5000*.

- Instytut Geodezji i Kartografii (pomiar połowy Miżerski W.), 1984b, *Mapa Polskiej Stacji Polarnej w Hornsundzie 1:500*.
- Instytut Geofizyki PAN, Służba Topograficzna W.P., Instytut Geodezji i Kartografii, (red.: Barna Sz., Warchol Z.), 1987, *Spitsbergen, 1:25 000 (10 arkuszy map topograficznych)*, Warszawa.
- Jania J., 1986, *Dynamika czoł spitsbergenskich lodowców uchodzących do morza*, Prace Naukowe Uniwersytetu Śląskiego, nr 800 (Geographia. Studia et dissertationes, T. 9), Katowice, s. 78–100.
- Jania J., 1987, *Interpretacja glaciologiczna zdjęć lotniczych otoczenia Hornsundu (Spitsbergen) na przykładzie Lodowców Körber i Peters*, (w:) Fotointerpretacja w Geografii, Tom IX (19), Prace Naukowe Uniwersytetu Śląskiego, nr 861, Katowice, s. 60–107.
- Jania J., 1988a, *Dynamiczne procesy glacialne na południowym Spitsbergenie*, Prace Naukowe Uniwersytetu Śląskiego w Katowicach, nr 995, Katowice, ss. 258.
- Jania J., 1988b, *Klasyfikacja i cechy morfometryczne lodowców otoczenia Hornsundu, Spitsbergen*, [w:] Wyprawy Polarne Uniwersytetu Śląskiego 1980–1984, Prace Naukowe Uniwersytetu Śląskiego, nr 910, Katowice, s. 12–47.
- Jania J., 1997, *Glaciologia*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa, (II wyd.), ss. 359+40 fot.
- Jania J., Hagen J. O. (Eds.), 1996, *Mass balance of Arctic Glaciers*, IASC Report, 5, Sosnowiec-Oslo, ss. 62.
- Jania J., Kolondra L., 1982, *Field investigations performed during the Glaciological Spitsbergen Expedition in the Summer of 1982*, Interim Report, Uniwersytet Śląski, Katowice, ss. 32+3 mapy.
- Jania J., Kolondra L., 1984a, *Frontal part of the werenskiöld Glacier – 1982, mapa 1:5000*, Okr. Przeds. Geodezyjno-Kartograficzne, Katowice, 1 arkusz (mała poligrafia).
- Jania J., Kolondra L., 1984b, *Frontal part of the Werenskiöld Glacier – 1983, mapa 1:5000*, Okr. Przeds. Geodezyjno-Kartograficzne, Katowice, 1 arkusz (mała poligrafia).
- Jania J., Kolondra L., 1988, *Fotogrametryczne kartowanie szczegółowe czołowej części Lodowca Werenskiöld w 1982 i 1983*, [w:] Wyprawy Polarne Uniwersytetu Śląskiego 1980–1984, Katowice, s. 123–141.
- Jania J., Kolondra L., Bukowska-Jania E., 1983, *Photogrammetric survey of glaciers*, [in:] *Field investigations performed during the Glaciological Spitsbergen Expedition in 1983*, Interim Report, Uniwersytet Śl., Katowice, s. 34–38+2 mapy+1 wkładka „Fugleberget Catchment” – mapa 1:10 000.
- Jania J., Kolondra L., Rudowski, S., 1986, *Annual activity of Hans Glacier, Spitsbergen as determined by photogrammetry and micro-tremors recording*, (abstract), [in:] *Proceedings of the Symposium on Glacier Mapping and Surveying held at the University of Iceland, Reykjavik, 26–29 August 1985*, Annals of Glaciology, vol. 8, Cambridge, p. 206.
- Jania J., Kolondra L., AAS, H. F., 2002, *Werenskiöldbreen and surrounding area, Orthophotomap 1:25 000*, Wydział Nauk o Ziemi Uniwersytet Śląski Sosnowiec and Norsk Polarinstittut, Tromsø, Sosnowiec.
- Kolondra L., 1979, *Wurmbrandegga – fragment wsch. stoku pasma, mapa 1:5000 i widok*, Okręgowe Przedsiębiorstwo Geodezyjno-Kartograficzne, Katowice, 1 arkusz (mała poligrafia).
- Kolondra L., 1980, *Tsjehysjovfiellet – fragment zach. stoku pasma, mapa 1:5000 i widok*, Okręgowe Przedsiębiorstwo Geodezyjno-Kartograficzne, Katowice, 1 arkusz (mała poligrafia).
- Kolondra L., 1984, *Ruch Lodowca Hansa (Spitsbergen) na podstawie okresowych pomiarów terrofotogrametrycznych*, Zeszyty Naukowe AGH, nr 998, seria Geodezja, Zeszyt nr 84, Kraków, s. 71–85.

- Kolondra L., 1985, *Field investigations performed during the Glaciological Spitsbergen Expedition in the summer of 1984*, Interim Report, Uniwersytet Śl., Katowice, ss. 32+8 zdjęć+7 wkłęk.
- Kolondra L., 1986, *Dorobek fotogrametryczny Wypraw Glaciologicznych Uniwersytetu Śl. na Spitsbergen (zarys) – [w:] Materiały II Sympozjum Polarne Stow. Geodetów Polskich*, Biuletyn Informacyjny Instytutu Geodezji i Kartografii, nr 4/86, Warszawa, s. 48–56+8 wkłęk.
- Kolondra L., 1991, *Fotogrametryczne wyznaczenie zmian powierzchni centrum zlodowacenia pld. Spitsbergenu w okresie 1934–1990*, [w:] *Materiały Sympozjum z okazji 60-lecia Polskiego Towarzystwa Fotogrametrycznego*, Warszawa, s. 85–93.
- Kolondra L., 2000, *Prace i dorobek polskich fotografów w Arktyce (1934–2000) – Materiały Ogólnopolskiego Sympozjum Naukowego nt. „Fotogrametria, teledetekcja i GIS u progu trzeciego tysiąclecia”*, Archiwum fotogrametrii, kartografii i teledetekcji, vol. 10, Kraków, s. 47.1–47.14 (+25 zdjęć w wersji CD).
- Kolondra L., 2002a, *Cyfrowa ortofotomapa – nowa forma danych kartograficznych w badaniach glaciologicznych (na przykładzie Lodowców Werenskiöld i Nann – S Spitsbergen)*, *Materiały XXVIII Międzynarodowego Sympozjum Polarne nt. Funkcjonowanie i monitoring geosystemów obszarów polarnych*, Poznań, 15–16.03.2002, [w:] *Polish Polar Studies*, s. 173–186.
- Kolondra L., 2002b, *Problemy fotogrametrycznego pozyskiwania danych w badaniach glaciologicznych (studium metodyczne na przykładzie Spitsbergenu)*, praca doktorska, Uniwersytet Śląski, Wydział Nauk o Ziemi, Sosnowiec, ss. 166+3 mapy.
- Kolondra L., Głowacki P., Jania J., Pulina M., 1994, *Elevation changes of the Amundsenisen Surface (Large Icefield in South Spitsbergen) and elements of its Mass Balance*, (abstract), Workshop on Mass Balance of Arctic Glaciers, Wisła, Poland, s. 11.
- Kolondra L., Pulina M., 1998, *Charting of surface relief forms of polar glacier on the example of the Hans Glacier (Fiord Hornsund, Spitsbergen)*, [w:] *Wyprawy Geograficzne na Spitsbergen, Materiały IV Zjazdu Geomorfologów Polskich*, Lublin 3–4.06.1998, s. 59–70+1 mapa.
- Kolondra L., Jania J., 1998, *Changes of longitudinal profiles of Large Glaciers in Southern Spitsbergen based on the Airborne Laser Altimeter*, P. Głowacki & J. Bednarek (Eds.), *25th International Polar Symposium*, [w:] *Polish Polar Studies*, Warszawa, Institute of Geophysics of Polish Academy of Sciences, Warszawa, s. 273–277.
- Komitet Międzynarodowej Współpracy Geofizycznej PAN, Wojskowa Służba Topograficzna, 1966 – red. T. Naumienko, oprac. Lipert i in., *Lodowiec Pencka, morena czołowa. Mapa 1:2000*, W. Z. Kart. – Warszawa.
- Krabill W., Thomas R., Jezek K., Kuivinen K., Manizade S., 1995a, *Greenland ice sheet thickness changes measured by laser altimetry*, *Geophysical Research Letters*, vol. 22, no. 17, p. 2341–2344.
- Krabill W., Thomas Martin C. F., Swift R. N., Frederick, E. B., 1995b, *Accuracy of Airborne Laser Altimetry over the Greenland ice sheet*, *International Journal Remote Sensing*, vol. 16, no. 7, p. 1211–1222.
- Krabill W., Frederick E., Manizade S., Martin C., Sonntag J., Swift R., Tomas R., Wright W., Yungel J., 1999, *Rapid thinning of parts of the Southern Greenland ice sheet*, *Science*, vol. 283, p. 1522–1524.
- Lipert C., 1961, *Lodowiec Werenskiöld 1:5000 – Strefa czołowa*, Wojskowa Służba Topograficzna, Warszawa, 2 arkusze.
- Mechliński Z., 1979, *Mapa rzeźby strefy marginalnej Lodowca Werenskiöld 1:5000*, Instytut Geofizyki PAN, Okręgowe Przedsiębiorstwo Geodezyjno-Kartograficzne w Szczecinie, 2 arkusze.

Norsk Polarinstitutt, 1953–1994, *Topografisk kart over Svalbard*, 1:100 000, Blad: B12 Torrelbreen, C12 Markhambreen, C13 Sörkapp.

Norsk Polarinstitutt, 1966, *Topografisk kart over Svalbard*, 1:50 000, Blad: D12, E12, F12, E13.

Norsk Polarinstitutt, 1936, 1960, 1961, 1990, *Zdjęcia lotnicze Spitsbergenu w skali 1:50 000*.

Norsk Polarinstitutt, 1991, *The Place-names of Svalbard*, (Reprint: Skrifter om Svalbard og ishavet. Nr 80, Editor Adolf Hoel, Oslo, 1942., pp. 540+supplement 1: Skrifter nr 112, Editor: Anders K. Orvin), Oslo.

Pulina M., Kolondra L., Řehák J., 1999, *Charting of cryocart forms on Werenskiöld Glacier (SW Spitsbergen)*, XXVI Polar Symposium, [w:] Polish Polar Studies, Lublin, s. 235–241+1 mapa.

Řehák J., 1998, *Ledovec Werenskiöld – pracovní verze*, Mapa w skali 1:5000 (wersja robocza) oraz dane analityczne. Materiały nie publikowane (zbiór *.dwg oraz dane tabelaryczne).

Sohn H.-G., Jezek K. C., van der Veen C. J., 1998, *Jakobshavn Glacier, West Greenland: 30 Years of Spaceborne Observations*, [in:] Geophysical Research Letters, vol. 25, no. 14, p. 2699–2702.

Sitek Z., 1997, *Wprowadzenie do teledetekcji lotniczej i satelitarnej*, Wydawnictwa AGH, Kraków, ss. 331.

Thomas R., Krabill W., Frederick E., Jezek K., 1995, *Thickening of Jakobshavn Isbrae, West Greenland, measured by Airborne Laser Altimetry*, Annals of Glaciology, 21, p. 259–262.

Uniwersytet Śląski – Katowice, Université du Québec – Montreal, Norsk Polarinstitutt – Oslo, 1992, (red. Jania J., Kolondra L., Schroeder J.), *Hans Glacier 1:25 000, Topographic Map*, Department of Geomorphology, University of Silesia, Sosnowiec.

Uniwersytet Śląski, Katowice, Norsk Polarinstitutt, Oslo, 1994, (red. Jania J., Kolondra L., Hagen J. O.),

Amundsenisen 1:25 000, Topographic Map, Department of Geomorphology, University of Silesia, Sosnowiec.

Zagrajski S., Zawadzki A., 1935–1936, *Prace geodezyjne polskiej wyprawy polarnej na Spitsbergen w 1934 roku*, Wiadomości Służby Geograficznej, zeszyt 1–2 z roku 1935 i zeszyt 1 z roku 1936.

Zagrajski S., Zawadzki A., 1936, *Polska wyprawa na Spitsbergen 1934 – Prace geodezyjne i kartograficzne*, Biblioteka Służby Topograficznej, T. 16, Wojskowy Instytut Geograficzny, Warszawa, ss. 102+2 mapy.

Summary

Recently there has been a considerable technological progress covering many spheres of science and technology. This includes also methods of gathering data about natural environment. Remote sensing methods still give a lot of information which two decades ago were impossible to obtain. New technologies of digital data processing make it possible to automatize earlier time-consuming and laborious activities in the process of photogrammetric elaborations.

The author – photogrammetry specialist – basing on his own works carried out during 7 glaciological expeditions to Spitsbergen and over 30 year long experience gathered during other works concerning glaciological investigations in this region tries to answer the question whether photogrammetry may still be a reliable source of information in glaciology. The work includes the results of measurements of typical objects and phenomena studied by glaciologists:

- glacier cliff and changes of its limits,
- glacier front and changes of its limits,
- large firn fields and changes of their geometry

(thickness),

– the value of surface movement of a glacier in different time periods,

- glacial macro-, meso-, and microforms,
- permanent snow fields and glacierets.

The results of glacier geometry measurements are necessary to define the so-called mass balance. The results reveals that during the last 25 years all the investigated glaciers in the area of Hornsund fiord show negative mass balance. Together with the ice loss due to glacier calving, a considerable deficit of accumulation in mass balance is visible. The consequence of long-lasting negative mass balance of nearly all the glaciers in the area studied is their clear recession during the 20th century, which was recorded mainly using photogrammetric methods.

Basing on the results of other works (DTM, digital orthophotomaps and new possibilities they create) and new remote sensing techniques (high resolution, radar images with interference processing) the author concludes that modernized photogrammetry and its new competitor may be complementary to each other. It should be stressed that photogrammetry is still a reliable source of information in glaciological investigations.

ZDZISŁAW KURCZYŃSKI¹

SYNERGIA SYSTEMÓW OBRAZOWANIA POWIERZCHNI ZIEMI

Słowa kluczowe:

systemy obrazowania Ziemi, kamera cyfrowa, VHRS, potencjał kartograficzny, zdolność rozdzielcza

Abstrakt

Opracowania fotogrametryczne przez dziesięciolecia bazowały na tradycyjnych zdjęciach lotniczych. Sytuacja ta ulega gwałtownej zmianie w ostatnich latach. Staje się tak za sprawą pojawienia się nowych technicznych środków obrazowania Ziemi, a mianowicie lotniczych kamer cyfrowych oraz wysokorozdzielczych obrazów satelitarnych, o potencjale kartograficznym porównywalnym z potencjałem drobnoskalowych zdjęć lotniczych. Nastąpiło więc zbliżenie – pod względem technicznym – możliwości obrazowania z pułapu lotniczego i satelitarnego.

W opracowaniu zaproponowano system pojęć oraz wskaźników ilościowych dla oceny potencjału kartograficznego wieloźródłowych danych, tj. tradycyjnych zdjęć lotniczych, obrazów cyfrowych pozyskiwanych lotniczymi kamerami cyfrowymi oraz obrazów satelitarnych o bardzo dużej rozdzielczości. Umożliwiło to porównanie danych wieloźródłowych oraz dało podstawę oceny przydatności konkretnych zdjęć i obrazów dla realizacji postawionych zadań pomiarowych.

Podjęta w pracy problematyka ma praktyczne odniesienie do obecnych uwarunkowań rozwoju krajowych systemów GIS oraz ich dalszych perspektyw.

SYNERGY OF EARTH SURFACE IMAGING SYSTEMS

Key words:

Earth surface imaging systems, digital camera, VHRS, cartographic potential, resolution

Abstract

For a long time, photogrammetric projects were based on conventional aerial photographs. This situation has been rapidly changed recently. This results from development of new Earth surface imaging systems, including aerial digital cameras and high resolution satellite images, which cartographic potential is comparable with small scale aerial photographs. Thus, from the technical point of view, imaging possibilities from satellite platforms are approaching those of aerial ones.

The discussed publication proposes a system of terms and quantitative indices which can be used for evaluation of the cartographic potential of multi-source data, i.e. conventional aerial photographs, digital images acquired with aerial digital cameras and very high resolution satellite images. This allowed for comparing various systems and became the basis for evaluation of the usefulness of particular photographs and images for implementation of specified measurement tasks.

Issues discussed in the publication may be practically referred to the existing conditions of national GIS systems development as well as to their future perspectives.

¹ Politechnika Warszawska, Wydział Geodezji, Instytut Fotogrametrii i Kartografii, Warszawa.

I. Wprowadzenie

Rozwój technik obrazowania Ziemi, a w ślad za tym i rozwój metod opracowania i zastosowań pozyskanych obrazów szedł w ostatnich dziesięcioleciach w dwóch, wyraźnie rozłącznych kierunkach:

- fotografowanie lotnicze, głównie dla zastosowań topograficznych (mapy, ortofotomapy, Numeryczny Model Terenu (NMT)) i w mniejszym stopniu dla zastosowań interpretacyjnych,

- obrazowanie satelitarne (i w znacznie mniejszym stopniu fotografowanie satelitarne), głównie dla monitorowania zjawisk zachodzących na powierzchni globu, wizualizowane w formie map tematycznych drobnego i średnioskalowych, ilustrujących obiekty i zjawiska będące przedmiotem zainteresowania. Rozwój technik obrazowania satelitarnego i metod opracowania doprowadził do powstania i rozwoju teledetekcji satelitarnej – z czasem samodzielnej dyscypliny naukowej i aplikacyjnej.

Zgodnie z dotychczasową tradycją i praktyką kształcono dwie grupy specjalistów, wykorzystujących zdjęcia lotnicze i obrazy satelitarne dla różnych zastosowań:

- fotografometrów wykorzystujących zdjęcia lotnicze dla zastosowań pomiarowych, tworzących na ich bazie takie produkty, jak NMT, ortofotomapy czy mapy wektorowe,

- specjalistów interpretacji i teledetekcji zorientowanych na ekstrakcję informacji jakościowych z obrazów, tj. na interpretacyjne zastosowania, owocujące tematycznymi opracowaniami.

Specjaliści z obu grup działają zwykle oddzielnie i wywodzą się z różnych środowisk akademickich i zawodowych. Rozłączność ta jest często większa, niż by to było uzasadnione merytorycznie.

Obecny etap rozwoju wyraźnie pokazuje, że powyższy podział na kierunek pomiarowy i interpretacyjny przestaje być adekwatny do rzeczywistości. Następuje scalenie dotychczas rozbieżnych technik i pułapów, z których obrazowana jest Ziemia. Ta unifikacja dotyczy:

- technicznych środków obrazowania (kamery analogowe, kamery cyfrowe, inne niefotograficzne techniki obrazowania),

- pułapów obrazowania (pułap lotniczy i satelitarne),

- zakresów spektralnych obrazowania (zakres panchromatyczny i wielospektralny).

W zakresie lotniczego i satelitarnego obrazowania powierzchni Ziemi w ostatnich kilku latach zaistniała jakościowo nowa sytuacja. Proces tych zmian trwa nadal. Ta nowość przejawia się w kilku trendach:

1. Zaistnienie w 1999 r. komercyjnych satelitarnych systemów obrazowania powierzchni Ziemi o bardzo dużej rozdzielczości (określane również VHRS – Very High Resolution Satellites – satelity bardzo dużej rozdzielczości, lub jako systemy „metrowe”, tj. z pikselem zbliżonym do 1 metra lub mniej). Zapowiadany jest rozwój tych systemów idący m.in. w kierunku dalszego zwiększania rozdzielczości. Zdolność rozdzielcza tych systemów zbliżyła się do rozdzielczości tradycyjnych zdjęć lotniczych, a w zakresie zdjęć drobnoskalowych nastąpiło zrównanie rozdzielczości. Stworzyło to całkowicie nową sytuację współistnienia i konkurencji danych obrazowych z pułapu lotniczego i satelitarnego.

2. Pojawienie się na rynku po 2000 r. lotniczych kamer cyfrowych. Kamery te powoli wchodziły na rynek obrazowania z pułapu lotniczego i będą wypierać tradycyjne kamery fotografometryczne na film zwojowy.

Znamienną cechą lotniczych kamer cyfrowych i systemów satelitarnych dużej rozdzielczości są techniczne możliwości jednoczesnego obrazowania w kilku zakresach spektralnych z podczerwienią termalną włącznie. Rozwiązanie takie pod względem technicznym góruje nad równoczesnym wykorzystaniem wszystkich typów emulsji stosowanych w fotografowaniu lotniczym: czarno-białej panchromatycznej, czarno-białej w podczerwieni, barwnej w barwach rzeczywistych i barwnej w podczerwieni. Separacja zakresów spektralnych (barw), zakres dynamiczny i rozdzielczość radiometryczna obrazowania cyfrowego (lotniczego i satelitarnego) znacznie przewyższają możliwości tradycyjnych filmów zwojowych. Ma to zasadnicze znaczenie dla zastosowań tych obrazów do opracowań interpretacyjnych i tematycznych. Obrazy takie – pod względem technicznym – w jednakowym stopniu spełniają wymagania

zarówno opracowań o charakterze pomiarowym, jak i potrzeb teledetekcji.

Wprowadzone rozwiązania umożliwiają zaspokojenie potrzeb związanych ze wzrostem zapotrzebowania na informację obrazową i gwałtownym rozwojem różnych aplikacji Systemów Informacji Geograficznej – GIS (GIS – Geographical Information System).

Zapoczątkowana nowa sytuacja w zakresie obrazowania lotniczego i satelitarnego rodzi wiele pytań natury technicznej, ale również pytań o skutki ekonomiczne dalszego rozwoju technik obrazowania i opracowania danych obrazowych. Na rynku usług fotolotniczych i fotografometrycznych budzi to nawet pewne zaniepokojenie o najbliższą przyszłość. Te pytania i wątpliwości wynikają również z braku jasnych i powszechnie akceptowalnych podstaw umożliwiających ocenę potencjału pomiarowego i interpretacyjnego każdego z trzech głównych, dostępnych obecnie źródeł obrazowania, umożliwiających porównanie i ocenę przydatności danych dla realizacji konkretnych zadań pomiarowych. Można tu wskazać m.in. następujące zasadnicze kwestie natury technicznej dotyczące:

- porównania jakości geometrycznej i interpretacyjnej obrazów pozyskanych lotniczymi kamerami cyfrowymi ze zdjęciami tradycyjnymi,

- oceny perspektyw zastąpienia tradycyjnych kamer przez kamery cyfrowe,

- oceny potencjału pomiarowego i interpretacyjnego obrazów satelitarnych o bardzo dużej rozdzielczości i porównania tego potencjału ze zdjęciami lotniczymi.

Na powyższe pytania natury technicznej nakładają się wątpliwości środowiska geoinformatycznego dotyczące zapotrzebowania na zdjęcia i obrazy z pułapu lotniczego w świetle zaistnienia obrazów satelitarnych o bardzo dużej rozdzielczości oraz konsekwencji technicznych i ekonomicznych powstałych w wyniku wprowadzenia do produkcji cyfrowych obrazów lotniczych i satelitarnych.

Przedstawiona sytuacja zmienia się dynamicznie, pojawiają się różne oceny przedstawionych problemów i różne scenariusze ich rozwoju. Znamienna jest rozbieżność ocen dotyczących potencjału kartograficznego wysokorozdzielczych obrazów satelitarnych i porównania tego potencjału ze zdjęciami lotniczymi. To zróżnicowanie

oceny może po części wynikać z braku doświadczeń produkcyjnych wykorzystania nowych źródeł obrazowania powierzchni Ziemi oraz braku uporządkowanych pojęć umożliwiających porównywanie wieloźródłowych danych obrazowych. Nie bez wpływu na tę sytuację są działania firm komercyjnych promujących nowe produkty, wzmagające „szum” informacyjny wokół przedstawionych kwestii.

Przedstawione problemy stały się bardzo aktualne również w kraju. Wynika to z pewnych opóźnień w pokryciu powierzchni kraju takimi podstawowymi produktami, jak Numeryczny Model Terenu, cyfrowa ortofotomapa czy wektorowa mapa numeryczna. Trwają obecnie intensywne prace w tym zakresie. Tworzona jest ortofotomapa o zasięgu krajowym dla potrzeb Systemu Identyfikacji Działek Rolnych – LPIS, składowej Zintegrowanego Systemu Zarządzania i Kontroli – IACS (LPIS – Land Parcel Identification System, IACS – Integrated Administration Control System), wdrażana jest Baza Danych Topograficznych (TBD), w perspektywie czekają prace nad modernizacją katastru. Uruchomiono Centrum Operacji Regionalnych – ROC dla odbioru i obróbki obrazów satelitarnych (tzw. Stacja ROC – Regional Operations Centre). W tej sytuacji nie może dziwić, że rozważane są różne scenariusze techniczne realizacji pilnych bieżących i przyszłych zadań na poziomie ogólnokrajowym.

Postęp w zakresie obrazowania cyfrowego z pułapu lotniczego oraz zaistnienie satelitarnych systemów o bardzo dużej rozdzielczości (tj. zbliżonej do 1 m w zakresie panchromatycznym) powodują, że – w kategoriach technicznych – nastąpiło zbliżenie i częściowe pokrycie się potencjału pomiarowego i interpretacyjnego trzech, dotąd rozbieżnych, źródeł obrazowania powierzchni Ziemi:

- zdjęć lotniczych wykonywanych współczesnymi kamerami analogowymi (na film zwojowy),

- obrazów cyfrowych pozyskiwanych lotniczymi kamerami cyfrowymi,

- obrazów satelitarnych o bardzo dużej rozdzielczości.

Dalszy rozwój przyniesie dalsze zbliżenie i nałożenie technicznych możliwości wymienionych źródeł. W opinii autora niniejszej publikacji nie jest uzasadnione

rozłączne postrzeganie tych źródeł. Tworzą one wzajemnie komplementarny układ wieloźródłowych danych obrazowych, przydatny dla opracowań zarówno pomiarowych, jak i teledetekcyjnych. Takie postrzeganie wymaga jednak zbudowania spójnego systemu oceny jakości i porównania kamer analogowych i cyfrowych oraz pulapów obrazowania: lotniczego i satelitarnego. Taki spójny system pozwoli ocenić przydatność konkretnych zdjęć lub obrazów dla realizacji postawionych zadań pomiarowych czy też pozwoli zaprojektować pożądane parametry zdjęć lub obrazów umożliwiających realizację takich zadań.

Publikacja niniejsza jest próbą stworzenia takiego systemu pojęć oraz technicznych i technologicznych relacji dla oceny potencjału kartograficznego wieloźródłowych danych. Cel ten wymaga rozwiązania szeregu zadań cząstkowych:

- oceny jakości współczesnych, tradycyjnych zdjęć lotniczych,
- oceny stanu zaawansowania budowy lotniczych kamer cyfrowych i perspektyw zastąpienia nimi kamer tradycyjnych,
- zdefiniowania pojęcia zdolności rozdzielczej zdjęć analogowych i obrazów cyfrowych oraz określenia relacji między nimi,
- porównania pojemności informacyjnej zdjęć analogowych i cyfrowych,
- oceny stanu rozwoju wysokorozdzielczych obrazów satelitarnych,
- oceny potencjału kartograficznego (pomiarowego i interpretacyjnego) wysokorozdzielczych obrazów satelitarnych oraz porównania tego potencjału ze zdjęciami lotniczymi,
- określenia wymaganych parametrów obrazów cyfrowych (lotniczych i satelitarnych) dla realizacji konkretnych zadań pomiarowych.

2. Stan obecny i perspektywy rozwoju analogowych kamer topograficznych

Lata rozwoju lotniczych kamer topograficznych to ciągle ich doskonalenie, możliwe dzięki rozwojowi optyki, mechaniki precyzyjnej, elektroniki i chemii. Ten ewolucyjny rozwój doprowadził w latach 80. do

konstrukcji, które – wydawało się – zbliżyły się do kresu możliwości dalszego rozwoju. W drugiej połowie lat 80. dzięki wprowadzeniu nowych, wspomaganych komputerowo metod projektowania układów optycznych, a także rozwojowi mikroelektroniki, powstały nowe konstrukcje kamer lotniczych. Są one na tyle różniące się od poprzednich, że uzasadnione jest określanie ich jako **kamery lotnicze nowej generacji**. Tę nową jakość uzyskano poprzez zastosowanie w nich:

- nowej generacji obiektywów charakteryzujących się istotnym wzrostem zdolności rozdzielczej,
- systemu FMC (FMC: Forward Motion Compensation) – kompensującego ruch postępowy samolotu,
- systemu AMC (AMC: Angular Motion Compensation) – kompensującego rozmazanie obrazu spowodowane ruchami kątowymi kamery,
- systemu AEC (AEC: Automatic Exposure Control) – zapewniającego poprawną ekspozycję zdjęć,
- systemu nawigacyjnego GPS pozwalającego na sterowanie pracą kamery i precyzyjny pomiar współrzędnych środków rzutów w locie lub zintegrowanego systemu GPS/INS (INS: Inertial Navigation System – inercyjny system nawigacyjny) pozwalającego na pomiar wszystkich elementów orientacji zewnętrznej kamery w locie.

Zastosowane rozwiązania pozwoliły na znaczne podwyższenie jakości zdjęć i ułatwiły ich opracowanie. Do kamer nowej generacji zaliczane są kamery:

- Zeiss Jena (od 1982): LMK, LMK 1000, LMK 2000, LMK 3000,
- Carl Zeiss, obecnie Z/I Imaging (od 1984): RMK TOP,
- Leica (od 1987): RC 20, RC 30.

Jakość współczesnych zdjęć lotniczych

Pojemność informacyjna zdjęć lotniczych jest uwarunkowana ich zdolnością rozdzielczą. Zdolność rozdzielcza jest limitowana przez kilka czynników, a mianowicie:

- zdolność rozdzielczą obiektywu,
- zdolność rozdzielczą filmu,
- rozmazanie obrazu spowodowane ruchem postępowym samolotu,

- rozmazanie obrazu spowodowane ruchami kątowymi kamery,
- kontrast obiektu,
- wpływ atmosfery.

Na końcowym efekcie tego procesu waży najbardziej jego „najsłabsze ogniwo”. Tymi słabymi ogniwami były do niedawna rozmazanie obrazu spowodowane ruchem postępowym samolotu i ruchami kątowymi kamery. Ich wyeliminowanie spowodowało skokowy wzrost zdolności rozdzielczej zdjęć lotniczych. Można oczekiwać, że współczesne czarno-białe zdjęcia lotnicze, wykonane na niskoczułym filmie lotniczym, kamerą FMC na stabilizowanym podwieszeniu, charakteryzują się rozdzielczością:

- około 55 par linii/mm dla obiektów kontrastowych ($1 \text{ pl/mm} = 18 \mu\text{m}$),
- około 40 par linii/mm dla obiektów o niskim kontraście ($1 \text{ pl/mm} = 25 \mu\text{m}$).

Są to wartości uśrednione dla całego formatu zdjęcia (AWAR). „Najsłabszym” ogniwem we współczesnym procesie fotografowania lotniczego jest film. Dla filmów o mniejszej zdolności rozdzielczej należy liczyć się z pogorszeniem średniej zdolności rozdzielczej zdjęć. Tę zależność według obecnego stanu ilustruje tabela 1 (Kurczyński 1999a).

Tabela 1. Zdolność rozdzielcza zdjęć (dla małego kontrastu obiektu).

Table 1. Resolution of aerial photos (for low object contrast).

Rodzaj filmu	Zdolność rozdzielcza zdjęć dla niskiego kontrastu obiektów (1.6:1) [pary linii/mm]	Nieostrość [μm]
Niskoczuły czarno-biały	40	25
Średniczuły czarno-biały	35	29
Wysokoczuły czarno-biały	30	33
Średniczuły barwny	30	33
Barwny IR	25	40

Tabela ilustruje oczekiwaną zdolność rozdzielczą zdjęć lotniczych wykonanych dla celów pomiarowych. Dla zdjęć wykonywanych z wysokich pulapów, szczególnie o przeznaczeniu interpretacyjnym, stosowane są cienkowarstwowe filmy o bardzo dużej rozdzielczości, umożliwiające uzyskanie zdjęć o rozdzielczości większej niż w tabeli.

Poprawa jakości zdjęć pod względem ich jakości geometrycznej i zdolności rozdzielczej spowodowała wzrost dokładności opracowania. Ten wzrost jakości przekłada się na konkretny i wymierny efekt ekonomiczny: to samo zadanie pomiarowe może być zrealizowane poprzez opracowanie zdjęć lotniczych w mniejszej skali. W zakresie opracowań mapowych oznacza to zmianę tzw. „przełożenia skalowego”, tj. proporcji między skalą mapy a skalą zdjęć, na podstawie których dana mapa może być opracowana z zachowaniem wymaganej dokładności geometrycznej i zasobu treści właściwych opracowywanej mapie. Te zmiany przekładają się na efekt ekonomiczny: ten sam obszar pokryty zdjęciami w mniejszej skali oznacza konieczność wykonania i opracowania mniejszej liczby zdjęć, a wiadomo, że koszty opracowania fotograficznego są – w pierwszym przybliżeniu – proporcjonalne do liczby opracowywanych zdjęć. Należy dodać, że zmiana przełożenia skalowego, jako efekt poprawy jakości zdjęć, jest obserwowana bardziej w zakresie opracowań wieloskalowych niż średnio- i drobnoskalowych. Praktyka pokazuje, że współczesne zdjęcia lotnicze pozwalają na pomiary punktowe wyrażające się dokładnością:

- błąd sytuacyjny: 6–10 μm w skali zdjęcia,
- błąd wysokościowy: 0,05% + 0,08% wysokości lotu.

