

POLSKA AKADEMIA UMIEJĘTNOŚCI
PRACE KOMISJI GEOINFORMATYKI

GEOINFORMATICA POLONICA



8

KRAKÓW 2006

Komitet Redakcyjny

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

Redaktor Naczelny

Kazimierz TWARDOWSKI

Sekretarz

Andrzej KRAWCZYK
Krystian PYKA

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

Publikacja dofinansowana przez Stowarzyszenie Zbiorowego Zarządzania Prawami Autorskimi
Twórców Dzieł 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

8



KRAKÓW 2006

Redakcja tomu
Maria MICHAŁEWICZ

Skład, łamanie
Irena JORDAN

Copyright by Polska Akademia Umiejętności
Kraków 2007

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

ISSN: 1642 - 2511

Złożono do druku: listopad 2006
Druk ukończono: październik 2007

Druk i oprawa:
Oficyna Wydawniczo-Drukarska „Secesja”

Objętość: ark. wyd. 10,25, ark. druk. 11,5+wkl., nakład: 300 egz.

SPIS TREŚCI

Artykuły

Wojciech DRZEWIECKI	
<i>Zastosowanie GIS i danych teledetekcyjnych do oceny środowiskowych uwarunkowań sposobu użytkowania terenu</i>	<i>7</i>
Tomisław GOŁĘBIEWSKI	
<i>Numeryczne modelowanie pola georadarowego przy pomocy metody FDTD</i>	<i>23</i>
Zbigniew KASINA, Nasar EL ZAWAM	
<i>Recovering near surface velocity fields by means of turning ray tomography – model study.....</i>	<i>37</i>
<i>Odtwarzanie przypowierzchniowych rozkładów prędkości za pomocą tomografii fal refragowanych – studium modelowe</i>	
Andrzej LEŚNIAK, Grzegorz PSZCZOŁA	
<i>Algorytmy genetyczne w rozwiązywaniu zagadnień odwrotnych w geofizyce</i>	<i>45</i>
Marian NOGA	
<i>Pionier – Polski internet optyczny.....</i>	<i>53</i>
Tomasz PIROWSKI	
<i>Integracja danych teledetekcyjnych pochodzących z różnych sensorów – propozycja kompleksowej oceny scalonych obrazów</i>	<i>59</i>
Włodzimierz WÓJCIK	
<i>Model rzeki Raby z wykorzystaniem programu QUAL2E</i>	<i>77</i>

Kronika

<i>Kronika prac Komisji Geoinformatyki PAU</i>	
<i>(Janusz KOTLARCZYK, Ryszard ŚLUSARCZYK)</i>	<i>89</i>

CONTENTS

Papers

Wojciech DRZEWIECKI	
<i>GIS and remote sensing data application to the assessment of land-use conditions</i>	7
Tomisław GOŁĘBIEWSKI	
<i>Numerical modelling of gpr wave filed using FDTD method</i>	23
Zbigniew KASINA, Nasar EL ZAWAM	
<i>Recovering near surface velocity fields by means of turning ray tomography – model study</i>	37
Andrzej LEŚNIAK, Grzegorz PSZCZOŁA	
<i>Genetic algorithms for solving inverse problems in geophysics</i>	45
Marian NOGA	
<i>Polish optical internet pionier</i>	53
Tomasz PIROWSKI	
<i>The integration of remote sensing data acquired with various sensors – a proposal of merged image assessment</i>	59
Włodzimierz WÓJCIK	
<i>Model of the Raba River with the application of QUAL2E Program</i>	77

Chronicle

<i>Chronicle of the works of the Geoinformatics Commission PAU</i> (Janusz KOTLARCZYK, Ryszard ŚLUSARCZYK)	89
---	----

WOJCIECH DRZEWIECKI¹

ZASTOSOWANIE GIS I DANYCH TELEDETEKCYJNYCH DO OCENY ŚRODOWISKOWYCH UWARUNKOWAŃ SPOSOBU UŻYTKOWANIA TERENU²

Słowa kluczowe:

funkcje i potencjały krajobrazu, systemy informacji geograficznej, teledetekcja

Abstrakt

Artykuł przedstawia próbę zastosowania metody wykorzystującej koncepcję potencjałów częściowych krajobrazu do oceny środowiskowych uwarunkowań sposobu użytkowania terenu na posiadającym charakter wyżynny obszarze zlewni Prądnika i Dłubni. Zadanie zrealizowano w systemie GIS z wykorzystaniem przede wszystkim istniejących danych cyfrowych, uzupełnianych danymi teledetekcyjnymi i w razie konieczności danymi pozyskiwanymi na drodze cyfryzacji istniejących materiałów kartograficznych.

Na etapie wstępnego przetwarzania danych wykonano m.in. ortorektyfikację zobrazowań satelitarnych, aktualizację mapy pokrycia/użytkowania terenu oraz interpolację przestrzennego rozkładu opadów z danych punktowych. Zestaw oszacowanych funkcji i potencjałów krajobrazu dobierano tak, by znalazły się w nim zarówno funkcje regulacyjno-odpornościowe (funkcja odporności gleb na erozję wodną, funkcja gleby jako filtra i buforu, funkcja odtwarzania wód podziemnych, funkcja regulacji odpływu, funkcja ochrony wód podziemnych), jak i potencjały użytkowe (rekreacyjny, produktywności biotycznej, przydatności do zabudowy). W artykule przedstawione zostały szczegóły dotyczące sposobu oceny funkcji odporności gleb na erozję wodną oraz potencjału produktywności biotycznej. Pokazano również przykładowe możliwości wykorzystania oszacowanych funkcji i potencjałów krajobrazu do wspomagania decyzji o sposobie użytkowania terenu.

GIS AND REMOTE SENSING DATA APPLICATION TO THE ASSESSMENT OF LAND-USE CONDITIONS

Key words:

landscape functions and potentials, geographical information systems, remote sensing

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

²Praca wykonana w ramach badań statutowych AGH nr 11.11.150.459.

Abstract

An application of landscape functions and potentials methodology for the assessment of land-use conditions is presented for the area of Pradnik and Dłubnia rivers basins (upland region north of Krakow). The task was realised in GIS environment and based on existing digital data, satellite images as well as hydrogeological maps and meteorological data.

First of all initial data preprocessing was done, including satellite images orthorectification, land-use/land cover map updating and spatial interpolation of rainfall data. Then chosen landscape functions and potentials were evaluated: water erosion resistance function, groundwater recharge function, soil filter and buffering functions, runoff regulation function, groundwater protection function, recreational potential, biotic productivity potential, building localisation potential. Details of water erosion resistance function and biotic productivity potential assessments are presented in the paper. Possible ways of using the evaluated landscape functions and potentials in the land-use decision making process support are presented as well, including 1) simulations of landscape functions changes caused by different land-use scenarios and 2) land-use optimization (based on the decision tree).

Wprowadzenie

Problematyka środowiskowych uwarunkowań sposobu użytkowania terenu od wielu lat znajduje się w obszarze zainteresowań zarówno planistów przestrzennych, jak i przedstawicieli nauk przyrodniczych, zwłaszcza fizycznej geografii kompleksowej i ekologii krajobrazu. Jedną z interesujących metod oceny przyrodniczych uwarunkowań zagospodarowania przestrzeni jest metoda potencjałów częściowych krajobrazu, wywodząca się z powstałej we wschodniemieckiej szkole geografii kompleksowej koncepcji potencjału krajobrazu. Koncepcja ta zyskała sobie popularność przede wszystkim w państwach niemieckojęzycznych (dawne NRD, RFN, Austria) oraz Czechosłowacji. W Polsce stosowana była na terenach młodogłajalnych. (por. Kistowski 1995, Kistowski 1997, Ołdak 1997, Pietrzak 1998).

Artykuł przedstawia próbę zastosowania metody wykorzystującej koncepcję potencjałów częściowych krajobrazu na terenie wyżynnym – na obszarze zlewni Prądnika i Dłubni. Przyjęto założenie, iż ocena funkcji i potencjałów krajobrazu przeprowadzona zostanie w systemie GIS z wykorzystaniem przede wszystkim istniejących danych cyfrowych uzupełnianych danymi teledetekcyjnymi i w razie konieczności danymi pozyskiwanymi na drodze cyfryzacji istniejących materiałów kartograficznych.

Prezentowane badania przeprowadzone zostały w ramach przygotowywania rozprawy doktorskiej (Drzewiecki 2003). W ich ramach dokonano oszacowania wybranych funkcji i potencjałów krajobrazu w obszarze zlewni

Prądnika i Dłubni, za punkt wyjścia przyjmując opracowanie Marksa i in. (1989). Stanowi ono rodzaj instrukcji do szacowania wielkości funkcji i potencjałów krajobrazu na podstawie danych pozyskiwanych z opracowywanych w Niemczech map geoekologicznych i uznawane jest za najbardziej kompleksowe podejście do problemu określania potencjałów częściowych krajobrazu (por. Pietrzak 1998).

1. Koncepcja potencjałów częściowych krajobrazu

Na wstępie wyjaśnienia wymaga zastosowanie w prezentowanej pracy terminu „krajobraz”. Pojęcie to używane jest zarówno w ekologii krajobrazu, jak i fizycznej geografii kompleksowej. Krajobraz, definiowany jako (Przewoźniak 1987) „dowolnej wielkości system powiązanych funkcjonalnie komponentów abiotycznych i biotycznych oraz tworzonych przez nie realnie istniejących jednostek przestrzennych, również powiązanych funkcjonalnie, wraz z efektami wpływu na niego działalności człowieka”, stanowi przedmiot badań obydwu tych nauk.

Tak zdefiniowany „krajobraz” utożsamiany może być ze środowiskiem. Utożsamienie takie widoczne jest w pracach polskich autorów zajmujących się koncepcją potencjałów częściowych krajobrazu od strony aplikacyjnej – sformułowań „potencjał krajobrazu” i „potencjał środowiska” używają oni zamiennie (por. Kistowski 1995, Ołdak 1997). Kistowski (1995) zaznacza nawet, iż krajobraz (zdefiniowany tak, jak w przytoczonej powyżej definicji

Przewoźniaka) tożsamy jest ze środowiskiem przyrodniczym.

Termin „potencjał krajobrazu” pojawił się w niemieckiej literaturze geograficznej pod koniec lat 40. i używany był na określenie „przestrzennego uporządkowania stworzonych przez przyrodę możliwości rozwojowych społeczności ludzkich” (Pietrzak 1998). Koncepcja potencjału krajobrazu rozwinięta została jednak dopiero przez Neefa (1966) i Haasego (1978). Zdefiniowali oni potencjał krajobrazu jako uwarunkowaną właściwościami jego struktury i dynamiki zdolność do zaspokajania potrzeb społeczeństwa. W późniejszym okresie, wraz z rozwojem koncepcji, większą wagę zaczęto przypisywać odporności krajobrazu na efekty działalności człowieka, czego odzwierciedlenie znaleźć można np. w definicji zaproponowanej przez Kistowskiego (1997). Według niego potencjał krajobrazu stanowią „wszelkie zasoby i walory krajobrazu (jego cechy materialne i estetyczne), kreujące jego zdolność do zaspokajania potrzeb człowieka (fizycznych i psychicznych), aktualnie i w przyszłości oraz podtrzymujące te zdolności w wyniku działania w krajobrazie mechanizmów samoregulacyjnych i odpornościowych”.

Zastosowanie koncepcji potencjału krajobrazu w praktyce okazało się jednak skomplikowane. Rozwiązanie przyniosła koncepcja potencjałów częściowych krajobrazu. Haase (1978) zaproponował siedem takich potencjałów: produktywności biotycznej, wodny, samooczyszczania, regulacji biotycznej, surowcowy, zabudowy oraz rekreacyjny. Listę uzupełniono później o potencjał atmosferyczny (Richling 1992).

W literaturze niemieckiej od przełomu lat osiemdziesiątych i dziewięćdziesiątych zaznacza się tendencja do zastępowania terminu „potencjał” terminem „funkcja krajobrazu” lub stosowania obu terminów komplementarnie. W takim ujęciu funkcje krajobrazu mogą być traktowane jako odpowiedniki składowych potencjału samoregulacyjno-odpornościowego, potencjały zaś związane są z możliwością gospodarczego korzystania z krajobrazu (por. Pietrzak 1998).

Niezależnie od koncepcji rozwijanych w Niemczech powstała w Holandii bardzo do nich zbliżona koncepcja funkcji przyrody (ang. *functions of nature*). Jej twórca (de Groot 1992) zauważa, że jakość życia ludzkiego zależy bezpośrednio lub w sposób pośredni od dóbr i usług dostar-

czanych przez środowisko przyrodnicze. Funkcje przyrody definiowane są przez niego właśnie jako zdolność środowiska (jego komponentów i naturalnych procesów w nim zachodzących) do dostarczania dóbr i usług zaspokajających potrzeby ludzkie (bezpośrednio i/lub w sposób pośredni). Wyróżnia on cztery rodzaje funkcji przyrody (funkcji środowiska): regulacyjne (ang. *regulation functions*), przestrzeni życiowej (ang. *carrier functions*), produkcyjne (ang. *production functions*) oraz informacyjne (ang. *information functions*). Koncepcja funkcji przyrody, będąc niejako połączeniem oceny konserwatorskiej i oceny możliwości wykorzystania środowiska, stanowić ma narzędzie umożliwiające planistom i decydom wybór najlepszej metody wykorzystania terenu, włączając również możliwość podjęcia decyzji o objęciu go ochroną (por. de Groot 1992).

2. Obszar testowy

Obszar badań określono wstępnie jako zlewnie rzek Prądnik i Dłubnia. Zlewnie te obejmują tereny o charakterze wiejskim i podmiejskim, ale też silnie zurbanizowane tereny aglomeracji krakowskiej. Oszacowanie potencjałów częściowych krajobrazu na całości obszaru zlewni wymagałoby opracowania oddzielnych zasad postępowania (metod oceny) dla terenów zurbanizowanych i pozostałych. Postanowiono zatem ograniczyć badania jedynie do obszaru zlewni poza silnie zurbanizowanymi terenami miejskimi Krakowa.

Obszar testowy w części zachodniej stanowi, według podziału Polski na jednostki fizyczno-geograficzne, fragment Wyżyny Olkuskiej (zwanej także Krakowską) należącej do Wyżyny Krakowsko-Częstochowskiej (Kondracki, 1988). W części wschodniej, obszar ten jest fragmentem Wyżyny Miechowskiej, część południowo-wschodnia natomiast należy do Płaskowyżu Proszowickiego – obie te jednostki wchodzi w skład Wyżyny Małopolskiej. Na Wyżynie Olkuskiej przeważają gleby wytworzone z lessów. Są to głównie gleby pseudobielicowe i pseudoglejowe oraz brunatne wylugowane. Na obszarze tym występują również rędziny jurajskie i gleby piaszczyste. Na Wyżynie Miechowskiej występują wytworzone z lessów gleby brunatne, czarnoziemne oraz rędziny kredowe. Gleby te zaliczyć można do najżyźniejszych w Polsce. W dolinach rzecznych

obszaru badań występują mady, których skład zbliżony jest do lessu (Komornicki, 1980). Teren ten narażony jest na występowanie intensywnych procesów erozji wodnej (por. Starkel, 1991).

3. Metodyka badań

3.1. Wstępne przetwarzanie danych

Pierwszą czynnością, do jakiej przystąpiono w ramach opracowywanego zadania było przygotowanie bazy danych systemu GIS. Systemem informacji geograficznej wybranym do realizacji badań w ramach przygotowywanej rozprawy było oprogramowanie Idrisi32. Program ten operuje na rastrowej strukturze danych (choć w ograniczonym stopniu możliwe jest w nim również korzystanie z danych wektorowych) i poza procedurami typowymi dla systemów GIS zawiera również zestaw narzędzi przeznaczonych do pracy ze zobrazowaniami satelitarnymi.

Na potrzeby badań zgromadzono następujący zestaw danych:

Komputerowy Atlas Województwa Krakowskiego – zrealizowany w drugiej połowie lat 90. w Zakładzie Fotogrametrii i Informatyki Teledetekcyjnej AGH w ramach projektu celowego KBN, współfinansowanego przez Urząd Wojewódzki w Krakowie (por. Bujakowski i in. 1998); objął swoją problematyką zagadnienia przyrodnicze (geologia, hydrogeologia, hydrologia, geomorfologia, gleby, fitogeografia, pokrycie terenu, klimat) i społeczno-gospodarcze (m.in. zabudowa, elementy infrastruktury, komunikacja drogowa); opracowaniu podlegał obszar ówczesnego województwa miejskiego krakowskiego oraz przyległe fragmenty województw sąsiednich.

Mapa Sozologiczna Polski (dane cyfrowe; arkusze M-34-52-D, M-34-64-A, M-34-64-B, M-34-64-D, M-34-65-A i M-34-65-C),

Mapy topograficzne (1:50 000) w układzie współrzędnych 1942 (skalibrowane skany),

Obrazy satelitarne (Landsat 7 z dn. 5 lipca 2000, Landsat 5 z dn. 19 sierpnia 2000, ASTER z dn. 7 czerwca 2001 oraz 5 kwietnia 2002, IRS LISS

z 2 czerwca 2000 oraz IRS PAN z 28 maja i 30 sierpnia 2000)

Dane meteorologiczne – miesięczne sumy opadów pomierzonych w 53 stacjach pomiarowych IMGW w wieloleciu 1975-1995,

Przeładowa Mapa Hydrogeologiczna Polski (1:300 000) (red. Kolago 1961) – Arkusz Kraków, Przeładowa Mapa Geologiczno-Inżynierska Polski (1:300 000) (red. Watycha 1955) – Arkusz Kraków,

Mapa Hydrogeologiczna Polski (1:200 000) – Arkusze: Kraków i Tarnów.