Dokładności takie uzyskuje się kamerami nowej generacji z obiektywami szerokokątnymi przy maksymalnym otworze (1:4), na stabilizowanym podwieszeniu. Podane dokładności odnoszą się do punktów kontrolnych: sygnalizowanych dla zdjęć wieloskalowych i naturalnych dla zdjęć drobnoskalowych (Leica 1996; Schlienger 1996). W zakresie zdjęć wieloskalowych są to więc dokładności opracowania na poziomie dokładności punktów osnowy geodezyjnej.

Kierunki dalszego rozwoju lotniczych kamer pomiarowych

Współczesne obiektywy kamer pomiarowych charakteryzują się rewelacyjnymi parametrami: praktycznie wyeliminowano dystorsję, a zdolność rozdzielcza średnio w całym kadrze (AWAR) jest na poziomie 110–120 [par linii/mm]. Znamienne jest przy tym to, że ta rozdzielczość uzyskiwana jest przy maksymalnym otworze obiek-

tywu (dla otworów względnych $f/4 = f/5,6$). Świadczy to o tym, że aberracje zostały praktycznie wyeliminowane, a głównym czynnikiem limitującym zdolność rozdzielczą jest dyfrakcja światła. Dzięki kompensacji rozmycia (system FMC) i stabilizowanemu zawieszonemu można pełniej wykorzystywać te parametry obiektywów. Powstaje pytanie: czy jest możliwy dalszy postęp? Jaką drogą pójść dalszy rozwój kamer lotniczych?

Zbudowanie nowej generacji tradycyjnych kamer lotniczych byłoby celowe, gdyby udało się w znaczący sposób podwyższyć osiągnięte już parametry, głównie zwiększenie zdolności rozdzielczej. Z teoretycznych przesłanek bazujących na teorii dyfrakcji światła wiadomo, że dalszą poprawę zdolności rozdzielczej obiektywów można byłoby uzyskać zwiększając ich jasność, co zmniejszyłoby wpływ dyfrakcji. Jasność współczesnych obiektywów wynosi 1:4. Obiektyw taki waży 50–60 kg, a ciężar całej kamery (z podwieszeniem, ładownikiem i jednostką napędową) przekracza 130 kg. Zwiększenie jasności obiektywu o jedną „działkę”, tj. do 1:2,8, byłoby okupione bardzo znaczącym zwiększeniem gabarytów i ciężaru kamery. Ze względów praktycznych nie jest to przewidywane. Można więc prognozować, że możliwości dalszego rozwoju tradycyjnej, fotograficznej, lotniczej kamery pomiarowej praktycznie wyczerpały się.

Dalszych możliwości rozwoju obrazowania lotniczego należy upatrywać w całkowitej jakościowej zmianie technicznych środków obrazowania. Tą nową „jakością” będzie lotnicza kamera cyfrowa. Obiektyw takiej kamery poddawany jest wprawdzie takim samym ograniczeniom jak obiektyw kamery tradycyjnej, jednak kamera cyfrowa wykazuje szereg innych istotnych zalet z punktu widzenia potrzeb obrazowania powierzchni Ziemi, stawiających ją ponad kamerą tradycyjną.

Obecni producenci tradycyjnych kamer lotniczych przewidują, że produkcja takich kamer będzie kontynuowana jeszcze do końca bieżącego dziesięciolecia. Już nie przewiduje się wypuszczenia na rynek całkowicie nowych modeli kamer analogowych. Po tym okresie nastąpi równowaga popytu na kamery analogowe i kamery cyfrowe, z tendencją wzrostu przewagi lotniczych kamer cyfrowych.

3. Konstrukcje lotniczych kamer cyfrowych i perspektywy ich rozwoju

3.1. Koncepcje konstrukcji lotniczych kamer cyfrowych

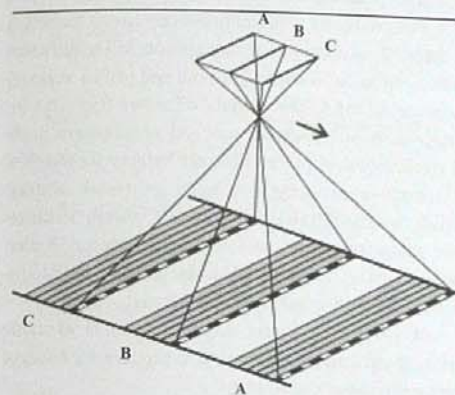
Cywilne systemy satelitarne dostarczające obrazy o globalnym pokryciu liczą sobie ponad 30 lat. Obrazy te od dawna znalazły miejsce w licznych zastosowaniach. W zakresie klasycznych opracowań fotogrametrycznych przechodzi się na technologie cyfrowe (w zakresie opracowań teledetekcyjnych nastąpiło to wcześniej). Nadal jednak dominującym źródłem danych jest klasyczna kamera pomiarowa na film zwojowy. W technologiach zorientowanych na opracowania cyfrowe tradycyjne zdjęcia lotnicze muszą być najpierw zamienione na postać cyfrową w procesie skanowania. Rodzi się pytanie o perspektywę zastąpienia tradycyjnej lotniczej kamery fotogrametryczną kamerą cyfrową.

Jeszcze kilka lat temu nie do pomyślenia była lotnicza kamera cyfrowa jako dostępny produkt rynkowy, która dawałaby obrazy zbliżone pod względem jakości geometrycznej do zdjęć wykonywanych tradycyjnymi kamerami fotogrametrycznymi. Latem 2000 r., podczas Kongresu Międzynarodowego Towarzystwa Fotogrametrii i Teledetekcji w Amsterdamie, po raz pierwszy zostały zaprezentowane produkcyjne egzemplarze takich kamer. Stało się to za sprawą:

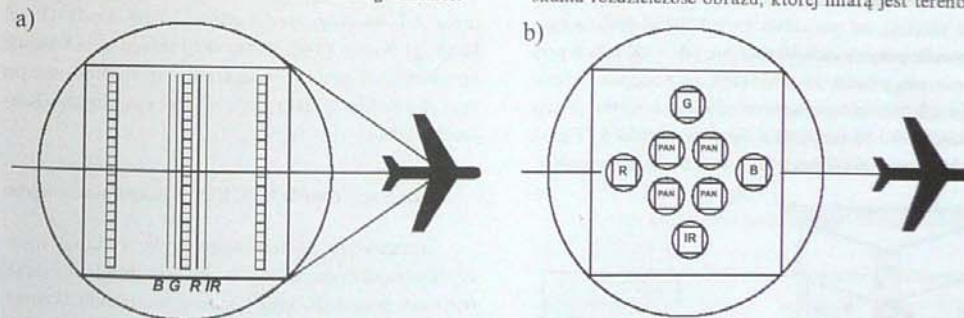
- postępu w produkcji linijek i matryc CCD,
- postępu w szybkości transmisji i zapisu sygnałów z elementów CCD na nośniki pamięci masowej,
- postępu w zakresie pomiaru elementów orientacji liniowej (położenie) i kątowej (nachylenia) platformy, na której umieszczona jest kamera,
- postępu w budowie i upowszechnieniu Cyfrowych Stacji Fotogrametrycznych do opracowania zdjęć.

Koncepcja lotniczej kamery cyfrowej jest realizowana dwiema drogami. Pierwsza to koncepcja skanera elektrooptycznego. Sensorem w takim skanerze jest linijka czułych detektorów CCD umiejscowionych w płaszczyźnie tłowej obiektywu i zorientowana prostopadle do kierunku lotu. Obraz tworzy się w sposób ciągły, w miarę ruchu postępowego samolotu (czy satelity). Z punktu widzenia potrzeb pomiarowych opracowań przestrzennych szczególnie interesujące i mające per-

spektywy rozwoju są skanery z trzema linijkami detektorów, obrazującymi ten sam pas terenu: jedna obrazuje „do przodu”, druga „nadiowo” i trzecia „wstecz”. W czasie jednego lotu otrzymuje się trzy obrazy stereoskopowe, o dobrej wyznaczalności wysokości (rys. 1 i 2).



Rys. 1. Skaner elektrooptyczny z 3 linijkami detektorów.
Fig. 1. Optoelectronic scanner with three-line digital sensor.



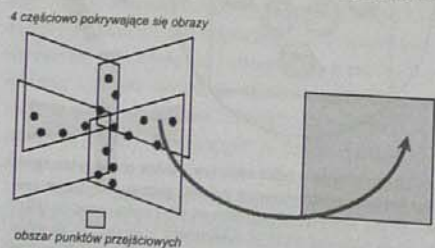
Rys. 2. Konstrukcja lotniczej kamery cyfrowej: a – oparta na skanerze elektrooptycznym – jeden obiektyw i jedna płaszczyzna tłowa (w płaszczyźnie tłowej kamery znajdują się trzy linijki CCD dla obrazowania stereoskopowego w zakresie panchromatycznym oraz 4 linijki CCD dla obrazowania wielospektralnego: w zakresie niebieskim (B), zielonym (G), czerwonym (R) i podczerwonym (IR)). b – oparta na kilku modułach (głowicach optycznych) z prostokątnymi tablicami CCD (8 obiektywów i płaszczyzn tłowych: 4 w zakresie panchromatycznym, tworzące zespół wielokamerowy dla zwiększenia pola widzenia i 4 wielospektralne obrazujące w zakresie niebieskim (B), zielonym (G), czerwonym (R) i podczerwonym (IR)).

Fig. 2. Concepts of airborne digital cameras: a – based on optoelectronic scanner – one lens and focal plane (in focal plane three line CCD and sensors for stereo imaging in panchro range, and four CCD lines for multispectral imaging: in blue (B), green (G), red (R) and infrared (IR) spectral range. b – based on several modules (optical heads) with array CCD sensors (8 lenses and focal planes: four in panchro, creating multicamera assembly for increasing the field of view and four multispectral in blue (B), green (G), red (R) and infrared (IR) spectral range).

wymiar piksela. Mówiąc inaczej: samolot musi lecieć na tyle wolno i na tyle wysoko (większy wymiar piksela), aby nadażyć z zapisem danych.

Przykładem kamer cyfrowych opartych na koncepcji skanera elektrooptycznego jest Lotnicza Kamera Cyfrowa ADS40 (*Airborne Digital Sensor*) firmy LH Systems, oraz Lotnicza Stereoskopowa Kamera Dużej Rozdzielczości HRSC-A (*High Resolution Stereo Camera – Airborne*) skonstruowana przez Niemieckie Centrum Kosmiczne DLR (Kurczyński 2000).

Problemy związane ze stabilnością geometryczną obrazu nie występują w przypadku drugiej koncepcji: kamery z prostokątną matrycą sensorów CCD. Jest to – z geometrycznego punktu widzenia – cyfrowy odpowiednik kamery fotograficznej. W tym rozwiązaniu występuje jednak inna trudność: rozmiar tablicy CCD. Matryca ekwiwalentna pod względem wymiarów kamery lotniczej musiałaby zawierać około 500 mln elementów ($23\,000 \times 23\,000$). Nic nie zapowiada pojawienia się takich sensorów w najbliższym czasie. Matrycę CCD produkuje się na „plastrze” półprzewodnika. Do niedawna bazowano na technologii „4-calowej” (średnica plastra), co pozwalało na produkcję tablic kwadratowych o wymiarach 60×60 mm ($4K \times 4K$ pikseli przy wymiarach piksela $15\ \mu\text{m}$). Obecnie dostępna technologia „5-calowa” pozwala produkować tablice o wymiarach 80×80 mm ($9K \times 9K$ przy pikselu $8,75\ \mu\text{m}$). Technologia „6-calowa” jest w fazie eksperymentów.



Rys. 3. Kamera wielomodułowa DMC 2001. Zasięg pokrycia poszczególnych modułów panchromatycznych i pokrycie wynikowego zdjęcia.

Fig. 3. Multihed DMC 2001 camera. Ground coverage of individual panchromatic modules and coverage of resultant image.

W tej technologii zbudowano tablice CCD o rozdzielczości $10K \times 5K$.

Wyjściem z ograniczenia związanego z rozmiarami dostępnych tablic CCD jest kamera wielomodułowa, zawierająca kilka sprzężonych ze sobą głowic optycznych – każda z oddzielnym obiektywem i tablicą CCD. Pola widzenia tych modułów częściowo zachodzą na siebie. Z uzyskanych w ten sposób kilku obrazów generuje się jeden, o większym polu widzenia i większej rozdzielczości niż każdy moduł oddzielnie (rys. 2b i 3). Obrazowanie wielospektralne w tym rozwiązaniu może być zrealizowane poprzez dołożenie kolejnych modułów optycznych, obrazujących w kilku zakresach widma. Moduły wielospektralne mają zwykle gorszą rozdzielczość geometryczną, a pole widzenia każdego z nich pokrywa sumaryczne pole widzenia sprzężonych modułów obrazujących w zakresie panchromatycznym.

W przypadku kamer z tablicami CCD aktualnie pozostają ograniczenia związane z prędkością odczytu i zapisu sygnałów z sensorów.

Przykładem kamer cyfrowych opartych na prostokątnej matrycy sensorów CCD jest Modułowa Kamera Cyfrowa DMC 2001 (*DMC – Digital Modular Camera*) firmy Z/I Imaging oraz kamera UltraCam-D (*Vexel Imaging*). Każda z tych konstrukcji składa się z 8 głowic optycznych: 4 pracują w zakresie panchromatycznym oraz 4 pracują w zakresach wielospektralnych (Kurczyński 2000).

Integracja danych GPS/INS. Geokodowanie wprost

Przeszkodą pomiarowego wykorzystania lotniczych obrazów skanerowych jest trudność dokładnej rejestracji trajektorii lotu i kątów nachylenia skanera. Rozwiązaniem jest zintegrowanie dwóch systemów: GPS (ang. Global Positioning System) i INS (ang. Inertial Navigation System). System GPS pozwala rejestrować trajektorię lotu (X, Y, Z) z dokładnością nie gorszą niż 10 cm. Inercjalny system nawigacyjny INS mierzy przyspieszenia wzdłuż trzech osi oraz zmiany kątowych pochyłeń kamery. Ciągłe integrowanie (sumowanie) tych pomiarów w czasie pozwala wyznaczyć bardzo dokładnie trajektorię lotu samolotu (z błędem rzędu 2 cm) i kąty pochylenia (z dokładnością kilkunastu sekund kątowych).

wych). Wadą systemów INS jest dryft, powodujący spadek dokładności pomiaru pozycji i kątów nachylenia z upływem czasu. Ten błąd systematyczny może być korygowany na podstawie danych GPS, zachowujących wysoką i stabilną w czasie dokładność. Z kolei dane INS są wykorzystywane do interpolacji pozycji podczas możliwych, krótkich przerw w łączności z satelitami GPS (np. „przesłonięcie” satelity skrzydłem samolotu podczas manewru nawrotu).

Systemy GPS i INS charakteryzują się więc różną i komplementarną propagacją błędów. Ich integracja jest realizowana w procesie obróbki zarejestrowanych danych z wykorzystaniem filtrowania Kalmana. Pozwala to wykorzystać zalety obu systemów. Stosowane w fotogrametrii systemy bazują na dostępnych na rynku systemach GPS i średniej klasy systemach INS (odgrywa tu rolę cena: cena systemu INS niskiej klasy jest rzędu 10 tys. USD, średniej klasy – 100 tys. USD, a wysokiej klasy – 1 mln USD). Liczne opracowania testowe wskazują, że zintegrowanie systemów GPS/INS pozwala obecnie z dużą częstotliwością (rzędu $50 - 250$ Hz) rejestrować położenie z dokładnością lepszą niż 10 cm i kąty orientacji z dokładnością $10'' - 30''$, tj. $0,003^\circ - 0,008^\circ$ (niektórzy autorzy, cytując wyniki eksperymentalnych opracowań, podają nawet wyższe dokładności; błędy kątowe poniżej $10''$). Taka precyzja jest zbliżona do dokładności wyznaczenia elementów orientacji zewnętrznej zdjęć fotogrametrycznych, określanych w procesie aerotriangulacji blokowej. Jest to więc dokładność wystarczająca dla potrzeb lotniczych kamer cyfrowych z linią detektorów.

Zagadnienie integracji GPS/INS ma dla fotogrametrii szersze znaczenie niż tylko wynikające z potrzeb kamer cyfrowych. Systemy takie są sprzęgane również z tradycyjnymi kamerami fotogrametrycznymi, skanerami laserowymi czy innymi platformami. Skoro jest możliwe wyznaczenie w locie, z wystarczającą dokładnością, wszystkich elementów orientacji zewnętrznej zdjęć (liniowych i kątowych), to można pomiar fotogrametryczny (tj. wyznaczenie położenia X, Y, Z punktów podlegających opracowaniu, odfotografowanych na zdjęciach) sprowadzić do bezpośredniego „przestrzennego wiecienia w przód” ze znanych elementów orientacji. Jest to realizacja tzw. „geokodowania wprost” (ang.

direct geocoding, direct georeferencing). Oznacza to wyeliminowanie osnowy polowej i procesu aerotriangulacji. Trwają intensywne, również międzynarodowe, eksperymenty w celu określenia zakresu użyteczności tego rozwiązania. Uzyskane wyniki pokazują, że taka możliwość została osiągnięta. Utrzymywanie technologii aerotriangulacji jest jednak na obecnym etapie nadal pożądane, bardziej dla zabezpieczenia niezawodności całego procesu niż dla zwiększenia dokładności.

3.2. Porównanie kamer cyfrowych z kamerami analogowymi

Kamera lotnicza jest kluczowym elementem całego procesu fotografowania lotniczego. Ponieważ sama kamera w znacznym stopniu determinuje etapy tego procesu, a także późniejszego procesu opracowania zdjęć, przy porównywaniu kamer cyfrowych i analogowych należy postrzegać je w szerszym kontekście tych procesów.

Obrazowanie kamerami cyfrowymi ma wiele zalet w porównaniu z klasycznymi zdjęciami lotniczymi. Zalety te wyrażają się:

- zmniejszeniem kosztów procesu fotografowania,
- skróceniem czasu dostarczenia danych,
- wyższą jakością radiometryczną obrazów,
- możliwością nowych aplikacji.

Wśród istotnych zalet obrazowania kamerami cyfrowymi na uwagę zasługują:

- wyeliminowanie kosztownego filmu i obróbki fotolaboratoryjnej,
- wyeliminowanie czasochłonnego i kosztownego etapu skanowania zdjęć,
- zakres dynamiczny i rozdzielczość radiometryczna obrazów cyfrowych są znacznie większe od filmu. Zakres dynamiczny (tj. stosunek maksymalnej wartości sygnału z elektronicznego sensora do „szumu” sygnału) jest około $3500:1$, tj. $11 - 12$ bitów; dla porównania, ten zakres dla zdjęć skanowanych wynosi około $6 - 7$ bitów. Cecha ta oznacza znacznie lepszą wyróżnialność szczegółów w najjaśniejszych i najciemniejszych partiach obrazu. Ma to szczególne znaczenie przy obrazowaniu miast (cienie zajmują duże partie obrazu),

- lepsza reprodukcja barw,
- łatwiejsza droga do obrazowania wielospektralnego (ważne dla opracowań tematycznych),
- radykalnie skrócony czas dostarczenia obrazów do odbiorcy.

3.3. Uwarunkowania zastąpienia tradycyjnej kamery lotniczej kamerą cyfrową

Najpierw zapowiedzi, a następnie prezentacja „produkcyjnych” rozwiązań kamer cyfrowych podczas Kongresu w Amsterdamie spowodowały bardzo ożywioną dyskusję w środowisku fotogrametrycznym. Stawiane jest pytanie: czy kamera cyfrowa będzie stanowić konkurencję dla używanych obecnie tradycyjnych, wielkoformatowych kamer lotniczych?

Odpowiedź jest złożona i musi uwzględniać wiele uwarunkowań, wykraczających poza czysto techniczne kwestie. O konkurencyjności kamery cyfrowej w stosunku do kamery tradycyjnej stanowić będzie kilka czynników:

1. Opracowania fotogrametryczne przechodzą na technologie zorientowane cyfrowo. Wylodem są stosowane nadal tradycyjne zdjęcia lotnicze, które trzeba najpierw zeskanować, aby później opracowywać je w ciągu zorientowanym cyfrowo. Powszechna jest świadomość zalet kamer cyfrowych, z drugiej jednak strony firmy fotogrametryczne zainwestowały w dominujący obecnie ciąg „hybrydowy”, bazujący na tradycyjnej kamerze i specjalistycznym skanerze do zdjęć lotniczych. Żywotność tego sprzętu liczona jest na kilkanaście lat. Muszą zaistnieć ważne techniczne i rynkowe powody, aby skłonić „produkcję” do zmiany obecnych technologii i związanych z tym nowych, znacznych inwestycji.
2. Decydującym czynnikiem w upowszechnieniu kamer cyfrowych może okazać się dostępność dla szerokiego kręgu potencjalnych użytkowników oprogramowania oraz szczegółowych parametrów geometrycznych i radiometrycznych kamer, umożliwiających włączenie obrazów cyfrowych do technologicznego procesu opracowań fotogrametrycznych. Oczekiwane jest wsparcie w tym zakresie samych producentów kamer.
3. Rozwiązania konstrukcyjne kamer cyfrowych idą w kierunku umożliwienia równoczesnego pozyskiwania zarówno stereoskopowych obrazów panchromatycznych (czarno-białych), jak i barwnych obrazów w zakresie widzialnym i bliskiej podczerwieni. Oznacza to, że kamery te łączą dwie – obecnie niezależne – dziedziny opracowań bazujących na zdjęciach: pomiarowe opracowania fotogrametryczne i tematyczne opracowania teledetekcyjne. Twórcy kamer cyfrowych przewidują, że 50% (aż 50%!) wykorzystania kamer cyfrowych stanowić będą zastosowania związane z teledetekcyjnymi opracowaniami tematycznymi.
4. Ważnym czynnikiem jest cena. Koszt kamery cyfrowej kształtuje się na poziomie 1÷1,5 mln USD. Przekracza on 1,5–2 razy cenę oferowanych na rynku tradycyjnych kamer lotniczych.
5. Pojawienie się i przewidywany rozwój satelitarnych obrazów z „metrycznym” pikselem przejmie rynek zdjęć lotniczych w zakresie drobnych skal. Zdjęcia lotnicze (tradycyjne czy cyfrowe) zostaną „zepszczone” do obrazowania w zakresie skal średnich i dużych, w tym szczególnie obszarów zurbanizowanych.
6. Ważąc „za” i „przeciw”, nie należy oczekiwać szybkiego zastąpienia tradycyjnej kamery lotniczej przez jej cyfrowy odpowiednik. Oba typy kamer będą koegzystować, z właściwymi sobie zakresami zastosowań, przy stopniowym przechodzeniu na rozwiązania cyfrowe.

4. Porównanie pojemności informacyjnej zdjęcia analogowego i obrazu cyfrowego

Pojemność informacyjna zdjęć analogowych i obrazów cyfrowych zależy od ich przestrzennej zdolności rozdzielczej oraz rozdzielczości radiometrycznej.

Na gruncie tradycyjnej fotografii lotniczej pojęcie przestrzennej zdolności rozdzielczej jest jednoznacznie zdefiniowane i jednakowo rozumiane, a procedury wyznaczania praktycznej zdolności rozdzielczej są znormalizowane i opisane międzynarodowymi standardami. Rozdzielczość odnosi się do najwyższej częstotliwości przestrzennej, która może być rozpoznana w płaszczyźnie płowej kamery i jest mierzona w cyklach na milimetr,

inaczej: liczbie par linii na milimetr obrazu. Para linii stanowiąca jeden cykl to linia jasna i ciemna. Równoważna takiemu cyklowi odległość terenowa (czyli szerokość linii jasnej i ciemnej łącznie) definiowana jest jako **terenowa zdolność rozdzielcza** (ang.: *Ground Resolved Distance – GRD*).

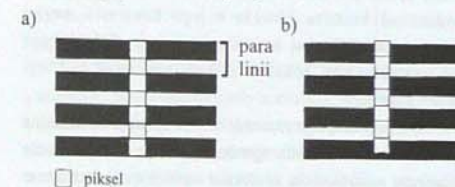
W praktyce terenowa zdolność rozdzielcza może być określana poprzez sfotografowanie wyłożonych testów paskowych o stopniowo zmieniającej się częstotliwości przestrzennej (grubości linii jasnych i ciemnych), określonej szerokości, długości i kontraście. Zwykle określa się terenową zdolność rozdzielczą niezależnie w kierunku lotu i kierunku poprzecznym. Terenową zdolność rozdzielczą na zdjęciu określa ta grupa pasków, dla której paski jasne i ciemne są jeszcze rozróżnialne jako oddzielne. Tak określona terenowa zdolność rozdzielcza opisuje jakość zdjęcia, tj. końcowego ogniwa całego procesu zdjęciowego. Uwzględnia więc sumarycznie jakość obiektywu, film, wpływ atmosfery, rozmazanie spowodowane ruchem samolotu, drgania kamery, obróbkę fotochemiczną. Spodziewaną zdolność rozdzielczą zdjęć lotniczych wykonanych współczesnymi kamerami lotniczymi (tj. kamerami z kompensacją rozmazania FMC) dla małego kontrastu obiektu, dla różnych rodzajów filmu przedstawiono w tabeli 1.

Posiłkując się zawartymi tam danymi można oczekiwać, że np. terenowa zdolność rozdzielcza zdjęć w skali 1:26 000, wykonanych na filmie barwnym, wyniesie około 0,86 m. Dla zdjęć w tej samej skali, ale wykonanych na niskoczułym, drobnoziarnistym filmie czarno-białym, zdolność rozdzielcza zdjęć będzie wyższa i wyniesie około 0,65 m.

Precyzja definicji „terenowej zdolności rozdzielczej” oraz znormalizowana procedura jej określania sprawiają, że jest to powszechnie akceptowana i używana miara jakości zdjęć, umożliwiającą porównywanie różnych systemów obrazowania.

Całkowicie inną sytuację mamy w przypadku obrazów cyfrowych, pozyskanych skanerami optyczno-mechanicznymi, skanerami elektrooptycznymi (z linią czułych cementów CCD) czy kamerami cyfrowymi bazującymi na prostokątnych matrycach CCD. W tych przypadkach obraz składa się z pikseli. Każdemu pikselowi odpowiada czuły element CCD w płaszczyźnie

ogniskowej układu optycznego kamery. Rozdzielczość obrazu cyfrowego ma związek z wymiarami piksela: im mniejszy piksel, tym większa szczegółowość obrazu (wyższa rozdzielczość). Wielkością charakteryzującą tę wielkość jest kąt, pod jakim układ optyczny kamery widzi fragment terenu rzutowany na powierzchnię pojedynczego piksela IFOV (ang.: *Instantaneous Field of View – IFOV*) lub odpowiadający mu terenowy wymiar, tzw. **piksel terenowy**. Często piksel terenowy mylnie utożsamiany jest z terenową zdolnością rozdzielczą obrazu. Terenowa zdolność rozdzielcza – zdefiniowana jak wyżej – jest miarą rozdzielczości zdjęcia, tymczasem piksel terenowy jest tylko wielkością obszaru obrazowanego przez pojedynczy piksel linijki czy matrycy CCD. Różnice te poglądowo ilustruje rys. 4.



Rys. 4. Relacje między wymiarami piksela a szerokością pary linii, stanowiących terenową zdolność rozdzielczą obrazu: a – próbkowanie jest zgodne z parami linii, b – próbkowanie jest niezgodne z parami linii.

Fig. 4. The relationship between pixel and line pairs, composing ground resolution of image: a – sampling is aligned with the line pairs, b – sampling is misaligned with the line pairs.

Para linii na obiekcie może być rozróżniona, jeżeli piksel ma wymiar połowy szerokości pary linii i układ pikseli i linii będzie przypadkowo zgodny (rys. 4a). W przypadku jednak niezgodności (rys. 4b) linie nie będą rozróżnialne jako oddzielne. W tym przypadku piksel musiałby być mniejszy. Ogólnie, dla rozróżnienia pary linii, stosunek między szerokością pary linii a wymiarem piksela powinien leżeć w przedziale od 2:1 do 3:1. W teorii próbkowania relację tę opisuje tzw. współczynnik Kella. Zwykle przyjmuje się, że:

$$2 \times P_{\text{teren}} \leq R_{\text{teren}} \leq 2\sqrt{2} \times P_{\text{teren}} \quad (1)$$

gdzie:

P_{teren} – terenowy wymiar piksela,
 R_{teren} – terenowa zdolność rozdzielcza.

Tak więc terenowa zdolność rozdzielcza obrazu cyfrowego, rozumiana jak na gruncie tradycyjnych zdjęć lotniczych, jest równa dwóm – trzem wymiarom piksela terenowego.

Należy dodać, że powyższa zależność uwzględnia tylko pikselową strukturę obrazu cyfrowego. Faktyczna terenowa zdolność rozdzielcza obrazu cyfrowego może być dodatkowo zdegradowana przez wady optyki, atmosfery i rozmazanie spowodowane ruchem platformy (samolotu czy satelity).

Terenowa zdolność rozdzielcza jest wyjściowym i kluczowym parametrem określającym, co faktycznie na danym zdjęciu może być dojrzone (wykryte), rozpoznane i pomierzone. Praktycy wiedzą, że zależy to nie tylko od terenowej zdolności rozdzielczej, ale również od kształtu obiektu i jego kontrastu względem tła. Obiekt musi być wystarczająco duży i tworzyć wystarczający kontrast z tłem, aby mógł być wykryty na zdjęciu.

Istnieją empiryczne zależności łączące minimalne wymiary obiektu możliwego do wykrycia i rozpoznania na zdjęciu z wielkością zdolności rozdzielczej, kształtem obiektu (liniowy, punktowy) i jego kontrastem. Problemy te są szczegółowiej traktowane w literaturze z zakresu fotointerpretacji.

Wydaje się dziwne, że na obrazach satelitarnych dostrzec można białe linie namalowane przez środek asfaltowej drogi i jednocześnie nie można dostrzec obiektów znacznie większych. Jest to wynikiem kombinacji kontrastu i oświetlenia obiektu, zakresu dynamicznego sensora, wpływu atmosfery oraz geometrii „widzenia” i próbkowania. Z wymienionych czynników najistotniejszym jest kontrast.

W przypadku obrazów satelitarnych należy liczyć się z istotnym wpływem atmosfery, powierzchnia Ziemi obrazowana jest przez całą jej grubość. Atmosfera powoduje bardzo istotne zmniejszenie kontrastów; bardziej odczuwalne w zakresie fal krótszych (niebieski, zielony) i mniej w zakresie fal dłuższych (czerwony, podczerwony). Zmniejszenie kontrastu ma bezpośredni, degradujący wpływ na możliwości interpretacyjne obrazu.

Zależność (1) pozwala powszechnie stosowane pojęcie zdolności rozdzielczej tradycyjnych zdjęć prze-

nieść na obraz o pikselowej strukturze geometrycznej, właściwej dla kamery cyfrowej, ale również dla zdjęć analogowych po zeskanowaniu. Zależności tej nie można jednak utożsamiać z relacją pojemności informacyjnej zdjęcia analogowego, wykonanego kamerą na film i obrazu cyfrowego otrzymanego kamerą cyfrową. Poszukiwanie takiej relacji ma obecnie, tj. w dobie wchodzenia do użycia kamer cyfrowych i powszechności obrazów satelitarnych, kapitalne znaczenie praktyczne, pozwoli bowiem ocenić faktyczny potencjał interpretacyjny zdjęć i obrazów wykonywanych różnymi systemami (analogowymi i cyfrowymi) z różnych pułapów (lotniczego i satelitarnego) i wskazać ich przydatność do rozwiązywania konkretnych zadań pomiarowych. Przy poszukiwaniu takiej relacji należy uwzględnić dodatkowe uwarunkowania:

1. Opracowania fotogrametryczne są obecnie zdominowane przez technologie cyfrowe. W przypadku opracowania zdjęć analogowych należy najpierw zamienić je na postać cyfrową w procesie skanowania.
2. Zdjęcia analogowe i obrazy cyfrowe różnią się istotnie rozdzielczością radiometryczną, co ma wpływ na ich pojemność informacyjną, a w konsekwencji jakość produktów wytwarzanych na ich bazie.

W przypadku skanowania zdjęć powstają pytania:

- o przestrzenną rozdzielczość skanowania (tj. o wymiar piksela skanowania),
- o rozdzielczość radiometryczną.

Ograniczeniem jest tu jakość fotograficzna zdjęć i ich ziarnista struktura. Obraz utworzony w emulsji światłoczułej składa się z mikroskopijnych czarnych (nieprzeźroczystych) ziaren srebra na jasnym (przeźroczystym) tle. Upraszczając zjawisko, przy skanowaniu z pikselem porównywalnym z rozmiarami ziaren, otrzymalibyśmy obraz o 1-bitowej rozdzielczości radiometrycznej (tj. wynikowy piksel skanowania byłby albo biały, albo czarny). Aby przełożyć gęstość optyczną zdjęcia na postać cyfrową, piksel skanowania musi być dostatecznie duży. Problem ten jest analogiczny do problemu druku, gdzie za pomocą czarnych punktów (kropli atramentu w drukarce lub farby drukarskiej) należy oddać różne tony szarości.

Mając na uwadze rozpiętość tonalną zdjęć (wyrażoną przez rozpiętość gęstości optycznych), zdjęcia

powszechnie skanuje się z rozdzielczością 8 bitów, tj. z rozróżnieniem 256 poziomów „szarości”. Aby rozróżnić tyle poziomów w druku, wynikowy piksel drukowanego obrazu musiałby składać się z $16 \times 16 = 256$ pól białą-czarnych. Każdemu takiemu polu odpowiada jedna kropla atramentu (lub jej brak). Dysponując takim polem, poprzez dozowanie kropli atramentu, można w rezultacie uzyskać piksel drukowanego obrazu o stopniowanej jasności w zakresie od 0 (brak atramentu) do 255 (wszystkie pola wypełnione kroplami atramentu). Przekładając to na ziarnistą strukturę obrazu i zakładając – dla uproszczenia – regularny rozkład ziaren, piksel skanowania nie może być mniejszy od 16-krotnego wymiaru takich ziaren. Poza samą ziarnistą strukturą obrazu srebrnego, należy również mieć na uwadze nieostrości spowodowane różnymi czynnikami (obiektów, atmosfera, rozmazanie spowodowane ruchem samolotu, inne). W rezultacie istnieje związek między jakością zdjęcia, ograniczoną nieostrościami i ziarnistą strukturą, a minimalnym wymiarem piksela skanowania.

W procesie skanowania zdjęć należy tak dobrać piksel skanowania, aby nie zdegradować tkwiącego w nich potencjału pomiarowego wyrażanego przez wysoką jakość geometryczną i zdolność rozdzielczą. Teoria próbkowania wskazuje, że dla zachowania zdolności rozdzielczej oryginalnych zdjęć należy je skanować z pikselem w zakresie:

$$\frac{1}{2\sqrt{2}R} < P_{\text{skan}} < \frac{1}{2R} \quad (2)$$

gdzie:

R – zdolność rozdzielcza zdjęć wyrażona w parach linii/mm,

P_{skan} – wymiar piksela skanowania zdjęć.

Tabela 2 prezentuje rekomendowane wielkości piksela skanowania, określone zgodnie z powyższą regułą, dla współczesnych zdjęć lotniczych (tj. wykonanych kamerami FMC nowej generacji, na stabilizowanym zawieszaniu) na różnych filmach lotniczych [Kurczyński 1999a].

Skanowanie z pikselem mniejszym niż rekomendowany jest nieuzasadnione, skutkuje bowiem wzrostem

Tabela 2. Rekomendowana rozdzielczość skanowania współczesnych zdjęć lotniczych.

Table 2. Recommended scanning resolution of present aerial photos.

Rodzaj filmu	Zdolność rozdzielcza zdjęć dla niskiego kontrastu obiektów (1,6:1) [pary linii/mm]	Nieostrość [μm]	Rekomendowany piksel skanowania [μm]
Niskoczuły czarno-biały	40	25	9÷12
Średnionoczuły czarno-biały	35	29	10÷14
Wysokoczuły czarno-biały	30	33	12÷16
Średnionoczuły barwny	30	33	12÷16
Barwny IR	25	40	14÷20

„szumów” spowodowanych ziarnistą strukturą obrazu i poza zwiększeniem objętości wynikowych zbiorów nie wnosi nowych informacji. Odwrotnie, skanowanie z większym pikselem oznacza degradację potencjału tkwiącego w oryginalnych zdjęciach.

Czułym elementem w kamerach cyfrowych, zamiast ziarnistej emulsji, jest sensor elektroniczny CCD w formie linijki lub prostokątnej tablicy czułych elementów. Dzięki temu obraz uzyskany taką kamerą charakteryzuje się – w porównaniu z emulsją srebrną – znacznie większym zakresem dynamicznym i większą rozdzielczością radiometryczną. Zakres dynamiczny (tj. stosunek maksymalnej wartości sygnału z elektronicznego sensora do „szumu” sygnału) jest jak około 3500:1, tj. odpowiada 11÷12 bitom (11 bitów oznacza możliwość rozróżnienia 2048 poziomów sygnału, a 12 bitów odpowiednio 4096). Oznacza to około 16-krotny wzrost rozdzielczości radiometrycznej w porównaniu ze zdjęciami tradycyjnymi (niektórzy autorzy oceniają praktyczny zakres dynamiczny skanowanych zdjęć na 6÷7 bitów, a obrazów z kamer cyfrowych na 10÷12 bitów, nadal daje to około 16-krotną relację tych zakresów). Ma to oczywisty związek z pojemnością informacyjną obrazów. Teoria przetwarzania sygnałów pozwala określić ilościowy związek między wielkością piksela (na gruncie tej teorii określanej jako „rozdzielczość prze-

strzenna") a rozdzielczością radiometryczną (tj. „rozdzielczością amplitudową”). Zgodnie z tą teorią obraz cyfrowy o rozdzielczości 12 bitów (używa się określenia „próbki z głębią” 12 bitów) ma taką samą pojemność informacyjną jak taki sam obraz o rozdzielczości 8 bitów, zawierający 4 razy więcej pikseli (tj. z pikselem dwukrotnie mniejszym). Inaczej mówiąc: **piksel-12 bitowy jest – pod względem pojemności informacyjnej – ekwiwalentny $2 \times 2 = 4$ pikselom 8-bitowym.**

Powyższe przesłanki teoretyczne pozwalają znaleźć praktyczne relacje między potencjałem informacyjnym analogowych i cyfrowych systemów obrazowania. Badania laboratoryjne pokazują, że zdjęcie analogowe po „optymalnym” zeskanowaniu (w rozumieniu wcześniejszych rekomendacji) oraz obraz z kamery cyfrowej, oba z tym samym wymiarem piksela terenowego, różnią się przestrzenną zdolnością rozdzielczą w proporcji jak 1:1,8 na korzyść obrazu cyfrowego (Leberl i in. 2003). Różnica ta jest spowodowana ziarnistą strukturą zdjęcia oraz różną rozdzielczością radiometryczną obu systemów. Zdjęcie lotnicze po zeskanowaniu zawiera „szum” spowodowany ziarnem emulsji. Widać to szczególnie na jednorodnych powierzchniach, gdzie piksele skanowania wykazują znaczne zróżnicowanie wartości; obraz takiej powierzchni z kamery cyfrowej jest bardziej „gładki”.

Powyższe przesłanki można ująć w zależność określającą warunek zrównania przestrzennej rozdzielczości analogowych i cyfrowych systemów obrazowania:

$$P_{cyfr} = k P_{skan} M_{zdej} \quad (3)$$

gdzie:

- P_{cyfr} – terenowy wymiar piksela kamery cyfrowej,
- P_{skan} – wymiar piksela skanowania zdjęć,
- M_{zdej} – mianownik skali zdjęć,
- k – współczynnik empiryczny określający wpływ na przestrzenną zdolność rozdzielczą ziarnistej struktury zdjęcia analogowego i różnic rozdzielczości radiometrycznej systemu analogowego i cyfrowego. Przy porównaniu systemów cyfrowych o rozdzielczości radiometrycznej 11–12 bitów ze zdjęciami skanowanymi z „optymalnym” pikselem (w rozumieniu wcześniejszych rekomendacji – wzór 2) przyjmuje się $k \approx 1,8$.

Powyższa zależność pozwala znaleźć parametry obrazowania cyfrowego o zasobie treści odpowiadającej danym zdjęciom lotniczym, a tym samym projektować parametry obrazowania cyfrowego dla określonych zadań pomiarowych.

Przytoczone różnice pojemności informacyjnej obu systemów obrazowania przekładają się na potencjał kartograficzny obu typów obrazów, wyrażany przez ich możliwości pomiarowe i interpretacyjne. W świetle powyższych relacji przestrzennej zdolności rozdzielczej obrazów otrzymanych kamerą cyfrową i zdjęć skanowanych, przy uwzględnieniu jakości współczesnych zdjęć lotniczych wykonanych kamerami nowej generacji i zachowaniu rekomendacji ich skanowania, można następująco sformułować porównanie potencjału interpretacyjnego kamery analogowej i kamery cyfrowej: pod względem potencjału interpretacyjnego odpowiednikiem współczesnej, lotniczej, analogowej kamery pomiarowej o formacie 23×23 cm, jest kamera cyfrowa zawierająca około 11 tysięcy pikseli w kierunku poprzecznym do kierunku lotu.

Dotychczasowe niebogie doświadczenia praktyczne z kamerami cyfrowymi potwierdzają ten wniosek. Spośród obecnych na rynku kamer cyfrowych warunk ten spełniają kamery DMC2001, UltraCam-D, HRSC-AX150, HRSC-AX047, a kamera ADS40 spełnia go ze znacznym nadmiarem.

W kontekście dokładności geometrycznej opracowania dodatkową zaletą kamer cyfrowych jest:

- trzykrotne odwzorowanie terenu w każdym szeregu kamerami opartymi na koncepcji skanera elektrooptycznego lub
- możliwość zwiększonego pokrycia podłużnego obrazów wykonanych kamerami opartymi na prostokątnej matrycy CCD, praktycznie bez wzrostu kosztów opracowania.

W przypadku cyfrowego opracowania automatycznego powyższe różnice jakości zdjęć analogowych i obrazów cyfrowych przekładają się na jakość korelacji obrazów (ang.: *image matching*). Praktyczne pomiary wskazują, że jakość korelacji obrazów cyfrowych jest około 2,5 razy lepsza niż zdjęć skanowanych (tj. błąd średni korelacji odniesiony do wymiarów piksela jest 2,5 razy mniejszy) (Leberl i in. 2003). W rezultacie oznacza

to np. lepszą jakość aerotriangulacji czy Numerycznego Modelu Terenu.

Pojemność informacyjna zdjęć i obrazów uwarunkowana ich zdolnością rozdzielczą i rozdzielczością radiometryczną jest pierwszorzędnym czynnikiem determinującym ich potencjał kartograficzny. Przybliżeniu problemu potencjału kartograficznego zdjęć i obrazów i wynikającej z tego ich użyteczności dla realizacji różnych zadań pomiarowych poświęcony jest rozdział 5.

5. Ocena potencjału kartograficznego zdjęć i obrazów

5.1. Zdefiniowanie problemu oceny potencjału kartograficznego

Typowe produkty kartograficzne spełniają jednoznacznie określone wymagania określające jakość produktu finalnego. W praktyce geodezyjnej wymagania te są skodyfikowane w formie wytycznych technicznych (standardów technicznych).

W przypadku map sytuacyjno-wysokościowych podstawowymi parametrami określającymi jakość mapy są:

- dokładność sytuacyjna (dokładność lokalizacji sytuacyjnej) obiektów na mapie. W praktyce krajowej określa się ją zwykle na 0,3 mm w skali mapy (błąd średni),
- dokładność wysokościowa, określana w praktyce krajowej na 1/3 zasadniczego cięcia warstwicowego (samą wielkość zasadniczego cięcia precyzują instrukcje, w zależności od stopnia złożoności rzeźby terenu. Instrukcja określa również dokładność wysokościową w zależności od spadku terenu),
- zakres treści mapy, tj. szczegółowy wykaz obiektów, jaki ma się znaleźć na mapie. Zależy to od rodzaju mapy, a szczegółowo precyzyjnie określają odpowiednie instrukcje techniczne.

Parametry te dla mapy sytuacyjno-wysokościowej w tradycyjnym ujęciu są pochodną skali mapy. W pierwszym rzędzie to w parametrze skali mapy zakodowane są powyższe wymagania jakości mapy.

W przypadku map numerycznych pojęcie skali mapy utraciło ten sens, pozycja obiektów jest tu kodowana w skali terenowej. Nadal jednak używany jest parametr skali jako ekwiwalent określający szczegółowość (zasób treści) i dokładność geometryczną mapy.

W przypadku cyfrowej ortofotomapy parametrami określającymi jej jakość są:

- terenowy wymiar piksela ortofotomapy,
- średni błąd położenia sytuacyjnego.

W przypadku druku mapy (niskonakładowym – plotowanie na ploterze lub wysokonakładowym – druk) pojawia się skala ortofotomapy. Można mówić wówczas o wymiarze piksela wyrażonym w skali mapy.

W przypadku Numerycznego Modelu Terenu (NMT) parametrami określającymi jakość takiego produktu są:

- struktura geometryczna danych tworzących NMT (siatka – GRID, punkty rozproszone – TIN),
- dokładność wysokościowa NMT, rozumiana jako średni błąd wysokości wyinterpolowanej z NMT w dowolnym punkcie (punkcie o zadanej lokalizacji sytuacyjnej),
- terenowa wielkość oczka siatki (dla struktury GRID) lub średnia odległość punktów pomiarowych (dla struktury TIN czy innej).

Wymienione powyżej produkty są wynikiem opracowania fotogrametrycznego zdjęć lotniczych. Tak dobiera się parametry geometryczne zdjęć lotniczych, aby w danych warunkach produkcyjnych wytworzyć produkt spełniający postawione wymagania. W praktyce projektowania zdjęć lotniczych sprowadza się to do zaprojektowania dwóch podstawowych parametrów:

- skali zdjęć lotniczych determinującej możliwy do osiągnięcia zasób treści tworzonej mapy i jej dokładność sytuacyjną oraz koszty wytworzenia tej mapy. Dokładność sytuacyjna opracowania jest wprost proporcjonalna do skali zdjęć (im większa skala zdjęć, tym wyższa dokładność sytuacyjna pomiaru i większy zasób możliwej do odczytania treści, ale i wyższe koszty opracowania),

- obiektywu kamery (ogniskowa kamery wraz ze skalą zdjęć określają wysokość fotografowania, dokładność pomiaru wysokościowego jest odwrotnie proporcjonalna do wysokości lotu).

Dziesięciolecia praktyki fotogrametrycznej ustaliły relacje między skalą mapy a skalą zdjęć lotniczych, z których daną mapę można wytworzyć. Rozwój optyki, metod opracowania i stosowane technologie produkcyjne zmieniają te relacje w kierunku wzrostu dyspro-

porcji między skalą mapy a skalą zdjęć, z oczywistymi wynikającymi z tego efektami ekonomicznymi. Są to problemy powszechnie znane w środowisku, a obowiązujące instrukcje techniczne precyzyjnie określają te relacje.

Przedstawiona sytuacja przestaje być tak klarowna, jeżeli przedmiotem zainteresowania nie jest potencjał kartograficzny klasycznych zdjęć lotniczych, lecz obrazów cyfrowych, pozyskiwanych kamerami cyfrowymi (typu skaner elektrooptyczny z linią CCD lub kamera z matrycą elementów CCD) z pułapu lotniczego czy satelitarnego. Upraszczając problem, w przypadku zdjęć lotniczych o potencjale kartograficznym tych zdjęć – w pierwszym rzędzie – decyduje ich zdolność rozdzielcza, będąca pochodną skali zdjęć. Ta zdolność rozdzielcza jest tu jednoznacznie zdefiniowana i może być precyzyjnie wyznaczona. W przypadku obrazów cyfrowych trudno jest mówić o ich skali, a możliwości interpretacyjne obrazów zależą od wymiaru piksela. Spotykamy się więc tutaj z innymi wielkościami, należy zdefiniować parametry właściwe dla określenia potencjału kartograficznego obrazów oraz znaleźć relacje tych parametrów z parametrami opisującymi klasyczne zdjęcia lotnicze.

Wokół tych problemów obserwuje się w środowisku wiele nieporozumień, skutkujących tym, że pod tymi samymi pojęciami są rozumiane różne treści. Przykładem tego może być np. utożsamianie terenowej wielkości piksela obrazu cyfrowego z jego terenową zdolnością rozdzielczą. Ten brak jednakowego rozumienia pojęć może prowadzić do bardziej zasadniczych nieporozumień, np. w ocenie potencjału obrazów o określonych parametrach. Sytuację komplikuje dodatkowo fakt, że obraz „pikselowy” nie ma skali, można go (lub produkty z niego pochodne) wizualizować (wyświetlać na ekranie czy plotować) w dowolnej skali, co zaciemnia faktyczne relacje między obrazem a produktem, jaki z niego można wytworzyć.

Aby ocenić potencjał kartograficzny danych obrazów cyfrowych i stwierdzić ich przydatność do wytworzenia (czy aktualizacji) mapy sytuacyjno-wysokościowej należy:

– ocenić dokładność pomiaru sytuacyjnego i wysokościowego na bazie obrazów i porównać te dokładności z wymaganymi dla tworzonej mapy,

– ocenić możliwości interpretacyjne obrazów, tj. ocenić ich zasób treści i porównać ten zasób z zakresem treści wymaganej dla tworzonej mapy. Ocena taka odpowiada na pytanie: czy (w jakim zakresie) możliwa do ekstrakcji informacja jakościowa z obrazów jest adekwatna do zakresu treści, która obowiązuje dla tworzonej mapy.

Można się spotkać z oceną potencjału zdjęć czy obrazów odnoszącą się tylko do oceny dokładności geometrycznej. Autorzy takich ocen konkludują, że dokładność ta spełnia wymagania mapy w określonej skali, sugerując tym samym, że skoro tak, to dane obrazy nadają się do tworzenia czy aktualizacji mapy w tej skali. Tkwi tu istotne nieporozumienie. Tymczasem o przydatności bądź nieprzydatności decydują oba wymienione kryteria, a analiza i praktyka pokazują, że drugie kryterium (dotyczące zasobu informacyjnego) jest bardziej krytyczne. Na gruncie fotogrametrii wiadomo, że w zakresie kartografii średnioskalowej i drobnoskalowej o przełożeniu między skalą mapy a skalą zdjęć fotogrametrycznych, z których można tę mapę wytworzyć, decydują w pierwszym rzędzie ograniczone możliwości interpretacyjne zdjęć. Spełnienie wymagań dokładnościowych jest – w zakresie skal średnich – mniej krytyczne.

Możliwości interpretacyjne zdjęć i obrazów są pochodną ich zdolności rozdzielczej. Pojęcie zdolności rozdzielczej zdjęć lotniczych jest pojęciem jednoznacznie zdefiniowanym i może być dla danych zdjęć jednoznacznie określone. Trudniej jest pojęcie zdolności rozdzielczej przenieść na obrazy cyfrowe. Przed przejściem do oceny zasobu treści obrazów cyfrowych należy uporządkować pojęcie ich zdolności rozdzielczej. W rozdziale 4: „Porównanie pojemności informacyjnej zdjęcia analogowego i obrazu cyfrowego” zostało zdefiniowane pojęcie przestrzennej zdolności rozdzielczej w odniesieniu do tradycyjnych zdjęć lotniczych oraz obrazów cyfrowych. W rozdziale tym przedstawiono relację między terenową zdolnością rozdzielczą obrazu cyfrowego a wymiarami jego piksela oraz zilustrowano na przykładach efekty, jakie występują przy obrazowaniu obiektów o wymiarach zbliżonych do terenowej wielkości piksela. W konkluzji zostało powiedziane, że terenowa zdolność rozdzielcza obrazu cyfrowego, rozumiana jak na gruncie tradycyjnych zdjęć lotniczych, jest równa dwóm – trzem wymiarom piksela terenowego. W dalszej części podjęto

próbę porównania pojemności informacyjnej analogowych i cyfrowych systemów obrazowania uwzględniając – obok relacji ich przestrzennej zdolności rozdzielczej – również istotne różnice rozdzielczości radiometrycznej obu systemów.

5.2. Kryteria oceny potencjału kartograficznego zdjęć i obrazów

Ocena dokładności geometrycznej opracowania

W kontekście tworzenia (czy aktualizacji) map sytuacyjno-wysokościowych należy mówić o wymaganej dokładności sytuacyjnej oraz wysokościowej takiej mapy. Standardowo przyjmuje się, że:

– średni błąd sytuacyjny wynosi 0,3 mm w skali mapy,

– średni błąd wysokościowy dla terenu płaskiego wynosi 1/3 zasadniczego cięcia warstwicowego mapy.

Powszechnie wiadomo, że dokładność sytuacyjna opracowania zdjęć liniowo zależy od skali zdjęć i dokładności ich pomiaru. Błąd sytuacyjny jest wprost proporcjonalny do mianownika skali zdjęć i błędów ich pomiaru. Dla obrazów cyfrowych błąd opracowania jest wprost proporcjonalny do terenowego wymiaru piksela. Można to ująć zależnością:

$$m_{\text{syty}} = M_{\text{zdj}} m_{\text{pom}} = \frac{W}{f} m_{\text{pom}} = k P_{\text{teren}} \quad (4)$$

gdzie:

- m_{syty} – dokładność opracowania sytuacyjnego,
- M_{zdj} – mianownik skali zdjęć,
- W – wysokość lotu,
- f – ogniskowa kamery,
- m_{pom} – błąd pomiaru na zdjęciach,
- P_{teren} – terenowy wymiar piksela,
- k – współczynnik empiryczny, zwykle $k \approx 0,5 - 0,9$ [Schiewe 1995].

Pierwsza część tego wzoru jest znana z klasycznego opracowania fotogrametrycznego. Druga część odnosi się do obrazów cyfrowych. Należy podkreślić, że zarówno błąd pomiaru na zdjęciach (m_{pom}), jak i współczynnik „ k ” bardzo zależą od kontrastu obrazu. W przypadku automatycznego

opracowania obrazów cyfrowych istotny wpływ na jakość korelacji obrazów ma ich jakość radiometryczna.

Dokładność opracowania wysokościowego zdjęć lotniczych zależy od skali tych zdjęć, ich stosunku bazowego i dokładności pomiaru paralaksy na zdjęciach. Dla danego obiektu i typowego pokrycia podłożnego zdjęć (tj. dla danego stosunku bazowego) błąd opracowania wysokościowego jest wprost proporcjonalny do wysokości lotu. Zależność ta pozostaje aktualna również dla kamer cyfrowych. Dokładność opracowania wysokościowego można zatem wyrazić jako:

$$m_{\text{wys}} = \frac{W}{f} \frac{W}{B} m_k \quad (5)$$

gdzie:

- m_{wys} – dokładność opracowania wysokościowego,
- W – wysokość lotu,
- f – ogniskowa kamery,
- W/f – mianownik skali zdjęć,
- B – baza podłużna,
- B/W – stosunek pomiaru paralaksy podłużnej,
- m_k – błąd pomiaru paralaksy podłużnej.

Dla obrazów cyfrowych błąd pomiaru paralaksy podłużnej można wyrazić w funkcji rozmiaru piksela, co prowadzi do zależności przekształconej do postaci:

$$m_{\text{wys}} = k \frac{W}{B} P_{\text{teren}} \quad (6)$$

gdzie:

- k – współczynnik empiryczny, zwykle $k \approx 0,3 - 0,8$ [Schiewe 1995],
- P_{teren} – terenowy wymiar piksela.

Uwzględniając powyższe, empirycznie potwierdzone zależności, można określić przewidywaną dokładność geometryczną sytuacyjnego i wysokościowego opracowania zdjęć i lotniczych obrazów cyfrowych oraz obrazów pozyskiwanych z popularnych systemów satelitarnych.

Ocena zasobu treści zdjęć i obrazów cyfrowych

Przydatność konkretnych obrazów cyfrowych dla opracowania (czy aktualizacji) mapy w określonej skali i o określonej zawartości treści zależy od wielu czynni-

ków związanych z terenem (rzeźba terenu, kontrast obiektów) oraz parametrów tych zdjęć, a w tym przestrzennej zdolności rozdzielczej. Oczywiście jest, że zasób treści zdjęć zależy w pierwszym rzędzie od ich przestrzennej zdolności rozdzielczej. To rozdzielczość określa potencjalne możliwości interpretacyjne, zatem zdolność rozdzielcza warunkuje, czy i w jakim stopniu obiekty topograficzne, stanowiące wymaganą treść mapy w danej skali, mogą być odczytane i pomierzone na zdjęciach. Lata praktyki ukształtowały relacje między skalą tworzonej mapy, pod którą kryje się wymagany zasób treści, oraz skalą zdjęć lotniczych, których rozdzielczość umożliwia – w danych warunkach technologicznych fotogrametrycznego opracowania – opracowanie mapy o wymaganym zasobie treści.

W przypadku obrazów pozyskiwanych kamerami cyfrowymi (lotniczych czy satelitarnych) parametrem określającym ich możliwy do ekstrakcji zasób treści są wymiar piksela i jakość radiometryczna, wyrażana przez rozdzielczość radiometryczną. W rozdziale 4 podano ilościowe relacje tych parametrów pozwalające porównywać analogowe i cyfrowe systemy obrazowania (wzór 3). Pozwala to wskazać pożądane parametry zdjęć analogowych i systemów cyfrowych dla wytworzenia map sytuacyjno-wysokościowych w określonej skali. Parametry te przedstawia tabela 3.

Zawarte w tabeli relacje dotyczą:

– współczesnych technologii opracowania fotogrametrycznego,

Tabela 3. Rekomendowane parametry zdjęć lotniczych i systemów cyfrowych dla opracowania map sytuacyjno-wysokościowych o treści topograficznej.

Table 3. Recommended parameters of aerial photos and digital imaging systems for compilation of topographic planimetric and contour maps.

Skala mapy topograficznej	Skala zdjęć lotniczych	Piksel terenowy obrazu cyfrowego
1:2000	1:10 000	0,25 m
1:5000	1:18 000	0,45 m
1:10 000	1:26 000	0,65 m
1:25 000	1:40 000	1,00 m
1:50 000	1:70 000	1,75 m

– zdjęć lotniczych wykonywanych współczesnymi kamerami lotniczymi na filmie drobnoziarnistym (nisko-czułym lub średnioczułym) i skanowanych zgodnie z rekomendacjami zawartymi w rozdz. 4 (dla obliczeń przyjęto piksel skanowania 14 μ m),

– kamer cyfrowych o rozdzielczości radiometrycznej 11–12 bitów.

Przytoczone w tabeli parametry tradycyjnych zdjęć lotniczych i systemów cyfrowych wywodzą się ze stosowanych w praktyce przełożeń między skalą map a skalą zdjęć oraz relacji pojemności informacyjnej analogowych i cyfrowych systemów obrazowania. Nie należy jednak podanych relacji traktować jako uniwersalne. W konkretnych przypadkach mogą mieć miejsce odstępstwa od tych reguł, szczególnie w przypadku tworzenia map numerycznych, często o zasobie treści istotnie różniącym się od zasobu tradycyjnych map topograficznych.

Komentarz do rekomendowanych relacji:

1. Podane rekomendacje dotyczą przypadku tworzenia map topograficznych w określonej skali o „tradycyjnym” zasobie treści.
2. Zakres treści mapy topograficznej w danej skali nawet w tradycyjnym rozumieniu jest różny w różnych krajach. Z tego punktu patrząc, mapy w tradycji europejskiej są wyraźnie bogatsze w treść od map amerykańskich, a mapy polskie bogatsze od map europejskich. Przekłada się to na związek skali mapy z wymaganymi parametrami zdjęć i obrazów.
3. Zakres treści map topograficznych zależy od charakteru terenu: jest inny dla obszarów miejskich, a inny dla odkrytych obszarów rolniczych. Przekłada się to na związek skali mapy z wymaganymi parametrami zdjęć i obrazów.
4. Obecnie tworzy się mapy topograficzne w wersji numerycznej. Częściej mówi się raczej o bazie danych topograficznych niż o mapie. Pojęcie „skali” takiej mapy jest w znacznym stopniu umowne.
5. Zakres treści map topograficznych (czy baz danych topograficznych) może znacznie odbiegać od zakresu tradycyjnych map, aż do sytuacji, gdy mapa taka ma treść zorientowaną na konkretne potrzeby, np. danej branży (mapa „branżowa”), o znacznie zubożonej treści. W takich przypadkach problem należałoby

widzieć poprzez możliwość interpretacji obrazu w zakresie obiektów stanowiących treść konkretnego opracowania.

6. Problem relacji między skalą mapy a parametrami zdjęć czy obrazów nieco inaczej kształtuje się w przypadku tworzenia nowej mapy topograficznej i aktualizacji takiej mapy. Przy aktualizacji mapy, posługując się istniejącą mapą, można odczytać więcej detali z obrazu (np. decyzja, czy widoczna linia to droga polna, czy granica działki).
7. Na relacje między skalą mapy a parametrami zdjęć i obrazów ma wpływ technologia opracowania (nieco inaczej będzie przy wektoryzacji „mono” ortofotobrazu, a inaczej przy stereodigitalizacji).

Porównując oba kryteria określające potencjał kartograficzny obrazów, tj. dokładność geometryczną opracowania i możliwości interpretacyjne, łatwo zauważyć, że dostępne obrazy satelitarne łatwiej spełniają wymagania dokładności geometrycznej niż wymagania dotyczące zasobu treści. Krytycznym czynnikiem limitującym potencjał kartograficzny dostępnych obrazów satelitarnych jest ich ograniczony zasób treści, a dopiero w drugiej kolejności ich dokładność geometryczna.

Ocena możliwości generowania ortofotomap ze zdjęć i obrazów cyfrowych

Jeżeli celem opracowania jest wytworzenie cyfrowej ortofotomapy, to jej zdolność rozdzielczą określa wymiar wynikowego piksela terenowego. Należy mieć na uwadze, że w procesie ortorektifikacji następuje przepróbkowanie (ang.: *resampling*) oryginalnego obrazu na wynikową ortofotomapę. Każde przepróbkowanie wiąże się z pewną stratą informacji, na poziomie 10–20%. Dla zachowania właściwych relacji między rozdzielczością obrazu a rozdzielczością ortofotomapy, piksel obrazu czy skanowanego zdjęcia powinien być mniejszy o 10–20% od piksela generowanej ortofotomapy.

Cyfrowa ortofotomapa funkcjonuje zwykle w formie cyfrowej, nie ma więc zastosowania pojęcie jej skali. Skala pojawia się przy wydruku cyfrowej ortofotomapy. Przy wydruku ortofotomapy przyjmuje się, że dla zachowania oryginalnej treści ortofotomapy cyfrowej wy-

druk powinien mieć rozdzielczość około 10 pikseli/mm. Praktyka pokazuje, że przy korzystaniu z obrazów cyfrowych i właściwej ich obróbce cyfrowej można uzyskać zadowalający efekt wizualny już przy wydruku o rozdzielczości 5–7 pikseli/mm.

Przyjmuje się dodatkowo, że dokładność cyfrowej ortofotomapy, wyrażona w wielkości jej piksela, wynosi 2–3 piksele. Dla uzyskania takiej dokładności konieczne jest – na etapie ortorektifikacji – wykorzystanie Numerycznego Modelu Terenu (NMT) o odpowiedniej dokładności wysokościowej.

Uwzględniając powyższe rekomendacje, można określić, w jakiej maksymalnej skali można wizualizować (plotować, drukować) cyfrowe ortofotomapy, wytworzone z powszechnie dostępnych obrazów satelitarnych.

Obrazy satelitarne:

– z pikselem $P_{\text{ter}} = 30$ m (np. wielospektralne kanały ETM Landsat 7) umożliwiają wytworzenie ortofotomap w skali 1:150 000,

– z pikselem $P_{\text{ter}} = 20$ m (np. wielospektralne kanały SPOT 1–4) umożliwiają wytworzenie ortofotomap w skali 1:100 000,

– z pikselem $P_{\text{ter}} = 15$ m (np. panchromatyczny kanał ETM Landsat 7) umożliwiają wytworzenie ortofotomap w skali 1:75 000,

– z pikselem $P_{\text{ter}} = 10$ m (np. wielospektralne kanały SPOT 5, panchromatyczne kanały SPOT 1–4) umożliwiają wytworzenie ortofotomap w skali 1:50 000,

– z pikselem $P_{\text{ter}} = 5$ m (np. panchromatyczny kanał SPOT 5, panchromatyczny kanał IRS-1C/1D) umożliwiają wytworzenie ortofotomap w skali 1:25 000,

– z pikselem $P_{\text{ter}} = 1,8 \div 2,5$ m (np. panchromatyczny kanał SPOT 5 w trybie „super”, obrazy panchromatyczne EROS-A) umożliwiają wytworzenie ortofotomap w skali 1:10 000,

– z pikselem $P_{\text{ter}} = 1$ m (np. wysokorozdzielcze systemy obrazowania satelitarnego: Ikonos-2, QuickBird) umożliwiają wytworzenie ortofotomap w skali 1:5000.

Wizualizacja cyfrowych ortofotomap w większej skali nie zwiększa zakresu informacji odczytywanych przy wizualnym oglądzie ortofotomapy.

Porównanie wymaganej rozdzielczości obrazów cyfrowych dla tworzenia topograficznej mapy wektoro-

wej i ortofotomapy potwierdza znany fakt, że dla wytworzenia cyfrowej ortofotomapy wystarczają obrazy o niższej zdolności rozdzielczej niż dla wytworzenia mapy wektorowej w tej samej skali (przykład: zdjęcia 1:26 000 pozwalają wytworzyć ortofotomapę odpowiadającą skali 1:5000, ale mapę wektorową tylko w skali 1:10 000).

5.3. Ocena przydatności wysokorozdzielczych obrazów satelitarnych dla tworzenia produktów kartograficznych

Przez wiele lat komercyjne zastosowania obrazów satelitarnych były ograniczone dostępnymi obrazami z pikselem 10 m i stereoskopią „z sąsiednich” orbit (jak SPOT). Od niedawna działają operacyjnie systemy obrazowania z pikselem 1 m, a nawet nieco mniejszym. Stawia to oczywiste pytanie: czy (w jakim stopniu) obrazy te mogą być przydatne dla wytwarzania typowych produktów kartograficznych. Odpowiedź na takie pytania powinna uwzględniać kryteria zarówno techniczne, jak i ekonomiczne, szczególnie w porównaniu z rozwiązaniem bazującym na tradycyjnych zdjęciach lotniczych.