3.1.1 Import danych KAWK

W celu zaimportowania danych KAWK do systemu Idrisi dokonano eksportu poszczególnych obiektów KAWK wraz z tabelami atrybutów z programu MGE do formatu MapInfo, a następnie przejścia na format ArcView Shape. Dane w tym formacie importowano do Idrisi i dokonywano ich rasteryzacji. W przypadku NMRT wygenerowano przy użyciu programu MGE Terrain Analyst model rastrowy o rozmiarze piksela 30 m, który zaimportowano do Idrisi poprzez format ASCII.

3.1.2 Import danych z map sozologicznych

W postaci cyfrowej Mapa Sozologiczna wykonywana jest w formacie MapInfo. Konwersji wybranych obiektów Mapy Sozologicznej do formatu Idrisi dokonano za pośrednictwem oprogramowania Geomatica firmy PCI Geomatics, czytającego i zapisującego pliki w obu tych formatach. Zaimportowane dane poddawano rasteryzacji.

3.1.3 Ortorektifikacja zobrazowań satelitarnych

Pierwszym etapem pracy ze zobrazowaniami satelitarnymi było dokonanie ich ortorektifikacji. Proces ten ma na celu usunięcie zniekształceń spowodowanych odchyleniem płaszczyzny satelity od pionu, ruchem Ziemi oraz różnicami wysokości powierzchni terenu. Efektem ortorektifikacji jest również wpasowanie obrazu satelitarnego w pożądaną z punktu widzenia użytkownika układ współrzędnych.

Narzędziem wykorzystanym w tym etapie było oprogramowanie PCI OrthoEngine Satellite Edition ver. 7.0. Umożliwia ono odczytanie różnorodnych formatów danych

satelitarnych wraz z danymi orbitalnymi, przeprowadzenie procesu ich rektyfikacji bądź ortorektyfikacji (w tym również m.in. pozyskanie punktów dostosowania z map) oraz mozaikowanie ortoobrazów. Korekcja zobrazowań może być wykonana, przy użyciu PCI OrthoEngine, jedną z trzech metod: metodą wielomianową, ilorazową metodą wielomianową oraz z zastosowaniem rozwiązania ścisłego (precyzyjnego).

Do korekcji wszystkich zobrazowań poza obrazami z sensora LISS użyto modeli ścisłych. W przypadku LISS nie zostały poprawnie odczytane przez program dane orbitalne (nie ustalono czy spowodowane to było uszkodzeniem danych, czy niepoprawnym działaniem programu), co spowodowało konieczność użycia ilorazowej metody wielomianowej.

Współrzędne terenowe punktów dostosowania pozyskiwano w programie OrthoEngine bezpośrednio z zeskanowanych i skalibrowanych map topograficznych w skali 1:50 000, a współrzędne wysokościowe z Numerycznego Modelu Rzeźby Terenu. Dokładność wpasowania określano na podstawie punktów kontrolnych nieuwzględnianych w procesie wyrównania. Współrzędne punktów kontrolnych pozyskiwano w ten sam sposób, co dla punktów dostosowania. Punkty dostosowania wybierano tak, by obejmowały one swoim zasięgiem obszar większy od obszaru opracowania. Punkty kontrolne lokowano wewnątrz obszaru opracowania. Do ortorektyfikacji wszystkich zobrazowań wykorzystano pochodzący z KAWK Numeryczny Model Rzeźby Terenu o rozmiarze piksela wynoszącym 30 metrów. Ze względu na przewidywane w dalszych etapach pracy wykorzystanie procedur automatycznej klasyfikacji zobrazowań w procesie rektyfikacji zastosowano, niezmieniający wartości jasności pikseli, resampling metodą najbliższego sąsiada.

3.1.4 Określenie granic obszaru badań

Do określenia obszaru zlewni Prądnika i Dłubni zastosowano dostępną w systemie IDRISI procedurę WATERSHED, opartą na zmodyfikowanym algorytmie autorstwa Jenson i Domingue (1998). Dane wejściowe dla procedury WATERSHED stanowią Numeryczny Model Rzeźby Terenu oraz (ewentualnie) rastrowa mapa obrazu sieci hydrologicznej zawierająca obiekty, których zlewnie mają zostać określone. W niniejszym przypadku określe-

nie granic zlewni nastąpiło wyłącznie na podstawie rzeźby terenu – bez wykorzystania obrazu sieci rzecznej. W takim przypadku konieczne jest określenie minimalnej powierzchni wyodrębnianej zlewni. Minimalny obszar zlewni wydzielanych w trakcie analizy określono wstępnie na 100 000 pikseli, czyli 90 km². Wynik działania procedury WATERSHED poddano reklasyfikacji, tak by wyodrębnić jedynie obszar zlewni Prądnika i Dłubni. Dla zapewnienia poprawnego funkcjonowania stosowanych w przewidywanych analizach procedur GIS, do tak określonego obszaru dodano bufor o szerokości 1,5 km. Obszar badań ograniczono od strony południowej, wyznaczając jego granicę na ortofotomapie satelitarnej, wzdłuż północnej granicy zwartej zabudowy aglomeracji krakowskiej (rys. 1).

3.1.5 Opracowanie danych meteorologicznych

Do szacowania nieznannej wartości opadu w dowolnym punkcie na podstawie znanych wartości zmierzonych w punktach znajdujących się w otoczeniu stosowano w hydrologii wiele metod, np. poligony Thiessena, metodę odwrotnych odległości czy metodę izohiet (Goovaerts 2000). W ostatnich latach coraz częściej stosowane są techniki oparte na wykorzystaniu funkcji sklepanych lub metod geostatystycznych. Techniki te osiągają najlepsze rezultaty w testach porównawczych różnych metod interpolacji danych opadowych (por. np. Goovaerts 2000, Pokojska 2001, Sboarina 2002). W prezentowanej pracy zdecydowano się dokonać wyboru metody interpolacji na podstawie porównania rezultatów uzyskiwanych przy użyciu metod interpolacji dostępnych w oprogramowaniu Idrisi32 – metody odwrotnych odległości oraz krigingu zwykłego.

Ze względu na niewielką ilość punktów pomiarowych, zrezygnowano z wydzielenia pomiarowych populacji punktów pomiarowych zbioru punktów kontrolnych. Zdecydowano się natomiast przeprowadzić porównanie z wykorzystaniem techniki *crossvalidation* (Goovaerts 2000). Polega ona na tymczasowym usuwaniu z próbki jednego punktu i wykonywaniu interpolacji w oparciu o wartości pomierzone w pozostałych punktach. Usunięty punkt traktowany jest jak punkt kontrolny – dokonuje się w tym punkcie porównania wartości wyinterpolowanej z wartością pomierzoną. Postępowanie powtarzane jest dla wszystkich punktów pomiarowych. Odchyłki uzyskane na punktach stanowią podstawę do porównania wiarygodności

metod interpolacji. Goovaerts (1999) jako kryterium porównania poszczególnych metod interpolacji proponuje stosować średni błąd bezwzględny (tj. średnią z wartości bezwzględnych odchyłek), natomiast Goovaerts (2000) – średni błąd kwadratowy.

Crossvalidation wykonano automatycznie w programie Gstat (Pebesma i Wesseling 1998). Jako wynik obliczeń otrzymano dla każdego punktu pomiarowego wartości opadu średniego w poszczególnych miesiącach wyinterpolowane na podstawie pozostałych punktów pomiarowych. Obszar badań stanowi jedynie stosunkowo niewielki fragment terenu objętego przez punkty pomiarowe, a ponadto znajduje się na jego obrzeżu. Z tego względu za podstawę porównania metod interpolacji przyjęto jedynie rezultaty *crossvalidation* otrzymane dla 15 punktów znajdujących się wewnątrz obszaru badawczego lub w jego bezpośredniej bliskości. W wyniku przeprowadzonego porównania jako technikę interpolacji wielkości sum opadów wybrano metodę krigingu przy zastosowaniu sferycznego modelu semiwariogramu.

3.1.6 Opracowanie mapy użytkowania terenu

W ramach przeprowadzonych badań opracowano nową mapę pokrycia/użytkowania terenu. Decyzja o opracowaniu tego rodzaju mapy podjęta została po porównaniu obrazów satelitarnych z mapą użytkowania KAWK oraz mapą użytkowania utworzoną z warstw tematycznych mapy sozologicznej. W jego wyniku stwierdzono liczne niezgodności dotyczące obszarów leśnych (zarówno brak na mapach lasów widocznych na obrazach satelitarnych, jak i istnienie na mapach lasów, które w rzeczywistości zostały wycięte) oraz polegające na pojawieniu się w miejsce gruntów ornych terenów użytków zielonych i odlogów.

Podjęte próby sporządzenia mapy użytkowania terenu wyłącznie w oparciu o dane satelitarne nie powiodły się. Zastosowano więc rozwiązanie hybrydowe polegające na integracji danych kartograficznych i aktualnych danych satelitarnych. Podobne podejście stosowali autorzy KAWK uważając je za optymalną metodę opracowywania map użytkowania w warunkach polskich (por. Jędrychowski i in. 1998). W rozwiązaniach szczegółowych metodyka zastosowana w niniejszej pracy różni się jednak od metodyki opracowanej dla celów KAWK.

Na tworzoną mapę użytkowania przeniesiono bez jakichkolwiek zmian drogi i koleje z KAWK oraz wody powierzchniowe i tereny zieleni urządzonej z map sozologicznych. Jako podstawę do określenia obszarów zalesionych wykorzystano mapę sozologiczną (aktualność określenia granic lasów wahała się dla tej mapy, w zależności od sekcji, pomiędzy rokiem 1997 a 2001). Kontury lasów nałożono na zortorektyfikowany obraz panchromatyczny z satelity IRS i zweryfikowano na drodze fotointerpretacji usuwając obiekty, dla których zmienił się rodzaj użytkowania, dodając nowe obiekty oraz modyfikując przebieg konturów w przypadku, gdy ich kształt odbiegał od obrazu lasu zarejestrowanego przez satelitę.

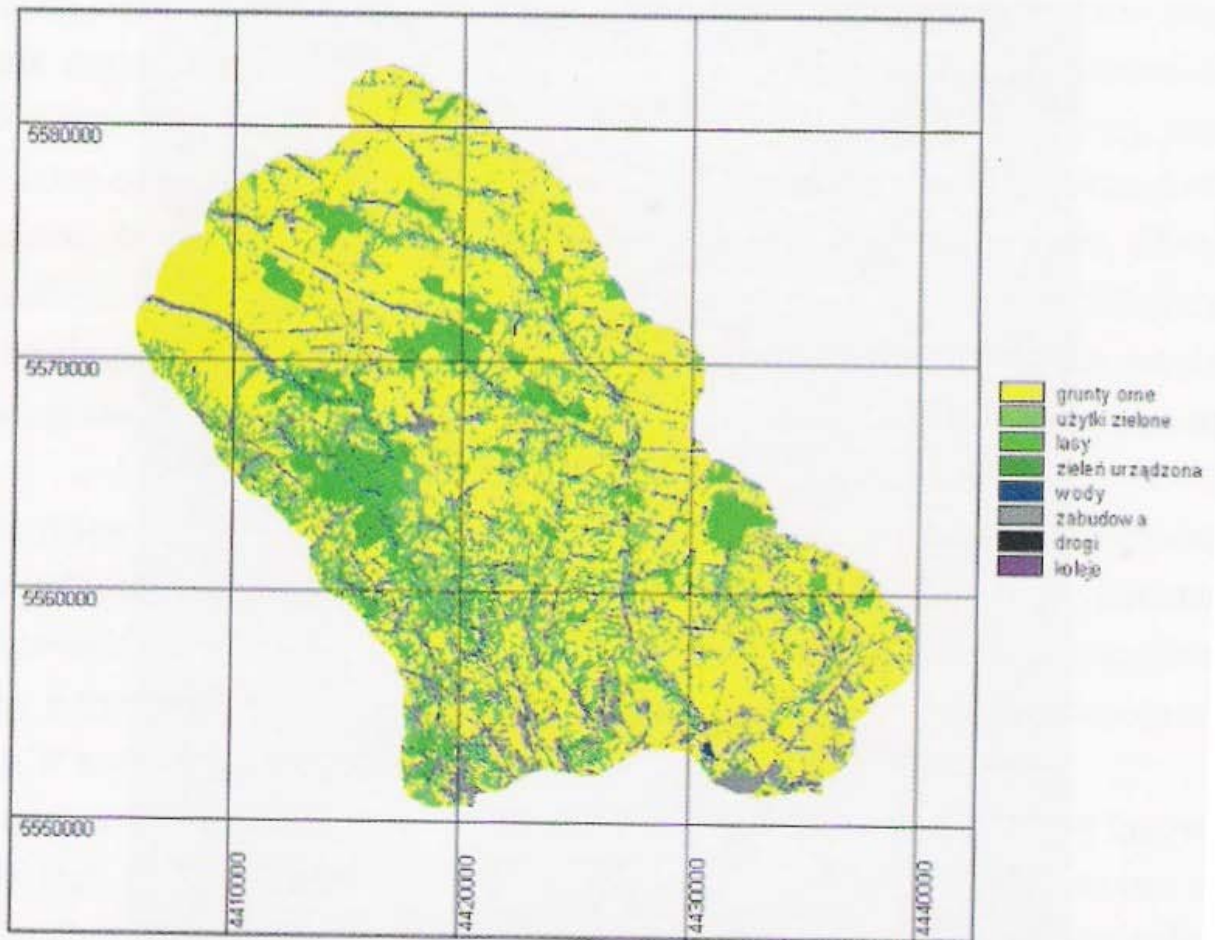
Kolejny krok stanowiło wykorzystanie obrazu pierwszej składowej głównej, uzyskanego w wyniku transformacji PCA wszystkich kanałów spektralnych dostępnych z obrazów satelitarnych. Obraz ten stanowił podstawę do wytypowania potencjalnych obszarów leśnych nieuwzględnionych na etapie fotointerpretacji – tereny pokryte lasami posiadały na nim wyraźnie ciemniejszy foton.

Określenie obszarów zabudowy dla potrzeb tworzonej mapy użytkowania wykonano scalając dane z map sozologicznych i KAWK i uzupełniając je o nowe obiekty na drodze fotointerpretacji z obrazu panchromatycznego z satelity IRS.

Obszary zabudowy, lasów, terenów zieleni urządzonej, dróg i kolei wykorzystano następnie jako maskę blokującą, dokonując rozróżnienia pozostałego obszaru na pola uprawne i użytki zielone (w klasie tej zawarto również łąki i sady) wyłącznie na podstawie zobrażeń satelitarnych. W tym celu przetestowano różne warianty klasyfikacji nadzorowanej i nienadzorowanej, jednak dokonanie rozdziału tych dwóch klas na drodze klasyfikacji zestawu kanałów pojedynczego zobrażenia okazało się niewykonalne. Najlepsze rezultaty osiągnięto stosując podejście polegające na przeprowadzeniu klasyfikacji nadzorowanej według algorytmu najmniejszej odległości z wykorzystaniem wszystkich kanałów spektralnych zobrażeń satelitów Landsat5, Landsat7 i ASTER (dwa terminy). Wyboru pól treningowych dokonano w oparciu o analizę zobrażeń i wizje terenowe. Wybrano dwa rodzaje pól treningowych (dwie podklasy) dla klasy pola uprawne (rzepak i pozostałe) oraz trzy dla klasy użytki zielone.



Rys. 1. Granice obszaru testowego (biały kontur) na tle ortofotomapy satelitarnej.
Fig. 1. Test area border (white line) with satellite orthophotomosaic in the background.



Rys. 2. Mapa użytkowania/pokrycia terenu.
 Fig. 2. Land use/land cover map.

Klasyfikację przeprowadzono w systemie Idrisi, przy użyciu modułu HYPERMIN. Moduł ten przypisuje piksel do klasy, której średnie odbicie spektralne jest najbliższe wartości piksela, przy czym odległość (w wielowymiarowej przestrzeni spektralnej) pomiędzy wartościami średnimi dla poszczególnych klas a analizowanymi pikselami poddawana jest normalizacji poprzez podzielenie przez wartość odchylenia standardowego dla danej klasy. Moduł HYPERMIN, zaprojektowany do klasyfikacji zobrazowań wielospektralnych, umożliwia klasyfikację z wykorzystaniem do 240 kanałów. Zdecydowano się wykorzystać ten moduł, pomimo iż w tym przypadku mamy do czynienia nie ze zobrazowaniem hiperspektralnym, a z kilkoma zobrazowaniami różniącymi się terminami rejestracji. Kanały spektralne, w jakich pozyskiwane były obrazy, częściowo się powtarzają. Jednak właśnie ze względu na odmienne terminy wykonania zobrazowań, a co za tym idzie różne fazy fenologiczne rozwoju roślin, te same kanały spektralne dostarczają odmiennej informacji – zarówno w przypadku zobrazowań z satelity ASTER, jak i w przypadku obrazów landsatowskich, przebieg krzywych spektralnych w tych samych kanałach jest odmienny.