W literaturze można spotkać się z różnymi opiniami na temat zakresu przydatności wysokorozdzielczych obrazów satelitarnych. Niejednoznaczne są opinie o potencjale kartograficznym tych obrazów. Można wskazać kilka powodów tych rozbieżności:

1. Brak dostatecznych wyników eksperymentalnych potwierdzających praktyczny zakres użyteczności obrazów, szczególnie w kontekście prac kartograficznych prowadzonych na szerszą skalę. Satelitarne obrazy dużej rozdzielczości są dostępne od końca 1999 r., tj. od umieszczenia na orbicie satelity Ikonos-2 – pierwszego, komercyjnego systemu „metrowego”. Jednak dopiero po zaistnieniu systemu QuickBird i jego wejściu w fazę operacyjną (druga połowa 2002 r.), oraz w przededniu zaistnienia kolejnych, można mówić o rynku takich obrazów.
2. Autorzy, wypowiadając się o potencjale kartograficznym obrazów, nie zawsze rozróżniają potencjał pomiarowy od potencjału interpretacyjnego. Często za kryterium użyteczności przyjmuje się tylko dokładność

pomiarową, tymczasem czynnikiem limitującym przydatność obrazów satelitarnych nie są ich wysokie możliwości pomiarowe, ale ograniczone możliwości interpretacyjne.

3. Powodem nieporozumienia może być niejednoznaczne rozumienie zdolności rozdzielczej obrazów cyfrowych.
4. Środowisko geoinformatyczne jest „zalewane” informacją typu reklamowego. Z oczywistych powodów w takich informacjach wyolbrzymia się zalety obrazów satelitarnych lub przedstawia problem jednostronnie.
5. Opinie o potencjale obrazów satelitarnych formułowane są w oparciu o wybrane próbki tych obrazów pozyskane w bardzo dobrych warunkach atmosferycznych, o bardzo wysokiej jakości, dostarczone przez dystrybutorów tych obrazów. Tymczasem realna jakość tych obrazów może być zróżnicowana, głównie z powodu wpływu atmosfery. Należy mieć na uwadze, że atmosfera wpływa degradującą na jakość, szczególnie w takich obszarach, jak Europa.
6. Autorzy, wypowiadając się o przydatności obrazów satelitarnych do tworzenia produktów kartograficznych w określonej skali, mają często na uwadze tworzenie ortofotomap, tymczasem należy rozróżniać wymagania w odniesieniu do tworzenia ortofotomap i numerycznych map topograficznych (patrz rozdz. 5.2.: „Kryteria oceny potencjału kartograficznego zdjęć i obrazów”).

Kartograficzne wykorzystanie wysokorozdzielczych obrazów satelitarnych

W kontekście tworzenia map sytuacyjno-wysokościowych potencjał kartograficzny obrazów należy rozumieć jako:

- potencjał pomiarowy, określający dokładność sytuacyjną i wysokościową opracowania,
- potencjał interpretacyjny, określający zasób treści obrazu.

W kwestii możliwości korekcy geometrycznej wysokorozdzielczych obrazów satelitarnych można stwierdzić, że stosowanie ścisłych modeli, dokładnych fotopunktów (błąd położenia około 0,5 m) i odpowiednio dokładnego NMT pozwala uzyskać dokładność korek-

cji obrazów QuickBird na poziomie około 1 m, obrazów Ikonos 1÷2 m i EROS 4 m. Wyniki takie, odniesione do rozdzielczości tych obrazów, oznaczają możliwości korekcy na poziomie 1–2 piksele [Kurczyński i in. 2002b; Toutin i in. 2002].

Z dwóch kryteriów potencjału kartograficznego obrazów satelitarnych drugie jest bardziej „krytyczne”. Jeżeli zadaniem jest tworzenie czy aktualizacja mapy topograficznej (o dokładności sytuacyjno-wysokościowej i zasobie treści jak „tradycyjna” mapa topograficzna), to zgodnie z analizą przeprowadzoną w rozdz. 5.2. i zawartymi tam rekomendacjami (tabela 3):

- dla tworzenia mapy w skali 1:10 000 konieczny jest piksel obrazu $P_{\text{tem}} \leq 0,65$ m,
- dla tworzenia mapy w skali 1:25 000 konieczny jest piksel obrazu $P_{\text{tem}} \leq 1,00$ m,
- dla tworzenia mapy w skali 1:50 000 konieczny jest piksel obrazu $P_{\text{tem}} \leq 1,75$ m.

Oznacza to, że spośród dostępnych obrazów satelitarnych obecnie dostępne obrazy Ikonos-2 i QuickBird (z pikselem terenowym w zakresie 0,6÷1,0 m) są przydatne dla tworzenia map topograficznych w skali 1:25 000 w pełnym zakresie treści. Obrazy te nie gwarantują tworzenia map topograficznych w skali 1:10 000 w pełnym zakresie treści.

Dla tworzenia map topograficznych w skali 1:50 000 przydatne i wystarczające są obrazy systemu EROS-1A z pikselem terenowym 1,8 m. Czyni to przydatnym te obrazy dla tworzenia i aktualizacji priorytetowego obecnie w kraju produktu, jakim jest mapa wektorowa poziomu 2 (VMap level 2).

Potencjał kartograficzny obrazów satelitarnych można wyrazić poprzez odniesienie do zdjęć lotniczych o podobnym potencjale. Analiza przeprowadzona w rozdz. 5.2, dotycząca potencjału pomiarowego i interpretacyjnego obrazów cyfrowych, pozwala stwierdzić, że potencjał kartograficzny (pomiarowy i interpretacyjny) wysokorozdzielczych obrazów satelitarnych typu Ikonos czy QuickBird z pikselem zbliżonym do 1 m odpowiada potencjałowi zdjęć lotniczych w skali 1:25 000–1:35 000 (porównaj tabelę 3).

Powyższe stwierdzenie dotyczy potencjału kartograficznego obrazów satelitarnych w kontekście tworzenia topograficznych map wektorowych i nie może być

uogólniane na inne możliwe produkty i zastosowania tych obrazów. Stwierdzenie to jest bardzo ważne z technicznego i ekonomicznego punktu widzenia. Wskazuje, jakie zdjęcia lotnicze mogą być zastąpione przez wysokorozdzielcze obrazy satelitarne. Należy zauważyć, że w literaturze można spotkać bardziej „optymistyczne” oceny potencjału obrazów satelitarnych.

Przedstawione problemy mają kluczowe znaczenie dla aktualnej sytuacji krajowej. Rozpoczęto wdrażanie Bazy Danych Topograficznych (TBD), w skład której wchodzi trzy główne komponenty:

- Numeryczny Model Terenu o dokładności wysokościowej 1 m,
- cyfrowa ortofotomapa z pikselem 0,5 m i dokładnością 1,5 m (3 piksele),
- mapa wektorowa o zasobie treści i dokładności odpowiadającej tradycyjnej mapie topograficznej w skali 1:10 000.

Wytworzenie TBD dla kraju jest zadaniem priorytetowym dla państwowej służby geodezyjnej, jest to jednak zadanie bardzo kosztowne z realizacją obliczoną na wiele lat. Obecnie dostępne wysokorozdzielcze obrazy satelitarne typu Ikonos czy QuickBird nie pozwalają wytworzyć ortofotomapy w standardzie TBD. W zakresie komponentu mapy wektorowej mapa taka może być wytworzona w niepełnym wymiarze treści, ale w perspektywie około 2 lat sytuacja ulegnie zasadniczej zmianie, wraz z uruchomieniem planowanych systemów satelitarnych z pikselem terenowym na poziomie 0,5 m.

W rozdz. 5.2 przedstawiono analizy i kryteria dotyczące generowania ortofotomap z obrazów cyfrowych. Z analizy tej wynika, że:

1. Obrazy panchromatyczne SPOT 1–4 (piksel 10 m) są przydatne dla generowania czarno-białych ortofotomap odpowiadających skali 1:50 000.
2. Obrazy wielospektralne SPOT-5 (piksel 10 m) są przydatne dla generowania barwnych ortofotomap odpowiadających skali 1:50 000.
3. Obrazy panchromatyczne SPOT-5 (piksel 5 m) lub IRS-1C/1D (piksel 5,8 m) są przydatne dla generowania czarno-białych ortofotomap odpowiadających skali 1:25 000.
4. Obrazy panchromatyczne SPOT-5 w trybie „super” (piksel 2,5 m) lub obrazy EROS-1A (piksel 1,8 m)

są przydatne dla generowania czarno-białych ortofotomap odpowiadających skali 1:10 000.

5. Obrazy Ikonos-2 oraz QuickBird są przydatne dla generowania czarno-białych lub barwnych ortofotomap odpowiadających skali 1:5000.

Odnosząc możliwości generowania cyfrowych ortofotomap z obrazów satelitarnych do aktualnych potrzeb krajowych należy zauważyć przydatność obrazów Ikonos i QuickBird do generowania ortofotomap na potrzeby Systemu Identyfikacji Działek Rolnych – LPIS (LPIS, składowa IACS). Taka ortofotomapa ma piksel terenowy 1 m i dokładność około 2 m, spełnia więc standardy UE w tym zakresie. Cyfrowa ortofotomapa o takich parametrach może być drukowana w skali 1:5000.

6. Podsumowanie

Przez dziesięciolecie rozwoju fotogrametria wypracowała metody opracowania produktów fotogrametrycznych na bazie zdjęć lotniczych. W ślad za tym opracowano bardzo wydajne technologie fotogrametryczne. Zdefiniowano precyzyjnie wskaźniki określające potencjał pomiarowy i interpretacyjny zdjęć. Pozwala to trafnie zaplanować optymalne parametry zdjęć lotniczych umożliwiających realizację postawionego zadania pomiarowego. „Optymalne” parametry zdjęć oznacza parametry umożliwiające osiągnięcie zadanych parametrów produktu (np. dokładność i zakres treści mapy) w danych warunkach technologicznych i przy minimalizacji kosztów (głównie: minimalizacji liczby zdjęć koniecznych do opracowywania). Rozwój optyki, mechaniki, elektroniki i metod opracowania skutkował zmianami technologicznymi i zmianami relacji parametrów zdjęć i celu, jakiego mają służyć (w przypadku mapy to tzw. „przełożenie skalowe”) z wynikającymi z tego skutkami ekonomicznymi. Ten ukształtowany przez dziesięciolecie obraz uległ zachwianiu w minionych 3–5 latach, wraz z pojawieniem się jakościowo nowych źródeł obrazowania, tj. lotniczych kamer cyfrowych i wysokorozdzielczych obrazów satelitarnych o potencjale kartograficznym częściowo pokrywającym się z potencjałem zdjęć lotniczych.

Pojawił się problem oceny potencjału tych nowych źródeł i znalezienia relacji między wskaźnikami ich jako-

ści a jakością tradycyjnych zdjęć. Doniesienia literaturowe wskazują na znaczne rozbieżności takich ocen.

W przedstawionej pracy zaproponowano pojęcia i wskaźniki ilościowe umożliwiające ocenę zdolności rozdzielczej obrazów pozyskiwanych kamerami cyfrowymi (lotniczymi czy satelitarnymi). Zdefiniowano pojemność informacyjną obrazów cyfrowych, uwzględniającą – oprócz przestrzennej zdolności rozdzielczej – również rozdzielczość radiometryczną. Pozwala to na porównania tradycyjnych zdjęć lotniczych z obrazami satelitarnymi. Dało to podstawy do znalezienia technicznych relacji między parametrami charakteryzującymi jakość zdjęć lotniczych a parametrami obrazów cyfrowych, a dalej, do technologicznych związków między wytwarzanymi produktami kartograficznymi a planowymi parametrami obrazowania, umożliwiającymi wytworzenie takich produktów.

Przedstawiona w pracy metodyka posłużyła do oceny potencjału pomiarowego wysokorozdzielczych obrazów satelitarnych. Pozwoliło to odnieść obecnie dostępne systemy satelitarne do możliwości tworzenia z nich różnorodnych produktów. W kontekście opracowań mapowych zwrócono uwagę na znaczną rozbieżność między stosunkowo dużym potencjałem pomiarowym takich obrazów (umożliwiającym osiągnięcie dużych dokładności geometrycznych pomiaru) a ograniczonym potencjałem interpretacyjnym tych obrazów.

Przedstawiona w pracy metodyka pozwala postrze-
gać dostępne obecnie źródła obrazowania, a mianowicie:

- tradycyjne zdjęcia lotnicze,
- lotnicze obrazowanie cyfrowe,
- wysokorozdzielcze obrazowanie satelitarne

jako wzajemnie komplementarny system oraz dobierać źródła i parametry obrazowania do potrzeb postawionego zadania pomiarowego. Zaprezentowane w pracy trendy rozwoju pozwalają prognozować, że w najbliższych latach będą równorzędnie dostępne te trzy źródła, ze stopniową tendencją wypierania kamer tradycyjnych przez kamery cyfrowe oraz przejmowaniem części zastosowań bazujących dotychczas na zdjęciach lotniczych przez obrazowanie satelitarne. Będzie to jednak proces stopniowy, rozłożony na kilka lat.

W pracy postawiono tezę o zbliżeniu, rozłącznych dotąd, dwóch nurtów wykorzystania zdjęć i obrazów,

Bibliografia

mianowicie nurtu pomiarowego (reprezentowanego przez fotogrametrów) i nurtu interpretacyjnego (reprezentowanego przez specjalistów teledetekcji). Na etapie pozyskiwania danych źródłowych dla obu wspomnianych nurtów zbliżenie to stało się faktem. Obrazy pozyskiwane lotniczymi kamerami cyfrowymi i obrazy satelitarne charakteryzują się bardzo wysokimi możliwościami pomiarowymi i interpretacyjnymi, dzieje się tak za sprawą ich dużej przestrzennej zdolności rozdzielczej, dużej rozdzielczości radiometrycznej i wielospektralności, wyrażającej się obrazowaniem w kilku wąskich zakresach spektralnych. Obrazowania te są w równym stopniu dedykowane dla opracowań pomiarowych, jak i interpretacyjnych. Ta nowa okoliczność może skłonić przedstawicieli obu nurtów do częściowej rewizji stosowanych dotąd podejść metodycznych oraz zbliżenia obu nurtów.

Podjęta w pracy problematyka ma praktyczne odniesienie do uwarunkowań krajowych. Kraj stoi przed pilną potrzebą wytworzenia produktów o zasięgu krajowym: Numerycznego Modelu Terenu, ortofotomapy i bazy danych topograficznych. Współczesne techniki obrazowania, włączając w to wysokorozdzielcze obrazowanie satelitarne, mogą ułatwić i przyspieszyć realizację tego zadania, a w przyszłości utrzymać te produkty w stanie aktualności. Można oczekiwać, że nowe możliwości techniczne w zakresie obrazowania szybko znajdą odbicie w tworzonych czy aktualizowanych standardach technicznych i wytycznych technicznych z zakresu fotogrametrii. Dla przykładu, przy definiowaniu standardu ortofotomapy nie ma uzasadnienia standard ten definiować oddzielnie dla ortofotomapy wytworzonej ze zdjęć lotniczych i obrazów satelitarnych. Funkcjonujący dotąd w praktyce podział na ortofotomapy „lotnicze” i „satelitarne” traci uzasadnienie w tym sensie, że taki sam produkt końcowy można wytworzyć z różnych danych źródłowych.

Istnieje również szansa, że wysokorozdzielcze obrazy satelitarne dostępne bez zbędnych technicznych i formalnych przeszkód zachęcą organa administracji samorządowej regionalnej i lokalnej do ich wykorzystania dla rozwiązywania regionalnych i lokalnych zadań gospodarczych. Zdjęcia i obrazy zajęłyby wówczas trwałe miejsce w życiu gospodarczym, adekwatne do ich faktycznych możliwości i potencjalnych korzyści.

Cramer M., 2003, *Integrated GPS/inertial and digital aerial triangulation – recent test results*, Photogrammetric Week '03, Heidelberg: Wichmann.

Ewiak I., Kaczyński R. 2004, *Accuracy of DTM generation from SPOT4 and SPOT5-HRS data*, International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, vol. XXXIII, part B7, Istanbul, XX ISPRS Congress, XXXV, B1, Com. I, p. 474–478.

Jacobsen K., 2003, *Geometric Potential of IKONOS and QuickBird-Images*, Photogrammetric Week '03, Heidelberg: Wichmann.

Kaczyński R., 1999, *Satelitarne programy rozpoznawcze i szpiegowskie USA i ZSRR w okresie trwania zimnej wojny*, Geodeta, nr 11 (54), listopad.

Kaczyński R., Ewiak I., Ren Wei Chun, Yang Ming Hui, 2001, *Evaluation of panchromatic IKONOS data for mapping*, Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji, vol. 11, Kraków, s. 3–1 do 3–6.

Kaczyński R., 2002, *Dokładność opracowania ortofotomapy cyfrowej z danych Carterra Geo Pan I Quick Bird Pan*, Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji, Warszawa.

Kaczyński R., Ewiak I., Majde A., 2004, *Accuracy of DTM and ortho generated from IKONOS stereo data*, International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, vol. XXXIII, part B7, Istanbul, XX ISPRS Congress, XXXV, B4, Com. IV, p. 463–464.

Kurczyński Z., 1999a, *Zasady wykonywania prac fotolotniczych. Wytyczne techniczne K-2.7*, GUGiK, Warszawa.

Kurczyński Z., 1999b, *Lotnicze kamery cyfrowe – stan obecny i perspektywy*, Geodeta, nr 11 (54), listopad.

- Kurczyński Z., 2000b, *Lotnicza cyfrowa kamera fotogrametryczna. Nowe wyzwania i szansa*, Geodeta, nr 12 (67), grudzień.
- Kurczyński Z., Wolniewicz W., 2002a, *Wysokorozdzielcze systemy obrazowania satelitarnego*, część I, Geodeta, nr 7 (86), lipiec 2002, część II, Geodeta, nr 8 (87), sierpień.
- Kurczyński Z., Wolniewicz W., 2002b, *Korekcja geometryczna wysokorozdzielczych obrazów satelitarnych*, Geodeta, nr 11 (90), listopad.
- Kurczyński Z., Wolniewicz W., 2003, *SPOT 5 – Nowa jakość obrazowania satelitarnego*, Geodeta, nr 7 (98), lipiec.
- Kurczyński Z., 2004, *Współdziałanie wieloźródłowych systemów obrazowania powierzchni Ziemi*, Prace Naukowe PW, Geodezja, z. 39, Oficyna Wydawnicza PW.
- Kurczyński Z., Wojtynek R., Wolniewicz W., 2004, *Assessment of VHR images utilization for the needs of the polish national geodesy authorities*, Geographical Information Systems in Research & Practice, Zagreb, Croatia, p. 65–71.
- Kurczyński Z., Wolniewicz W., 2005, *Ocena przydatności obrazów satelitarnych o bardzo dużej rozdzielczości (VHRS) do tworzenia baz danych topograficznych*, Przegląd Geodezyjny, nr 5, maj.
- Kurczyński Z., Wolniewicz W., 2005, *Assessment of Very High Resolution Satellite Images (VHR) for the development of topographic database*, 6th Geomatic Week, 8th–12th February, Barcelona.
- Leberl F. i in., 2003, *The UltraCam Large Format Aerial Digital Camera System*, Proceedings of ASPRS, Anchorage, Alaska, 5–9 May.
- Leberl F., Gruber M., 2003, *Flying the New Large Format Digital Aerial Camera Ultracam*, Photogrammetric Week '03, Heidelberg: Wichmann.
- Leica, 1996, *Leica production Information. Test with the new Leica 15/4 UAG-S Lens cone. Results of High-Altitude Photography with Leica RC30 and 15/4 UAG-S Lens Cone.*
- Nale D. K., 2002, *QuickBird – Aerial Product Comparison Report* (prepared by EMAP International for DigitalGlobe, August, www.digitalglobe.com)
- Schiewe J., 1995, *Cartographic potential of MOMS-02/D2 Images Data*. Photogrammetric Week '95, Heidelberg: Wichmann.
- Schlienger R., 1996, *Increased Image Quality Resulting from New Technologies in Aerial Cameras*, International Congress for Photogrammetry, Com. I, Vienna.
- Toutin T., Chenier R., Carbonneau Y., Alcad' de N., 2002, *3D mapping with high resolution images*, Proceedings of 22nd EARSeL Symposium, Prague, Czech Republic, June 4–6.

Summary

For a long time, photogrammetric projects were based on conventional aerial photographs. This situation has been rapidly changed recently. This results from development of new Earth surface imaging systems, including aerial digital cameras and high resolution satellite images, which cartographic potential is comparable with small scale aerial photographs (scale 1:25 000 and smaller). Thus, from the technical point of view, imaging possibilities from satellite platforms are approaching those of aerial ones.

This new situation gives rise to heated discussions within the geoinformation society, concerning further development of conventional aerial cameras and future perspectives of replacing them with new, digital cameras. Considering the foreseen development of satellite, high resolution imaging of the Earth surface, the future of aerial imaging is questioned. Various opinions concerning the discussed issues and various development scenarios are presented. Symptomatic divergence of opinions is interesting; it results from the lack of well-ordered terms, which would allow for comparison of multi-source image data.

The discussed publication proposes a system of terms and quantitative indices which can be used for evaluation of the cartographic potential of multi-source data, i.e.:

- 1) conventional aerial photographs,
- 2) digital images acquired with aerial digital cameras,
- 3) very high resolution satellite images.

This allowed for comparing various systems and became the basis for evaluation of the usefulness of particular photographs and images for implementation of specified measurement tasks.

Development perspectives of various technical means used for satellite and aerial imaging are discussed in the publication. According to the author's opinion, separate consideration of those sources is not justified. They create a system of complimentary components.

The only problem, which should be solved, is to select a source and imaging parameters for a given task. The development trends, presented in the publication, allows to foresee that the discussed three sources will be equally available within the nearest future, with the tendency to replace conventional cameras with digital ones and to take over some applications, which have been based on aerial photographs, by satellite imageries. The tendency of mutual linkage between aerial and satellite imaging, for the needs of existing and new GIS applications, will be much stronger than expansion of one source at the expense of another one. However, this would be a gradual process, which will last several years.

The thesis concerning the approach between the currently separated two trends of the use of photographs and images, namely the measurement trend (represented by photogrammetrists) and the interpretation trend (represented by remote sensing experts), is presented in the publication. This approach becomes the reality for both trends at the source data acquisition stage. Images acquired with aerial digital cameras and satellite images are characterised with high measurement and interpretation possibilities; this results from their high spatial and radiometric resolution, as well as from the multispectral nature of those images, allowing for data acquisition in several spectral bands. Those images are equally dedicated for measurement and interpretation tasks. These new circumstances may impel representatives of both trends to partially revise the currently used methodological approaches and to get them much closer to each other. Such situation is the realisation of the earliest expectation. During XVI-th Congress of International Society of Photogrammetry and Remote Sensing the new definition of photogrammetry was elaborated, connecting photogrammetry and remote sensing into one trend and the name of Society was widened for the „remote sensing” component.

Issues discussed in the publication may be practically referred to the existing conditions of national GIS systems development as well as to their future perspectives.

SŁAWOMIR MIKRUT¹

WPLYW SKANOWANIA I KOMPRESJI METODĄ JPEG NA WYKRYWANIE OBIEKTÓW LINIOWYCH I PUNKTOWYCH NA OBRAZACH CYFROWYCH

Słowa kluczowe:

skanowanie, kompresja, JPEG, zdjęcia lotnicze, obrazy cyfrowe

Abstrakt

W artykule omówiono problem określenia wpływu skanowania i kompresji stratnej obrazów cyfrowych na wykrywanie obiektów liniowych i punktowych. Gwałtowne zwiększenie się zdolności rozdzielczej skanerów pociągnęło za sobą wzrost objętości obrazów rastrowych, a co za tym idzie, konieczność stosowania kompresji stratnych do ich efektywnego przechowywania i manipulowania. Powstał zatem zasadniczy problem, gdzie znajduje się granica stosowania kompresji stratnej, przy której będzie można wykorzystać obrazy do celów fotogrametrycznych. Niniejszy artykuł jest próbą odpowiedzi na to pytanie. Zasadniczym problemem jawi się tutaj kwestia zdefiniowania miary określającej stratę. Zaproponowano dwie: miarę globalną – liczoną jako współczynnik korelacji oraz miarę lokalną – średni błąd położenia punktu wyznaczonego jako przecięcie się krawędzi na obrazie po kompresji w stosunku do obrazu przed kompresją. W przeprowadzonych badaniach wykorzystano metody JPEG, JPEG2000 oraz ECW firmy ER Mapper. Do skanowania użyto profesjonalnego skanera fotogrametrycznego Photoscan TD firmy Intergraph celem zbadania również wpływu wielkości apertury skanowania. Testowano obrazy skanowane z pikselem 7, 14 i 21 mikrometrów. Do celów badań wykorzystano autorskie oprogramowanie FES (ang.: *Feature Extraction Software*).

THE INFLUENCE OF SCANNING AND COMPRESSION BY USING JPEG METHOD ON LINEAR AND POINTS FEATURE EXTRACTION OF DIGITAL IMAGES

Key words:

scanning, compression, JPEG, aerial photography, digital images

Abstract

This article discusses the obstacles concerning an influence of scanning and compression on linear and points feature extraction. The massive increase in resolution ability of scanners caused the increase in raster files and necessity to use a loss compression to manage and save the data effectively. Consequently, a problem that arose concerns issue

¹ Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Geodezji i Inżynierii Środowiska, Zakład Fotogrametrii i Informatyki Teledetekcyjnej, Kraków.

of how to define the boundary of a loss compression usage so that it can be used for photogrammetric purposes. The aim of this article is to provide an answer to the problem mentioned above. The main obstacle in this matter is how to define the measurement concerning the loss. Therefore, the two solutions has been suggested: global measurement counted as coefficient correlation and local measurement as a RMS of the point determined an intersection of the edge of the image, after compression in proportion to image before the compression. While undertaking the research studies, JPEG, JPEG2000 and ECW methods were used. A professional photogrammetric Photoscan TD Intergraph scanner was used for determining an influence of equipment size. The pixel with resolution 7, 14 and 21 micrometers was used during the research, as well as, authoring software FES (Feature Extraction Software).

1. Wstęp

Mimo gwałtownego rozwoju sprzętu komputerowego w ostatnich latach, w tym pamięci masowych szybkiego dostępu, fotogrametria cyfrowa wciąż boryka się z problemem olbrzymiej objętości obrazów. Kulminacja następuje w pracach związanych z wykonywaniem aerotriangulacji dużych bloków zdjęć, gdzie konieczny jest dostęp do kilkudziesięciu czy nawet kilkuset obrazów. Jeśli stosuje się zdjęcia kolorowe, a dzieje się tak coraz częściej, to już przy rozdzielczości skanowania 1000 dpi sumaryczna objętość stu obrazów sięga kilkudziesięciu gigabajtów! Dlatego wciąż trwają poszukiwania skutecznych metod kompresji obrazów cyfrowych. Jedną ze stosowanych w praktyce produkcyjnej metod kompresji obrazów tonalnych jest standard JPEG. Skuteczność tej kompresji potwierdza Internet, bez kompresji JPEG oglądalibyśmy na stronach WWW jedynie teksty i proste rysunki. Ale stosowanie kompresji stratnej w fotogrametrii budzi wciąż żywe dyskusje. Swego czasu pojawiały się nawet głosy o konieczności wprowadzenia formalnego zakazu stosowania kompresji JPEG w procesach fotogrametrycznych. W USA np. nie wolno stosować kompresji stratnej w obrazach medycznych, ale dopuszcza się ją jako standard zapisu ortofotomapy cyfrowych.

W niniejszym artykule zaprezentowano zagadnienie w zakresie dotyczącym lokalizacji granic rozdzielających obszary o różnej jasności. Podjęta została próba znalezienia odpowiedzi na pytanie: gdzie jest granica używalności tej kompresji. Spośród wielu kompresji istniejących na rynku oprogramowania od kilku lat dominującą rolę odgrywa metoda JPEG. Próby porównania jej z innymi jak dotąd wskazują na jej właściwą funkcjonalność, tj. pliki kompresowane tą metodą do pewnego współczynnika dają wymierne efekty w po-

staci mniejszej objętości, pozostawiając geometrię obrazu w stanie nie pogarszającym wyników opracowań fotogrametrycznych. Celem badań było ilościowe określenie spadku jakości obrazów poddawanych kompresji metodą JPEG z jednoczesnym wskazaniem optymalnych warunków skanowania i kompresji obrazów cyfrowych wykorzystywanych dla potrzeb pomiarowych i interpretacyjnych. Powyższemu zagadnieniu została poświęcona rozprawa doktorska (Mikrut 2002).

2. Skanowanie

Popularyzacja w ostatnich latach cyfrowych zdjęć lotniczych spowodowała znaczny rozwój fotogrametrii. Kilka ośrodków badawczych zakupiło wysokorozdzielcze skanery fotogrametryczne, pozwalające na osiągnięcie wysokich rozdzielczości podczas skanowania. Skanery te charakteryzują się głównie bardzo dobrą geometrią zeskanowanych obrazów (rzędu 1–2 mikrometrów). Parametrem, pociągającym za sobą wyjściową wielkość obrazu podawaną najczęściej w MB (megabajtach), jest apertura skanowania, określająca wielkość skanowanego piksela, która inaczej mówiąc decyduje o nominalnej rozdzielczości. Najczęściej podawana jest jako wielkość pojedynczego piksela w mikrometrach. Naturalnie im mniejsza jest wartość apertury skanowania, tym wyższa jest rozdzielczość obrazu, w związku z czym dany piksel reprezentuje mniejszy fragment obrazu (a więc i terenu), co zwiększa szczegółowość, ale również zwiększa objętość plików. Najczęściej wykorzystywane w fotogrametrii rozdzielczości obrazu mieszczą się w przedziale od 15 do 30 mikrometrów. W badaniach wykorzystano skaner Photoscan TD firmy Intergraph, a doświadczenia przeprowadzono na obrazach skanowanych z rozdzielczością 7, 14 i 21 mikrometrów.

3. Kompresja stratna

Obrazy cyfrowe wykazują często duże podobieństwo danych. Podobieństwo takie występuje najczęściej pomiędzy sąsiednimi pikselami, co pozwala w pewien sposób na wprowadzenie „oszczędności” w rejestrowaniu danych na dysku. Dąży się do tego, aby te dane zapisać jak najkrócej. Stąd pomysł kompresji, która ma na celu redukcję liczby bitów potrzebnych na reprezentację obrazu w taki sposób, by jednocześnie algorytm dekodujący mógł zapewnić wierną rekonstrukcję oryginału. Z kompresją obrazów związane jest pojęcie stopnia kompresji, określanego jako stosunek wielkości obrazu po kompresji do obrazu przed kompresją i oznaczanego zwyczajowo jako „k” (czasem podaje się jego odwrotność). W przypadku kompresji zdjęć lotniczych współczynnik ten waha się w granicach od 1:4 do 1:10. Istnieją dwie techniki kompresji danych: bezstratna i stratna (degradowująca obraz).

W kompresji bezstratnej, zwanej także kompresją odwracalną, nie dochodzi do najmniejszej nawet utraty informacji. Zdekompresowany obraz jest numerycznie identyczny z obrazem oryginalnym. W kompresji stratnej, zwanej też nieodwracalną, podczas procesu pewna część informacji jest bezpowrotnie tracona. Powoduje to, że zdekompresowany obraz nie jest numerycznie identyczny z oryginałem. Kompresja bez straty informacji jest stosowana np. w standardzie GIF oraz TIFF, często jako jedna z opcji wyboru kompresji bezstratnej. Istnieją standardy, takie jak np. JPEG, posiadające zarówno wersję stratną kompresji, jak i bezstratną. Wersja bezstratna charakteryzuje się tym, że nie korzysta z tych etapów kompresji, które powodują utratę informacji (w przypadku JPEG jest to proces kwantyzacji), zachowuje natomiast kodowanie arytmetyczne, które z założenia nie powoduje utraty informacji, a używa jedynie proste algorytmy kodowe. W niniejszej pracy skupiono się głównie na metodzie stratnej z racji tego, że procent zysku na objętości podczas stosowania tej kompresji jest nieporównywalnie wyższy niż metody bezstratnej. Szczegółowy opis metod kompresji można znaleźć w literaturze (Wallace 1991; Skarbek 1993; Drodek 1999).

4. Ekstrakcja obiektów liniowych i punktowych

W ostatnich latach w literaturze fotogrametrycznej coraz więcej miejsca poświęca się procesom automatycznego wykrywania, identyfikacji i pomiaru różnego rodzaju obiektów występujących na obrazach cyfrowych. Problem automatyzacji sprowadza się do wydobywania (ekstrakcji) z obrazu cyfrowego niezbędnej informacji pożądaną przez użytkownika w sposób możliwie jak najbardziej zautomatyzowany. Informacja ta jest wydobyta, a następnie przedstawiana w zależności od potrzeb w formie rastrowej lub wektorowej. Automatyzacja znajduje zastosowanie na różnych etapach procesu opracowania zdjęć naziemnych, lotniczych czy satelitarnych. Przykładowe zastosowania podają autorzy (Mierzwa, Mikrut 2000). Spotkane w literaturze techniki związane z wykrywaniem obiektów na obrazach cyfrowych różnią się głównie: typem wykrywanych obiektów, zastosowanym modelem matematycznym. W procesie automatycznej ekstrakcji możemy wyróżnić trzy typy obiektów (Rottensteiner 2001):

- homogeniczne obszary obrazu cyfrowego,
- linie obrazu cyfrowego,
- punkty obrazu cyfrowego.

Badania przeprowadzone i opisane poniżej skupiają się na wykrywaniu obiektów liniowych i punktowych. Punkty są małymi obiektami występującymi na obrazie cyfrowym jako punkty końcowe (ang.: *end points*), naroża (ang.: *corners*), skrzyżowania (ang.: *junction*) krawędzi lub mogą być bardzo małymi fragmentami obszarów jednorodnych (ang.: *circual symmetric points*). W przypadku punktu reprezentowanego jako naroże, koniec czy skrzyżowanie krawędzi jego położenie może być określone bardzo precyzyjnie poprzez matematyczne obliczenie współrzędnych wykonane z podpikselową dokładnością. Algorytmy te zostały szerzej opisane i podane w literaturze (Mikrut 2002). Z literatury wynika, że ekstrakcja może odbywać się przez:

1. Optymalizację pewnych kryteriów ekstrakcji. Np. użycie operatora Förstnera (Förstner 1991) przy wydobywaniu punktów, które dają minimum średniego błędu kwadratowego w metodzie najmniejszych kwadratów w procedurze Least Squares Matching

(LSM). Przy użyciu tego operatora, wszystkie powyższe typy punktów mogą być wykryte.

2. Analizę krzywizny krawędzi obrazu. Takie operatory mogą wykryć punkty narożne jako maksymalna krzywizna krawędzi poprzednio wykrytej przez metodę ekstrakcji krawędzi (Rottensteiner 2001).

5. Parametry oceny

Zasadniczym problemem jest znalezienie odpowiednich parametrów oceny straty jakości obrazów po zastosowaniu kompresji stratnej. Zdegradowana jakość geometryczna obrazu może przejawiać się na dwa sposoby:

- degradacja jakości radiometrycznej, przejawiająca się tym, że mierzone obiekty są zamazane lub niejednoznacznie identyfikowalne,
- degradacja jakości geometrycznej, objawiająca się przesunięciem obiektów w linii lub kolumnie (lub obu na raz).

Jako stopień kompresji możliwy do stosowania w fotogrametrii cyfrowej, nie powodujący pogorszenia wyników pomiaru, podane są w literaturze wartości z przedziału: od 1:3 do 1:10, a nawet 1:20. Ponadto podawane są w różnych miarach. Jednak, jak wynika z dotychczasowych publikacji, pomimo wieloletnich doświadczeń w stosowaniu kompresji JPEG, brak jest jednoznacznych parametrów oceny, a co za tym idzie, zaleceń, które pozwalałyby optymalnie wykorzystywać kompresję dla potrzeb fotogrametrii cyfrowej. Przykładowe miary można znaleźć w literaturze (Skarbek i in. 1998; Pyka, Mikrut 2000).

6. Doświadczenia

Do celów badań przyjęto następujące założenia: w pierwszej kolejności wygenerowano obrazy symulowane i na nich podjęto próby badawcze (wykonano testy: oprogramowania, metody oraz poszukiwanych miar jakości), a następnie przystąpiono do pracy na obrazach rzeczywistych wybranych jako zeskanowane zdjęcia lotnicze wykonane w różnych skalach.

W ramach badań powstał program autorski napisany w języku C++ o nazwie „FEATURE EXTRACTION SOFTWARE” (FES), co można przetłumaczyć jako „oprogramowanie do ekstrakcji obiektów (cech)”. Program jest napisany na bazie oprogramowania wykorzystywanego w ramach prac prezentowanych w: (Tokarczyk, Mikrut 1999; Tokarczyk i in. 2000).

Cel działania programu

Głównym celem działania programu jest wykrywanie obiektów liniowych i punktowych na obrazach cyfrowych oraz wykonanie podstawowych obliczeń statystycznych.

Doświadczenia

Doświadczenia skupiały się na ocenie jakości obrazu wskutek kompresji JPEG skupionej na wybranych obiektach punktowych i liniowych, z uwzględnieniem wpływu rodzaju kompresora oraz wielkości piksela skanowania.

Z racji pewnych ograniczeń (słabsze kontury – większe błędy) podjęto próbę spojrzenia na obraz cyfrowy w sposób bardziej globalny. Poszukiwano drugiego parametru mogącego wzmocnić pozycję błędu średniego właśnie poprzez analizę obrazu nie tylko „punktowo” i „krawędziowo”, ale również w zakresie całego obrazu. W związku z tym przeprowadzono doświadczenia mające na celu obliczenie straty jakości obrazu traktowanego jako całość. W pierwszej kolejności przetestowano obrazy sztucznie wygenerowane w celu sprawdzenia zachowania się globalnych miar w odniesieniu do obrazów zróżnicowanych pod względem tekstury, a następnie przeprowadzono badania na obrazach rzeczywistych. Aby ocenić wpływ kompresji na wykrywanie obiektów liniowych i punktowych, do oceny wykorzystano pierwszą i drugą pochodną obrazu cyfrowego, które szczególnie uwypuklają duże zmiany w jasności pikseli danego obrazu cyfrowego. Poniżej przedstawiono wyniki określenia średniego błędu położenia punktu na obrazie cyfrowym dla trzech różnych rozdzielczości i różnych stopni kompresji (tabele 1–3). Badania przeprowadzono na obrazie oryginalnym (test.tif) oraz po kompresji JPEG (test.jpg), JPEG2000 (test.jp2) oraz ECW (test.ecw).

Wyniki porównania kompresji JPEG, JPEG2000 oraz ECW świadczą tutaj na korzyść kompresji JPEG. Kompresja ECW wyraźnie różni się od pozostałych. Dla wybranych obrazów określono także współczynnik korelacji obrazu. Wyniki zamieszczono w tabelach 4–6.

Tabela 1. Zestawienie wyników przedstawiających średni błąd położenia punktu na obrazach skanowanych z rozdzielczością 7 mikrometrów – wielkość pliku około 90 KB.

Table 1. The RMS as the result of point extraction on the image scanned with resolution 7 micrometer – file size about 90 KB.

Obraz	X [piksel]	Y [piksel]	Mx [piksel]	My [piksel]	Mp [piksel]
test.tif	360,18	536,58			
test.jpg	360,00	536,55	0,18	0,03	0,179
test.jp2	360,26	536,65	–0,08	–0,17	0,184
test.ecw	359,96	536,56	0,21	0,02	0,215

Tabela 2. Zestawienie wyników przedstawiających średni błąd położenia punktu na obrazach skanowanych z rozdzielczością 14 mikrometrów – wielkość pliku około 50 KB.

Table 2. The RMS as the result of point extraction on the image scanned with resolution 14 micrometer – file size about 50 KB.

Obraz	X [piksel]	Y [piksel]	Mx [piksel]	My [piksel]	Mp [piksel]
test.tif	180,41	272,06			
test.jpg	180,35	272,04	0,06	0,02	0,068
test.jp2	180,06	271,90	0,35	0,16	0,386
test.ecw	180,15	272,02	0,26	0,04	0,262

Tabela 3. Zestawienie wyników przedstawiających średni błąd położenia punktu na obrazach skanowanych z rozdzielczością 21 mikrometrów – wielkość pliku około 33 KB.

Table 3. The RMS as the result of point extraction on the image scanned with resolution 21 micrometer – file size about 33 KB.

Obraz	X [piksel]	Y [piksel]	Mx [piksel]	My [piksel]	Mp [piksel]
test.tif	118,90	177,32			
test.jpg	118,90	177,38	0,01	–0,06	0,065
test.jp2	118,93	177,27	–0,03	0,05	0,056
test.ecw	118,82	177,01	0,08	0,31	0,319

Tabela 4. Wyniki korelacji obrazu przedstawione dla trzech różnych miar dla obrazu o rozdzielczości 7 mikrometrów.
Table 4. The correlation coefficient for the three different measurements for image scanned with resolution 7 micrometer.

Współczynnik korelacji			
Q	Oryginał	Gradient	Laplace
test.tif			
test.jpg	0,9991	0,8266	0,3329
test.jp2	0,9999	0,9726	0,8123
test.ecw	0,9965	0,4216	0,0983

Tabela 5. Wyniki korelacji obrazu przedstawione dla trzech różnych miar dla obrazu o rozdzielczości 14 mikrometrów.
Table 5. The correlation coefficient for the three different measurements for image scanned with resolution 14 micrometer.

Współczynnik korelacji			
Q	Oryginał	Gradient	Laplace
test.tif			
test.jpg	0,9997	0,9681	0,7231
test.jp2	0,9988	0,9461	0,6553
test.ecw	0,9997	0,9554	0,6729

Tabela 6. Wyniki korelacji obrazu przedstawione dla trzech różnych miar dla obrazu o rozdzielczości 21 mikrometrów.
Table 6. The correlation coefficient for the three different measurements for image scanned with resolution 21 micrometer.

Współczynnik korelacji			
Q	Oryginał	Gradient	Laplace
test.tif			
test.jpg	0,9999	0,9869	0,8683
test.jp2	0,9999	0,9918	0,9100
test.ecw	0,9970	0,7705	0,2799

Dla przebadanych trzech rozdzielczości kompresji obrazów cyfrowych dostępnymi metodami JPEG, JPEG2000 oraz ECW najmniejsze średnie błędy położenia punktu dostajemy na obrazie po kompresji wg standardu JPEG. Dla kompresji JPEG uzyskano wyniki na poziomie 0,1 piksela dla rozdzielczości 14 i 21 mikrometrów oraz 0,2 piksela dla rozdzielczości 7 mikrometrów. Należy zauważyć, że pierwsze dwie dokładności są uzyskane dla obrazu o stopniu kompresji odpowiednio

0,10 oraz 0,16, natomiast dla obrazu o rozdzielczości 7 mikrometrów stopień kompresji wynosił 0,05, stąd ta dokładność. Zauważyć należy również, że najszerszy zakres kompresji posiada kompresor C_{JPEG} , natomiast największą kompresję ECW. Kompresja JPEG2000 odmiennie niż JPEG dzieli obraz na bloki. Znika widoczny wcześniej podział na bloki 8 na 8 pikseli, który stawał się coraz bardziej wyraźny wraz ze wzrostem stopnia kompresji. Kompresja ECW z racji tego, że posiada bardzo wąski zakres kompresji, nie powoduje widocznych na pierwszy rzut oka zmian w obrazie. W tabelach 4-6 zestawiono wyniki korelacji obrazów. Należy zauważyć, że współczynnik korelacji dla obrazów po filtracji Laplace'a dla kompresji JPEG oraz JPEG2000 są bardzo podobne do siebie dla rozdzielczości 14 i 21 mikrometrów. Współczynnik korelacji dla obrazów po filtracji Laplace'a dla obrazu po kompresji ECW jest wyraźnie mniejszy dla rozd. 7 i 21 niż dla dwóch pozostałych kompresji. Ma to swoje odzwierciedlenie w średnim błędzie położenia punktu. Dla tych danych średni błąd położenia punktu jest największy.

7. Podsumowanie

Analiza dotychczasowych badań pokazuje, że dla przyjętego stopnia kompresji można dokonać porównania metod kompresji używając miar tutaj zdefiniowanych, tj. średniego błędu położenia punktu oraz korelacji między obrazami. Dla obrazu o przykładowej rozdzielczości 14 mikrometrów zarówno korelacja, jak i średni błąd położenia punktu wskazały na kompresję JPEG. Obliczony współczynnik korelacji dla obrazów po kompresji ECW dla rozdzielczości 7 i 21 mikrometrów, będący najmniejszym ze wszystkich trzech kompresji, wykazał też największe błędy w średnim położeniu punktu. Zachodzi stwierdzenie już wcześniej prawidłowość polegająca na uzyskiwaniu małych błędów położenia dla silnej kompresji pomimo wyraźnie malejącej korelacji globalnej. Przykładem jest wartość korelacji 0,33 przy niewielkim średnim błędzie 0,179. Im większy stopień kompresji, tym generalnie większa degradacja. Jednakże nie dotyczy to wszystkich elementów tworzących obraz. Głównym powodem osiągania dużej redukcji objętości jest przyjęte w metodzie JPEG założenie, iż

w pierwszej kolejności redukowane są tzw. wysokie częstotliwości, odpowiadające szybkim zmianom jasności. Natomiast tam, gdzie występują niewielkie zmiany wartości jasności pikseli, obraz jest odtwarzany wierniej. Uzasadnienie tkwi w konstrukcji tabeli kwantyzacji, która właśnie w taki sposób wagi częstotliwościowy opis obrazów powstający podczas transformacji kosinusowej (DCT). Zatem teoretyczna analiza metodyki kompresji sugeruje, że zniekształcane w pierwszej kolejności powinny być krawędzie obrazu, jako miejsca o silnych zmianach jasności. Tym większego znaczenia nabiera tematyka badań podjęta w pracy. W trakcie badań obrazów kompresowanych algorytmem JPEG wykryto również efekt segmentyzacji krawędzi pojawiający się przy dużym stopniu kompresji, co dla współczynnika kompresji Q_{JPEG} , przedstawionego w skali od 0 do 100, odpowiadałby wartościom z przedziału 0-50. Efekt ten polega na zróżnicowaniu rozkładów przestrzennych punktów w zależności od tego, w którym znajduje się blok (8 na 8 pikseli). Aproksymacja przebiegu krawędzi na podstawie punktów zlokalizowanych w poszczególnych blokach prowadzi do uzyskania odcinków nie tworzących krawędzi prostoliniowej, a przybliżających ją schodkowo.

Przeprowadzona tutaj analiza nie wykazała prostej zależności pomiędzy współczynnikiem kompresji (określonej przez współczynnik kompresji Q) a spadkiem zdolności wykrywania krawędzi. Jeśli chodzi natomiast o wpływ skanowania, to przeprowadzone badania udowodniły, że wybór rozdzielczości skanowania ma znaczenie dla dokładności lokalizacji obiektów liniowych i punktowych. Udowodniono, że kompresowanie obrazów zeskanowanych w rozdzielczościach 14, 21 i 28 mikrometrów daje podobne rezultaty, natomiast kompresja obrazów skanowanych z rozdzielczością 7 mikrometrów wymaga stosowania większego współczynnika kompresji Q w celu osiągnięcia tego samego stopnia kompresji, czyli stosunku wielkości pliku obrazu po kompresji do wielkości pliku przed kompresją. Oznacza to, że obrazy o rozdzielczości 7 mikrometrów wymagają stosowania „mocniejszej” kompresji w celu osiągnięcia założonego stopnia kompresji. Potwierdza to teoretyczne założenia mówiące o tym, że obrazy o tej rozdzielczości mają już znaczne obniżenie informacji spowodowane różnymi

szumami występującymi w obrazie (jest to rozdzielczość zbliżona do rozdzielczości emulsji klisz fotograficznych). Zdolność do wykrywania dobrze zdefiniowanych krawędzi na obrazach kompresowanych w miarę wzrostu stopnia kompresji ulega tylko nieznacznemu pogorszeniu. Nawet na obrazach skrajnie zdegradowanych, tj. dla współczynnika kompresji $Q_{JPEG} < 20$, nie tracimy możliwości wykrycia dobrze zdefiniowanych (silnych) krawędzi. Dzieje się tak pomimo widocznej zmiany tekstury obrazu pojawiającej się w miarę zwiększania skali obserwowanych obrazów. Tekstura wynikająca z podziału na bloki 8×8 zaburza obserwację głównie obszarów jednorodnych na obrazie oryginalnym. Mamy tu do czynienia ze sprzecznością pomiędzy zdolnością wykrywania krawędzi a kompleksową interpretacją treści obrazu. O ile elementy interpretowane głównie przez krawędzie są dalej wykrywalne, to elementy jednorodne na oryginalne są obciążone sztuczną teksturą, a przez to ich interpretacja jest zaburzona lub wręcz niemożliwa. Na obiektach homogenicznych jak powierzchnie dróg, lasów, łąk silna kompresja powoduje podział na sztuczne fragmenty o wielkości wynikającej z rozmiarów bloków po kompresji. Natomiast dla silnych krawędzi nieznacznie tylko zmienia się liczba definiujących je punktów. Zmienia się natomiast ich przestrzenny rozkład, na co niewątpliwie wpływ ma blokowy charakter kompresji. Porównanie przestrzennego rozkładu wykrytych punktów w stosunku do rozkładu na obrazie oryginalnym wykazuje następujące różnice:

- zmniejsza się równomierność rozkładu punktów wzdłuż krawędzi,
- zwiększa się liczba miejsc o dużej koncentracji punktów,
- wpływ na zmianę tego rozkładu ma kierunek krawędzi w stosunku do osi współrzędnych obrazu. Krawędzie nachylone pod kątem 45° ulegają mniejszej degradacji niż krawędzie poziome i pionowe. Jeśli głównym celem dla użytkownika jest jedynie wykrycie określonych konturów na obrazie, to wówczas wpływ kompresji JPEG na samą zdolność wykrycia można uznać za zanedbywany. Wniosek ten, udowodniony na licznych przykładach, jest w pewnej sprzeczności z cechą kompresji JPEG polegającą na tłumieniu wysokich częstotliwości. Redukcja ta dotyczy bowiem miejsc punk-

towych, często wynikających z zakłóceń obrazu (szum). Natomiast zmiany jasności wzdłuż silnych krawędzi ulegają jedynie przypadkowym odchyleniom. Jeśli obraz jest wykorzystywany do interpretacji obiektów pokrycia terenu zarówno antropogenicznych, jak i przyrodniczych, to wówczas w mniejszym stopniu należy kierować się wykrywaniem samych krawędzi, a uwaga powinna być skupiona na zmianach tekstury w obszarach homogenicznych. Stopień ogólnej degradacji obrazu jest dobrze wskazywany przez badanie korelacji filtracji laplasjanowej obrazu skompresowanego i oryginalnego. Korelacja ta ma stałą tendencję spadającą przy wzroście stopnia kompresji. Jest to zgodne z wizualną obserwacją obrazu. A wielkość współczynnika korelacji można w uproszczeniu identyfikować ze stopniem podobieństwa w stosunku do oryginału.

8. Wnioski

W niniejszym artykule przedstawiono wpływ skanowania i kompresji według standardu JPEG na wykrywanie obiektów liniowych i punktowych na obrazach cyfrowych. Przeprowadzone badania wykazały, że ocena kompresji JPEG pod kątem wykrywania elementów liniowych i punktowych jest złożona ze względu na specyficzne właściwości kompresji. W czasie kompresji następuje degradacja obrazu, ale nie ma ona charakteru w pełni przewidywalnego. W artykule podano ostatecznie dwie miary jakości obrazu poddawane kompresji, mające na celu dokonanie oceny ilościowej straty jakości.

Pierwsza to średni błąd kwadratowy położenia punktu zdefiniowanego jako przecięcie się dowolnych krawędzi na wybranym obrazie cyfrowym po kompresji w stosunku do obrazu przed kompresją. Druga to współczynnik korelacji obrazów poddanych filtracji Laplace'a. Korelacja ta bazuje na stopniu podobieństwa obrazu skompresowanego w stosunku do obrazu oryginalnego. Dzięki temu, że w analizie uczestniczą obrazy przefiltrowane, a nie ich postacie pierwotne, wynik mówi więcej o rekonstrukcji elementów o charakterze krawędzi. Cechą tej analizy jest próbkowanie całego obrazu, a nie tylko wybranych fragmentów, jak ma to miejsce w przypadku pierwszej miary.

Wraz ze wzrostem kompresji pojawiają się sztuczne krawędzie generowane przez sam kompresor. Wtedy korelacja wyraźnie spada. Ta sama miara na obrazach pierwotnych jest nieskuteczna, gdyż korelacja nawet dla obrazów bardzo zmienionych osiąga wysokie wartości.

Ze względu na specyfikę algorytmu JPEG sugeruje używanie obu miar jako wzajemnie się uzupełniających.

W przeprowadzonych badaniach wykorzystano autorskie oprogramowanie pozwalające na wykrywanie krawędzi z podpikselową dokładnością. Oprogramowano metodę pozwalającą na półautomatyczną ekstrakcję obiektów liniowych i punktowych i policzono ich statystykę. Reasumując, można przyjąć, że przy zachowaniu odpowiednich parametrów skanowania i kompresji możliwa jest istotna redukcja objętości obrazów przy zanedbywanym ich wpływie na jakość pomiaru i interpretacji.

Można uznać, że przy kompresji obrazów cyfrowych o stopniu kompresji na poziomie 1:10 średni błąd położenia punktu na obrazie po kompresji w stosunku do obrazu pierwotnego (przed kompresją), wyznaczonego z podpikselową dokładnością, nie przekracza wartości 0,5 piksela.

Natomiast średni błąd położenia punktu na poziomie 0,2 piksela można uzyskać dla obrazów, których stopień kompresji nie jest gorszy niż 1:5.

Badania wykazały, że przypadku punktów zdefiniowanych jako przecięcie dwóch bardzo wyraźnych krawędzi błąd ten nie przekroczył 0,1 piksela.

Bibliografia

- Drozdek A., 1999, *Wprowadzenie do kompresji danych*, Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa.
- Förstner W., 1991, *Statistische Verfahren für die automatische Bildanalyse und ihre Bewertung bei der Objekterkennung und -vermessung*, PhD thesis, Verlag der Bayrischen Akademie der Wissenschaften, Reihe C Dissertationen, Bonn.
- Mierzwa W., Mikrut S., 2000, *Automatyczna identyfikacja elementów liniowych na obrazach cyfrowych*, Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji, vol. 10, Kraków.
- Mikrut S., 2002, *Wpływ skanowania oraz kompresji według metody JPEG na wykrywanie obiektów liniowych i punktowych na obrazach cyfrowych*, rozprawa doktorska, Akademia Górniczo-Hutnicza, Kraków.
- Pyka K., Mikrut S., 2000, *Poszukiwanie miar oceny straty jakości obrazów po kompresji JPEG*, Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji, vol. 10, Kraków.
- Rottensteiner F., 2001, *Semi-automatic extraction of buildings based on hybrid adjustment using 3D surface models and management of building data in a TIS*, rozprawa doktorska, Instytut Fotogrametrii i Teledetekcji, Uniwersytet Wiedeński, Wiedeń.
- Skarbek W., 1993, *Metody reprezentacji obrazów cyfrowych*, Akademicka Oficyna Wydawnicza PLJ, Warszawa.
- Skarbek W., Krupiczka A., Przelaskowski A., Rakowski W., 1998, *Multimedia – Algorytmy i standardy kompresji*, Akademicka Oficyna Wydawnicza PLJ, Warszawa.
- Tokarczyk R., Mikrut S., 1999, *Fotogrametryczny System Cyfrowy Bliskiego Zasięgu do pomiarów ciała ludzkiego dla potrzeb rehabilitacji leczniczej*, Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji, vol. 9, Kraków.
- Tokarczyk R., Mikrut S., Huppert M., 2000, *Fotogrametryczny system cyfrowy bliskiego zasięgu do pomiaru skrajni kolejowej*, Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji, vol. 10, Kraków.
- Wallace G. K., 1991, *The JPEG still picture compression standard*, Communications of the ACM, 34(4), Washington.

Summary

This article examines an influence of scanning and compression according to JPEG on linear and points extraction of digital images. The research showed that assessment of JPEG compression in linear and points extraction is complex. It is due to specific features of compression. During compression an image demotion might occur, moreover, it might not be easily predicted. This article features the two ways of measuring the condition of images while compressing. The first method is a root mean square error of the defined point as an intersection of random edges on the chosen digital image, after compression in proportion to image before the compression. The second method is an coefficient correlation of images that are being filtered by Laplace method. This correlation bases on similarity of an compressing image to an original image. Because of the fact that in this analysis are use filtered images, and not the original ones, the result is more accurate showing reconstruction of elements with edge characteristics. The main advantage of this analysis is that the whole image can be calculating, not only chosen elements, as it takes place in case of the first measurement. Along with an

increase of compression, artificial edges occur that are generated by the compressor itself. Then correlation diseases. The same measurement on the original images is not effective as correlation of even really changed images reaches high value.

Because of a specification of JPEG algorithm, it is suggested to use both methods as they complement each other. During the research authoring software was used that enabled to search for edges with subpixel accuracy. The specific method was created to enabled semi-automatic extraction of linear and points and make statistics of them. To recapitulate, if selecting right parameters of scanning and compressing, it is possible to reduce size of images and use them without impact on measurement and interpretation.

Assuming that compression of digital images with compression ratio 10:1 level, RMS of points on image after compression with compare to image before compression is not more than 0.5 pixel. However, a medium error of the point location on the level of 0.2 pixels, can be obtained for images, which level of compression is not worse than 1:5. The research showed that in case of the points defined as an intersection of the two very clear edges, such error did not exceed 0.1 pixels.

STANISŁAW MULARZ¹

TELEDETEKCYJNY MONITORING ŚRODOWISKA W REJONIE WYSADÓW SOLNYCH Z WYKORZYSTANIEM OBRAZÓW SATELITARNYCH SYSTEMU LANDSAT (ETM+)²

Słowa kluczowe:

teledetekcja satelitarna, monitoring środowiska, detekcja anomalii termicznych, wysady solne

Abstrakt

W artykule przedstawiono metodykę oraz wyniki badań dotyczących wykorzystania multispektralnych obrazów satelitarnych systemu LANDSAT (ETM+) dla potrzeb monitoringu środowiska w rejonie wysadów solnych. Pierwszy etap badań obejmował kompleksową ocenę pojemności informacyjnej pełnego zestawu wielospektralnych danych satelitarnych, w oparciu o różne procedury statystyczne, następnie integrację kanałów termalnych i optycznych metodą IHS oraz wygenerowanie mapy użytkowania i pokrycia terenu metodą klasyfikacji nadzorowanej. W drugim etapie dokonano próby detekcji przejawów termicznych w rejonie wysadu. Wykorzystano tutaj koncepcję koncentrycznych stref buforowych o modułach 50- i 25-metrowych, których granice przebiegały równolegle do konturu wysadu. Analiza uzyskanych wyników wykazała, że zmiany poziomu i rozkład temperatury w otoczeniu wysadu cechuje wyraźna tendencja spadkowa wraz z oddalaniem się od granic wysadu w kierunku jego przedpola, przy czym różnice temperatury są rzędu 2–3°C.

ENVIRONMENTAL REMOTE SENSING MONITORING OVER THE SALT DOMES USING SATELLITE LANDSAT (ETM+) IMAGERIES

Key words:

Satellite Remote Sensing, Environmental Monitoring, Thermal Anomalies Detection, Salt Domes

Abstract

The paper presents a methodology and results of remote sensing monitoring over the salt dome area using the Landsat (ETM+) multispectral imageries. On the first stage the statistical methods were used to determine the amount and distribution of information contained in full multispectral data set. Next thermal and optical bands were merged

¹ Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Geodezji i Inżynierii Środowiska, Zakład Fotogrametrii i Informatyki Teledetekcyjnej, Kraków.

² Artykuł był prezentowany pod auspicjami Komisji Geoinformatyki PAU na Ogólnopolskim Sympozjum Geoinformacji pn. „Geoinformacja zintegrowanym narzędziem badań przestrzennych”, Wrocław-Polanica Zdrój, 15–17.09.2003.

using IHS formula, and also land-use/land-cover map of the test area was generated using supervised classification method. On the second stage the detection of thermal anomalies around the salt dome was done. Analyses of distribution of radiation temperature around the dome in the consecutive buffer zones of 25 and 50 m wide showed a distinct drop of temperature level from centre of the dome towards its forefield and the recorded differences in real temperature values are of order of 2–3°C.

Wprowadzenie

W badaniach środowiska przyrodniczego, w tym również środowiska geologicznego, wykorzystuje się zazwyczaj satelitarne i/lub lotnicze obrazy wielospektralne, przy czym z reguły są one ograniczone do rejestracji w tzw. kanałach optycznych spektrum elektromagnetycznego, obejmujących region widzialny i/lub pasma bliskiej oraz krótkofalowej podczerwieni (Hunt, Ashley 1979; Prost 1980; Goetz, Rowan 1981; Campos-Marquetti Jr, Rockwell 1989). Wykorzystanie dla potrzeb monitoringu środowiska zakresu długofalowej podczerwieni termalnej jest jeszcze nadal stosunkowo skromne, chociaż w ostatnich latach wraz z rozwojem zwłaszcza technologii satelitarnej oraz doskonaleniem metodyki przetwarzania i interpretacji obrazów poszerzył się wydatnie obszar zastosowań teledetekcji termalnej. Dotyczy to możliwości detekcji w skali globalnej, tak ewidentnych zjawisk termicznych, jak erupcje wulkaniczne czy wpływy wód geotermalnych, jak również wielu innych aspektów termalnego monitoringu środowiska. Dla przykładu można tu przywołać takie aplikacje, jak: badania mikroklimatu (np. dużych aglomeracji miejsko-przemysłowych), ocena poziomu i określenie rozkładu przestrzennego wilgotności gleb (np. w oparciu o numeryczne modelowanie inercji termalnej podłoża), badania termiki wód powierzchniowych i gruntowych (np. kontrola stopnia termalnego skażenia środowiska wodnego) czy choćby ocena degradacji różnych komponentów środowiska (np. z tytułu prowadzenia eksploatacji górniczej, składowania odpadów przemysłowych i komunalnych itp.).

Prezentowane poniżej wyniki badań dotyczą próby zastosowania teledetekcji satelitarnej głównie dla potrzeb termalnego monitoringu środowiska w rejonie wysadowych struktur solnych. Podjęcie tej problematyki nastąpiło w ramach projektu badawczego Komitetu

Badań Naukowych, realizowanego przez Instytut Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią PAN w Krakowie (Bujakowski red. 2003; Mularz 2003). Prace nad doskonaleniem metodyki przetwarzania i interpretacji danych satelitarnych dla potrzeb monitoringu środowiska w rejonie wysadów solnych były również prowadzone w Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie jako badania własne autora (Mularz 2002).

1. Cel badań oraz wykorzystane dane

Zasadniczym celem prowadzonych badań była ocena przydatności zobrazowań satelitarnych nowej generacji do prowadzenia termalnego monitoringu środowiska w rejonie wysadów solnych. Inaczej mówiąc, cel badań sprowadzał się do znalezienia odpowiedzi na pytanie: czy i w jakim zakresie anomalie termiczne towarzyszące solnym strukturom wysadowym ujawniają się na powierzchni terenu i mogą być wykrywane za pomocą teledetekcji satelitarnej. Realizacja tak postawionego zadania wymagała m.in. opracowania i wdrożenia specjalnej metodyki przetwarzania i interpretacji danych satelitarnych. Było to w Polsce, w pewnym sensie, przedsięwzięcie pionierskie, zwłaszcza w odniesieniu do warunków teledetekcyjnego monitorowania rejonów solnych złóż wysadowych. Dotychczasowe bowiem rozpoznanie anomalii pola cieplnego nad wysadami w Polsce dokonywane było przy użyciu bezpośrednich i geofizycznych metod pomiarowych. Wykorzystanie do tego celu technik teledetekcyjnych, a zwłaszcza teledetekcji satelitarnej jest dotychczas sporadyczne, także w świecie, i ogranicza się z reguły do stref wysadowych o bardzo dużym kontraście termalnym, który charakteryzuje np. wysady położone na terytorium Stanów Zjednoczonych AP w otoczeniu Zatoki Meksykańskiej, gdzie strumień cieplny nad wysadami jest 5–8-krotnie wyższy niż w ich otoczeniu (Jacoby, Dillip 1974).

Podstawowy materiał analityczny dla omawianych badań stanowiły archiwalne, satelitarne dane systemu LANDSAT 7 (ETM+). Po dokonaniu wstępnej analizy dostępnych materiałów satelitarnych (dwie sceny) do szczegółowych badań wybrano rejestrację wykonaną w okresie wczesnej wiosny, w dniu 3 kwietnia 2000 r. Wybór powyższy uzasadnia fakt, iż w tym właśnie okresie zarówno warunki gruntowo-wodne, jak i pokrycie powierzchni terenu, zwłaszcza w obrębie upraw, są w miarę stabilne i nie powodują nadmiernego zakłócenia rejestracji termalnej (wychłodzenie w okresie zimowym podłoża gruntowego, zredukowanie wpływu retencji wodnej w przypowierzchniowej warstwie gleb uprawnych, zredukowanie wpływu wegetacji roślinnej, optymalna ekspozycja odkrytych gleb). Natomiast druga dostępna archiwalna scena systemu LANDSAT 7 (ETM+), zarejestrowana w dniu 8 maja 2001 r., okazała się mało przydatna dla tych potrzeb, ze względu na zaawansowaną już o tej porze wegetację.

Dysponowano również barwnymi zdjęciami lotniczymi w postaci cyfrowej tworzącymi dwa stereogramy. Zdjęcia te, w skali 1:26 000, wykonane zostały w ramach programu PHARE w 1995 r. Stanowiły one najbardziej aktualny materiał fotolotniczy, dokumentujący rejon wysadu „Góra”. Zdjęcia powyższe posłużyły do sporządzenia uproszczonej fotomapy rejonu wysadu „Góra”. Natomiast pełny zakres wykorzystania materiałów fotolotniczych obejmował przede wszystkim szczegółową interpretację elementów topograficznych – cech użytkowania terenu, a także analizę mezoreliefu w bezpośrednim otoczeniu wysadu solnego „Góra”.

Charakterystyka obszaru testowego

Rejon wysadu solnego „Góra” znajduje się w odległości około 9 km na południowy wschód od Inowrocławia. Kontur wysadu geometryzuje w rzucie poziomym nieregularna elipsa o wymiarach w przybliżeniu 1000 × 900 m. Na tle ogólnie mało urozmaiconej morfologii tego obszaru, charakterystycznej dla terenów równinnych, obecność struktury wysadowej zaznacza się wyraźnym wyniesieniem powierzchni terenu, którego wysokość w stosunku do otoczenia sięga nawet kilkunastu metrów. W jego części środkowej oraz południowo-

-wschodniej znajdują się dwa niewielkie jeziora, które wraz z otaczającymi je mokradłami wypełniają lokalne, nieckowate zagłębienia terenowe. Eksploatację wysadowego złoża solnego „Góra” rozpoczęto w 1968 r. metodą podziemnego ługowania otworami o głębokości przeciętnie 1200 m, wierconymi z powierzchni terenu.