Wyniki klasyfikacji zdecydowano się wzmocnić analizą indeksów wegetacji. Przyjęto założenie, iż analiza indeksów wegetacji dla poszczególnych zobrazowań pozwoli wychwycić obszary o niskich wartościach indeksu odpowiadających odkrytej glebie. Nawet jednorazowe zaistnienie tego rodzaju sytuacji w którymkolwiek z terminów (czyli dla dowolnego zobrazowania) upoważnia do stwierdzenia, iż nie mamy do czynienia z trwałym użytkiem zielonym.

Do analizy zastosowano indeks wegetacji SAVI (Soil Adjusted Vegetation Index) (Huete 1988):

$$\text{SAVI} = (1+L)(\text{NIR}-\text{RED})/(\text{NIR}+\text{RED}+L),$$

gdzie:

- NIR – wartość odpowiedzi spektralnej w zakresie bliskiej podczerwieni,
- RED – wartość odpowiedzi spektralnej w zakresie promieniowania czerwonego,
- L – współczynnik kalibracji.

Według Huete i Liu (1994) stosowanie współczynnika L wynoszącego 0,5 pozwala na wykorzystywanie indeksu dla różnych rodzajów utworów glebowych bez konieczności dokonywania kalibracji (por. Jensen 2000).

Dla poszczególnych obrazów SAVI określono progowe wartości indeksu na podstawie wartości na obszarach łąk ze znaczną ilością suchych pozostałości. Przyjęto założenie, iż jest to każdorazowo najniższa z wartości jakie mogą występować na obszarach użytków zielonych. Zerojedynkowe obrazy otrzymane w wyniku progowania obrazów SAVI pomnożono przez siebie uzyskując w efekcie obraz terenów, na których wartości indeksu przewyższały zawsze wartość progową. Do klasy użytków zielonych zaliczone zostały jedynie obszary określone jako użytki zielone na drodze klasyfikacji oraz spełniające kryterium indeksów wegetacji. W celu wyeliminowania powstałych po klasyfikacji obiektów o rozmiarze pojedynczych pikseli, mapę poddano dwukrotnej filtracji filtrami modalnymi – najpierw o rozmiarze 3x3, a następnie 5x5 pikseli. Na tak uzyskaną mapę nałożono pozostałe kategorie użytkowania. Obszarom niezaklasyfikowanym do żadnej z kategorii przypisano jedną z kategorii użytkowania na drodze automatycznej, poprzez kilkakrotne stosowanie kombinacji procedur filtracji modalnej i nakładania. Uzyskaną mapę użytkowania przedstawia rys. 2.

3.1.7 Konwersja map tradycyjnych na postać cyfrową

Mapy papierowe zeskanowano na skanerze wielkoformatowym, a następnie przy użyciu programu Geomatica dokonano ich wpasowania na punkty kontrolne w układ współrzędnych 1942. Skalibrowane mapy w formacie GeoTiff zaimportowano do programu ImageAnalyst i zwektoryzowano przy użyciu MicroStation. Pliki wektorowe zaimportowano do Idrisi i poddano rasteryzacji.

3.2. Oszacowanie funkcji i potencjałów krajobrazu

Zestaw oszacowanych funkcji i potencjałów krajobrazu dobierano tak, by znalazły się w nim zarówno funkcje regulacyjno-odpornościowe (funkcja odporności gleb na erozję wodną, funkcja gleby jako filtra i buforu, funkcja odtwarzania wód podziemnych, funkcja regulacji odpływu, funkcja ochrony wód podziemnych) jak i potencjały użytkowe (rekreacyjny, produktywności biotycznej, przydatności do zabudowy). Dla szacowanych funkcji i potencjałów zaproponowano metody oceny będące modyfikacjami metod Marksa i in. (1989) lub innych autorów (por.

Drzewiecki 2003). Poniżej przedstawione zostaną dla przykładu szczegóły dotyczące sposobu oceny funkcji odporności gleb na erozję wodną oraz potencjału produktywności biotycznej.

3.2.1. Funkcja odporności na erozję wodną gleb

Do określenia funkcji odporności na erozję wodną posłużono się modelem RUSLE (Revised Universal Soil Loss Equation) (Renard i in. 1991), w którym średni roczny ubytek gleby szacowany jest na podstawie równania:

$$A = R K L S C P,$$

gdzie:

A – masa wyerodowanej gleby z jednostki powierzchni w ciągu roku [Mg/ha];

R – wskaźnik erozyjności deszczu i spływu dla danej lokalizacji [(MJ/ha)(cm/h)];

K – wskaźnik podatności gleby na erozję wodną [(Mg/ha)(MJ/ha)(cm/h)];

L – wskaźnik długości stoku (bezwymiarowy);

S – wskaźnik nachylenia stoku (bezwymiarowy);

C – wskaźnik pokrywy roślinnej (bezwymiarowy);

P – wskaźnik zabiegów przeciwoerozyjnych (bezwymiarowy).

Wartość wskaźnika R obliczono na podstawie wyinterpolowanych dla obszaru badań rozkładów średniomiesięcznych sum opadów według wzoru Arnoldusa (1977):

$$R = \frac{\sum_{i=1}^{12} p_i^2}{P}$$

gdzie: p_i – suma opadów w i -tym miesiącu,

P – roczna suma opadów.

Wskaźnik podatności gleby na erozję wodną K określono na podstawie równania Renarda i in. (1997):

$$K = 0,0034 + 0,0405 \cdot \exp \left[-0,5 \left(\frac{\log D_g + 1,659}{0,7101} \right)^2 \right]$$

przy czym

$$D_g = \exp(0,01 \cdot \sum f_i \cdot \ln \frac{d_i + d_{i-1}}{2}),$$

gdzie dla każdej frakcji granulometrycznej cząstek glebowych:

d_i – maksymalna średnica cząstek,

d_{i-1} – minimalna średnica cząstek,

f – udział masowy.

Wartości wskaźnika topograficznego LS (połączonego wskaźnika długości stoku i nachylenia) obliczono przy użyciu oprogramowania USLE2D (Desmet i Govers 1996b). Wskaźnik LS obliczany jest w programie USLE2D z wykorzystaniem wielkości jednostkowej powierzchni spływu, według metody Desmeta i Goversa (1996a). Po przeprowadzeniu porównania (Drzewiecki i Mularz 2001) dostępnych w programie algorytmów generowania na podstawie Numerycznego Modelu Rzeźby Terenu obrazu sieci erozyjno-drenażowej, koniecznego dla obliczenia wielkości jednostkowej powierzchni spływu, wybrano algorytm Desmeta i Goversa (*flux decomposition algorithm*). W przeprowadzonych obliczeniach obszar modelowania spływu powierzchniowego ograniczono do powierzchni użytkowanych rolniczo (pól uprawnych, użytków zielonych) oraz lasów, pozostałe obszary (tereny zabudowane, drogi, koleje, wody, tereny zieleni urządzonej) traktując jako bariery. Przyjęto założenie, iż spływająca po powierzchni terenu woda w obszarach tych odprowadzana jest w sposób zorganizowany.

Wartość wskaźnika C określono na podstawie literatury (m.in. Koreleski 1992a, Molnár i Julien 1998, Pistocchi i in. 2002).

Wartość wskaźnika zabiegów przeciwoerozyjnych P określono w oparciu o ortofotomapę satelitarną, uzyskaną z panchromatycznego zobrazowania satelity IRS, oraz Numeryczny Model Rzeźby Terenu. Jedynym zabiegiem przeciwoerozyjnym, którego istnienie mogło zostać stwierdzone na podstawie posiadanych danych, było stosowanie uprawy poprzecznostokowej. Określenia sposobu uprawy dokonano na drodze fointerpretacji obrazu ortofotomapy. Ortofotomapa uzyskana z panchromatycznego zobrazowania satelity IRS posiadała rozdzielczość przestrzenną (terenowy rozmiar piksela) wynoszącą 5 metrów. Produkt ten pozwala na identyfikację granic poszczególnych pól uprawnych. Ocenie podlegał kierunek uprawy (kierunek rozłogowania) w stosunku do rysunku warstwicowego uzyskanego z Numerycznego Modelu Rzeźby Terenu.

Uwzględniając podnoszone w literaturze zastrzeżenia wobec modelu RUSLE (por. np. Mitsova i in. 1996, Mitsova i in. 1998) skorygowano uzyskane wyniki, uwzględniając obszary depozycji prognozowane przez model USPED (Unit Stream-Power Erosion/Deposition)

(Mitasova i in. 1998; 1999). Obszarom tym przypisano brak zagrożenia erozyjnego.

Model USPED zrealizowano przystosowując do wykonania w programie Idrisi32 algorytm zaproponowane przez Mitasovą i in. (1999) dla programów ArcView i Grass. W modelu tym miarą erozji i depozycji jest dywergencja strumienia osadu

$$D = \text{div} (T \cdot s) = d(T^* \cos \alpha) / dx + d(T^* \sin \alpha) / dy,$$

gdzie:

$T = A^m (\sin \beta)^n$ – zdolność transportowania osadu;

A – jednostkowa powierzchnia zasilania [m^2/m],

β – nachylenie w stopniach

s – wektor jednostkowy w kierunku spływu;

α [°] – ekspozycja powierzchni terenu.

W obliczeniach wykorzystano obliczoną wcześniej przy użyciu programu USLE2D wielkość powierzchni zasilania. Wartości wykładników potęgowych w modelu USPED ($m=1,4$ oraz $n=1,2$) przyjęto przyjmując założenie, iż modelowanie prowadzone jest dla warunków średnich w długim okresie czasu (por. Mitasova i in. 2003).

Na podstawie uzyskanych w wyniku modelowania prognozowanych strat gleby, określono wartość funkcji przeciwdziałania erozji wodnej gleb, stosując progi zaproponowane przez Marksa i in. (1989) (tab. 1).

Funkcja odporności na erozję określona w przedstawionym powyżej sposób wykazuje znaczne zróżnicowanie przestrzenne (rys. 3). W klasie zagrożenia wysokiego i bardzo wysokiego znalazło się 25,7% analizowanej powierzchni. Brak zagrożenia erozyjnego prognozowany jest na 36,3% analizowanej powierzchni. Pomimo, iż wyniki wskazują, że w analizowanym obszarze przeważają obsza-

ry o niewielkim zagrożeniu ze strony erozji aktualnej, niepokoić może fakt, iż w najwyższych klasach zagrożenia znajduje się ponad jedna trzecia powierzchni użytkowanej obecnie jako grunty orne.

3.2.2 Potencjał produktywności biotycznej

Potencjał produktywności biotycznej definiowany jest jako zdolność krajobrazu do produkowania biomasy i regenerowania warunków służących powtarzalności tego procesu (Przewoźniak 1991). Oszacowania potencjału produktywności biotycznej dokonano jedynie dla obszaru użytkowanego rolniczo (grunty orne i użytki zielone). Ocena przeprowadzono w oparciu o wskaźnik glebowo-klimatyczny zaproponowany przez Koreleskiego (1992b):

$$PWgk = \sqrt{g \cdot k},$$

gdzie:

g – punktacja klas glebowych,

k – punktacja agroklimatu.

Oba elementy oceniane są w skali stupunktowej. Zastosowanie wartości średniej geometrycznej powoduje, że ostateczny wynik w większym stopniu uzależniony jest od niższej z wartości, co dostosowuje proces oceny do wymagań prawa minimum (por. Koreleski 1988). Jednocześnie podstawę oceny stanowią cechy środowiska o niskim stopniu wzajemnej korelacji.

Ponieważ zgromadzone dane nie zawierały mapy klas bonitacyjnych gleb w przeprowadzonej ocenie punktację klas zastąpiono punktacją kompleksów przydatności rolniczej gleb (Witek i Górski 1977). Bonitację agroklimatu wiąże Koreleski z długością okresu wegetacyjnego. Dla określenia długości okresu wegetacyjnego dla dowolnego fragmentu terenu proponuje stosowanie wzorów Hessa

Tabela 1. Kryteria klasyfikacji zagrożenia erozyjnego (Marks i in. 1989).

Table 1. Soil erosion resistance classes.

Klasa	Prognozowane straty gleby [t/(ha*rok)]	Zagrożenie erozyjne	Wartość funkcji przeciwdziałania erozji
I	< 1	brak	bardzo wysoka
II	1 - 5	bardzo małe	wysoka
III	5 - 10	małe	średnia
IV	10 - 15	średnie	umiarkowana
V	15 - 30	wysokie	niska
VI	> 30	bardzo wysokie	bardzo niska

(1969) – liniowych zależności pomiędzy długością okresu wegetacyjnego (okresu ze średnią dobową temperaturą powyżej 5°C), a temperaturą średnioroczną w obszarze określanym jako „podregion miasta Krakowa”, obejmującym najbliższe okolice Krakowa, w tym również obszar zlewni Prądnika i Dłubni. Hess (1969) przedstawia również równania pozwalające na obliczenie w tym obszarze średniej rocznej temperatury powietrza w zależności od wysokości nad poziom morza.

Wykorzystanie wzorów Hessa wymaga dokonania rozróżnienia wypukłych i wklęsłych form terenowych oraz stoków o ekspozycji północnej i południowej. Ponieważ Hess podaje osobne wzory dla stoków, do form wklęsłych zaliczono jedynie dna dolin, do wypukłych natomiast – spłaszczenia wierzchowinowe. Dla stoków o ekspozycji wschodniej i zachodniej średnią roczną temperaturę powietrza określono jako wartość pośrednią pomiędzy wartościami dla ekspozycji północnej i południowej (por. Koreleski 1992b).

Dane zgromadzone na potrzeby niniejszego opracowania zawierały mapę geomorfologiczną z Komputerowego Atlasu Województwa Krakowskiego. Mapa ta przedstawia główne elementy rzeźby, jednak jak wykazuje bliższa analiza jej legendy wyróżniono na niej jedynie formy o charakterze form wklęsłych. W tej sytuacji zdecydowano się na wyróżnienie wypukłych form terenowych w oparciu o Numeryczny Model Rzeźby Terenu z wykorzystaniem techniki GIS.

Analizę wklęsłości i wypukłości terenu przeprowadzono według algorytmu zaproponowanego przez Blaszczyńskiego (1997), przy użyciu własnego programu napisanego w języku GOAL – skrypcyjnym języku programu MGE Grid Analyst firmy Intergraph. Metoda zaproponowana przez Blaszczyńskiego polega na obliczeniu w kwadratowym oknie o dowolnych rozmiarach różnicy wysokości pomiędzy pikselem centralnym i każdym z pozostałych pikseli okna, a następnie podzieleniu uzyskanej wartości przez odległość pomiędzy pikselami. Wyniki dla poszczególnych pikseli w oknie są sumowane i uśredniane, a otrzymany rezultat przypisywany komórce centralnej. Wartość dodatnia oznacza, że otoczenie komórki ma kształt wypukły, ujemna – wklęsły. Zero pojawia się w przypadku terenu płaskiego lub gdy wypukłości i wklęsłości znoszą się wzajemnie (jak w przypadku siodła).

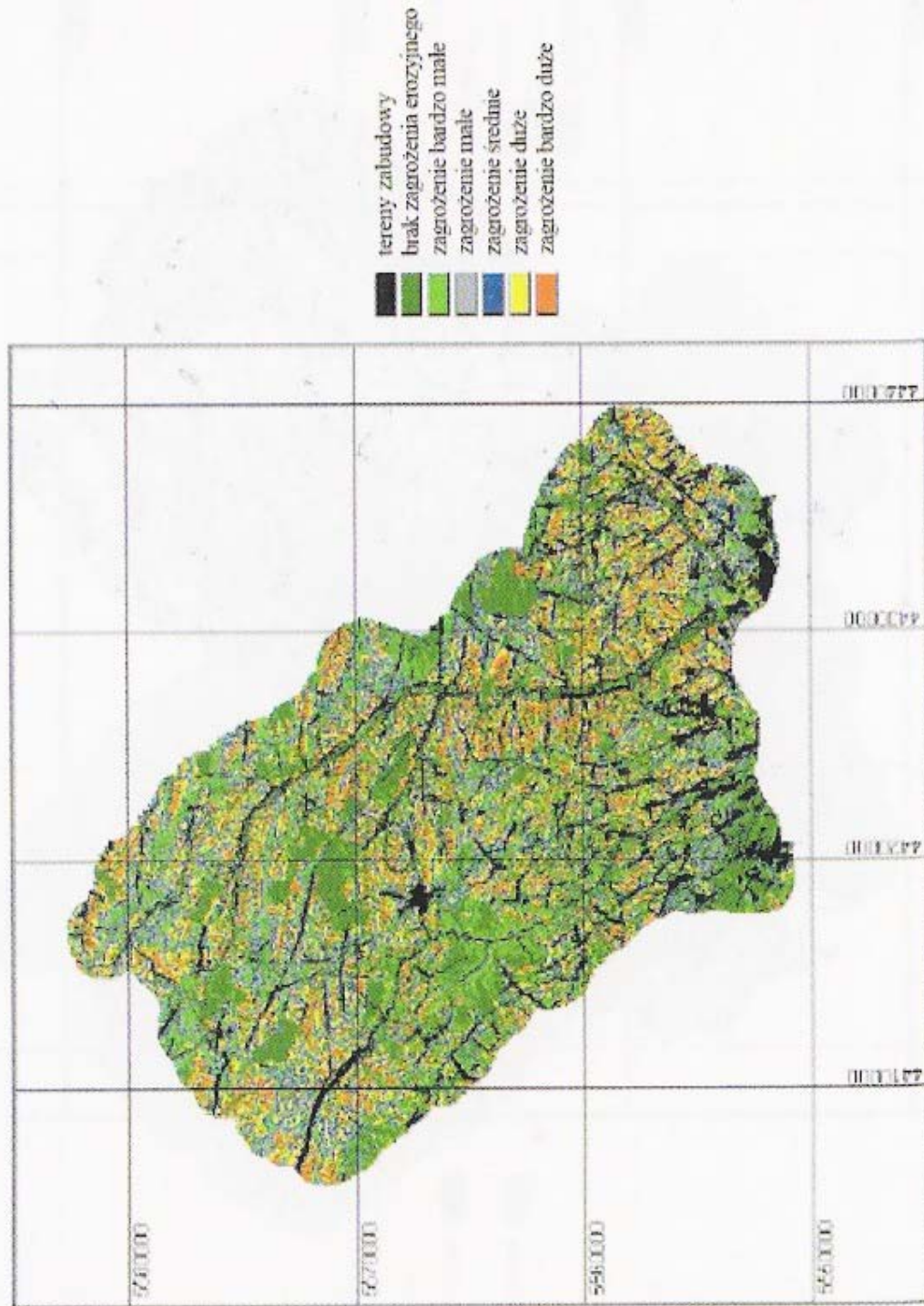
Wyniki uzyskane przy zastosowaniu algorytmu Blaszczyńskiego różnią się w zależności od zastosowanego rozmiaru okna. W przypadku prowadzenia analiz w małych oknach wynik przedstawiał będzie wypukłości i wklęsłości o charakterze lokalnym. W przypadku bardzo dużych rozmiarów okna uzyskamy natomiast obraz form terenu o charakterze regionalnym. Rozmiar okna dostosowany powinien być zatem do wielkości form terenowych, które chcemy analizować.

Numeryczny Model Rzeźby Terenu obszaru testowego poddano analizie przy użyciu algorytmu Blaszczyńskiego wykorzystując okna o rozmiarach 3x3, 5x5, 7x7, 9x9, 21x21, 41x41 oraz 81x81 pikseli. Do dalszych analiz wykorzystano obraz uzyskany z wykorzystaniem okna 21x21 pikseli – w tym przypadku wydzielone formy wklęsłe wykazywały największą zgodność z wydzieleniami KAWK. Ostateczny obraz form wypukłych uzyskano kwalifikując do nich te spośród terenów wydzielonych wstępnie, które nie leżały w obrębie form wklęsłych wydzielonych na mapie geomorfologicznej KAWK i posiadały nachylenie nieprzekraczające 5 stopni. Ostateczny obraz uzyskanych form wklęsłych i wypukłych przedstawia rys. 4.

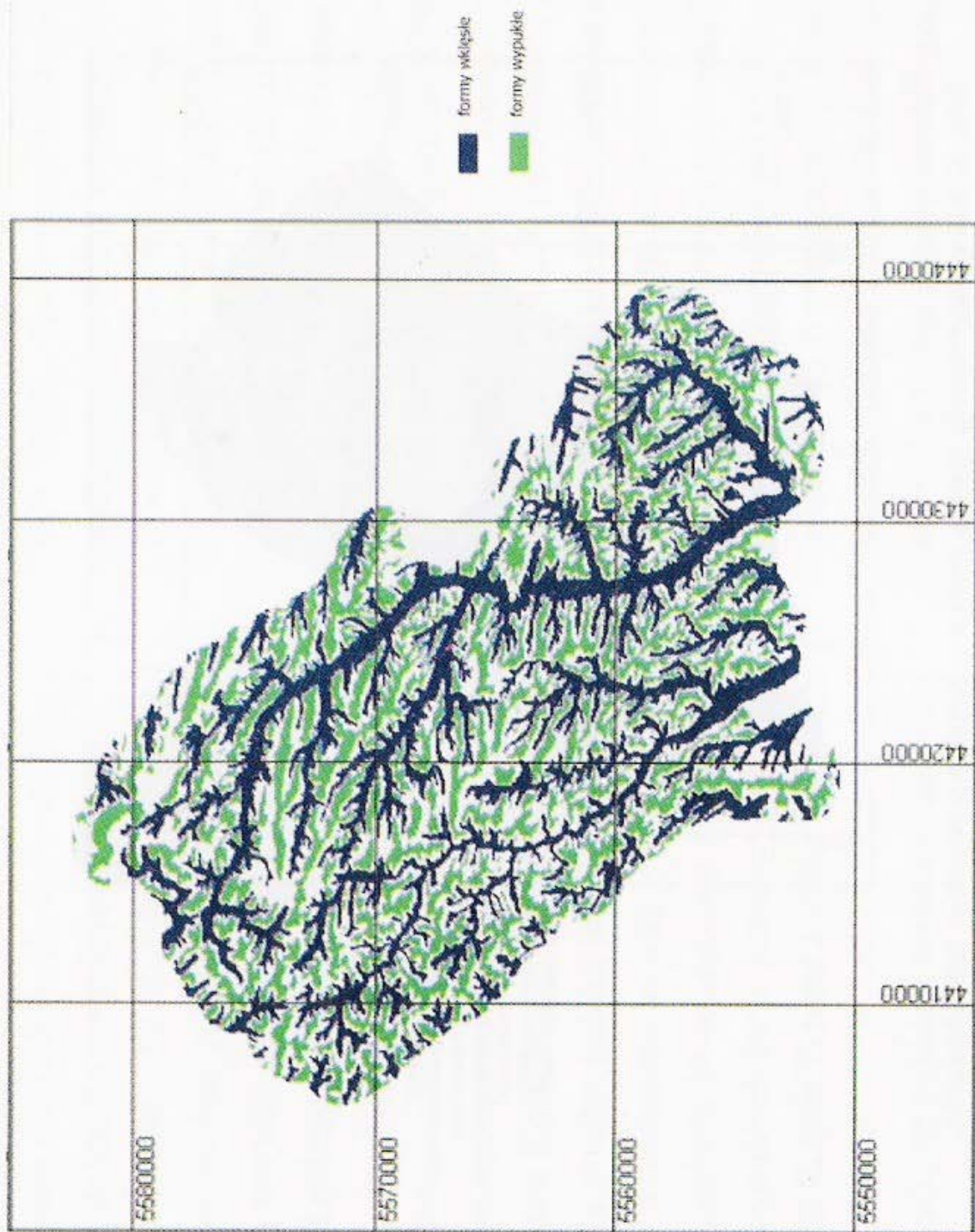
Tereny niezaliczone do form wklęsłych i wypukłych zakwalifikowano na podstawie mapy ekspozycji do stoków północnych (ekspozycja pomiędzy NW i NE), południowych (ekspozycja pomiędzy SE i SW) oraz pozostałych. Otrzymana mapa form terenowych oraz Numeryczny Model Rzeźby Terenu stanowiły dane wejściowe do określenia wartości temperatury średniorocznej i długości okresu wegetacji.

Koreleski nie podaje sposobu podziału waloryzowanego terenu na klasy potencjalnej produktywności biotycznej na podstawie opracowanego przez siebie wskaźnika. Dokonuje jednak na podstawie danych z lat 1983-1987 (Koreleski 1992b) próby określenia wielkości globalnej produkcji roślinnej i plonów zbóż w odniesieniu do wartości wskaźnika. Na podstawie tej analizy i przy uwzględnieniu wielkości średniej globalnej produkcji roślinnej oraz średniego plonu zbóż w tym okresie, dokonano waloryzacji potencjału produktywności biotycznej obszaru testowego w podziale na 5 klas (rys. 5).

Pod względem potencjału produktywności biotycznej analizowany obszar został oceniony bardzo wysoko. Do klasy potencjału wysokiego i bardzo wysokiego zali-

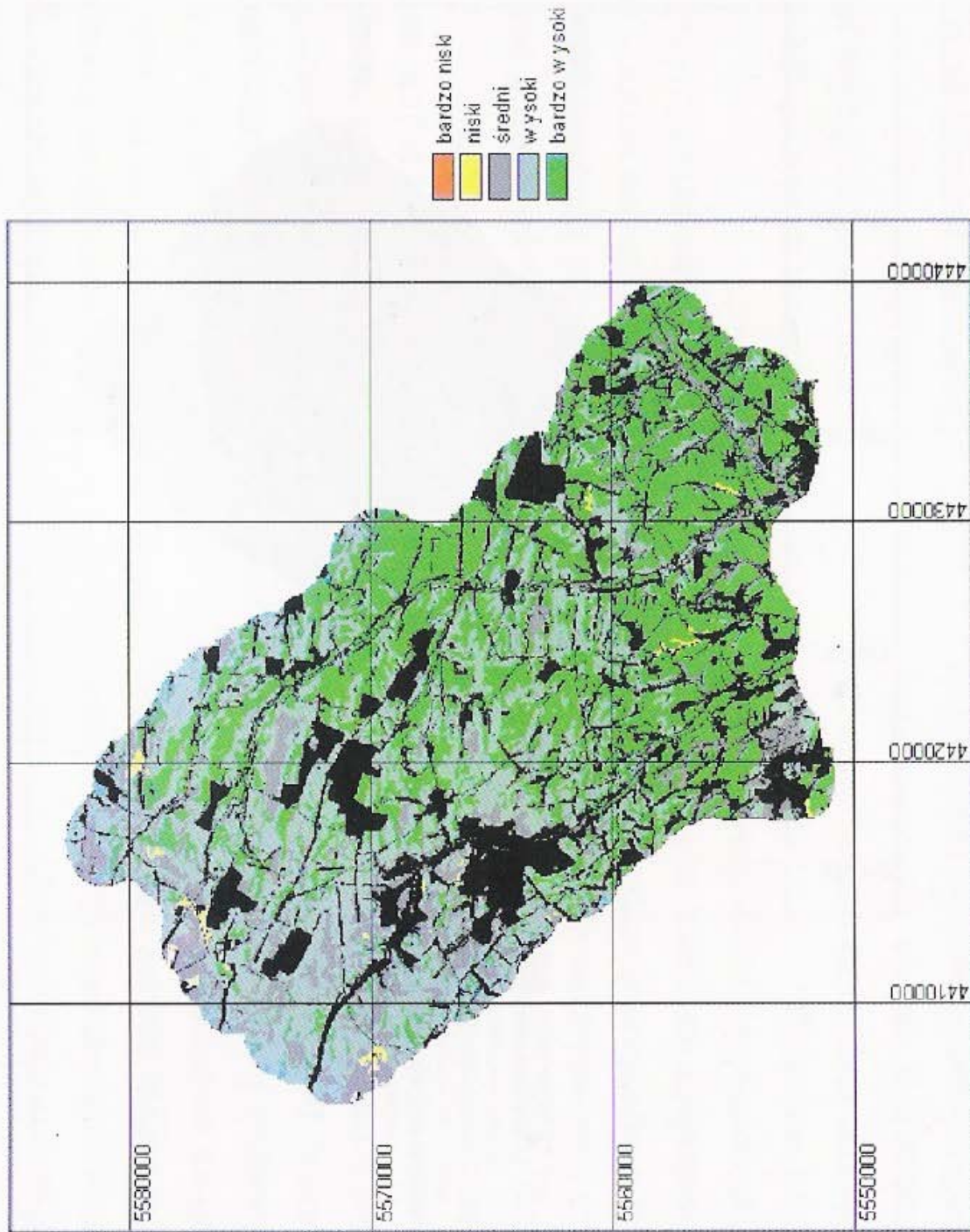


Rys. 3. Klasy zagrożenia erozją wodną – końcowy rezultat modelowania.
 Fig. 3. Soil erosion risk – final map.

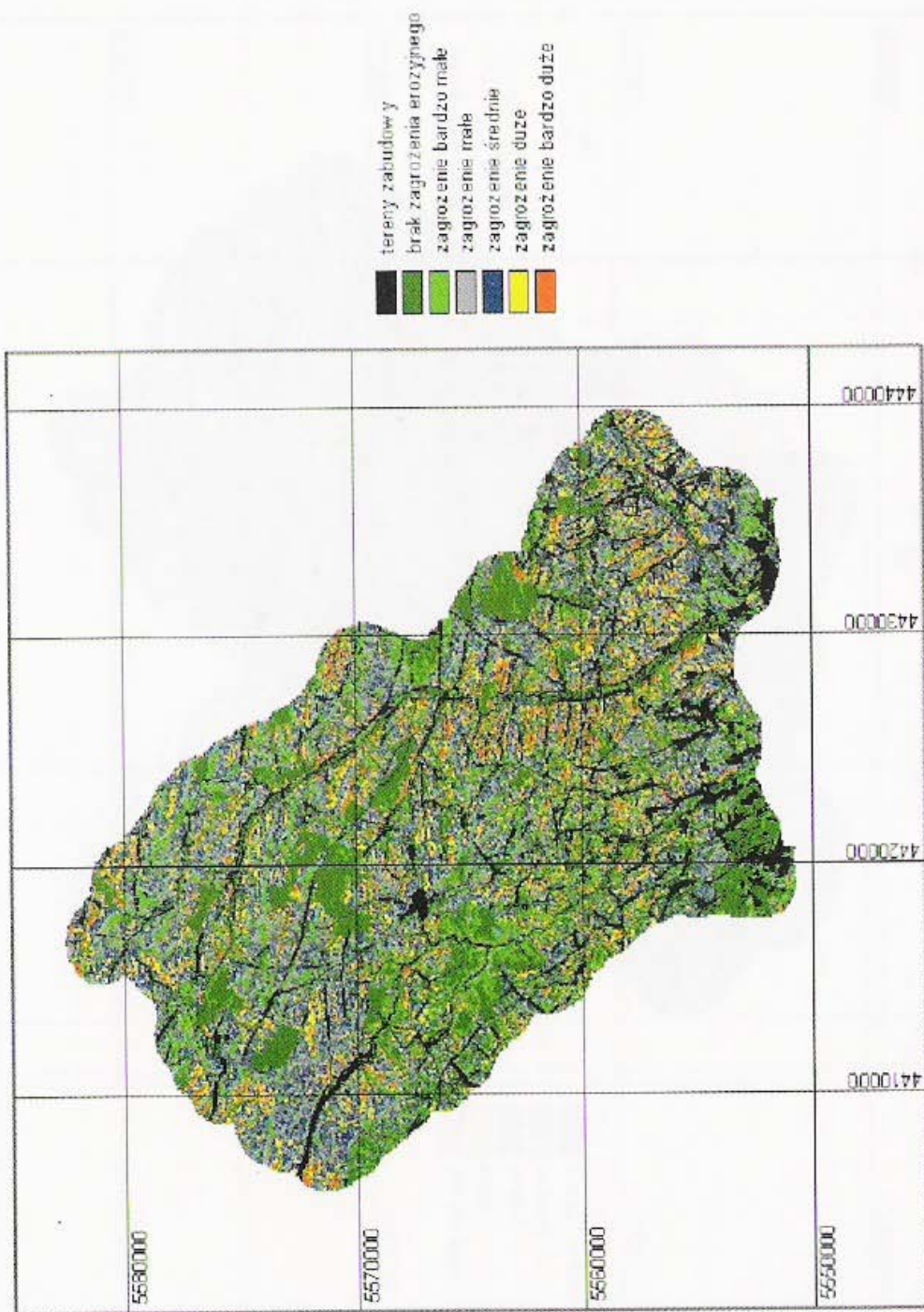


Rys. 4. Mapa form terenu.

Fig. 4. Concave and convex landforms.



Rys. 5. Mapa wartości potencjału produktywności biotycznej.
 Fig. 5. Biotic productivity potential map.



Rys. 6. Symulacja wpływu zmian sposobu uprawy na wielkość zagrożenia erozyjnego.
 Fig. 6. Simulation of land-use practice changes on soil erosion risk – resulting map.

czono zostało 86,3 procent powierzchni, a jedynie 0,9 procenta znalazło się w klasie potencjału niskiego.

3.3 Funkcje i potencjały krajobrazu – a sposób użytkowania terenu

Na tle oszacowanych funkcji i potencjałów krajobrazu przeanalizowano istniejący sposób użytkowania terenu. Tego rodzaju analiza stanowić może podstawę optymalizacji sposobu użytkowania. W jej wyniku sformułować można zalecenia dotyczące m.in. zmiany sposobu użytkowania (np. z rolniczego na leśny), wprowadzenia ograniczeń użytkowania bądź stosowania specjalnych rozwiązań (np. zabiegi przeciwoerozyjne, ograniczenie nawożenia, określone uprawy). Prowadzone analizy obejmować mogą również symulację wpływu proponowanych rozwiązań na zmiany wielkości określanych funkcji i potencjałów krajobrazu, wspomagając proces podejmowania decyzji o sposobie zagospodarowania terenu.