Budowa geologiczna rejonu wysadu, rozpoznana na podstawie danych z licznych wierceń (poszukiwawczych i eksploatacyjnych) oraz wyników badań geofizycznych, przedstawia się w uproszczeniu następująco (Szybiński 2003). Bezpośrednie otoczenie struktury solnej budują utwory górnej jury, w przewadze węglanowe, wykształcone w postaci wapieni, margli i dolomitów. Wyżej zalegają osady trzeciorzędowe (mioceńskie), które pod względem litologicznym stanowią serię piaszczysto-mulkową o zmiennej miąższości, od kilku do kilkudziesięciu metrów. Ostatnie ogniwo profilu geologicznego stanowią najmłodsze osady czwartorzędowe reprezentowane głównie przez gliny żwałowe, piaski, mulki oraz ropy. Zarówno w strefie wysadu, jak i w jego otoczeniu utwory czwartorzędowe tworzą ciągłą pokrywę, o łącznej miąższości od 15 do około 70 m.

Strukturę wysadową budują w przewadze sole kamienne wieku cechsztyńskiego. Zwierciadło solne występuje na głębokości od 101 do 172 m od powierzchni terenu, z wyraźną depresją w centralnej części wysadu, która, jak się wydaje, znajduje swoje odbicie w morfologii powierzchni terenu. Wysad przykrywa czoła gipsowa z przerostami ilów. Urozmaicony morfologicznie strop czapy zalega na głębokości od 19 do 70 m, a jej miąższość waha się w przedziale 34–116 m. Tektonika wewnętrzna wysadu, o fałdowym charakterze zaburzeń jest bardzo skomplikowana (Gałicki red. 1988; Szybiński 1993).

Z punktu widzenia halotektoniki wysad solny „Góra” należy do nielicznych struktur solnych regionu kujawskiego, które całkowicie przebiegają utwory mezozoiku aż do powierzchni podkenozoicznej. Stwarza to potencjalnie korzystne warunki propagacji strumienia energii geotermalnej przez słup solny z głębi górotworu ku powierzchni terenu i ujawniania się tam efektów tej propagacji w postaci anomalii termicznych. Pomiędzy utworami solnymi i warstwami otaczającymi istnieje bowiem duża różnica przewodności cieplnej, która po-

woduje, że diapiry solne stanowią dogodny drogę przewodzenia ciepła z głębi Ziemi, przy okazji stając się swoistymi „akumulatorami” energii cieplnej (Selig, Wallick 1966; Jensen 1990; Petersen, Lerche 1995; Jarzyna 2003). W tym kontekście wybór wysadu „Góra” jako pola testowego do przeprowadzenia kompleksowych badań nad termiką górotworu w rejonie wydawczych struktur solnych, z wykorzystaniem także metod teledetekcji satelitarnej, był w pełni uzasadniony.

2. Metodyka badań

Program badań, związany z wykorzystaniem archiwalnych satelitarnych materiałów teledetekcyjnych, obejmował następujący zakres prac:

A. Wstępne przetwarzanie obrazów satelitarnych systemu LANDSAT (ETM+), na które składały się następujące operacje:

- transformacja geometryczna pełnego zestawu danych satelitarnych (2×8 kanałów spektralnych) do jednolitego układu 1992, przyjmując odwzorowanie G-K/TM, elipsoidę GRS80 i południk centralny 19°;
- usunięcie zniekształceń radiometrycznych typu „stripping”;
- kalibracja danych wielospektralnych (usunięcie wpływu atmosfery, kalibracja poziomu temperatury radiacyjnej);

– wycięcie odpowiednich fragmentów scen zobrazowania LANDSAT 7 (ETM+) dla rejonu analizowanego wysadu „Góra”.

B. Operacje wzmacniania obrazu, polegające na uwydatnieniu cech, ważnych z punktu widzenia potrzeb interpretacji przy wykorzystaniu procedur wzmacniania kontrastu, progowania oraz technik filtracyjnych. Dokonano również testowania różnych metod wzmacniania informacji spektralnej, poprzez integrację zwłaszcza kanałów termalnych o rozdzielczości przestrzennej 60 m z kanałem panchromatycznym o rozdzielczości 15 m.

C. Ekstrakcja informacji tematycznej polegającej na wydobywaniu z cyfrowych obrazów multispektralnych pożądanej porcji informacji poprzez równoczesną analizę dwóch lub więcej kanałów spektralnych. Zgodnie z metodyką geologiczną interpretacji wielospektralnych obrazów cyfrowych wykorzystano następujące metody:

- wagowanie obrazów,
- generowanie pełnego zestawu kompozycji barwnych wraz z ich analizą statystyczną,
- dokonanie klasyfikacji danych wielospektralnych metodami: nadzorowaną i nienadzorowaną.

Metodyka wspomaganego komputerowo interpretacji satelitarnych zobrażeń systemu LANDSAT (ETM+) nie ograniczała się jedynie do wykorzystania kanałów termalnych, ale zakładała również poszerzony udział informacji spektralnej, którą zawierają tzw. kanały optyczne obejmujące zakres widzialny oraz bliską i środkową podczerwień widma elektromagnetycznego. Takie podejście wynikało z faktu, iż potencjalne anomalie termiczne związane ze strukturą wysadu mogłyby nie ujawniać się samoistnie, ze względu na porę rejestracji (około godz. 11 czasu lokalnego) i wynikający stąd poziom zakłóceń emisji promieniowania cieplnego przy bezpośredniej „dostawie” energii słonecznej.

W tej sytuacji nieodzowne okazało się scalenie efektów emisji długofalowej podczerwieni termalnej z rejestracją w kanałach odbijalnych, zwłaszcza w zakresie pozawidzialnym spektrum elektromagnetycznego, a mianowicie w bliskiej i krótkofalowej podczerwieni.

3. Wyniki badań i ich interpretacja

3.1. Analizy tematyczne

Analizy tematyczne wykonano na fragmencie sceny (30×30 km) systemu LANDSAT 7 (ETM+), skalibrowanym dla poszczególnych kanałów wg następującego schematu:

- 1000×1000 pikseli – kanały optyczne: [1, 2, 3, 4, 5, 7] (piksel 30 m);
- 2000×2000 pikseli – kanał panchromatyczny (piksel 15 m);
- 1000×1000 pikseli – kanały termalne [6] i [9] (piksel 60 m skalibrowany do rozdzielczości kanałów optycznych: 30×30 m).

Wpasowanie przeprowadzono przy użyciu programu PCI OrthoEngine, który posiada odpowiednie algorytmy do kalibracji geometrycznej danych satelitarnych, w tym moduł do rektyfikacji danych z satelity Landsat 7 (ETM+) wykorzystujący w obliczeniach pa-

rametry orbity. Uzyskaną dokładność wpasowania przedstawia poniższy raport:

- a) dla kanałów spektralnych i termalnych (piksel 30 m):
 - RMS na punktach dostosowania (kontrolowanych): 0,45 pikseli, tj. 0,45×30 m=13,4 m,
 - RMS na punktach kontrolujących: 0,43 pikseli, tj. 0,43×30 m=12,9 m;
- b) dla kanału panchromatycznego (piksel 15 m):
 - RMS na punktach dostosowania (kontrolowanych): 0,62 pikseli, tj. 0,62×15 m=9,2 m,
 - RMS na punktach kontrolujących: 0,59 pikseli, tj. 0,59×15 m=8,9 m.

Zestaw analiz tematycznych otwiera macierz korelacji (tab. 1). Dla obszaru testowego 30×30 km, w którego centrum znajduje się wysad „Góra”, stwierdzono bardzo wysoką korelację ($r=0,92-0,98$) odpowiednio pomiędzy kanałami widzialnymi [1, 2, 3], następnie kanałami środkowej podczerwieni [5] i [7] oraz pomiędzy kanałami termalnymi [6] i [9]. Natomiast pasmo bliskiej podczerwieni, kanał [4], zawiera wyraźnie odmienną informację od kanałów pozostałych i koreluje najwyżej z kanałem [2] ($r=0,51$). Kanały termalne wykazują praktycznie brak korelacji z kanałami widzialnymi i bliską podczerwienią, natomiast stosunkowo znacząco korelują z kanałami [5] ($r=0,43$) i [7] ($r=0,48$).

Tabela 1. Macierz korelacji.

Table 1. Correlation matrix.

r	1	2	3	4	5	6	7	9
1		0,95	0,94	0,37	0,66	0,15	0,64	0,15
2			0,96	0,51	0,67	0,06	0,60	0,06
3				0,37	0,73	0,14	0,71	0,14
4					0,33	-0,13	0,06	-0,14
5						0,43	0,92	0,43
6							0,47	0,98
7								0,48
9								
NDVI								-0,32

Różnica pomiędzy danymi z kanałów [6] i [9] wynika nie z zastosowania innego okna poboru informacji, lecz z innego skalibrowania sensorów, co uzasadnia tak

wysoką wzajemną korelację pomiędzy kanałami [6] i [9]. W toku dalszej analizy wykazano, że lepiej skalibrowany dla terenu badań jest kanał [9]. Analiza regresji wielokrotnej wykazała bowiem dla tego kanału korelację rzędu $r=0,59$ i $R^2=35\%$ z pozostałymi kanałami widzialnymi oraz bliskiej i środkowej podczerwieni:

$$TM9 = 114,8716 + 0,3756 \cdot TM1 - 0,2841 \cdot TM2 - 0,1163 \cdot TM3 - 0,0336 \cdot TM4 + 0,1281 \cdot TM5 + 0,0459 \cdot TM7$$

3.2. Pojemność informacyjna kompozycji barwnych

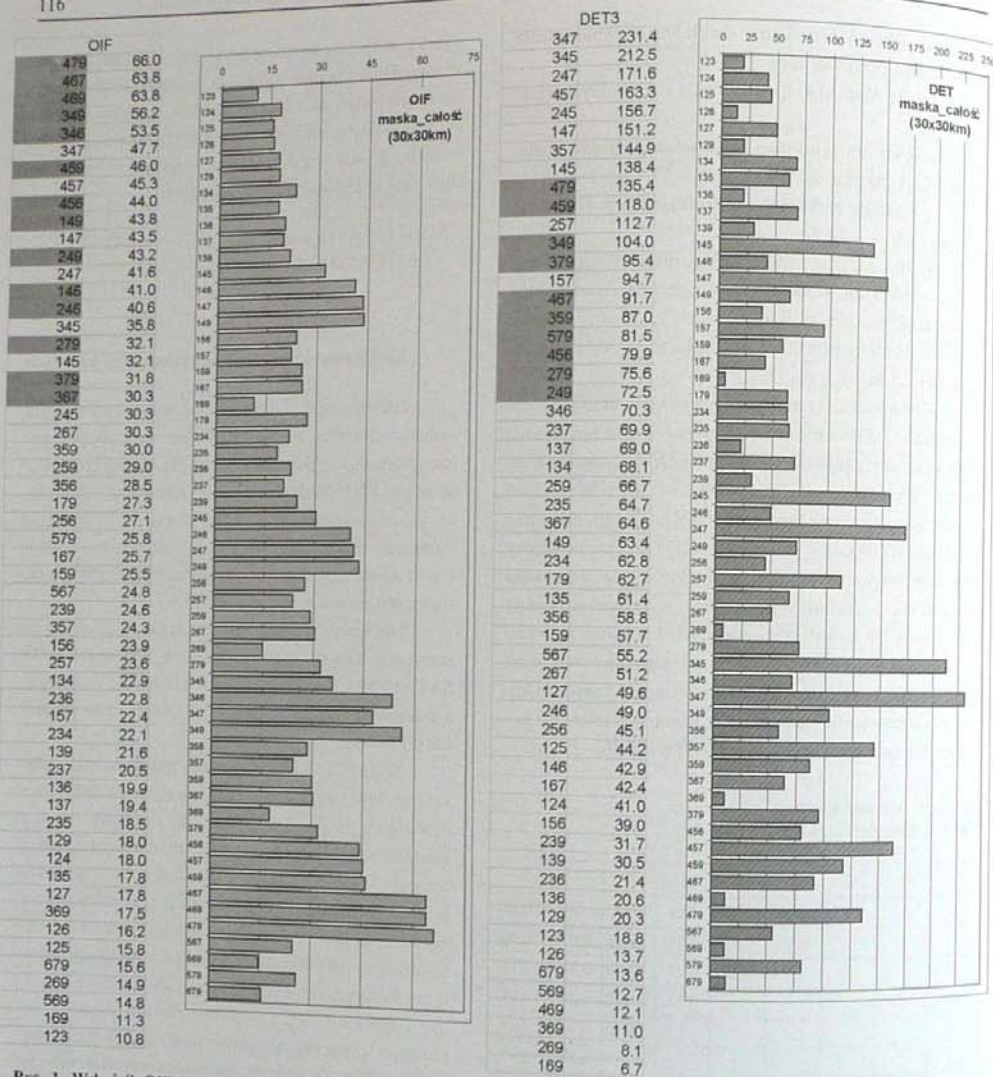
Generowanie kompozycji barwnych ma na celu scalenie informacji z trzech dowolnie wybranych kanałów spektralnych poprzez ich barwną wizualizację jako składowe RGB (Red, Green, Blue). Dla potrzeb omawianej analizy wygenerowano pełny zestaw 56 kompozycji barwnych obejmujący wszystkie możliwe kombinacje trzech dowolnych kanałów spektralnych z pełnego zestawu obrazowania skanera (ETM+).

Dla statystycznej oceny zawartości informacji tematycznej danych wielospektralnych systemu LANDSAT (ETM+) wykorzystano 4 niezależne wskaźniki, a mianowicie: wskaźnik OIF, DET, MOIK oraz INDEX CRIPPENA.

Wskaźnik OIF – „Optimum Index Factor” (Chavez i in. 1984) wyraża normalizację sumy odchyłań standardowych trypletu kanałów i sumy modułów korelacji kanałów spektralnych, tworzących daną kompozycję barwną. Wysokie wartości wskaźnika OIF oznaczają zatem, z formalnego punktu widzenia, dużą objętość i różnorodność informacji, podczas gdy niskie wartości OIF wskazują na podobieństwo i powielanie informacji w tworzących daną kompozycję kanałach spektralnych (rys. 1).

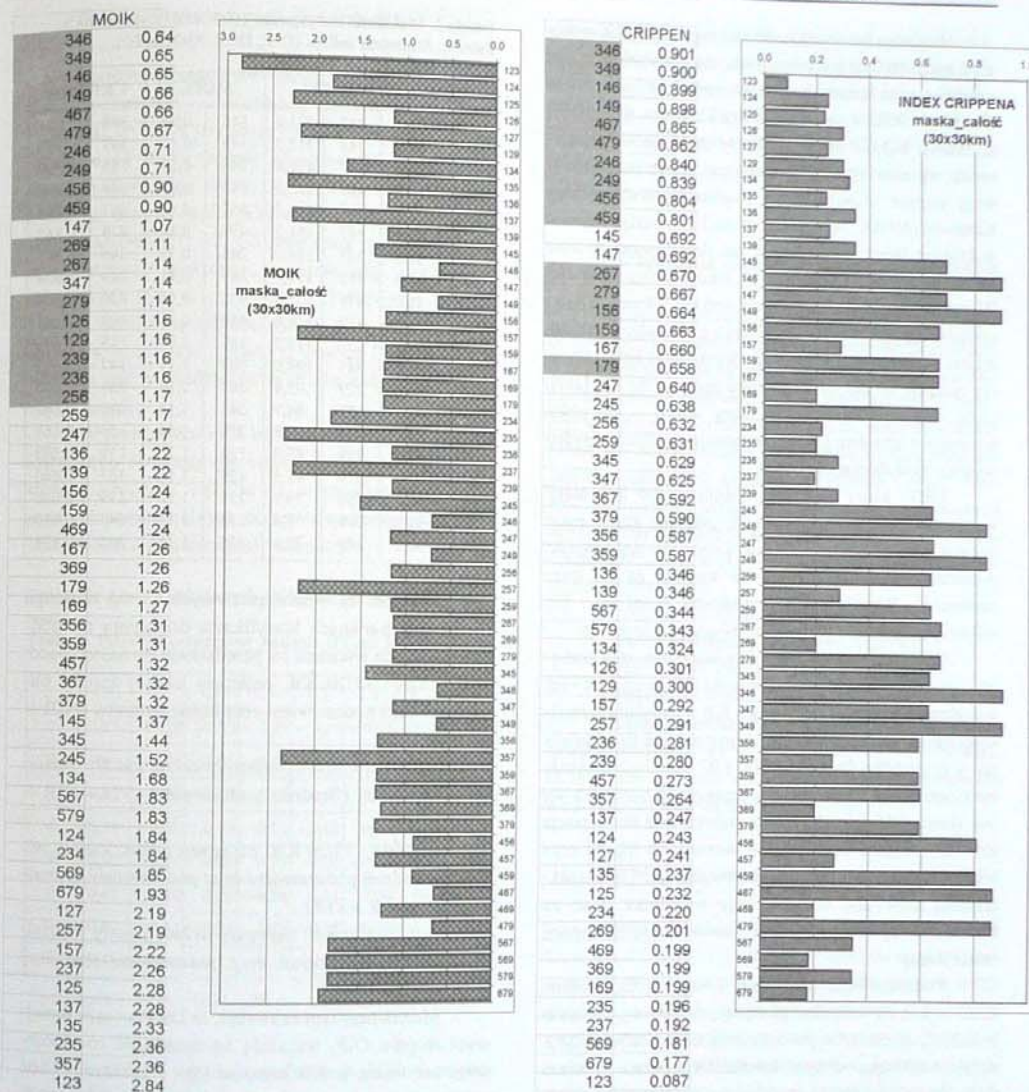
Wskaźnik DET – „Determinant” definiuje wyznacznik macierzy wariancyjno/kowariancyjnej trypletu kanałów. Ze względu na zakres wartości wskaźnika DET wyniki przedstawiono jako pierwiastek 3 stopnia (rys. 2).

Wskaźnik MOIK jest to suma modułów korelacji trzech kanałów spektralnych tworzących kompozycję barwną (rys. 3), zaś INDEX CRIPPENA (IC) definiuje wyznacznik macierzy korelacji trypletu kanałów (rys. 4).



Rys. 1. Wskaźnik OIF dla pełnego zestawu kompozycji barwnych.
Fig. 1. OIF index for full set of colour composites.

Rys. 2. Wskaźnik DET dla pełnego zestawu kompozycji barwnych.
Fig. 2. DET index for full set of colour composites.



Rys. 3. Wskaźnik MOIK dla pełnego zestawu kompozycji barwnych.

Fig. 3. MOIK index for full set of colour composites.

Rys. 4. Wskaźnik Crippena (IC) dla pełnego zestawu kompozycji barwnych.

Fig. 4. Crippen index (IC) for full set of colour composites.

Porównując wyniki obliczeń wg wszystkich wykorzystanych formuł statystycznych, można powiedzieć, że największe znaczenie kanałom termalnym przypisuje ranking MOIK, a następnie Index Crippena (IC) i OIF, natomiast bardzo niskie rezultaty uzyskują kanały termalne wg rankingu DET. Rankingi, które przywiązują wagę przede wszystkim do stopnia korelacji między kanałami (MOIK, IC), wskazują na kompozycje barwne, w których biorą udział różne, nie skorelowane ze sobą informacje, bez względu na ich jakość i różnorodność. W takim przypadku obecność kanału [6] lub [9] jest pożądana, ponieważ ich korelacja z pozostałymi kanałami jest bardzo niska. Dochodzi nawet do tak paradoksalnej sytuacji, że już na 12 miejscu pojawia się KB [269], gdzie oba termalne kanały biorą udział – ich niska korelacja z kanałem [2] rekompensuje wzajemne bardzo wysokie podobieństwo.

DET, który preferuje różnorodność informacji w obrębie pojedynczego kanału, odrzuca kompozycje barwne z kanałami termalnymi, a wyraźnie wskazuje na pozostałe kanały jako cenne ze względu na ich dużą zmienność. Wyraźnie też rozgranicza kanał [6] i [9], wskazując na kanał [9] jako bogatszy w informacje.

OIF jest parametrem równoważącym oba podejścia: uwzględnia zarówno zmienność informacji, jak i ich skorelowanie, w tym przypadku KB z kanałami termalnymi uzyskują przewagę, ale nie jest ona tak dominująca jak w przypadku formuł MOIK i IC. Analizując wyniki rankingu dla pełnego zestawu kompozycji barwnych wg wskaźnika OIF (rys. 1), łatwo zauważyć, iż kompozycje złożone z kombinacji kanałów termalnych [6], [9] oraz bliskiej [4] i środkowej podczerwieni [5], [7] charakteryzują najwyższe wartości tego wskaźnika, a co za tym idzie, największy zasób i różnorodność informacji tematycznej.

Podsumowując powyższe uwagi, można stwierdzić, że kanały termalne posiadają odmienną, ale mało różnorodną informację w stosunku do kanałów optycznych. Analizując w tym kontekście macierz korelacji (tab. 1), można przypuszczać, że optymalnym nośnikiem informacji tematycznej będą kompozycje barwne zawierające po jednym kanale z czterech głównych grup kanałów cechujących się bardzo dużym wewnętrznym podobieństwem. Warunek powyższy spełniają wszystkie

Tabela 2. Wskaźniki statystyczne (OIF, DET, MOIK, IC).
Table 2. Statistical indices (OIF, DET, MOIK, IC).

OIF		DET3		MOIK		CRIPPEN	
479	66,0	347	231,4	346	0,64	346	0,901
467	63,8	345	212,5	349	0,65	349	0,900
469	63,8	247	171,6	146	0,65	146	0,899
349	56,2	457	163,3	149	0,66	149	0,898
346	53,5	245	156,7	467	0,66	467	0,865
347	47,7	147	151,2	479	0,67	479	0,862
459	46,0	357	144,9	246	0,71	246	0,840
457	45,3	145	138,4	249	0,71	249	0,839
456	44,0	479	135,4	456	0,90	456	0,804
149	43,8	459	118,0	459	0,90	459	0,801
147	43,5	257	112,7	147	1,07	145	0,692
249	43,2	349	104,0	269	1,11	147	0,692
247	41,6	379	95,4	267	1,14	267	0,670
146	41,0	157	94,7	347	1,14	279	0,667
246	40,6	467	91,7	279	1,14	156	0,664
345	35,8	359	87,0	126	1,16	159	0,663
279	32,1	579	81,5	129	1,16	167	0,660
145	32,1	456	79,9	239	1,16	179	0,658
379	31,8	279	75,6	236	1,16	247	0,640
367	30,3	249	72,5	256	1,17	245	0,638

wskaźniki (tab. 2). Wśród pierwszych 20 wg rankingu kompozycji barwnych klasyfikacja dokonana na podstawie różnych wskaźników przedstawia się następująco:

– OIF: 18/20 KB, najlepszy układ: kanały bliskiej i średniej podczerwieni oraz kanał termalny (NIR + SWIR + TIR);

– DET: 16/20 KB, najlepszy układ: kanały widzialne oraz bliskiej i średniej podczerwieni (VIS + NIR + SWIR);

– MOIK: 17/20 KB, najlepszy układ: kanały widzialne, średniej podczerwieni oraz podczerwieni termalnej (VIS + NIR + TIR);

– IC: 20/20 KB, najlepszy układ: kanały widzialne, średniej podczerwieni oraz podczerwieni termalnej (VIS + NIR + TIR).

Można przy tym zauważyć, że DET, oraz w mniejszym stopniu OIF, wskazują na zasadność równoczesnego używania w KB kanałów [5] i [7], które – choć wzajemnie ze sobą skorelowane – niosą dużą różnorodność informacji. Takiego sygnału nie dają pozostałe dwa wskaźniki (MOIK i IC), które zdecydowanie preferują używanie kanałów termalnych, nawet podwojonych (MOIK) lub dwóch kanałów widzialnych (MOIK).

3.3. Analiza składowych głównych (PCA)

Analiza składowych głównych (PCA) stanowi technikę liniowej transformacji danych obrazowych, w wyniku której z oryginalnych kanałów spektralnych uzyskuje się nowy zestaw obrazów tzw. składowych (Chavez, Kwarteng 1989). Dla typowego zestawu satelitarnych danych multispektralnych pierwsze dwie lub trzy składowe (C1, C2, C3) zawierają niemal kompletną informację spektralną, podczas gdy w kolejnych składowych (C4, C5, C6, C7, C8) dominują różnego rodzaju zakłócenia radiometryczne oraz szczerkowa informacja tematyczna. Stąd też analiza PCA wykorzystywana jest w teledetekcji m.in. do kompresji danych spektralnych.

W przedmiotowych badaniach podejście PCA wykorzystano do oceny zawartości spektralnej danych systemu LANDSAT 7 (ETM+), w tym również do próby separacji poszczególnych zakresów spektralnych, a zwłaszcza zakresu podczerwieni termalnej.

Tabela 3. Analiza składowych głównych [PCA]: macierz ładowania.

Table 3. Principal component analysis [PCA]: loading matrix.

	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8
1	0,89	-0,29	-0,12	-0,27	-0,17	-0,03	-0,04	-0,01
2	0,89	-0,40	-0,01	-0,20	0,04	0,01	0,12	0,02
3	0,92	-0,28	-0,15	-0,14	0,15	0,01	-0,08	-0,01
4	0,39	-0,51	0,75	0,12	-0,01	0,04	-0,02	0,00
5	0,90	0,13	0,01	0,39	0,01	-0,13	0,01	0,00
6	0,42	0,86	0,22	-0,16	0,01	0,00	0,02	-0,10
7	0,86	0,25	-0,26	0,33	-0,04	0,13	0,00	0,00
9	0,42	0,86	0,21	-0,16	0,01	0,00	-0,01	0,10

widz+ term. NIR IR
IR.

Analizując wyniki transformacji PCA w postaci macierzy ładowania (tab. 3) łatwo zauważyć, że pierwsza składowa (C1) zawiera niemal kompletną informację przestrzenną pochodzącą z kanałów widzialnych [1, 2, 3] oraz średniej podczerwieni [5, 7]. Natomiast druga składowa (C2) zawiera prawie wyłącznie informację

z kanałów termalnych [6, 9], co jest najbardziej istotne, z punktu widzenia prowadzonych badań. Następne dwie składowe (C3, C4) prowadzą informację odpowiednio, z kanałów bliskiej [4] i średniej podczerwieni [5, 7]. W pozostałych składowych (C5, C6, C7, C8) dominują różnego rodzaju szumy radiometryczne, związane głównie z pracą skanera.

3.4. Integracja kanałów termalnych i optycznych

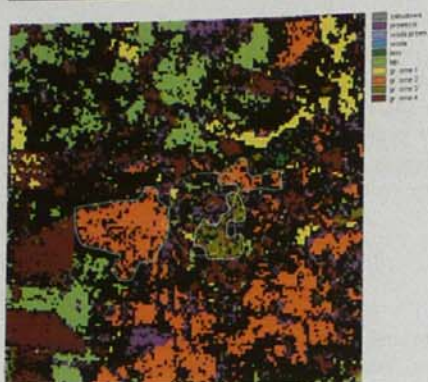
W toku analiz tematycznych podjęto również próbę integracji kanałów o różnej rozdzielczości przestrzennej. Zabieg ten miał na celu sprawdzenie, czy i w jakim zakresie można podnieść walory interpretacyjne kanałów termalnych, o rozdzielczości 60 m, poprzez wzmocnienie ich odwzorowania dwukrotnie wyższą rozdzielczością przestrzenną kanałów optycznych (30 m). Spośród znanych z literatury i najczęściej stosowanych metod integracyjnych (Carper i in. 1990; Rigol, Chica-Olmo 1997; Wald i in. 1997) testowaniu poddano następujące procedury:

- IHS (Intensity, Hue, Saturation),
- PCA (Principal Component Analysis),
- HPF (High Pass Filter) oraz formuły
- Jaakkola i Mroza (IHS + Jaakkola).

Analiza porównawcza uzyskanych wyników integracji dokonanych ww. metodami pozwoliła stwierdzić, iż najlepsze rezultaty dała fuzja kanałów termalnych z optycznymi metodą IHS (rys. 7a i b).

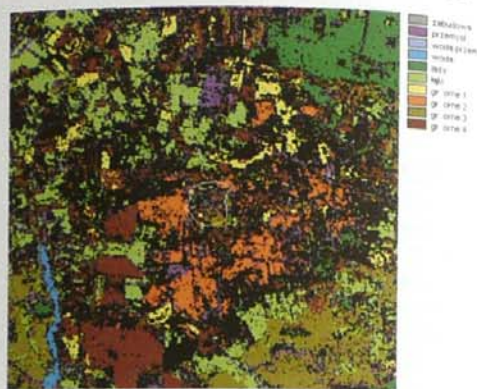
3.5. Mapa użytkowania i pokrycia terenu

Wielospektralne dane z kanałów optycznych Landsata 7 (ETM+) posłużyły również do opracowania mapy użytkowania i pokrycia terenu dla obszaru testowego. Tego rodzaju mapa była niezbędna w kolejnym etapie badań dla analizy zmian termalnych w rejonie wysadu i jego najbliższym otoczeniu. Informacja bowiem o przestrzennej lokalizacji różnych kategorii użytkowania, a zwłaszcza pokrycia terenu pozwala na właściwą interpretację oraz ilościową ocenę poziomu i rozkładu radiacji termalnej, rejestrowanej przez sensor satelity.



Rys. 5. Mapa użytkowania i pokrycia terenu w rejonie wysadu solnego.

Fig. 5. Land-use/land-cover map over the salt dome area.



Rys. 6. Mapa użytkowania i pokrycia terenu dla obszaru studiów (30x30 km).

Fig. 6. Land-use/land-cover map for the study area (30x30 km).

Mapę opracowano w oparciu o metodę klasyfikacji nadzorowanej danych wielospektralnych systemu LANDSAT 7 (ETM+). Wydzielono ogółem 10 kategorii użytkowania terenu, w tym cztery rodzaje gruntów ornych (rys. 5, rys. 6). Takie podejście miało na celu sprawdzenie, czy i w jakim zakresie zachodzi korelacja pomiędzy emisją termalną a różnicami się spektralnie

strefami, w obrębie tej samej kategorii rolniczego użytkowania, jaką stanowią grunty orne (tab. 4). Analizując mapę użytkowania terenu łatwo zauważyć, że w bezpośrednim, a nawet dalszym otoczeniu wysadu dominują grunty orne, przy czym w części północnej strefy okalającej wysad zwiększa się wyraźnie udział trwałych użytków zielonych.

Tabela 4. Charakterystyka wydzielonych 10 kategorii użytkowania i pokrycia terenu.
Table 4. Characteristic of 10-th landuse/landcover categories.

		Pole pow. w %	tm9 śr	odch.	ndvi śr	odch.	kor.-Tm9 z:	
							Tm7	ndvi
1	Zabudowa	1,2	125,52	5,63	0,37	0,09	0,25	-0,41
2	Przemysł	6,8	122,09	3,90	0,40	0,15	0,19	0,16
3	Przem. woda	0,1	124,97	9,32	0,15	0,14	0,27	-0,38
4	Woda	0,7	100,42	3,72	0,64	0,14	0,29	-0,22
5	Lasy	1,7	116,02	2,17	0,77	0,05	0,30	-0,29
6	Łąki	19,2	126,10	3,88	0,38	0,07	0,43	-0,22
7	Gr. orne 1	3,7	119,30	2,45	0,73	0,06	0,22	-0,09
8	Gr. orne 2	4,1	120,96	3,44	0,14	0,04	0,43	-0,26
9	Gr. orne 3	5,4	124,68	3,66	0,39	0,07	0,22	-0,05
10	Gr. orne 4	10,2	122,30	3,13	0,55	0,09	0,25	-0,12
	Gr. 1-4	23,4	122,14	3,59	0,47	0,20	0,16	-0,17
	Gr. 1-4, łąki	42,6	123,92	4,21	0,43	0,16	0,39	-0,27
	Niesklas.	46,9						



(a)

Rys. 7. Obraz termalny obszaru testowego: oryginalny (a) oraz po integracji metodą IHS (b).

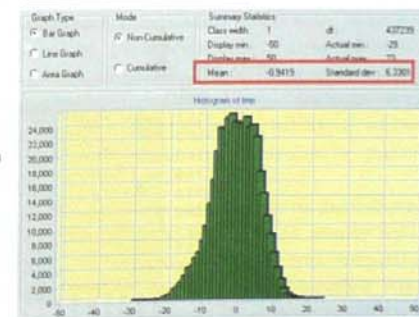
Fig. 7. Thermal image over the study area: original thermal band (a) and after merging HIS method (b).