Wariantowa analiza wpływu ewentualnych zmian sposobu użytkowania terenu (lub zmian sposobu uprawy) na szacowane wielkości funkcji przeciwdziałania erozji wodnej wykazała np., iż wprowadzenie uprawy poprzeczniostokowej na terenach o najwyższych stopniach zagrożenia erozyjnego spowodowałoby znaczącą redukcję tego zagrożenia (rys. 6). Występowałoby ono jednak wciąż na 12% powierzchni obszaru testowego.

W znacznie większym stopniu na ograniczenie zjawiska erozji wodnej wpłynęłaby zmiana sposobu użytkowania terenu. Trwałe zadarnienie najbardziej zagrożonych terenów (zamiana pól uprawnych w trwałe użytki zielone bądź sady) spowodowałoby zdecydowany spadek zagrożenia erozyjnego. W najwyższych stopniach zagrożenia pozostałoby zaledwie 0,35% powierzchni analizowanego obszaru.

Zagrożenie erozyjne w obszarze testowym może zostać ograniczone również bez konieczności tak daleko idących zmian sposobu użytkowania terenu, a jedynie poprzez wprowadzenie uprawy poprzeczniostokowej oraz pewnych ograniczeń, co do rodzajów upraw. Zastosowanie technologii GIS umożliwiło dokonanie modelowania mającego na celu określenie progowej wartości współczynnika użytkowania C, dla której przy założeniu stałości pozostałych warunków prognozowane straty gleby będą niższe od

przyjętego progu. W niniejszym przypadku próg ten określono jako górną granicę średniego stopnia zagrożenia erozją wodną. Modelowanie wykonano przy założeniu, iż na obszarach o wysokim i bardzo wysokim zagrożeniu erozyjnym stosowana będzie uprawa poprzeczniostokowa. Otrzymane rezultaty poddano reklasyfikacji wyznaczając następujące klasy terenu:

- 1) obszary, na których przy uprawie poprzeczniostokowej możliwa jest uprawa większości rodzajów roślin ($C > 0,2$);
- 2) obszary, na których przy uprawie poprzeczniostokowej konieczne jest wprowadzenie ograniczeń rodzajów upraw – możliwa jest np. uprawa zbóż (z wyjątkiem kukurydzy) lub roślin pastewnych ($0,2 > C > 0,1$);
- 3) obszary, na których przy uprawie poprzeczniostokowej konieczne jest wprowadzenie ograniczeń rodzajów upraw – możliwa jest np. uprawa roślin pastewnych, uprawa zbóż przy zastosowaniu odpowiednich zabiegów uprawowych ($0,1 > C > 0,04$);
- 4) obszary, na których przy uprawie poprzeczniostokowej konieczne jest wprowadzenie ograniczeń rodzajów upraw – możliwa jest uprawa roślin pastewnych ($0,04 > C > 0,02$) lub trwałe zadarnienie;
- 5) obszary, na których dla ograniczenia zagrożenia erozyjnego niezbędne jest zalesienie ($0,02 > C > 0,002$).

Porównanie sposobu użytkowania terenu z wartościami poszczególnych funkcji i potencjałów środowiska pozwala na diagnozę potencjalnych sytuacji konfliktowych, jak również na formułowanie zaleceń odnośnie dostosowania sposobu użytkowania do naturalnych uwarunkowań. Podjęto próbę sformułowania tego rodzaju zaleceń posługując się zaproponowaną przez Bastiana i Rödera (1998) techniką drzewa decyzyjnego, które zmodyfikowano, tak by dostosować je do specyfiki analizowanego obszaru. Wynikiem takiej analizy (prowadzonej w oparciu o wartości funkcji odtwarzania wód gruntowych, przeciwdziałania erozji, funkcji filtracyjnej i buforowej gleby, potencjału ochrony wód podziemnych oraz potencjału produktywności biotycznej) jest ocena możliwości użytkowania terenów rolniczych w obszarze testowym (od intensywnego

wykorzystania rolniczego poprzez rolnictwo ekstensywne, konieczność stosowania zabiegów przeciwoerozyjnych aż po zmianę rodzaju użytkowania).

Podsumowanie

Koncepcja potencjałów częściowych krajobrazu stanowić może obiecujące narzędzie oceny środowiskowych uwarunkowań sposobu użytkowania terenu w różnych warunkach fizyczno-geograficznych. Funkcje i potencjały krajobrazu zdefiniowane są bowiem w taki sposób, iż kryteria ich oceny dobierane być mogą zależnie od specyfiki waloryzowanego obszaru, a do pewnego stopnia również dostępnych danych.

Wykorzystanie w tego typu badaniach narzędzia GIS znacznie wzbogaca paletę możliwości analitycznych. Możliwe staje się m.in. przestrzenne modelowanie zjawisk przyrodniczych z zastosowaniem modeli, których nie można by wykorzystać bez wsparcia ze strony GIS. Wykonanie przedstawionych w artykule analiz (podobnie jak i innych wykonanych w ramach badań) nie byłoby możliwe bez wykorzystania systemu informacji geograficznej. GIS stanowi również narzędzie umożliwiające dokonywanie symulacji wpływu ewentualnych decyzji dotyczących sposobu użytkowania terenu na wartości modelowanych funkcji i potencjałów środowiska, co wspomagać może proces podejmowania decyzji. Przyspieszenie i obiektywizacja wykonywanej oceny były już wcześniej podkreślane jako zalety wykorzystania systemów informacji geograficznej w procesie szacowania funkcji i potencjałów krajobrazu (por. np. Oldak 1997).

W przeprowadzonych analizach wykorzystano również satelitarne dane teledetekcyjne. Ich przydatność uwidacznia się przede wszystkim w kontekście zmian sposobu użytkowania terenu zachodzących o wiele szybciej, niż następuje aktualizacja zasobów kartograficznych. Dane teledetekcyjne wykorzystane mogą zostać jednak nie tylko do aktualizacji mapy użytkowania, ale także znaleźć bezpośrednie zastosowanie w procesie szacowania funkcji i potencjałów krajobrazu (np. do oceny stosowanego sposobu uprawy w kontekście modelowania funkcji przeciwdziałania erozji).

Bibliografia

- Arnoldus H. M. J., 1977, *Methodology used to determine the maximum potential average annual soil loss due to sheet and rill erosion in Morocco* [w:] *Assessing Soil Degradation*. FAO Soils Bulletin 34, Rome.
- Bastian O., Röder M., 1998, *Assessment of landscape change by land evaluation of past and present situation*. Landscape and Urban Planning, 41.
- Błaszczynski J. S., 1997, *Landform Characterization with Geographic Information Systems*. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, Vol. 63, No. 2.
- Bujakowski K., Mierzwa W., Pyka K., Trafas K., 1998, *Komputerowy atlas województwa krakowskiego – stan aktualny i przyszłość*. Polskie Towarzystwo Informacji Przestrzennej – VIII Konferencja Naukowo-Techniczna. Systemy Informacji Przestrzennej, 19-21 maja, Warszawa.
- De Groot R. S., 1992, *Functions of nature*. Wolters.
- Desmet P. J., Govers G., 1996a, *A GIS procedure for automatically calculating the USLE LS factor on topographically complex landscape units*. Journal of Soil and Water Conservation, 51 (5).
- Desmet P. J., Govers G., 1996b, *Comparison of routing algorithm for digital elevation models and their implications for predicting ephemeral gullies*. International Journal of Geographical Information Systems, 10.
- Drzewiecki W., 2003, *Analiza krajobrazowo-ekologiczna sposobów użytkowania terenu z wykorzystaniem systemów informacji geograficznej i danych teledetekcyjnych*. Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Geodezji Górniczej i Inżynierii Środowiska, Kraków. Rozprawa doktorska.
- Drzewiecki W., Mularz S., 2001, *Modelowanie erozji wodnej gleb z wykorzystaniem GIS*. Materiały Konferencji Naukowej nt. „Nowoczesne technologie w geodezji i inżynierii środowiska”, 22 września 2001, Wydział Geodezji Górniczej i Inżynierii Środowiska AGH w Krakowie.
- Goovaerts P., 1999, *Using elevation to aid the geostatistical mapping of rainfall erosivity*. Catena, 34.

- Goovaerts P., 2000, *Geostatistical approaches for incorporating elevation into the spatial interpolation of rainfall*. Journal of Hydrology, 228.
- Haase G., 1978, *Zur Ableitung und Kennzeichnung von Naturraumpotentialen*. Peterm. Geogr. Mitt., 122, 2.
- Hess M., 1969, *Klimat podregionu miasta Krakowa*. Folia Geographica, Ser. Geogr.-Physica, vol. III.
- Huete A. R., 1988, *A Soil-adjusted Vegetation Index (SAVI)*. Remote Sensing of Environment, 25.
- Huete A. R., Liu H. Q., 1994, *An Error and Sensitivity Analysis of the Atmospheric- and Soil-Correcting Variants of the Normalized Difference Vegetation Index for the MODIS-EOS*. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 32 (4).
- Jensen J. R., 2000, *Remote Sensing of the Environment. An Earth Resource Perspective*. Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey.
- Jenson S. K., Domingue J. O., 1988, *Extracting topographic structure from digital elevation data for geographic information system analysis*. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 54.
- Jędrzychowski I., Pyka K., Sokołowski J., 1998, *Wykorzystanie danych teledetekcyjnych i kartograficznych dla potrzeb opracowania map użytkowania w Komputerowym Atlasie Województwa Krakowskiego*. Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji, Vol. 8.
- Kistowski M., 1995, *Propozycja metody oceny przyrodniczych uwarunkowań ekorozwoju w skali makroregionalnej (na przykładzie Polski północno-wschodniej)*. Przegląd Geograficzny, T. LXVII, z. 1-2.
- Kistowski M., 1997, *Problem pola podstawowego w ocenie potencjału krajobrazu na obszarach młodogłajalnych*, [w:] Richling A., Lechnio J., Malinowska E. [red.] *Zastosowanie ekologii krajobrazu w ekorozwoju. Problemy ekologii krajobrazu*, t. 1, Warszawa.
- Komornicki T., 1980, *Gleby miejskiego województwa krakowskiego*. Folia Geographica Series Geographica-Physica, Vol. XIII.
- Kondracki J., 1988, *Geografia fizyczna Polski*. PWN, Warszawa.
- Koreleski K., 1988, *Adaptations of the Storie Index for land evaluation in Poland*. Soil Survey and Land Evaluation, 8.
- Koreleski K., 1992a, *Próby oceny natężenia erozji wodnej*. Zeszyty Naukowe Akademii Rolniczej im. H. Kołłątaja w Krakowie, Sesja Naukowa, z. 35.
- Koreleski K., 1992b, *Przydatność wskaźnika glebowo-klimatycznego dla oceny potencjalnej produktywności gruntów ornych*. Zeszyty Naukowe Akademii Rolniczej im. H. Kołłątaja w Krakowie, Geodezja, z. 13.
- Marks R., Müller M. J., Leser H., Klink H. J. (red.), 1989, *Anleitung zur Bewertung des Leistungsvermögens des Landschaftshaushaltes (BA LVL)*. Forschungen zur Deutschen Landeskunde Band 229, Zentralausgabe für deutsche Landeskunde, Selbstverlag, Trier.
- Mitasova H., Hofierka J., Zlocha M., Iverson R. L., 1996, *Modeling topographic potential for erosion and deposition using GIS*. International Journal of Geographic Information Science, 10 (5).
- Mitasova H., Mitas L., Brown W. M., Johnston D. M., 1998, *Multidimensional soil erosion/deposition modeling and visualization using GIS. Final report for USA CERL*. University of Illinois, Urbana-Champaign, IL.
- Mitasova H., Mitas L., Brown W. M., Johnston D. M., 1999, *Terrain modeling and soil erosion simulations for Fort Hood and Fort Polk test areas. Annual report for USA CERL*. University of Illinois, Urbana-Champaign, IL.
- Mitasova H., Brown W. M., Johnston D. M., 2003, *Terrain Modeling and Soil Erosion Simulation. Final Report*. University of Illinois, Urbana-Champaign, IL.
- Molnár D. K., Julien P. Y., 1998, *Estimation of Upland Erosion Using GIS*. Computer and Geosciences, vol. 24, nr 2.
- Neef E., 1966, *Zur Frage des gebietswirtschaftlichen Potentials*. Forsch. u. Fortsch., 40, 3.
- Óldak A., 1997, *Badanie potencjału produktywności biotycznej z zastosowaniem systemów informacji geograficznej*. Prace i Studia Geograficzne, Tom 21.
- Pebesma E. J., Wesseling C. G., 1998, *GSTAT: A program for geostatistical modelling, prediction and simulation*. Computers & Geosciences, Vol. 24, 1.

- Pietrzak M., 1998, *Syntezy krajobrazowe – założenia, problemy, zastosowania*. Bogucki Wydawnictwo Naukowe, Poznań.
- Pistocchi A., Cassoni G., Zanio O., 2002, *Use of the USPED model for mapping soil erosion and managing best land conservation practices*. IEMSs 2002, Congress Proceedings, Lugano.
- Pokojska P., 2001, *Modelowanie struktury przestrzennej elementów bilansu wodnego (na przykładzie dorzecza Regi)*. Przegląd Geofizyczny, XLVI, 1-2.
- Przewoźniak M., 1987, *Podstawy geografii fizycznej kompleksowej*. Uniwersytet Gdański.
- Renard K. G., Foster G. R., Weesies G. A., Porter J. P., 1991, *RUSLE: Revised Universal Soil Loss Equation*. Journal of Soil and Water Conservation, 46(1).
- Renard K. G., Foster G. R., Weesies G. A., McCool D. K., Yoder D. C., 1997, *Predicting Soil Erosion by Water: A Guide to Conservation Planning With the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE)*. U.S. Department of Agriculture, Agriculture Handbook No. 703.
- Richling A., 1992, *Kompleksowa geografia fizyczna*. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa.
- Sboarina C., 2002, *Development of a complete climat database using a new GRASS module*. Proceedings of the Open source GIS - GRASS users conference 2002 - Trento, Italy, 11-13 September 2002.
- Starkel L., 1991, *Rzeźba terenu [w:] I. Dynowska, M. Maciejewski (red.) Dorzecze górnej Wisły*. PWN, Warszawa.
- Witek T., Górski T., 1977, *Przyrodnicza bonitacja rolniczej przestrzeni produkcyjnej w Polsce*. Wydawnictwa Geologiczne, Warszawa.

Summary

An application of landscape functions and potentials methodology for the assessment of land-use conditions is presented for the area of Pradnik and Dłubnia rivers basins (upland region north of Krakow). The task was realised in GIS environment and based on existing digital data, satellite images as well as hydrogeological maps and meteorological data.

First of all initial data preprocessing was done, including satellite images or thorectification, land-use/land cover map updating and spatial interpolation of rainfall data. A new land-use/land cover map had to be made, because of the differences noticed during digital land-use data and satellite images comparison. A hybrid approach was chosen. Roads, railway, waters and green areas (cementeries, parks, etc.) were taken from digital data sets. Forest areas as well as residential areas taken from digital data sets were updated with panchromatic IRS image by photointerpretation. Arable lands and pastures/meadows were detected by supervised minimal distance classification procedure applied to all available satellite spectral bands. Classification results were compared with SAVI (Soil Adjusted Vegetation Index) images.

For spatial interpolation of rainfall data the ordinary kriging with spherical semivariogram model was applied. The approach was chosen from the methods available in Idrisi software based on crossvalidation test results.

Then chosen landscape functions and potentials were evaluated: water erosion resistance function, groundwater recharge function, soil filter and buffering functions, runoff regulation function, groundwater protection function, recreational potential, biotic productivity potential, building localisation potential. Details of water erosion resistance function and biotic productivity potential assessments are presented in the paper.

Water resistance function was assessed with RUSLE (Revised Universal Soil Loss Equation) model. Deposition areas determined with USPED (Unit Stream Power-based Erosion/Deposition) model were excluded. Biotic productivity potential was evaluated with Koreleski's soil-climatic index. Vegetation period needed for climate assessment was determined from the year mean tempera-

ture using correlation equations. Landform map was elaborated for this analysis from DTM with MGE Grid Analyst script written in GOAL scripting language.

Possible ways of using the evaluated landscape functions and potentials in the land-use decision making

process support are presented as well, including 1) simulations of landscape functions changes caused by different land-use scenarios and 2) land-use optimization (based on the decision tree).

TOMISŁAW GOŁĘBIEWSKI¹

NUMERYCZNE MODELOWANIE POLA GEORADAROWEGO PRZY POMOCY METODY FDTD

Słowa kluczowe:

Metoda georadarowa, modelowanie numeryczne

Abstrakt

W artykule przedstawiono sposób numerycznego modelowania elektromagnetycznego (georadarowego) pola falowego przy pomocy metody różnic skończonych w wersji FDTD (*Finite Difference Time Domain Method*). Obecnie stosuje się kilka metod modelowania pola georadarowego, a najpopularniejszą z nich jest metoda FDTD, z tego powodu autor ograniczył się tylko do opisu tej metody. W pierwszej części artykułu zamieszczono krótkie wprowadzenie do metody georadarowej (GPR), aby nie pojawiały się niejasności w drugiej części, opisującej specyfikę modelowania pola georadarowego. Druga część artykułu przedstawia szeroki opis sposobu przygotowania modelu numerycznego i prowadzenia symulacji komputerowych z uwzględnieniem specyfiki metody georadarowej.