(b)



100
102
104
106
108
110
112
114
116
118
120
122
124
126
128
130

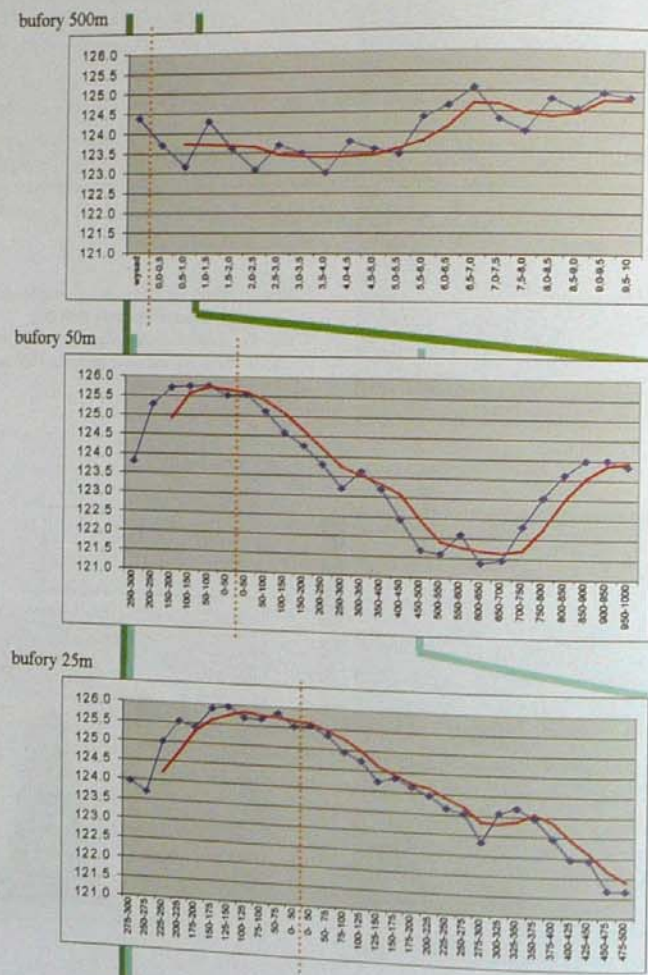
RMSE = 6,4
DI = 5,14



4. Analiza zmian termalnych

Analizę poziomą i rozkład przestrzenny temperatury radiacyjnej w rejonie wysadu solnego „Góra” oparto na koncepcji koncentrycznych stref buforowych, których granice poprowadzono równoległe do konturu

wysadu wyznaczonego na głębokości 150 m od powierzchni terenu. W oparciu o wyniki wstępnej analizy dla różnych wariantów bufora od 25 m do 500 m (rys. 8). Do szczegółowych studiów wybrano moduły o szerokości 50 i 25 metrów (rys. 9 i rys. 10). Następnie przetestowano zmiany odpowiedzi spektralnych (dla wszyst-



Rys. 8. Zmiany temperatury radiacyjnej w rejonie wysadu solnego (strefy buforowe: 500 m, 50 m, 25 m).
Fig. 8. Radiation temperature changes over the salt dome area (buffer zones: 500 m, 50 m, 25 m).

kich możliwych kombinacji kanałów optycznych i termalnych) wraz z odległością, przyjmując różne zasięgi przestrzenne i kierunki prowadzonej analizy, w stosunku do granicy wysadu na głębokości 150 m, a mianowicie:

- na zewnątrz od granicy wysadu z pominięciem strefy nad samym wysadem,
- wyłącznie w obrębie strefy nad wysadem,
- jednocześnie na zewnątrz i do centrum wysadu, idąc od jego granicy,
- od umownego środka wysadu poza jego granicę na odległość 395 m.

Uzyskane rezultaty wskazują na podobną tendencję zmian odpowiedzi spektralnych wraz z odległością od granic wysadu lub jego umownego środka (rys. 11). Kanały termalne są przy tym istotnym elementem wzmacniającym łączną ilość informacji i, co ważniejsze, jest to w niewielkim stopniu uzależnione od wybranego sposobu i obszaru analizy. Fakt ten świadczy o poprawności przyjętych założeń metodycznych.



Rys. 9. Strefy buforowe o module 50 m.
Fig. 9. Buffer zones of 50 m module.

Dla kompleksowej oceny zmian termalnych w rejonie badanego wysadu „Góra”, co do poziomu i rozkładu przestrzennego temperatury powierzchni terenu, dokonano kalibracji kanałów termalnych systemu

LANDSAT 7 (ETM+), uzyskując tym samym zamianę temperatury radiacyjnej na temperaturę kinetyczną wyrażoną w °C.

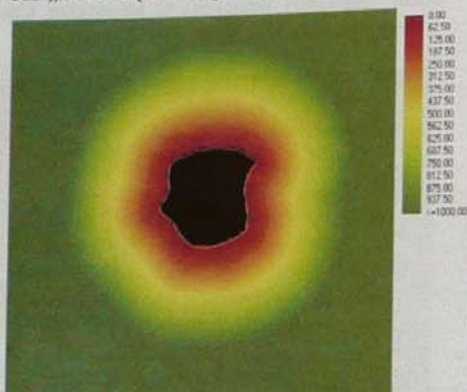


Rys. 10. Strefy buforowe o module 25 m.
Fig. 10. Buffer zones of 25 m module.

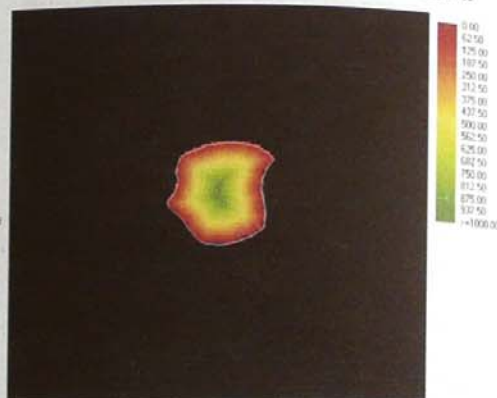
Graficzną syntezę wyników analizy termalnych danych satelitarnych przedstawiają rys. 12 oraz rys. 13. Analizując zmiany poziomu temperatury w rejonie badanego wysadu, łatwo zauważyć wyraźną tendencję spadkową w rozkładzie temperatury wraz z oddalaniem od granic wysadu, przy czym zależność ta jest ewidentna dla obu przyjętych modułów bufora, zarówno 25-, jak i 50-metrowego. Stwierdzone przy tym różnice poziomu temperatury radiacyjnej odpowiadają zakresowi temperatury rzeczywistej w granicach 2–3°C.

Ponadto należy podkreślić, że na dalekim przedpolu, w odległości około 700 m od granicy wysadu obserwuje się ponownie wyraźny wzrost temperatury, rzędu 2°C. Fakt ten należy przypuszczać w związku z tektoniką okolicy wysadową. Bowiernieciągłości, w postaci uskoków, a zwłaszcza większych dyslokacji mogą stanowić dogodne strefy migracji ciepła z głębi górotworu ku powierzchni, dając tam lokalne anomalie termalne.

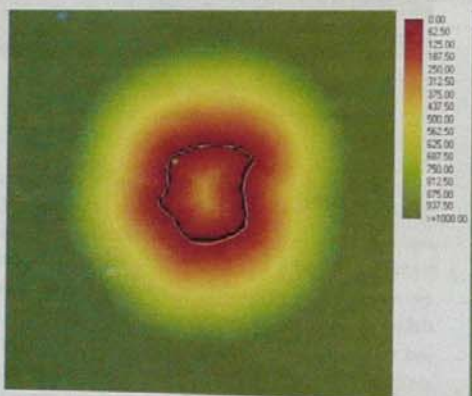
odl. „na zewnątrz” od gr. wysadu na gl. 150m



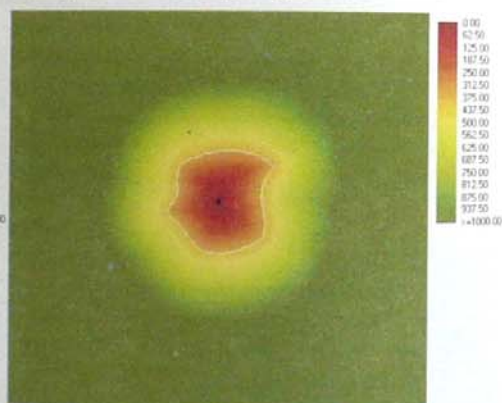
odl. „do wewnątrz” od gr. wysadu na gl. 150m



odl. równocześnie „na zewnątrz” i „do wewnątrz”



odl. „od środka”, na gr. wysadu odl.=395m



Rys. 11. Warianty analiz buforowych.
Fig. 11. Variants of buffer analysis.

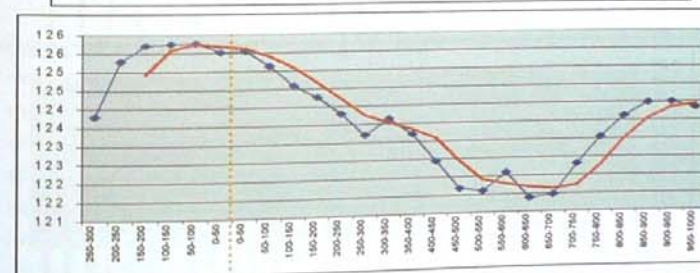
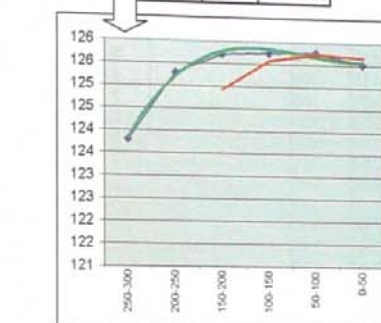
Dodać należy, że analiza buforowych stref 50- i 25-metrowych wskazuje również na wyraźną tendencję spadku poziomu temperatury, idąc od granicy wysadu w stronę jego centrum na dystansie od około 50-150 m, przy czym przyjęcie stref 25-metrowych daje możliwość dokładniejszego próbkowania, przy zachowaniu podobnej tendencji zmian, jak w przypadku stosowania bufora 50-metrowej szerokości.

Istotne uzupełnienie omówionych dotychczas wyników badań stanowią analizy porównawcze dla buforów 50 m i 25 m, na wyodrębnionych kategoriach terenu o rolniczym profilu użytkowania, z pominięciem obszarów leśnych, stref zabudowy oraz wód powierzchniowych (rys. 14).

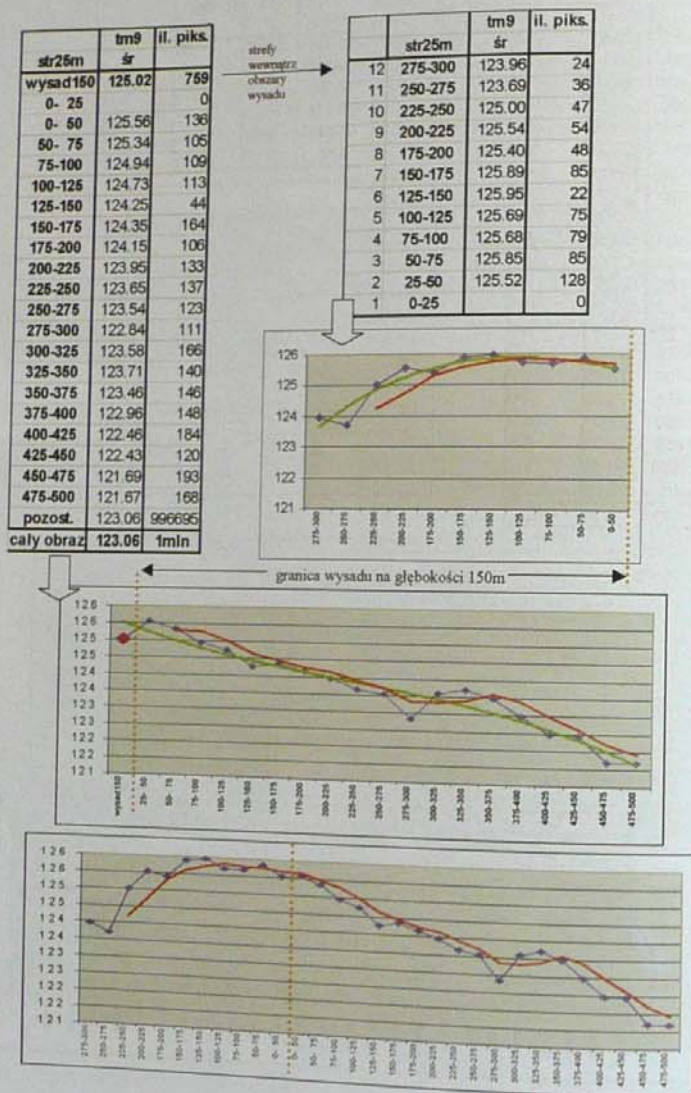
Takie podejście pozwala na częściowe wyeliminowanie problemu przypadkowego wpływu udziału poszczególnych form użytkowania terenu (szczególnie

str50m	tm9	il. piks.
wysad150	125.02	759
0-50	125.56	136
50-100	125.14	214
100-150	124.60	157
150-200	124.27	270
200-250	123.80	270
250-300	123.21	234
300-350	123.64	306
350-400	123.21	294
400-450	122.45	304
450-500	121.68	361
500-550	121.60	341
550-600	122.10	356
600-650	121.39	417
650-700	121.47	400
700-750	122.32	379
750-800	123.05	479
800-850	123.63	490
850-900	123.99	409
900-950	124.00	525
950-1000	123.85	540
pozost.	123.06	992359
cały obraz	123.06	1mln

str50m	tm9	il. piks.
250-300	123.8	60
200-250	125.3	101
150-200	125.7	133
100-150	125.8	97
50-100	125.8	164
0-50	125.5	128

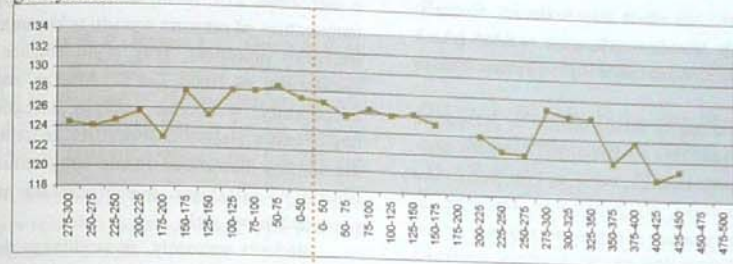


Rys. 12. Zmiany temperatury radiacyjnej w rejonie wysadu solnego (strefy buforowe: 50 m).
Fig. 12. Radiation temperature changes over the salt dome area (buffer zones: 50 m).



Rys. 13. Zmiany temperatury radiacyjnej w rejonie wysadu solnego (strefy buforowe: 25 m).
Fig. 13. Radiation temperature changes over the salt dome area (buffer zones: 25 m).

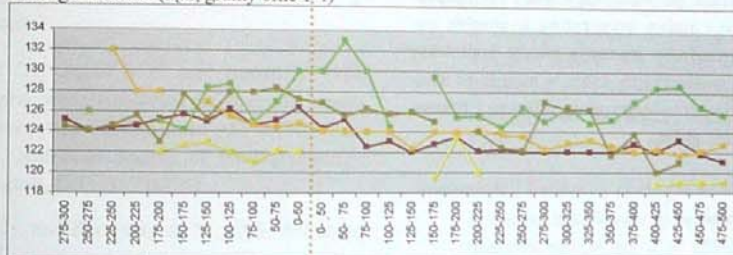
grunty orne 3



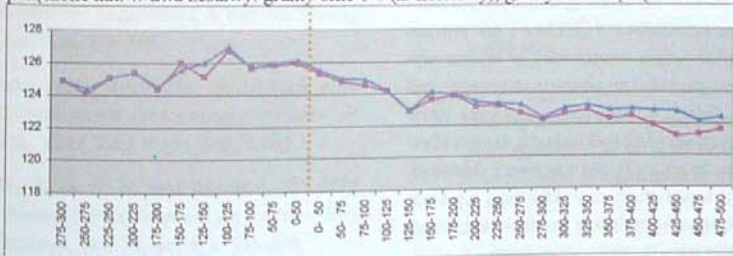
grunty orne 4



5 kategorii terenu (łąki, grunty orne 1-4)



połączone kat. w dwa zestawy: grunty orne 1-4 (k. fioletowy), grunty orne i łąki (k. niebieski)



Rys. 14. Zmiany temperatury radiacyjnej w obrębie różnych kategorii rolniczego użytkowania.
Fig. 14. Radiation temperature changes within different agriculture categories.

antropogenicznych), ale niesie inne trudności, szczególnie przy buforach 25-metrowych, gdyż rozkład pikseli w poszczególnych strefach może być wówczas bardzo nierównomierny.

Analogicznie jak to miało miejsce w przypadku analizy całego obrazu (bez wydzielonych kategorii użytkowania i pokrycia terenu), tak i w tym przypadku obserwuje się podobną, jak poprzednio, tendencję do obniżania się temperatury wraz z oddalaniem się od granicy wysadu. Szczególnie wysoką korelację uzyskano dla kategorii „grunty orne 4” lub, z pewnymi ograniczeniami, „grunty orne 2”, które w czasie rejestracji sceny satelitarnej stanowiły w większości gleby odkryte o prawdopodobnie już przesuszonej powierzchni, po okresie zimowym. Okoliczności powyższe należy uznać za nader korzystne dla prowadzenia tego rodzaju analiz. Natomiast dla obszarów łąk i trwałych użytków zielonych nie uzyskano wyraźnego związku zmian temperatury z odległością, co można uznać jako wskazanie metodyczne uzasadniające możliwość wyłączenia z analizy tego rodzaju kategorii użytkowania. Analizy na wydzielonych obszarach potwierdzają regułę, że najlepsze obszary do detekcji zmian temperatury w obrębie wysadu i na jego przedpolu stanowią zwarte kompleksy użytków ornych, zwłaszcza te, które w momencie zdalnego obrazowania termalnego mają odkrytą i przesuszoną powierzchnię gleby.

Podsumowanie

W toku przeprowadzonych badań dokonano kompleksowej oceny możliwości wykorzystania danych satelitarnych systemu LANDSAT 7 (ETM+) dla potrzeb termalnego monitorowania środowiska w rejonie wysadów solnych, na przykładzie obszaru testowego, jaki stanowił wysad „Góra” k. Inowrocławia. Ocena statystyczna pełnego zestawu wielospektralnych danych obrazowych wykazała, że największym zasobem i różnorodnością informacji tematycznej charakteryzują się kompozycje barwne będące kombinacją kanałów termalnych z pasmami: bliskiej i środkowej podczerwieni.

W wyniku analizy rozkładu temperatury radiacyjnej wokół wysadu, w kolejnych strefach buforowych

o szerokości 25 i 50 m, stwierdzono wyraźny spadek temperatury od centrum wysadu w kierunku jego bezpośredniego przedpola, przy czym różnice temperatury rzeczywistej są rzędu 2–3°C. Analiza zmian poziomu temperatury, w obrębie różnych kategorii rolniczego użytkowania, pozwoliła stwierdzić, że najlepsze warunki dla detekcji niewielkich różnic temperatury radiacyjnej istnieją na odkrytych powierzchniach przesuszonych powierzchniowo gleb.

Badania wykazały, że satelitarne dane obrazowe nowej generacji, systemu LANDSAT 7 (ETM+) stanowią niezwykle obiecujące narzędzie dla wykrywania i geometryzacji przestrzennej anomalii termicznych towarzyszących wysadom solnym. Konieczne jest jednakże dalsze doskonalenie metodyki przetwarzania i interpretacji tego rodzaju danych teledetekcyjnych.

Bibliografia

- Abrams M. J., Ashley R. P., Rowan I. C., Goetz A. F. H. and Kahle A. B., 1977, *Mapping of hydrothermal alteration in the Cuprite Mining District, Nevada, Using Aircraft Scanner Images for the Spectral Region 460 to 2360 nm*. Geology, vol. 5, s. 713–718.
- Bujakowski W. red., 2003, *Termiczna charakterystyka górotworu w rejonie wysadów solnych*, Wyd. IGSMiE PAN, Kraków, s. 136.
- Campos-Marquetti R. Jr. and Rockwell B., 1989, *Quantitative lithologic mapping in spectral ratio feature space: volcanic, sedimentary and metamorphic terrains*, Proceedings of the 7th Thematic Conference on Remote Sensing for Exploration Geology, Calgary, Alberta, s. 471–484.
- Carper W. J., Lillesand T. M. and Kiefer R. W., 1990, *The use of intensity-hue-saturation transformations for merging SPOT panchromatic and multispectral image data*, Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, vol. 56, no. 4, s. 459–467.
- Chavez P. S. Jr., Gupil S. C. and Howell J., 1984, *Image processing techniques for thematic mapper data*, Proceedings: 50th Annual ASP-ACMS Symposium, American Society of Photogrammetry, Washington, D.C., s. 728–743.
- Chavez P. S. Jr. and Kwarteng A. Y., 1989, *Extracting spectral contrast in landsat thematic mapper image data using selective principal component analysis*, Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, vol. 55, no. 3, s. 339–348.
- Garlicki A. red., 1988, *Możliwości identyfikacji geofizycznej i rozpoznania geologicznego wysadów solnych*. Arch. Zakł. Złóż Rud i Soli, AGH.
- Goetz A. F. H., Rock B. N. and Rowan L. C., 1983, *Remote sensing for exploration. An overview*, Economic Geology, vol. 78, no. 4, s. 573–590.
- Goetz A. F. H. and Rowan L. C., 1981, *Geologic remote sensing*, Science, vol. 211, p. 781–791.
- Hunt G. R. and Ashley R. P., 1979, *Spectra of altered rocks in the visible and near infrared*, Economic Geology, vol. 74, p. 1613–1629.
- Jacoby Ch. D., Dillip P. K., 1974, *Salt domes as a source of geothermal energy*, Mining Engineering 26/5, p. 34–39.
- Jarzyna J., 2003, *Własności cieplne skał wokół wysadów solnych [w:] Termiczna charakterystyka górotworu w rejonie wysadów solnych*, praca zbiorowa pod red. W. Bujakowskiego, Wyd. IGSMiE PAN, Kraków, s. 61–72.
- Jensen P. K., 1990, *Analysis of the temperature field around diaphers*, Geothermics, vol. 19, p. 273–283.
- Mularz S., 2002, *Teledetekcyjny monitoring środowiska w rejonie wysadów solnych z wykorzystaniem obrazowań satelitarnych nowej generacji*, Raport z prac badawczych nr 10.10.150.597, Arch. ZFiT AGH.
- Mularz S., 2003, *Analiza zdjęć lotniczych i satelitarnych w detekcji anomalii termicznych towarzyszących wysadom solnym [w:] Termiczna charakterystyka górotworu w rejonie wysadów solnych*, praca zbiorowa pod red. W. Bujakowskiego, Wyd. IGSMiE PAN, Kraków, s. 37–48.
- Petersen K., Lerche I., 1995, *Quantification of thermal anomalies in sediments around salt structures*, Geothermics, vol. 24, no. 2, p. 253–268.
- Prost G., 1980, *Alteration mapping with airborne multispectral scanners*, Economic Geology, vol. 75, s. 894–906.
- Rigol J. P., Chica-Olmo M., 1997, *Merging remote-sensing images for geological-environmental mapping: application to the Cabo de Gata-Níjar Natural Park, Spain*, Environmental Geology 34 (2/3), p. 194–202.
- Selig F., Wallick G., 1966, *Temperature distribution in salt domes and surrounding sediments*, Geophysics, XXXI/2, p. 346–361.

Szybist A., 1993, *Charakterystyka geologiczna wysadu Góra i Mogilno W. Ocena możliwości wykorzystania komór eksploatacyjnych w kopalni Góra i Mogilno jako podziemnych magazynów do lokowania surowców lub odpadów*, red. Z. Kleczek. Arch. Zakł. Złóż Rud i Soli AGH.

Szybist A., 2003, *Struktury solne regionu kujawskiego [w:] Termiczna charakterystyka górotworu w rejonie wysadów solnych*, praca zbiorowa pod red. W. Bujakowskiego, Wyd. IGSMiE PAN, Kraków, s. 15–35.

Szybist A., Garlicki A., 2003, *Geologiczna charakterystyka regionu kujawskiego [w:] Termiczna charakterystyka górotworu w rejonie wysadów solnych*, praca zbiorowa pod red. W. Bujakowskiego, Wyd. IGSMiE PAN, Kraków, s. 7–13.

Wald L., Ranchin T. and Mangolini M., 1997, *Fusion of satellite images of different spatial resolutions: assessing the quality of resulting images*, *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, vol. 63, no. 6, p. 691–699.

Summary

The main subject of the study presented was usability evaluation of multispectral satellite LANDSAT 7 (ETM+) data, for thermal monitoring purposes, over the salt dome „Góra”, near town of Inowrocław, Poland. On the first stage, the complex analysis was performed to assess an information content of the full set of satellite data using different statistic procedures and indices (PCA, OIF, DET, MOIK and IC). Merging of thermal and optical channels using IHS formula was also tested. Finally, land-use/land-cover map was generated using supervised classification method. Detection and analysis of the thermal phenomena on the test area was the subject of the second stage of this investigations. To analyse temperature level and distribution over the salt dome and its surroundings, the buffer zone concept was applied. A consecutive buffer zones of 50 m and 25 meters module were parallel to the salt dome contour line, which was specified of 150 m in depth, below the ground surface. Interpretation results indicated decreasing tendency of the temperature level of about 2–3°C, going from the salt dome to the forefield direction. Temperature increased again of about 2°C at the distance of about 700 meters from salt dome border. This was probably connected with the salt tectonic features. In the course of this research have been also stated that among different agricultural categories, a large barren soils surface was the best for the thermal anomaly detection. As a conclusion one can say that satellite LANDSAT 7 (ETM+) multispectral imageries provide very useful information for thermal anomaly detection over the salt dome areas. But methodology improvement is still necessary, especially for processing and thematic interpretation of such remote sensing data.

KRYSTIAN PYKA¹

OCENA DZIAŁAŃ ADMINISTRACJI PUBLICZNEJ W KONTEKŚCIE WYBRANYCH PROBLEMÓW KRAJOWEJ INFRASTRUKTURY GEOINFORMACYJNEJ

Słowa kluczowe:

infrastruktura geoinformacyjna, mapa topograficzna, mapa tematyczna, SIP, Internet

Abstrakt

W artykule dokonano oceny przeszłych i obecnych działań administracji publicznej w zakresie gromadzenia, przechowywania i udostępniania informacji przestrzennej w Polsce. W pierwszej części dyskutuje się, czy tradycyjny dorobek kartograficzny należy traktować jako zaletę, czy jako obciążenie z punktu widzenia tworzenia infrastruktury geoinformacyjnej. Następnie postawiono pytanie o bazową mapę GIS dla całego kraju. W odpowiedzi zasugerowano, że mapa bazowa powinna być budowana etapami, ale w taki sposób, aby każda warstwa informacyjna powstawała równocześnie dla całego kraju. W konkluzji stwierdza się m.in., że potrzebna jest koordynacja procesu decyzyjnego, aby unikać dublowania działań i redundancji przedsięwzięć w zakresie geoinformacji w Polsce.

THE EVALUATION OF POLISH PUBLIC ADMINISTRATION ACTIVITIES IN THE CONTEXT OF SELECTED NATIONAL PROBLEMS IN DEVELOPMENT OF SPATIAL DATA INFRASTRUCTURE

Key words:

spatial data infrastructure, topographic map, thematic map, GIS, Internet

Abstract

The paper includes an evaluation of the past and present activities of Polish public administration in the scope of accumulation, storing and accessing of spatial-related data. In the first part it was discussed if the traditional cartographic property is an advantage or a disadvantage for creation of spatial data infrastructure in Poland. Then a question about the general GIS basemap for whole country was asked. As the answer it was given the opinion the general GIS basemap should be elaborated stepwise but each level of information should be collected parallel for whole country. The conclusion of this paper deals with the need of coordinated decision-making, and avoid effort duplication and redundant investment in spatial database development in Poland.

¹ Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Geodezji i Inżynierii Środowiska, Kraków.

1. Wprowadzenie

Zadaniem każdego państwa dbającego o trwałą rozwój społeczny jest kształtowanie mechanizmów dających obywatelom szansę kreatywnego realizowania się w ramach globalnego społeczeństwa informacyjnego. Takemu społeczeństwu należy zagwarantować możliwość korzystania z wiarygodnej informacji przestrzennej poprzez zbudowanie infrastruktury geoinformacyjnej.

Termin infrastruktura geoinformacyjna oznacza ogół środków instytucjonalnych i technicznych służących efektywnemu wykorzystaniu informacji przestrzennej dla potrzeb gospodarczych, społecznych, kulturowych. Doświadczenia światowe przekonują, że nie można liczyć na „niewidzialną rękę wolnego rynku”, lecz trzeba „inteligentnie sterować” rozwojem infrastruktury geoinformacyjnej (Wysocka 1999). W większości krajów ciężar tworzenia infrastruktury geoinformacyjnej bierze na siebie administracja państwowa przy zróżnicowanym udziale administracji samorządowej i sektora prywatnego. Nie inaczej jest w Polsce, przy czym jako naturalny, instytucjonalny filar infrastruktury należy postrzegać służbę geodezyjną i kartograficzną, która od 1999 r. jest współtworzona przez administrację rządową i samorządową.

Tematyka artykułu koncentruje się wokół merytorycznego rdzenia infrastruktury geoinformacyjnej, za jaki uznano źródłowe dane referencyjne. W artykule poruszono także wybrane aspekty udostępniania informacji przestrzennej w Internecie. Na kształt pracy ma wpływ przyjęte założenie, że klasyczna mapa może być traktowana jako prekursor informatycznego systemu informacji przestrzennej, gdyż sama w sobie jest systemem, choć nie informatycznym. Przed kilku laty podczas międzynarodowej konferencji dyskutowano, czy „GIS zabija kartografię” (Goodchild 1999), a znaczna część kartografów dystansowała się od systemów informatycznych. Dziś okazuje się, że dopiero zaawansowane technologie GIS potrafią nie tylko wyszukiwać i analizować dane, ale także wizualizować wyniki analiz w postaci map tworzonych zgodnie z językiem mapy, choć wciąż z interaktywnym udziałem kartografa.

2. Polskie tradycje w zakresie informacji przestrzennej

Polska jest krajem o bogatym dorobku zarówno w zakresie opracowań geodezyjnych, topograficznych, jak i geograficznych. Opracowania topograficzne, choć przechodziły dość burzliwe i zmienne koleje, to jednak złożyły się w sumie na spory dorobek. Stabilniej toczyły się losy podstawowych opracowań geodezyjnych, co może wpłynęło na dość zachowawcze postępowanie, masowa informatyzacja rozpoczęła się przed kilku laty, dotyczy to map ewidencyjnych oraz – w miastach – map zasadniczych.

Opracowania geodezyjne, kartowane w skalach od 1:500 do 1:5000, to gigantyczny zasób danych, który z racji samej wielkości jest trudny do przekształcenia w postać cyfrową. Inną rafa na drodze do informatyzacji tego zasobu jest prowadzenie map w ponad stu układach współrzędnych (Szeliga 1999), a swoistą ciekawostką jest fakt, że dla układu „1965”, dominującego w skali kraju, dopiero w połowie lat dziewięćdziesiątych ujawniono parametry odwzorowania, pozwalające na przeliczenia pomiędzy współrzędnymi prostokątnymi a geograficznymi. Mapy wielkoskalowe były i są w dalszym ciągu skierowane na określone potrzeby relatywnie wąskiej grupy odbiorców, tj. inwestorów, gestorów liniowej infrastruktury technicznej, właścicieli i nabywców nieruchomości, i obsługujących te zadania geodetów. Dostęp do danych jest nie tylko odpłatny, ale i ograniczony, gdyż wymaga wykazania interesu prawnego.

Mało który kraj może pochwalić się tak licznymi programami wydawniczymi w zakresie map topograficznych jak Polska w latach powojennych. Nie wszystkie programy zrealizowano, wśród wykonanych w pełni należy wymienić mapę topograficzną 1:10 000, której pierwsze opracowanie zakończono w 1974 r., czyli niecałe dwadzieścia lat po sformułowaniu zadania w uchwale Prezydium Rządu z 1956 r. Paradoks polega na tym, że tak bogaty materiał nie był dostępny dla zastosowań cywilnych. Dopiero w latach siedemdziesiątych zainicjowano opracowanie cywilne, ale bez siatki geograficznej, stosując wspomniany wcześniej układ „1965”.

Ostatnia dekada XX w. to okres przemian w polskiej kartografii. W tym czasie nastąpiły długo oczekiwane zmiany w archaicznych regulacjach prawnych, które w zbiegu z gruntownymi zmianami technologicznymi spowodowały prawdziwe odrodzenie kartografii jako usługi na rzecz społeczeństwa. Odrodzenie rozumiane jako nawiązanie do znakomych przedwojennych tradycji Wojskowego Instytutu Geograficznego. Obok zupełnie nowych opracowań topograficznych w skalach 1:10 000 i 1:50 000 (Stankiewicz, Głazewski 2000) rozpoczęto opracowanie map środowiska przyrodniczego w skali 1:50 000 (Siwek 2001). Systematyczne kartowanie prowadzi w swoim zakresie służba geologiczna (Pietras, Graniczny 2001) oraz wojskowa (Sobczyński, Sielecki 2000).

3. Krajowy system informacji o terenie

W 2001 r. zostało wydane rozporządzenie w sprawie szczegółowych zasad i trybu założenia i prowadzenia krajowego systemu informacji o terenie, stanowiące delegację do ustawy Prawo geodezyjne i kartograficzne. SIT jest budowany na trzech poziomach: powiatowym, wojewódzkim i centralnym. Każdy z tych poziomów ma przypisany określony zakres informacyjny, z których najszerszy, bo obejmujący ośno geodezyjną, ewidencję gruntów i budynków, ewidencję sieci uzbrojenia terenu oraz obiekty topograficzne mapy zasadniczej, dotyczy poziomu powiatowego. Natomiast na poziomie wojewódzkim system przewiduje obiekty topograficzne i numeryczny model rzeźby terenu oraz bazę metadanych na temat funkcjonujących w regionie baz danych i systemów.

Prowadzenie systemu obejmuje: tworzenie zasobu informacyjnego, kontrolę, analizę, aktualizację i integrację danych, administrowanie zasobem informacyjnym oraz udostępnianie danych. System jest w zamierzeniu narzędziem do podejmowania decyzji prawnych, administracyjnych i gospodarczych oraz pomocą w planowaniu i zagospodarowaniu przestrzennym.

Poziom powiatowy ma znaną nazwę poziomu bazowego, na podstawie którego mogą być tworzone informacje na wyższym poziomie abstrakcji. Póki co poziom wojewódzki jest tworzony w izolacji od powiatowego.