NUMERICAL MODELLING OF GPR WAVE FIELD USING FDTD METHOD

Key words:

GPR method, numerical modelling

Abstract

In the paper the method of numerical modelling of electromagnetic (georadar) wave field is described. The only method discussed is the FDTD (*Finite Difference Time Domain Method*), because among the different methods using numerical modelling of georadar (GPR) wave field this one is the most popular. The first part of the paper includes a short introduction to the GPR method, in case any ambiguities might appear in the second part of the paper. The second part presents a rich description of the way of the numerical model construction and the way of carrying out computer simulation for GPR method.

¹Akademia Górniczo-Hutnicza; Wydział Geologii, Geofizyki i Ochrony Środowiska; Zakład Geofizyki; Kraków.

1. Wprowadzenie

Jedną z najczęściej stosowanych obecnie bezinwazyjnych metod geofizyki inżynierskiej jest metoda georadarowa, określana skrótem GPR. W porównaniu z innymi metodami, cechuje się ona niskimi kosztami badań oraz relatywnie małą czasochłonnością i pracochłonnością prowadzenia pomiarów i uzyskiwania wyników badań. Metoda ta ma zastosowanie m.in. w: geologii, górnictwie, glaciologii, archeologii, drogownictwie, budownictwie, inżynierii lądowej, lokalizacji infrastruktury podziemnej czy poszukiwaniach dla potrzeb wojska i policji. Jednym z najnowszych obszarów zastosowania metody georadarowej jest badanie i monitorowanie gruntów skażonych substancjami chemicznymi i ropopochodnymi.

Ze względu na technikę pomiarów metodą GPR, wstępne przetwarzanie i interpretację można przeprowadzić bezpośrednio w terenie w czasie badań. Takie podejście daje pozytywne rezultaty, gdy kontrasty parametrów elektromagnetycznych w badanym ośrodku są wystarczająco duże. Często natomiast, ze względu na skomplikowaną budowę geologiczną, niejednorodność i anizotropowość ośrodka, występowanie spękania, zawodnienia i in., natychmiastowa interpretacja staje się znacząco utrudniona.

Na świecie stosuje się wiele metod wspomagających proces interpretacji danych georadarowych, a jedną z nich jest numeryczne modelowanie elektromagnetycznego (e.m.) pola falowego (Bergmann *i in.*, 1998; Bourgeois i Smith 1996; Carcione 1996a,b; Holliger 2002; Roberts i Daniels 1997). W Polsce, symulacje komputerowe w interpretacji zdjęć georadarowych, jak dotychczas, stosowane były wyjątkowo rzadko (Gołębiowski 2006; Gołębiowski 2005; Marczak i Gołębiowski 2005; Gołębiowski 2004; Gołębiowski i Karczewski 2003).

Do numerycznych analiz pola georadarowego używa się obecnie na świecie dwóch metod: Metody Różnic Skończonych (MRS) oraz Metody Pseudospektralnej (MPS). Numeryczne obliczenia elektromagnetycznego pola falowego metodą MRS mogą być wykonywane albo w domenie czasu (metoda FDTD – *Finite Difference Time Domain Method*) lub w domenie częstotliwości (metoda FDFD – *Finite Difference Frequency Domain Method*).

Spośród wymienionych metod najczęściej obecnie stosowaną w symulacjach georadarowych jest metoda FDTD, a algorytm numeryczny dla tej metody został opracowany przez K.S.Yee (Yee 1966).

Cześć informacji przedstawionych w artykule pochodzi z rozwiązań zawartych w programie ReflexW, niemieckiej firmy Sandmeier-Geo, ponieważ jest on na dzień dzisiejszy jednym z najbardziej zaawansowanych symulatorów pola georadarowego.

2. Podstawy metody georadarowej

Metoda georadarowa jest bezinwazyjną techniką poszukiwawczą stosującą fale elektromagnetyczne w zakresie częstotliwości 10MHz – 1GHz do badania budowy geologicznej i poszukiwania obiektów podziemnych.

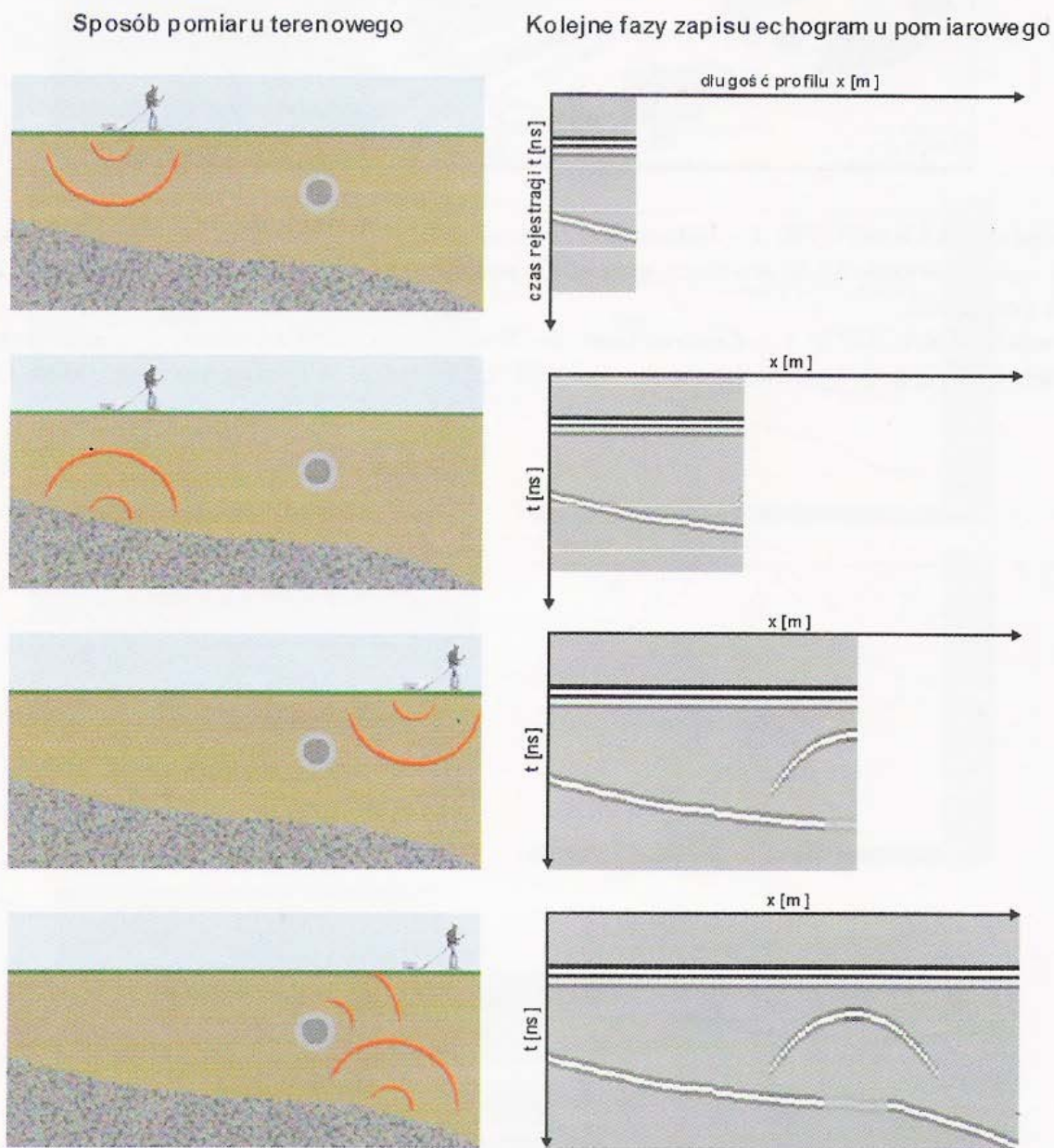
Stosuje się kilka technik badań terenowych:

- p rofilowanie refleksyjne,
- p rofilowanie refrakcyjne,
- p rofilowanie prędkości,
- t omografia (otwór-otwór; otwór-powierzchnia).

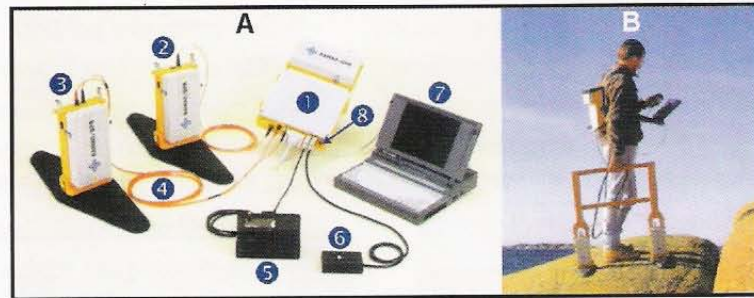
Ponieważ powierzchniowe profilowania refleksyjne są na dzień dzisiejszy najczęściej stosowaną techniką badań, w dalszej części artykułu zostanie omówiona tylko ta metodyka zarówno w odniesieniu do pomiarów terenowych, jak również w modelowaniu numerycznym.

Na rys. 1 pokazano ideę georadarowego profilowania powierzchniowego i sposób rejestracji wyników badań. Antena nadawcza emituje impuls elektromagnetyczny, który propaguje w postaci fali elektromagnetycznej (e.m.) w gruncie. Propagacja fal e.m. zależy od parametrów elektromagnetycznych ośrodka, a odbicie fali zachodzi w miejscach zmian w badanym ośrodku wartości tych parametrów. Antena odbiorcza rejestruje sygnały odbite, które zapisywane są w formacie cyfrowym na laptopie i wyświetlane w czasie pomiaru w postaci kolekcji tras na monitorze. Zapis taki nazywany jest echogramem lub falogramem. Pionowa oś na echogramie zapisywana jest w skali czasu w nanosekundach [ns]. W procesie przetwarzania danych pomiarowych dokonuje się konwersji skali czasowej na głębokościową.

Na świecie istnieje kilku liczących się producentów sprzętu georadarowego, a jednym z nich jest szwedz-

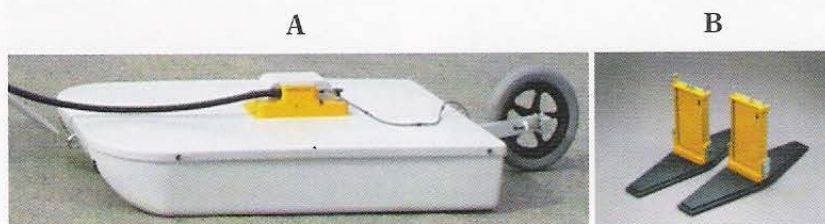


Rys. 1. Idea refleksyjnego profilowania georadarowego i uzyskiwany echogram pomiarowy.
 Fig. 1. The GPR reflection profiling and stages of echogram writing (Mala GeoScience 2005).



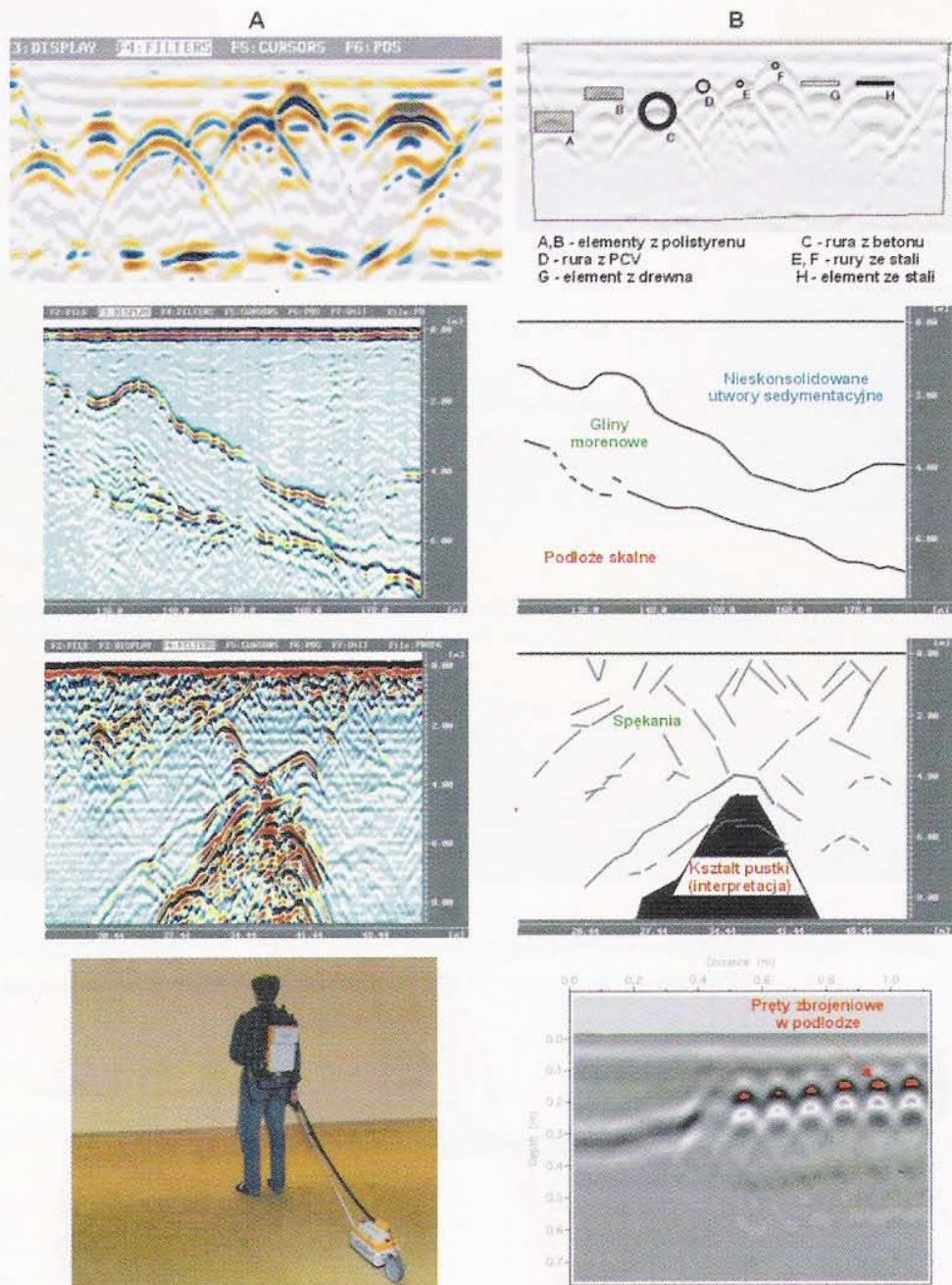
Rys. 2. A) Elementy georadaru RAMAC/GPR: 1 - Jednostka centralna; 2 - Antena nadawcza z nadajnikiem; 3 - Antena odbiorcza z odbiornikiem; 4 - światłowód; 5 - Wyzwalacz sygnału z pomiarem odległości; 6 - Trigger; 7 - Laptop; 8 - Gniazdo GPS; B) Operator w czasie pomiarów.

Fig. 2. A) The set of georadar RAMAC/GPR: 1 - Central Unit; 2 - Transmitter with antenna; 3 - Receiver with antenna; 4 - Optical fiber; 5 - Odometer; 6 - Trigger; 7 - Notebook; 8 - Port GPS; B) Operator during surveys. (Mala GeoScience 2005).



Rys. 3. Przykładowe anteny georadaru RAMAC/GPR: A) dipolowe, bistatyczne, ekranowane, 100MHz; B) dipolowe, bistatyczne, nie-ekranowane, 200MHz.

Fig. 3. Example of RAMAC/GPR antennas: A) dipol, bistatic, shielded, 100MHz; B) dipol, bistatic, unshielded, 200MHz (Mala GeoScience 2005).

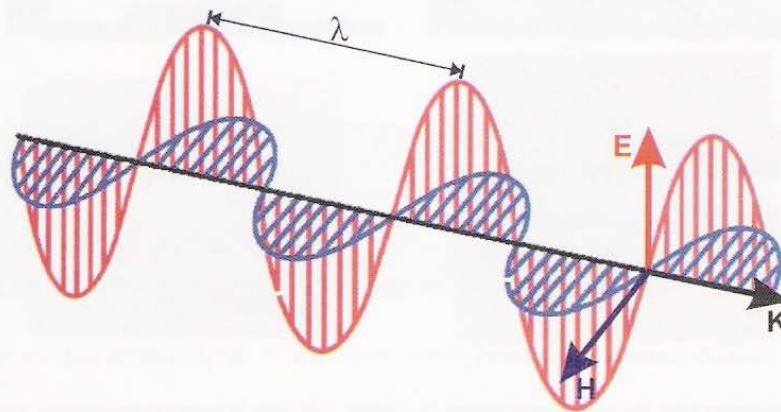


Rys. 4. A) Przykładowe wyniki pomiarów georadarowych i B) ich interpretacja.