Jest to wynik małego pokrycia kraju mapą zasadniczą, którą założono dla 40% powierzchni kraju, ale tylko dla 17% w pełnej treści, a jeszcze w mniejszym stopniu są to opracowania numeryczne, czyli spełniające kryteria SIT. Poziom wojewódzki jest w ww. rozporządzeniu zbyt ogólnie zdefiniowany, przypisane mu obiekty topograficzne nie są skojarzone z określonym modelem. Pomimo wymienionych braków załączki SIT są budowane w wielu ośrodkach dokumentacji geodezyjnej i kartograficznej, zarówno powiatowych, jak i wojewódzkich, dzięki czemu ośrodki te przekształcają się ze składnic materiałów w centra informacji przestrzennej.

Informatyzacja zasobu wielkoskalowego ma zróżnicowany zakres obszarowy, kompleksowo rozwiązana jest już w kilkunastu miastach, np. Gliwice, Kraków, Łódź, Pabianice. Od 2003 r. obserwuje się wyraźne przyspieszenie prac, ale głównie w odniesieniu do map ewidencji gruntów i związanych z nimi rejestrów, co wynika z potrzeb budowy jednolitego systemu identyfikacji działek rolnych – Land Parcel Identification System (Orlińska, Wasilewska 2003). W ramach prac nad nowelizacją ustawy Prawo geodezyjne i kartograficzne opracowano projekt instrukcji technicznej dotyczącej GIS w Polsce, należy się spodziewać szybkiego wprowadzenia tej instrukcji jako obowiązującego standardu technicznego.

4. Krajowe systemy informacji przestrzennej

Wydanie podstaw prawnych SIT nie rozwiązuje problemów krajowej infrastruktury geoinformacyjnej. Aby mówić o funkcjonowaniu infrastruktury, w pierwszej kolejności trzeba uzgodnić modele danych, klasyfikacje i standardy zapisu danych przestrzennych, przełamać bariery prawne, organizacyjne i techniczne w wymianie danych przestrzennych, uzgodnić zasady dostępu sieciowego. Są to typowe komponenty infrastruktury geoinformacyjnej, aczkolwiek nie wypełniają one całej listy problemów.

Rola SIT w krajowej infrastrukturze geoinformacyjnej może być postrzegana dwojako. Jedno podejście, opierające się na przesłankach merytorycznych, traktuje SIT jako fundament infrastruktury (Bujakowski 2001). Drugi wariant oddziela SIT i SIP (system informacji przestrzennej lub geograficznej), a założenie to

ma uzasadnienie czysto pragmatyczne – bazowanie na szczegółowej informacji geometrycznej jest pracochłonne, kosztowne, długotrwałe, nie zawsze potrzebne i nie wszędzie możliwe. Kompromisem jest dążenie w dłuższej perspektywie do ścisłego powiązania współzależnych obiektów SIT i SIP przy jednoczesnym dopuszczeniu okresu przejściowego, w którym dane są pozyskiwane z dostępnych, najbardziej kompletnych opracowań kartograficznych o szczególności i dokładności adekwatnej do problemu.

Dopiero pod koniec poprzedniej dekady przystąpiono do opracowywania koncepcji krajowego SIP (Linsenbarth 2001), a do dziś nie przyjęto żadnego wiążącego ustalenia. Tymczasem pierwsze polskie projekty geoinformacyjne powstały już w połowie lat dziewięćdziesiątych, nie wszystkie przeszły próbę czasu i są trwale rozwijane. Do ciekawszych przedsięwzięć należy zaliczyć:

- wojskowe serie map i baz przestrzennych, m.in. mapy-bazy VMAP1, 2, 3 modele rzeźby terenu – DTED,
- geologiczne systemy informacji przestrzennej tworzone jako bazy danych zorientowane kartograficznie – serie map Polski w skali 1:50 000: hydrogeologiczna-MHP, szczegółowa geologiczna-SMGP, geologiczno-gospodarcza-MGGP,
- tematyczne wydawnictwa Głównego Geodety Kraju (GGK), wydawane w skali 1:50 000, ale konstruowane jako baza danych z wyjściem kartograficznym – mapa sozologiczna i hydrograficzna,
- komputerowa mapa podziału hydrograficznego Polski – Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej,
- bazy CORINE opracowane dla potrzeb zarządzania środowiskiem przyrodniczym (pokrycie terenu, biotopy), obecnie wykorzystywane m.in. do wyznaczania sieci obszarów chronionych NATURA 2000,
- systemy opracowane przez Instytut Uprawy Nawożenia i Gleboznawstwa w Puławach – np. system informacji o rolniczej przestrzeni produkcyjnej Polski oraz Instytut Melioracji i Użytków Zielonych w Falentach – baza gleb marginalnych.

Niestety, te ciekawe projekty nie są dostosowane ani do współużytkowania, ani do integracji danych. Przyczyną jest brak instytucjonalnego mechanizmu, który dbałby o rozwój i koordynację projektów geo-

informatycznych. Nad faktem tym należy ubolewać, gdyż sytuacja taka prowadzi do powielania działań, straty czasu i środków finansowych.

5. Regionalne systemy informacji przestrzennej na przykładzie województwa małopolskiego

Wobec braku ustaleń krajowych prawie każde województwo w odmienny sposób buduje regionalny system informacji przestrzennej. Przyjmowane są dwie drogi budowania wojewódzkich SIP: na podstawie map topograficznych 1:10 000 albo na podstawie map topograficznych i tematycznych 1:50 000. Pierwsza droga jest znacznie dłuższa, nigdzie nie została zakończona, a perspektywa osiągnięcia finału jest dość odległa. Druga strategia budowy SIP jest znacznie szybsza i przyniosła w kilku województwach skutek w postaci opracowania bazy danych dla całego regionu.

Województwo małopolskie jest jednym z tych, które opowiedziały się za rozwiązaniem uproszczonym. Wybór miał uzasadnienie czysto pragmatyczne. Wiadomo, że dla potrzeb programowania rozwoju niezbędna jest wiedza o przestrzennych uwarunkowaniach procesów gospodarczych, społecznych i zjawisk przyrodniczych. Przyjęto założenie, że lepsza jest wiedza syntetyczna o całym województwie i wszystkich problemach niż szczegółowa, ale ograniczona do wybranych fragmentów. Takie podejście sprawdziło się już wielokrotnie, np. przy okazji prac nad planem zagospodarowania województwa, przy opracowywaniu przeglądowych map tematycznych województwa w skalach 1:100 000 – 1:200 000 (administracyjna, drogowa, ogólnogeograficzna, użytkowania Ziemi, satelitarna). Gdyby ograniczyć się tylko do ustawowych zadań województwa samorządowego, wówczas należałoby poziom szczegółowości ograniczyć do skali 1:100 000. Jest to bowiem największa skala używana podczas spotkań decydentów, daje możliwość objęcia całego województwa małopolskiego w polu widzenia obserwatora.

Finałem wieńczącym opracowanie bazy ogólnogeograficznej jest udostępnienie części danych w portalu internetowym Wrota Małopolski, dział MAPY-GIS-GPS, zakładka „mapa interaktywna” (www.malopolska.pl). Dostępne są następujące kategorie tematyczne:

transport, przyroda, podział administracyjny, zabudowa, rzeźba terenu. W każdej kategorii znajdują się wydzielenia szczegółowe, do użytkownika należy wybór tematów, które są wizualizowane na monitorze przy narzuconej symbolice graficznej. W przyszłości aplikacja będzie rozszerzona o możliwość zadawania pytań przestrzennych, a strategia ładowania danej kategorii tematycznej, zamiast, jak obecnie, dla całego obszaru, będzie zastąpiona sukcesywnym pobieraniem danych tylko dla chwilowego pola widzenia.

6. Problem źródłowych danych topograficznych

Tak jak mapy tematyczne potrzebują wyboru mapy podkładowej, tak fundamentalną decyzją przy tworzeniu SIP jest ustalenie źródła podstawowych danych geometrycznych. Przedstawiona uprzednio lista projektów geoinformacyjnych nie zawiera takiej pozycji, która spełniałaby funkcję topograficznej mapy bazowej. Niestety, jest to zgodne ze stanem faktycznym. W konsekwencji mapy geologiczne są opracowywane na relatywnie starych podkładach w układzie „1942”, których aktualizacja została zaniechana przez służby wojskowe ponad dziesięć lat temu. Natomiast mapy tematyczne wydawane przez Głównego Geodetę Kraju (GGK) stosują inne podkłady – albo w układzie „1965”, albo „1992” (z nazwą układu związane są także inne zasady redakcji). Jest to przykry dowód na resortowe budowanie składników krajowego systemu informacji przestrzennej, bez ustalenia płaszczyzny umożliwiającej koordynację działań i łączenie środków finansowych.

W poszukiwaniu bazowego rozwiązania topograficznego GGK przystąpił do realizacji projektu Baza Danych Topograficznych (TBD). Jest to w zamierzeniu podstawowa baza informacyjna stosująca podobny (ale nie identyczny) model opisu topografii terenu jak mapa topograficzna 1:10 000. Niestety, koszty opracowania okazały się tak wysokie, że przy środkach finansowych, jakimi dysponuje resort na opracowania topograficzne, wykonanie TBD dla całego kraju zajęłoby ponad 10 lat. W związku z tym przyjęto, że to opracowanie będzie wykonywane tylko dla terenów zurbanizowanych. Tymczasem to obszary wiejskie i obszary przyrodniczo chronione potrzebują w większym stopniu TBD niż zur-

banizowane. Dla dużych aglomeracji, gdzie ceny nieruchomości są bardzo wysokie, system informacji przestrzennej musi być silnie powiązany z ewidencją gruntów, ze szczegółowymi mapami technicznymi, a tego TBD nie gwarantuje. Dlatego silne gminy miejskie nie są zainteresowane współfinansowaniem TBD, zwłaszcza gdy wcześniej poniosły koszty opracowania podstawowego – SIT.

Zatem w proponowanym kształcie projekt TBD nie rozwiąże problemu jednolitej bazy topograficznej dla całego kraju. Co prawda, istnieje pełny zasób map analogowych w skalach 1:10 000 i 1:50 000, ale są to opracowania zaniechane przez GGK. Pewne nadzieje należy wiązać z wojskową bazą topograficzną VMap2, wykonywaną zgodnie ze standardami NATO, a służącą m.in. do opracowania map w skali 1:50 000. Projekt ten wszedł w ostatnią fazę opracowania i ma być wkrótce dostępny dla zastosowań cywilnych. Jednakże wybór już zgeneralizowanej informacji jako odniesienia topograficznego spowoduje zbyt niską jakość analiz przestrzennych, zwłaszcza gdy będą dotyczyły liniowej infrastruktury transportowej, sieci i obiektów hydrograficznych. Ponadto źródłowe dane topograficzne powinny gwarantować dokładność opisu geometrii obiektów co najmniej na takim poziomie, jak dokładność prostego pomiaru odbiornikami GPS (pomiar w „czasie rzeczywistym” bez poprawek korekcyjnych daje dokładność pozycji ok. 10–15 m, a z korekcją 3–5 m, a tego dane pozyskane z map 1:50 000 nie zapewniają).

W świetle powyższych faktów należy stwierdzić, że wybór źródłowych danych topograficznych jest kluczowym problemem warunkującym rozwój krajowego SIP. Konieczne jest pilne znalezienie rozwiązania, które stałoby się platformą geometryczną dla wszystkich projektów geoinformacyjnych. Takim rozwiązaniem jest zmiana strategii realizacji projektu TBD. Zamiast opracowywania pełnej bazy dla wybranych obszarów należałoby podzielić zakres tematyczny na grupy i realizować je po kolei, ale dla całego kraju. W pierwszym etapie należałoby opracować tylko sieć drogową, kolejową i hydrograficzną nawet z ograniczeniem do reprezentacji poprzez elementy osiowe, tworząc specyficzny podkład szkieletowy. W drugim etapie powinien powstać numeryczny model rzeźby terenu, a dopiero w następnych –

pozostała treść. Spowodowałoby to co prawda kilkuletnią przerwę w wydawaniu map topograficznych 1:10 000, ale w dłuższej perspektywie taka możliwość byłaby przywrócona. W okresie przejściowym materiałem zastępczym może być ortofotomapa, która już dziś ma pełne pokrycie w kilku województwach, a w ciągu dwóch lat będzie wykonana dla całej Polski (częściowo ze zdjęć lotniczych, a częściowo z obrazów satelitarnych).

7. Geoinformacja w Internecie

Udostępnianie informacji przestrzennej staje się standardową usługą internetową. Potwierdza to mnogość adresów internetowych z publikacjami kartograficznymi. Wyróżnia się trzy podstawowe typy internetowych publikacji kartograficznych: ilustracyjne, ilustracyjne z elementami interaktywności oraz serwisy informacji geograficznej (Pyka 2003). Zakłada się, że użytkownicy korzystają ze standardowej przeglądarki internetowej, co najwyżej wspomaganej przez dodatkowe aplikacje oferowane bezpłatnie klientowi, które często ładują się automatycznie.

Celem publikacji ilustracyjnych jest tylko prezentacja uprzednio przygotowanego obrazu kartograficznego, który przemawia klasycznymi kartograficznymi środkami wyrazu. Zupełnym ich przeciwieństwem są geoserwisy, które zamiast wyświetlania zredagowanego obrazu kartograficznego oferują klientom różne poziomy funkcjonalności: od wyboru kategorii tematycznych jako elementów treści generowanej mapy, poprzez możliwość zadawania pytań o konkretne obiekty geograficzne aż do prowadzenia analiz przestrzennych według określonych kryteriów. Szczególnym rodzajem serwisu jest hurtownia „surowych danych”, przeznaczona do samodzielnego użytkowania przez posiadaczy określonych narzędzi GIS. Ciekawym kompromisem są publikacje wprowadzające na tle statycznej mapy elementy reagujące na akcję użytkownika, ujawniając w odpowiedzi nowe, uprzednio niewidoczne informacje w formie tekstowej lub graficznej. Wydaje się, że w chwili obecnej cieszą się one największym powodzeniem ze względu na takie przymioty, jak prostota obsługi i sprawność przesyłania danych.

Podstawowym problemem informacji przestrzennej w Internecie jest znalezienie kompromisu pomiędzy aspektem merytorycznym – jakością i szczegółowością informacji, pragmatyką przekazu – stopień zrozumienia informacji, estetyką – wysoka jakość grafiki, oraz aspektem technicznym – krótki czas dostępu. Połączenie tych uwarunkowań jest na tyle nową wartością, że można mówić o „internetyzacji informacji przestrzennej”. Jeszcze bardziej niż w klasycznej kartografii uwypukla się problem generalizacji informacji obrazowej ze zmianą skali wyświetlanego obrazu. Użytkownik ma do dyspozycji relatywnie małe pole widzenia, znacznie mniejsze od rozmiarów, w jakich są wydawane typowe produkty kartograficzne. Zadaniem krytycznym jest wyświetlenie „dużego” obrazu kartograficznego na „małym” ekranie przeglądarki GIS (najczęściej pole obrazowe przeglądarki jest tylko fragmentem ekranu monitora).

Konieczne jest poszukiwanie odpowiedniej dla uwarunkowań internetowych definicji skali, w tym określania zakresu skalowego, w którym może być obserwowany niezmienny przekaz graficzny. Z drugiej strony obserwator mapy ekranowej musi mieć możliwość ciągłej zmiany skali odnosząc wrażenie, że obserwuje wciąż ten sam obszar (obiekt). W przypadku grafiki wektorowej można to osiągnąć poprzez zdefiniowanie sekwencji złożonych z operacji wyboru i upraszczania, sukcesywnie dostosowywanych do skali wizualizacji. Natomiast dla grafiki rastrowej stosuje się rozwiązania oparte o strukturę piramid (Kropatsch, Bischof 2000) lub transformację falkową (Wu i in. 2000). Metody te pozwalają na lepsze równoważenie przekazywanej informacji, pozwalają wywołać u odbiorcy oczekiwany efekt w postaci wrażenia, że obcuje on wciąż z tym samym przekazem kartograficznym. Postępy w dziedzinie kompresji obrazów zwiększają atrakcyjność stosowania w roli map podkładowych odpowiednio przetworzonych (rektyfikacja geometrii) obrazów lotniczych i satelitarnych.

Z teoretycznego punktu widzenia wyobraźalne jest zbudowanie systemu informacji przestrzennej, którego model danych nie odbiega szczegółowością i dokładnością od modelowanych obiektów, a każda wizualizacja o charakterze kartograficznym powstaje na drodze generalizacji. O ile dane mogą być uznane za „bezskałowe”, to ich wizualizacja już nie. Pomimo postępu brak jest

wciąż kompleksowych, w pełni automatycznych metod generalizacji. Natomiast wkładem Internetu dla rozwoju infrastruktury geoinformacyjnej jest udostępnienie platformy wizualizacji i analiz map oraz baz danych opracowanych w różnych odwzorowaniach i układach współrzędnych.

8. Podsumowanie

Wraz z rozwojem Internetu zmienia się rola jednostkowych projektów SIP, stają się one elementami większej całości. W Polsce istnieje pilna potrzeba przyjęcia koncepcji krajowej infrastruktury geoinformacyjnej. Jest to obowiązek administracji publicznej, odpowiedzialnej za tworzenie podstaw rozwoju społeczeństwa informacyjnego. Udostępnianie informacji przestrzennej narzędziami Internetu stawia przed środkami przekazu kartograficznego nowe wyzwania. Koncentrują się one wokół takich problemów, jak: skalowanie informacji obrazowej, silniejsze akcentowanie pragmatyki przekazu obrazowego, powszechniejsze wykorzystywanie obrazów lotniczych i satelitarnych w roli mapy podkładowej.

Obiektywnie trzeba przyznać, że opracowanie modelu infrastruktury geoinformacyjnej jest zadaniem wciąż nie rozwiązany w skali światowej. Dowodzi tego historia programu INSPIRE, który pierwotnie zakładał przygotowanie europejskiej infrastruktury danych przestrzennych, a ostatnio ograniczono jego zakres do sporządzenia listy komponentów danych jako załącznika do planowanej dyrektywy Komisji Europejskiej (Linsensbarth 2003).

Biorąc pod uwagę tradycje, przyzwyczajenia i dotychczasowy dorobek polskiej informacji przestrzennej, należy utrzymać współistnienie SIT i SIP. Rozwój SIT został już rozpoczęty, są określone podstawy prawne, doskonałe są modele danych. Wkrótce powstanie integracyjna platforma elektroniczna łącząca kataster, księgi wieczyste, bazy PESEL, REGON, NIP. Trzeba mieć nadzieję, że będzie to przykład udanej integracji baz tworzonych jako jednostkowe, a które muszą współpracować. Ze względu na operacyjny charakter tych baz, dostęp do nich musi być dostosowany pod względem formalnym do kompetencji obsługujących system osób wyposażonych w stosowne upoważnienia. Dlatego SIT

nie może być systemem powszechnie i łatwo dostępnym. Takie cechy mogą mieć natomiast wyeksportowane z SIT do hurtowni geoinformacyjnej zbiory danych, które wtedy przestają służyć realizacji określonego postępowania administracyjnego, a ich znaczenie ogranicza się tylko do funkcji informacyjnej. Dane w hurtowni nie zawierają informacji niejawnych i nie mają cech stałej aktualności, zawierają natomiast różne stany czasowe – raporty z baz operacyjnych. Jest to zgodne z celami geoinformacji – służy głównie dla potrzeb poznawczych, analitycznych, wspomaga podejmowanie decyzji, ale nie jest mechanizmem podejmowania decyzji.

Niestety, rozwój infrastruktury geoinformacyjnej w Polsce jest zagrożony. Brak nie tylko koncepcji systemu, ale i koordynacji bieżących działań. Zbudowane systemy branżowe i regionalne wymagają integracji. Punktem krytycznym jest ustalenie źródłowego opisu geometrycznego obiektów topograficznych oraz ich obligatoryjnej listy. Ale istniejące opóźnienie w stosunku do wielu krajów może okazać się atutem. Te kraje, które wystartowały przed laty, dzisiaj poważnie modernizują systemy albo wręcz budują je od nowa, według innych zasad. Wynika to albo z konieczności rewizji modelu danych, albo ze zmiany narzędzia informatycznego – niestety „programy GIS” dyktują funkcjonalność rozwiązań, a rośnie ona wraz z postępem metodyczno-narzędziowo-sprzętowym. Należy mieć nadzieję, że potrzeby społeczeństwa informacyjnego staną się stymulatorem budowania w Polsce dobrze zorganizowanej infrastruktury geoinformacyjnej, a dotychczas popełnione błędy pomogą uniknąć kolejnych.

Bibliografia

- Bujakowski K., 2001, *Krajowy system informacji o terenie jako podstawa funkcjonowania krajowej infrastruktury informacji przestrzennej*, Materiały XI Konferencji PTIP – Systemy Informacji Przestrzennej, s. 11–19.
- Goodchild M. F., 1999, *Cartographic futures on a digital Earth*, Conference Proceedings 19 International Conference, ICA, Ottawa 1999, vol. 1, p. 5–13.
- Kropatsch W., Bischof H. (eds), 2000, *Digital image analysis: selected techniques and applications*, New York, Springer.
- Linsenbarth A., 2001, *Koncepcja Systemu Informacji Przestrzennej w Polsce*, Materiały XI Konferencji PTIP – Systemy Informacji Przestrzennej, s. 63–71.
- Linsenbarth A., 2003, *Europejska infrastruktura danych przestrzennych w świetle finalnej wersji programu INSPIRE*, Materiały XIII Konferencji PTIP: Geoinformacja w Polsce – Roczniki Geomatyki, t. 1, z. 1, s. 20–25.
- Orlińska J., Wasilewska Z., 2003, *System identyfikacji działek rolnych*, Materiały XVII Sesji Naukowo-Technicznej z cyklu „Aktualne zagadnienia w geodezji”, Nowy Sącz, s. 19–29.
- Pietras M., Graniczny M., 2001, *Kartografia geologiczna*, Materiały XI Konferencji PTIP – Systemy Informacji Przestrzennej, s. 44–52.
- Pyka K., 2003, *Rola kompresji obrazów w internetowych publikacjach kartograficznych*, Materiały XIII Konferencji PTIP: Geoinformacja w Polsce – Roczniki Geomatyki, t. 1, z. 1, s. 103–108.
- Siwek J., 2001, *Niektóre problemy kartografii środowiska przyrodniczego Polski*, Polski Przegląd Kartograficzny, t. 33, nr 2, s. 106–113.
- Sobczyński E., Sielecki J., 2000, *Współczesne mapy wojskowe Służby Topograficznej WP*, Materiały XXVII Ogólnopolskiej Konferencji Kartograficznej „Kartografia polska u progu XXI wieku”, Warszawa, 8–9 grudnia 2000, s. 33–56.
- Stankiewicz M., Głazewski A., 2000, *Współczesne mapy topograficzne w wersji cywilnej*, Materiały XXVII Ogólnopolskiej Konferencji Kartograficznej „Kartografia polska u progu XXI wieku”, Warszawa, 8–9 grudnia 2000, s. 7–32.
- Szeliga K., 1999, *Układy odniesień przestrzennych w aspekcie tworzenia i funkcjonowania SIP w Polsce*, Prace Instytutu Geodezji i Kartografii, t. XLVI, s. 33–56.
- Wu J., Amaratunga K., Lui T., 2000, *Design of an online GIS viewer by wavelet technology*, Proceedings of the 8th International Conference on Computing in Civil and Building Engineering, Stanford, CA.
- Wysocka E., 1999, *Krajowe infrastruktury danych przestrzennych a system informacji przestrzennej w Polsce*, IX Konferencja Naukowo-Techniczna „Systemy Informacji Przestrzennej”, Warszawa, s. 43–47.

Summary

The paper includes an evaluation of the past and present activities of Polish public administration in the scope of accumulation, storing and accessing of spatial-related data. The Polish cartographic output is well developed. It was discussed if the traditional cartographic property is an advantage or a disadvantage for creation of spatial data infrastructure in Poland.

For few years the Land Information System is defined on Polish national law. But the LIS data has been prepared only for municipalities. There is a question about the general GIS basemap for whole country. In the author opinion finding a solution for this question is a major role for national and regional GIS creation. In Poland has been collected many national but separate GIS-related projects since early 1990s. Then the list of the most interest projects was given. Unfortunately each of this national and regional projects uses another coordination system and basemap which was elaborated under another cartographic principles.

Then the activities in GIS of the Malopolska Region GIS was presented. The Region developed a fairly comprehensive regional database for some spatial data infrastructure „fundamental” data topics. Some of this information is public accessible by through an internet map server that is provided through the Malopolska Gateway website. Present internet users expect that

online interactive GIS will search data with query and provide high quality maps. In the future the region is going to add additional geospatial information and data query and analysis services through to the Gateway.

The State Office of Geodesy and Cartography has been initiated a preparing of Topographic Database for few years. This project efforts is focused on the development of highly accurate basemaps based primarily on the cartographic tradition, rather than the business requirements of the community of potential users. Such elements as buildings and man-made structures are entered into the database as vector planimetric features. Capturing this level of information can be time consuming and expensive. In the author opinion the Topographic Database should be elaborated stepwise but each level of information should be collected parallel for whole country. For the first step elaboration of level line transportation and administration boundary are suggested. As source data for transportation line the orthophotomaps should be chosen. Use of digital orthophotography as a visual basemap can suffice for many purposes, some natural and manmade features are good recognizable on this map.

The conclusion of this paper deals, i.e., with the need of coordinated decision-making, and avoid effort duplication and redundant investment in spatial database development.

KRONIKA PRAC KOMISJI

W okresie od 1 października 2004 do 30 czerwca 2005 r. odbyły się następujące posiedzenia naukowe Komisji:

- 13 października 2004 r.** z referatem dr. Leszka Kolondry (Uniwersytet Śląski, Wydział Nauk o Ziemi, Katedra Geomorfologii, Zakład Teledetekcji Środowiska) pt. „Fotogrametria – wiarygodne źródło danych w badaniach glaciologicznych Spitsbergenu”;
- 17 listopada 2004 r.** z referatem prof. dr. hab. inż. Zbigniewa Kasiny (Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Geologii, Geofizyki i Ochrony Środowiska, Zakład Geofizyki) pt. „Wybrane aspekty wykorzystania sieci neuronowych w przetwarzaniu danych sejsmicznych”;
- 15 grudnia 2004 r.** z referatem dr. inż. Zdzisława Kurczyńskiego (Politechnika Warszawska, Wydział Geodezji, Instytut Fotogrametrii i Kartografii, Zakład Fotogrametrii) pt. „Stan obecny i trendy rozwoju obrazowania satelitarnego na tle potrzeb”. Posiedzenie organizowane wspólnie przez Komisję Geoinformatyki PAU oraz Wydział Geodezji Górniczej i Inżynierii Środowiska AGH w Krakowie;
- 12 stycznia 2005 r.** z referatem dr. inż. Zdzisława Kurczyńskiego (Politechnika Warszawska, Wydział Geodezji, Instytut Fotogrametrii i Kartografii, Zakład Fotogrametrii) pt. „Interferometria Radarowa – InSar”. Posiedzenie organizowane wspólnie przez Komisję Geoinformatyki PAU oraz Wydział Geologii, Geofizyki i Ochrony Środowiska AGH w Krakowie;

- 9 lutego 2005 r.** z referatem prof. dr. hab. inż. Bogdana Neya (członek rzeczywisty PAN, przewodniczący VII Wydziału PAN) pt. „Geoinformacja – problematyka badawcza, programy międzynarodowe, pożytki”;
- 9 marca 2005 r.** z referatem dr. inż. Tomasza Danka (Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Geologii, Geofizyki i Ochrony Środowiska, Zakład Informatyki w Naukach o Ziemi) pt. „Obliczenia równoległe i klastry PC w modelowaniu sejsmicznego pola falowego”;
- 13 kwietnia 2005 r.** z referatem prof. dr. hab. inż. Marka Niecia (Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Geologii, Geofizyki i Ochrony Środowiska, Katedra Geologii Kopalnianej) pt. „Wartość informacji geologicznej”;
- 11 maja 2005 r.** z referatem dr. hab. inż. Andrzeja Leśniaka, profesora AGH (Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Geologii, Geofizyki i Ochrony Środowiska, Zakład Informatyki w Naukach o Ziemi) pt. „Algorytmy genetyczne w rozwiązywaniu zagadnień odwrotnych w geofizyce”;
- 8 czerwca 2005 r.** z referatem dr. hab. inż. Włodzimierza Wójcika, profesora AGH (Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Geodezji Górniczej i Inżynierii Środowiska, Zakład Kształtowania i Ochrony Środowiska) i mgr inż. Joanny Dragosz (Invest-Eko Katowice) pt. „Model rzeki Raby z wykorzystaniem programu QUEL2E”.

W zeszycie nr 6 „Geoinformatica Polonica” (za rok 2004), o objętości 146 stron, zamieszczono 11 artykułów.

W części organizacyjnej kolejnych posiedzeń omawiano sprawy:

- prezentowania referatów na najbliższych posiedzeniach Komisji,
- przygotowywania publikacji w kolejnych rocznikach „Geoinformatica Polonica”,
- współudziału członków Komisji w organizacji konferencji powiązanych tematycznie z geoinformatyką,
- czynnego udziału członków Komisji w konferencjach geoinformatycznych,
- w omawianym okresie Komisja specjalną uwagę poświęcała postępowi w przygotowywaniu *Słownika geoinformatyki*. Pracami zespołu ds. słownika kieruje wiceprzewodniczący Komisji prof. Józef Jachimski.

Komisja Geoinformatyki liczy obecnie 40 członków. W obecnym składzie Komisji znajdują się przedstawiciele następujących dyscyplin:

- nauk informatycznych – 5 osób,
- geologii – 8 osób,
- geofizyki – 6 osób,
- geografii – 3 osoby,
- geodezji – 4 osoby,
- kartografii – 1 osoba,
- fotogrametrii i teledetekcji – 6 osób,
- nauk górniczych – 3 osoby,
- geomechaniki – 3 osoby,
- inżynierii środowiska – 1 osoba.

przewodniczący

Janusz KOTLARCZYK

sekretarz

Ryszard ŚLUSARCZYK

WSKAZÓWKI DLA AUTORÓW PRAC

Kompletny materiał przeznaczony do druku o objętości nie większej niż 2 arkusze powinien zawierać:

- tekst zasadniczy w języku polskim lub angielskim,
- tytuł w języku polskim i angielskim,
- tabele i rysunki z podpisami w języku polskim i angielskim,
- krótkie abstrakty (do 15 wierszy) i słowa kluczowe w języku polskim i angielskim,
- obszerniejsze streszczenie (do 45 wierszy) w języku alternatywnym (angielskim lub polskim) wobec tekstu zasadniczego.

Dyskietkę z wpisanym tekstem należy przekazać do Redakcji wraz z jednym kompletnym wydrukiem przygotowanej pracy na papierze formatu A4. Liczba wierszy i znaków w jednym wierszu jest dowolna. Należy tylko zachować jednowierszowe odstępy między poszczególnymi akapitami.

Tekst powinien być zapisany w formacie WORD FOR WINDOWS.

Na marginesie nadesłanego wydruku prosimy zaznaczyć miejsca wstawienia rysunków i tabel.

Tytuły i podtytuły należy oddzielić od tekstu światłem górnym i dolnym oraz określić stopień tytułu (I rzędu, II, III... Rozdział zasadniczy – I rz., podrozdział – II rz., tytuł podrzędny – III rz., itd.) na wydruku.

Tabele należy umieścić w osobnym pliku w formacie WORD lub EXCEL. Na wydruku każda tabela powinna być opisana nazwiskiem Autora i numerem tabeli.

Wszelkie symbole we wzorach i powołaniach na nie w tekście należy pisać pismem prostym. Ważne jest, by O (zero) wpisane było przez klawisz cyfrowy, w celu odróżnienia go od litery O (o).

Stosować jednostki miary zgodnie z obowiązującym układem SI.

Powołania w tekście na rysunki, tabele, wzory, rozdziały i podrozdziały – zgodnie z numeracją. W powołaniach na literaturę podajemy w nawiasie okrągłym nazwisko autora i rok wydania, np. (Rysiowa 1969) – jeden autor (Nowakowski, Kapinos 1992) – dwóch autorów, (Kluz i in. 1972) – więcej niż trzech autorów, a w przypadku prac zbiorowych – tytuł (początek tytułu) i rok wydania (Poradnik... 1971).

Rysunki (możliwe po uzgodnieniu kolorowe) powinny być dostarczone:

- na papierze lub kalce (z podanym nazwiskiem autora i numerem rysunku),
- na dyskiecie lub płycie CD-ROM w rozdzielczości: rys. czarno-białe 300 dpi (300 pikseli/cal), rys. kolorowe 600 dpi (600 pikseli/cal),
- w jednym z podanych niżej formatów:

- a) *.TIF – format zapisu mapy bitowej wykorzystywany przez większość programów obsługujących skanery,
- b) *.CGM – format zapisu grafiki wykorzystywany m.in. przez takie programy, jak: HARVARD PACKARD GRAPHICS, APPLAUSE,
- c) *.CDR z programu CorelDRAW.

Literatura wg układu alfabetycznego powinna być umieszczona na końcu pracy z oznaczeniem „BIBLIOGRAFIA”.

W trakcie wpisywania tekstu należy przestrzegać następujących zasad:

- nie kończyć poszczególnych wierszy klawiszem ENTER,
- nie stosować zacięć akapitowych za pomocą tabulatora czy spacji,
- poszczególne akapity rozdzielać, wstawiając jedną pustą linię,
- nie dzielić ręcznie wyrazów,
- nie justować poszczególnych linii akapitu za pomocą klawisza spacji,
- nie rozspacjowywać wyrazów (np. t y t u ł),
- nie podkreślać wyrazów, zdań (np. podkreślony).