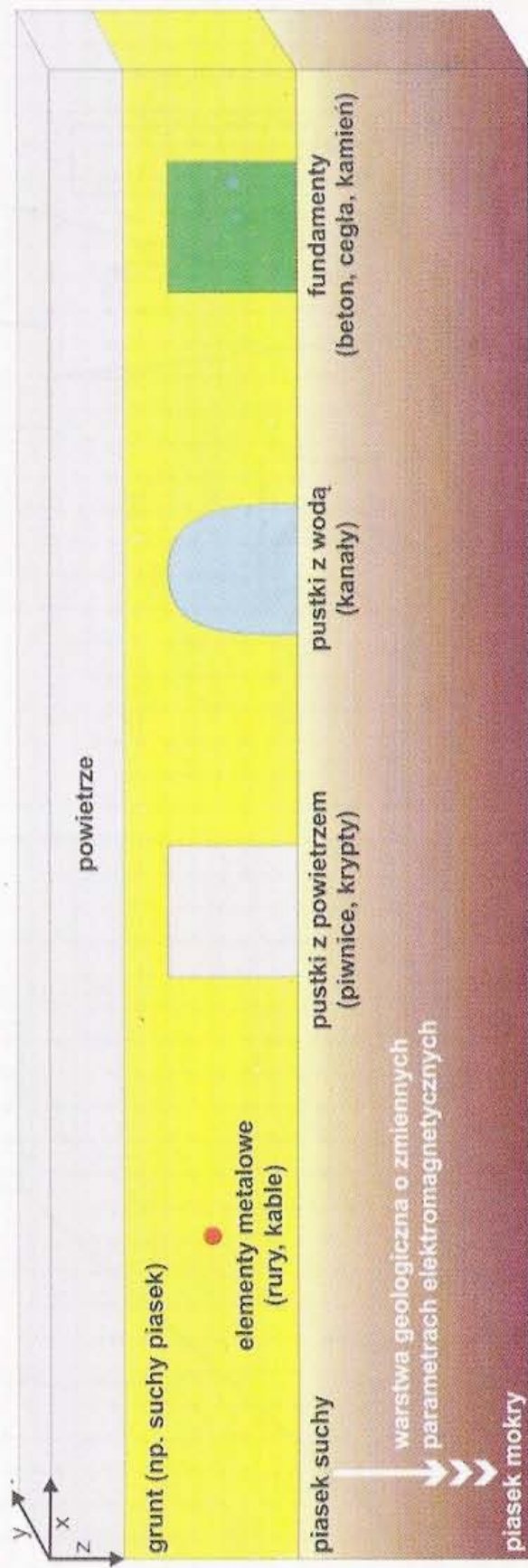
Fig. 4. A) Example results of GPR measurements and B) their interpretation (Mala GeoScience 2005).



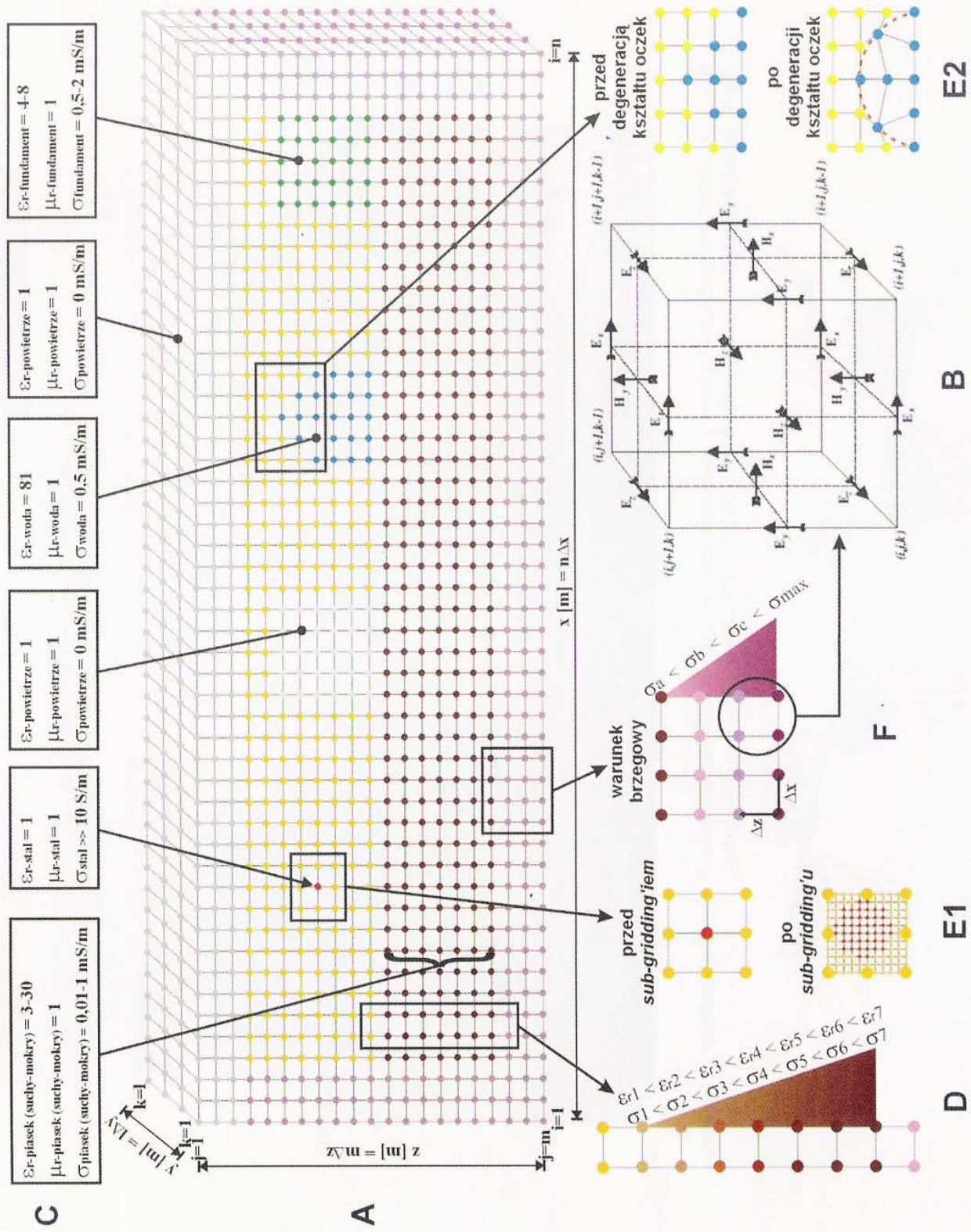
Rys. 5. Schemat prowadzenia interpretacji opartej na modelowaniu numerycznym pola georadarowego.
 Fig. 5. Schematic chart-flow for GPR interpretation based on numerical modelling.



Rys. 6. Poprzeczna fala elektromagnetyczna (TEM); E – składowa elektryczna fali TEM; H – składowa magnetyczna fali TEM; k – wektor propagacji; λ - długość fali.
 Fig. 6. Transverse Electromagnetic Wave (TEM); E – electric component of TEM wave; H – magnetic component of TEM wave; k – propagation vector; λ - wave length.



Rys. 7. Przykładowy model geologiczny z obiektami anomalnymi do wykrywania których używa się metody georadarowej.
 Fig. 7. Example geological model with objects which can be detected using GPR method.



Rys. 8. Model numeryczny dla modelu geologicznego z Rys. 7.
 Fig. 8. Numerical model for geological model – Fig. 7.

ka firma Mala GeoScience produkująca georadar RAMAC/GPR. Dalszy opis aparatury pomiarowej odnosił się będzie do georadaru RAMAC/GPR (rys. 2), ponieważ jest on w posiadaniu Zakładu Geofizyki AGH.

W zależności od rozmiarów poszukiwanych obiektów, jak również od założonej głębokości poszukiwań stosuje się anteny o różnych częstotliwościach (tabela 1).

Tabela 1. Charakterystyka anten georadaru RAMAC/GPR.
Table 1. Characteristic of RAMAC/GPR antennas (Mala GeoScience 2005).

Częstotliwość anteny [MHz]	Rozdzielczość [m]	Maksymalny zasięg głębokościowy [m]
10	2,0	60
25	1,0	50
50	0,5	40
100	0,25	25
200	0,125	12
500	0,05	6
800	0,03	2,5
1000	0,025	1,5

Standardowymi obecnie antenami w metodzie georadarowej są anteny dipolowe, bistatyczne ekranowane (rys. 3A) lub nieekranowane (rys. 3B). Z tego powodu dalszy opis technologii modelowania zostanie zawężonych do tego typu anten.

Na rys. 4 pokazano przykładowe wyniki badań georadarowych i ich interpretację przeprowadzoną bezpośrednio z echogramów pomiarowych dla wybranych dziedzin, dla których można z powodzeniem stosować metodę georadarową.

Interpretację końcową prowadzi się poprzez zastosowanie odpowiednich technik interpretacyjnych dla echogramów pomiarowych, jak pokazano przykładowo na rys. 4. W przypadku, gdy techniki te zawiodą, lub wyniki takiej interpretacji są niejednoznaczne, można posłużyć się dodatkową metodą interpretacyjną, bazującą na symulacjach komputerowych (rys. 5). Numeryczne modelowanie pola georadarowego stosuje się również wyprzedzająco, gdy chcemy zastosować metodę GPR w nowej dziedzinie i nie wiemy, jakiego typu efekty uzyskamy na echogramach.

3. Sposób modelowania pola georadarowego

3.1. Podstawy teoretyczne metody FDTD

Numeryczna analiza elektromagnetycznego (georadarowego) pola falowego wymaga rozwiązania układu równań Maxwella przy określonych warunkach brzegowych. Równania te opisują rozkład wartości składowych elektrycznych i magnetycznych e.m. pola falowego w analizowanym modelu numerycznym. W modelowaniu przyjmuje się, że fala elektromagnetyczna jest falą poprzeczną TEM (*Transverse Electro-Magnetic Wave*) – rys. 6, co ma swoją konsekwencję przy rozpisaniu wektorów pola falowego na siatce obliczeniowej (rys. 8B).

W analizach pola georadarowego przyjmuje się równania Maxwella najczęściej w postaci (Carcione 1996a):

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} + \mathbf{M}_s \quad \nabla \times \mathbf{H} = -\frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} + \mathbf{J} \quad (1,2)$$

Po uwzględnieniu we wzorach (1,2) zależności:

$$\mathbf{D} = \varepsilon * \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} \quad \mathbf{B} = \mu * \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t} \quad \mathbf{J} = \sigma * \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} + \mathbf{J}_s \quad (3,4,5)$$

otrzymujemy równania Maxwella w formie (Carcione 1996a):

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\mu * \frac{\partial^2 \mathbf{H}}{\partial t^2} + \mathbf{M}_s \quad \nabla \times \mathbf{H} = \sigma * \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} + \varepsilon * \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2} + \mathbf{J}_s \quad (6,7)$$

gdzie: ∇ - operator Nabla; * - operator splotu; \mathbf{E} - wektor natężenia pola elektrycznego [V/m]; \mathbf{H} - wektor natężenia pola magnetycznego [A/m]; \mathbf{D} - wektor indukcji elektrycznej [$\text{A} \times \text{s}/\text{m}^2$]; \mathbf{B} - wektor indukcji magnetycznej [T]; \mathbf{J} - wektor gęstości prądu w ośrodku [A/m^2]; \mathbf{J}_s - wektor gęstości prądu w źródle [A/m^2]; \mathbf{M}_s - wektor magnetyzacji w źródle [$\text{V} \times \text{s}/\text{m}$]; μ - przenikalność magnetyczna ośrodka [H/m]; ε - przenikalność elektryczna ośrodka [F/m]; σ - elektryczna przewodność właściwa ośrodka [S/m]; t - czas [s].

Aby rozwiązać w sposób numeryczny równania różniczkowe (6,7), należy w metodzie różnic skończonych zapisać je w formie różnicowej, i przekształcić w ten sposób ciągły model ośrodka geologicznego (rys. 7) w model dyskretny (rys. 8A). Operację tę nazywamy dyskretyzacją modelu ciągłego (rzeczywistego). W tym celu w analizowanym obszarze tworzy się siatkę i oblicza wartości składowych pola falowego ($E_x, E_y, E_z, H_x, H_y, H_z$) tylko

w węzłach siatki. Wprowadźmy następującą notację dla układu 3D: rozmiar oczek siatki Δx , Δy , Δz ; numeracja węzłów siatki odpowiednio i , j , k ; rozmiar modelu $n \times \Delta x$, $m \times \Delta y$, $l \times \Delta z$ (rys. 8A); dla dyskretyzacji czasu w równaniach Maxwella (6,7) - krok czasowy Δt .

Gdy stosuje się metodę FDTD do rozwiązania równań Maxwella, obliczenia należy prowadzić jednocześnie na dwóch siatkach skalarnych sprzężonych ze sobą (Fig. 8B). Punkty czasowe, w których obliczane jest pole elektryczne są przesunięte w stosunku do punktów czasowych dla obliczeń pola magnetycznego o $\Delta t/2$ (pole elektryczne obliczane jest w krokach czasowych $n+1$, natomiast

magnetyczne w $n+1/2$) – jest to metoda węzłów rozłożonych lub siatek przesuniętych (Bergmann i in., 1996).

Aby rozwiązać równania Maxwella (6,7) przy pomocy metody FDTD należy zapisać je w notacji skalarnej (Fornberg 2002):

$$\begin{aligned} \frac{\partial E_x}{\partial t} &= \frac{1}{\varepsilon} \left(\frac{\partial H_z}{\partial y} - \frac{\partial H_y}{\partial z} \right) & \frac{\partial H_x}{\partial t} &= -\frac{1}{\mu} \left(\frac{\partial E_z}{\partial y} - \frac{\partial E_y}{\partial z} \right) \\ \frac{\partial E_y}{\partial t} &= \frac{1}{\varepsilon} \left(\frac{\partial H_x}{\partial z} - \frac{\partial H_z}{\partial x} \right) & \frac{\partial H_y}{\partial t} &= -\frac{1}{\mu} \left(\frac{\partial E_x}{\partial z} - \frac{\partial E_z}{\partial x} \right) \\ \frac{\partial E_z}{\partial t} &= \frac{1}{\varepsilon} \left(\frac{\partial H_y}{\partial x} - \frac{\partial H_x}{\partial y} \right) & \frac{\partial H_z}{\partial t} &= -\frac{1}{\mu} \left(\frac{\partial E_y}{\partial x} - \frac{\partial E_x}{\partial y} \right) \end{aligned} \quad (8,13)$$

a następnie zamienić ten zapis na zapis różnicowy w postaci (Fornberg 2002):

$$\begin{aligned} E_x^{n+1}(i, j, k) &\approx K_x(i, j, k)E_x^n(i, j, k) + P_x(i, j, k) \left[\frac{H_z^{n+1/2}(i, j+1, k) - H_z^{n+1/2}(i, j, k)}{\Delta y} - \frac{H_y^{n+1/2}(i, j, k+1) - H_y^{n+1/2}(i, j, k)}{\Delta z} \right] \\ E_y^{n+1}(i, j, k) &\approx K_y(i, j, k)E_y^n(i, j, k) + P_y(i, j, k) \left[\frac{H_z^{n+1/2}(i, j, k+1) - H_z^{n+1/2}(i, j, k)}{\Delta z} - \frac{H_x^{n+1/2}(i+1, j, k) - H_x^{n+1/2}(i, j, k)}{\Delta x} \right] \\ E_z^{n+1}(i, j, k) &\approx K_z(i, j, k)E_z^n(i, j, k) + P_z(i, j, k) \left[\frac{H_y^{n+1/2}(i+1, j, k) - H_y^{n+1/2}(i, j, k)}{\Delta x} - \frac{H_x^{n+1/2}(i, j+1, k) - H_x^{n+1/2}(i, j, k)}{\Delta y} \right] \\ H_x^{n+1/2}(i, j, k) &\approx H_x^{n-1/2}(i, j, k) + \frac{\Delta t}{\mu_x(i, j, k)} \left[\frac{E_y^n(i, j, k+1) - E_y^n(i, j, k)}{\Delta z} - \frac{E_z^n(i, j+1, k) - E_z^n(i, j, k)}{\Delta y} \right] \\ H_y^{n+1/2}(i, j, k) &\approx H_y^{n-1/2}(i, j, k) + \frac{\Delta t}{\mu_y(i, j, k)} \left[\frac{E_z^n(i+1, j, k) - E_z^n(i, j, k)}{\Delta x} - \frac{E_x^n(i, j, k+1) - E_x^n(i, j, k)}{\Delta z} \right] \\ H_z^{n+1/2}(i, j, k) &\approx H_z^{n-1/2}(i, j, k) + \frac{\Delta t}{\mu_z(i, j, k)} \left[\frac{E_x^n(i, j+1, k) - E_x^n(i, j, k)}{\Delta y} - \frac{E_y^n(i+1, j, k) - E_y^n(i, j, k)}{\Delta x} \right] \end{aligned} \quad (14-19)$$

gdzie:

$$K_{x,y,z}(i, j, k) = \frac{\varepsilon_{x,y,z}(i, j, k) - 0,5\Delta t \sigma_{x,y,z}(i, j, k)}{\varepsilon_{x,y,z}(i, j, k) + 0,5\Delta t \sigma_{x,y,z}(i, j, k)} \quad P_{x,y,z}(i, j, k) = \frac{\Delta t}{\varepsilon_{x,y,z}(i, j, k) + 0,5\Delta t \sigma_{x,y,z}(i, j, k)}$$

Wypisanie zależności (14-19) dla wszystkich węzłów siatki w analizowanym obszarze prowadzi do układu równań, w którym występują niewiadome wartości pola E_x , E_y , E_z i H_x , H_y , H_z wewnątrz analizowanego obszaru i znane wartości w punktach brzegowych. Tak powstały układ równań ma dokładnie jedno rozwiązanie, ponieważ ilość równań i ilość niewiadomych jest taka sama, i jest równa ilości węzłów siatki. Do rozwiązania tak powstałego układu równań stosuje się odpowiednią metodę obliczeń numerycznych, np. metodę Rungego-Kutty czwarte-

go rzędu, metodę pasmową, iteracyjną, nadrelaksacyjną, przebiegania, skokową, Laxa-Wendroffa i in. (Fortuna i in., 2001, Dahlquist i Bjorck 1983).

Aby zachować zbieżność i stabilność rozwiązania numerycznego należy uwzględnić tzw. warunek Couranta-Friedrichsa-Lewy'ego (CFL) wyznaczający maksymalny krok czasowy obliczeń:

$$\Delta t \leq \frac{1}{v \cdot \sqrt{\frac{1}{(\Delta x)^2} + \frac{1}{(\Delta y)^2} + \frac{1}{(\Delta z)^2}}} \quad (20)$$

gdzie: v jest prędkością propagacji fali elektromagnetycznej.

Warunek (20) określa, że „sztuczna” prędkość $\Delta x / \Delta t$ przemieszczania się zaburzenia po siatce obliczeniowej musi być zgodna z fizyczną prędkością v propagacji fali e.m.

3.2. Geometria modelu obliczeniowego i parametry materiałowe

Rozmiar poziomy modelu (x) dobiera się odpowiednio do długości profilu z echogramu pomiarowego. Rozmiar pionowy modelu (z) należy dobrać w zależności od parametrów elektromagnetycznych wprowadzanych do modelu, definiujących minimalną prędkość v_{min} . Pionowy rozmiar modelu będzie powiązany zależnością (23) z oknem czasowym T [ns] przyjętym do obliczeń. Okno czasowe w obliczeniach numerycznych musi być zgodne z oknem czasowym określonym w czasie pomiarów georadarowych.

$$T_{min} = 2z / v_{min} \quad (23)$$

W metodzie FDTD rozmiary oczek siatki obliczeniowej Δx , Δy , Δz uzależnione są od długości modelowanej fali. Oczko musi być min. 10-krotnie mniejsze niż najmniejsza analizowana długość fali (λ). Najmniejszą długość fali (a co za tym idzie największą częstotliwość - f_{max}) należy odczytać z widma częstotliwościowego sygnału źródłowego, którego częstotliwość główna wynosi f_s . Dopuszczalnym uproszczeniem w symulacjach numerycznych pola georadarowego jest skorzystanie z zależności:

$$f_{max} = 3 \cdot f_s \quad \lambda = \frac{c}{f_{max} \cdot \sqrt{\epsilon_r}} \quad \Delta x \leq \frac{\lambda}{10} \quad (24,25,26)$$

Gdzie: c – prędkość światła; ϵ_r – tzw. względna stała dielektryczna ośrodka.

Biorąc pod uwagę częstotliwości metody georadarowej (tabela 1), w symulacjach numerycznych oczka siatki są rzędu centymetrów. Pomimo tak małych oczek w pewnych sytuacjach należy przyjąć oczko mniejsze niż $\lambda/10$, aby uniknąć w modelu niewłaściwego odwzorowania krzywizn i obiektów o małych rozmiarach. W takiej sytuacji stosuje się procedurę zagęszczania siatki w wybranych obszarach (rys. 8E1) - jest to procedura *subgridding'u*. Rzadziej stosowaną procedurą dostosowania siatki różnicowej do krzywizn obiektów w modelu jest

procedura *degenerowanie kształtu oczek siatki* (rys. 8E2).

W modelowaniu pola georadarowego przyjmuje się najczęściej następujące uproszczenia, tzn. ośrodek:

jest liniowy (ϵ i σ nie są funkcjami natężenia pola e.m.),

nie jest dyspersyjny (ϵ i σ nie zależą od częstotliwości pola e.m.) – rys. 9A,D,

jest bezstratny lub małostratny ($\sigma \approx 0$) – przyjmuje się, że przy elektrycznej przewodności właściwej ośrodka większej niż 10 mS/m ze względu na wartość tłumienia, pomiary georadarowe tracą sens.

nie jest anizotropowy (ϵ i σ nie zależą od kierunków wektorów pola e.m.).

Uwzględnia się natomiast zmienność geologiczną poprzez:

niejednorodność (ϵ i σ są funkcjami miejsca).

Badania georadarowe prowadzi się tylko w ośrodkach małostratnych, przyjmując, że przypowierzchniowe utwory geologiczne są dielektrykami. W modelu dyskretnym budowę geologiczną i parametry ciał anomalnych uzyskuje się poprzez przypisywanie stałych materiałowych, tj. względnej stałej dielektrycznej ϵ_r [-], względnej stałej magnetycznej μ_r [-] oraz elektrycznej przewodności właściwej σ [mS/m] do odpowiednich węzłów siatki różnicowej (rys. 8C). Względne stałe materiałowe definiowane są następująco:

$$\begin{aligned} \epsilon &= \epsilon_r \cdot \epsilon_0 & \epsilon_0 &= 8,85 \cdot 10^{-12} [F/m] \\ \mu &= \mu_r \cdot \mu_0 & \mu_0 &= 4,5 \cdot 10^{-7} [H/m] \end{aligned} \quad (27,28)$$

gdzie: ϵ_r , μ_r – odpowiednio przenikalność elektryczna i magnetyczna próżni.

W modelowaniu numerycznym pola georadarowego względną stałą magnetyczną μ_r przyjmuje się jako wartość niezmienną, równą 1 (rys. 8C).

Zmienność kierunkową parametrów elektromagnetycznych w warstwach geologicznych uwzględnia się w modelu numerycznym poprzez liniową (najczęściej) zmianę parametrów materiałowych (rys. 8D). W rzeczywistych warunkach zmienność taka może być spowodowana np. zmiennym zaileniem czy zawilgoceniem ośrodka (rys. 9B,E) lub zmienną zawartością mediów w przestrzeni międzyziarnowej (rys. 9C,F).

Tabela 2. Parametry elektromagnetyczne wybranych materiałów.

Table 2. Electromagnetic properties of some materials.

	ε [-]	σ [mS/m]	v [m/ns]	α [dB/m]
Powietrze (pustka)	1	0	0,3	0
Woda słodka (opadowa)	81	0,5	0,033	0,1
Grunt piaszczysty (suchy-mokry)	3-30	0,01-1	0,15-0,06	0,01-0,3
Gliny, ily, muły	5-40	2-1000	0,06	1-300
Wapień	4-8	0,5-2	0,12	0,4-1
Metal (rury, kable)	1	∞ (w porównaniu z parametrami gruntu)	0,3	∞ (w porównaniu z parametrami gruntu)

W tabeli 2 zestawiono wybrane parametry elektromagnetyczne używane w modelowaniu numerycznym pola georadarowego, wyliczone z wzorów (Raynolds 1999):

$$v = \frac{c}{\sqrt{\left(\frac{\varepsilon_r \cdot \mu_r}{2}\right) \cdot \left(1 + \frac{\sigma^2}{\omega^2 \varepsilon^2}\right) + 1}} \quad v \approx \frac{c}{\sqrt{\varepsilon_r}} \quad (29,30,31,32)$$

$$\alpha = \omega \sqrt{\left(\frac{\mu \cdot \varepsilon}{2}\right) \cdot \left(1 + \frac{\sigma^2}{\omega^2 \varepsilon^2}\right) - 1} \quad \alpha \approx \frac{\sigma}{2} \sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}}$$

gdzie c – prędkość światła [m/s]; ω – częstotliwość [Hz]; j – jednostka urojona; α – współczynnik tłumienia [dB/m]; \approx – wartości przybliżone dla ośrodków bezstratnych lub małostratnych.

3.3. Warunki brzegowe i warunki graniczne

Aby rozwiązać zagadnienie propagacji fali elektromagnetycznej w modelu o skończonych rozmiarach i w skończonym czasie należy zdefiniować warunki brzegowe oraz określić okno czasowe T [ns] prowadzenia obliczeń, co opisano w poprzednim podrozdziale.

W modelowaniu pola georadarowego na górnym brzegu modelu wprowadza się warstwę o parametrach elektromagnetycznych powietrza tj. $\varepsilon_r=1, \mu_r=1, \sigma=0$ mS/m. Na pozostałych brzegach modelu przyjmuje się warunki typu ABC (*Absorbing Boundary Condition*), które powodują tłumienie fali padającej na brzeg modelu. W przypadku symulacji metodą FDTD można stosować kilka różnych typów warunków tłumiących, np. warunek typu PML – *Perfectly Matched Layers* (Berenger 1996; Chen i in., 1997) lub warunek Mur'a (Mur 1981). W programie ReflexW, brzeg modelu (rys. 8F) opisany jest jako obszar wzrostu

przewodności elektrycznej σ (a więc i tłumienia α) zgodnie z zależnością (ReflexW Manual 2005):

$$\sigma_{\max} = A \cdot \omega \cdot \varepsilon_{\text{model}} \cdot \varepsilon_0$$

$$\sigma_i = \sigma_{\text{model}} + \frac{\sigma_{\max} - \sigma_{\text{model}}}{B} \cdot i \quad \text{lub} \quad \sigma_i = \sigma_{\text{model}} \cdot e^{\left(\frac{i}{B} \cdot \ln\left(\frac{\sigma_{\max}}{\sigma_{\text{model}}}\right)\right)} \quad (33,34,35)$$

gdzie A – współczynnik określający prędkość zmian wartości σ w obszarze brzegowym; B – współczynnik określający szerokość brzegu modelu; ω – częstotliwość drgań, σ_i – wartość przewodności elektrycznej w i -tym węźle wewnątrz obszaru tłumienia na brzegu modelu; indeks „model” – określa wartości przyjęte wewnątrz modelu obliczeniowego.

Ważnym aspektem w modelowaniu pola georadarowego jest określenie warunków granicznych na granicach geologicznych lub granicy: ciało anomalne – ośrodek. Warunki graniczne najłatwiej wyprowadzić z równań Maxwella w postaci całkowej (Morawski i Gwarek 1998):

$$\oint_l \mathbf{E} dl = -\frac{\partial}{\partial t} \iint_s [\mathbf{B} \cdot \mathbf{p}] ds \quad (36)$$

$$\oint_l \mathbf{H} dl = \iint_s \left[\left(\mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \right) \cdot \mathbf{p} \right] ds \quad (37)$$

gdzie: \mathbf{p} – wektor jednostkowy prostopadły do fragmentu powierzchni granicznej s ograniczonej krzywą l .

Po odpowiednich przekształceniach równań (36,37) korzystając z prawa Gaussa i zakładając, że nie występują ładunki powierzchniowe na granicach, przyjmuje się ciągłość składowych normalnych indukcji elektrycznej na granicy dwóch ośrodków, zgodnie z zależnością:

$$\overline{D}_\perp^1 = \overline{D}_\perp^2 \quad (38)$$

i odpowiednio ciągłość składowych normalnych indukcji magnetycznej, tzn.:

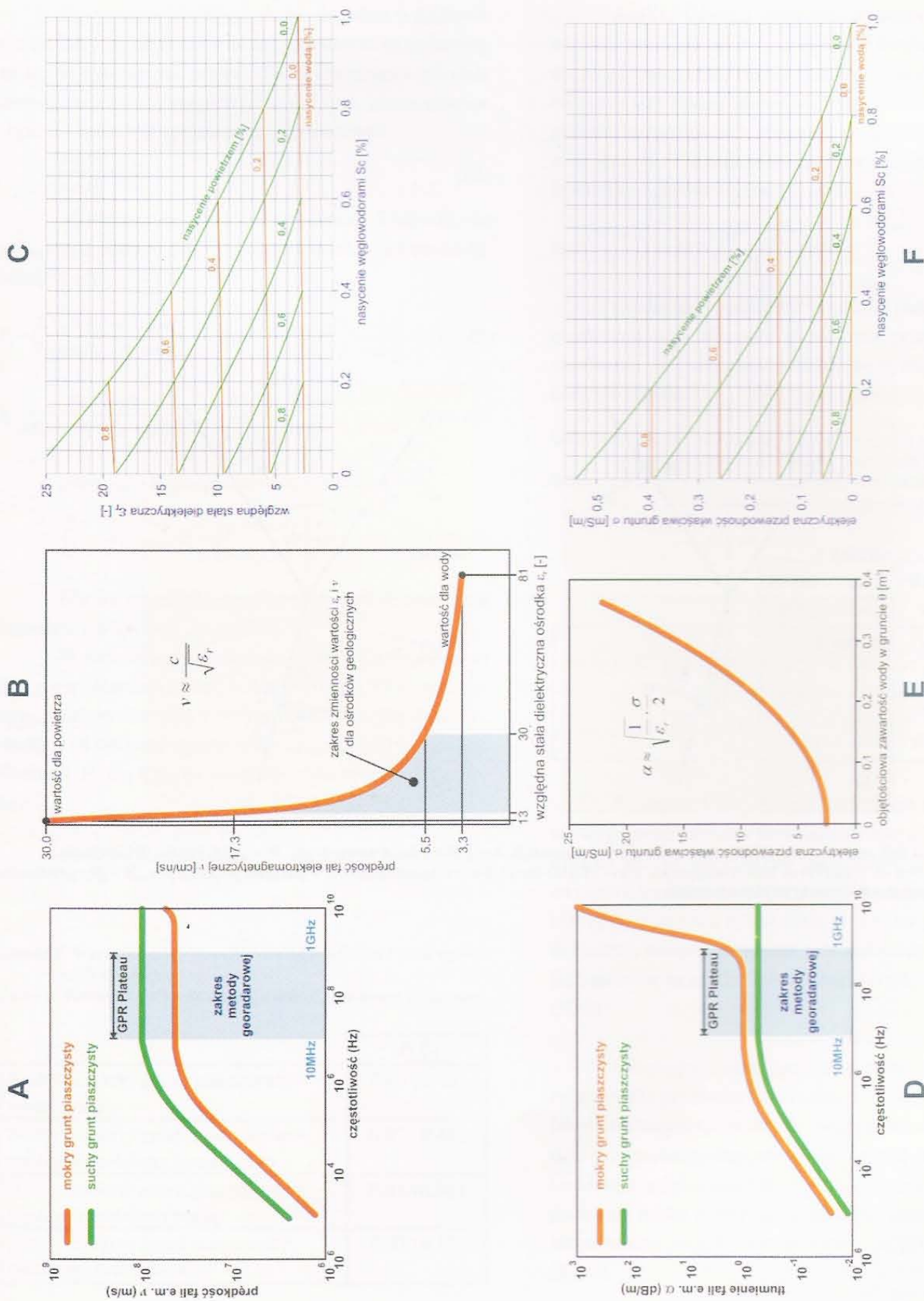
$$\overline{B}_\perp^1 = \overline{B}_\perp^2 \quad (39,40)$$

Korzystając z prawa Ampera i zakładając, że nie występuje prąd powierzchniowy na granicach, można przyjmując ciągłość składowych stycznych natężenia pola magnetycznego na granicy ośrodków w postaci:

$$\overline{H}_\parallel^1 = \overline{H}_\parallel^2 \quad (41)$$

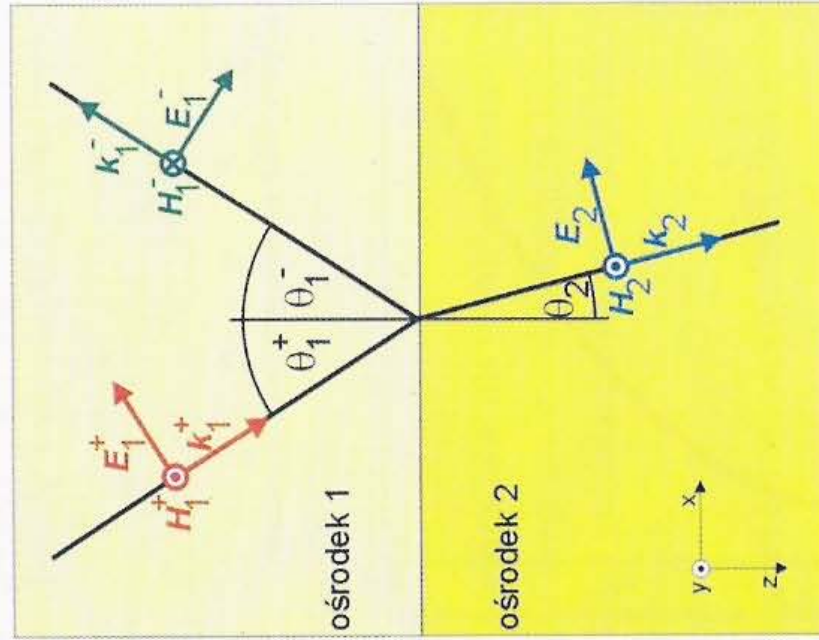
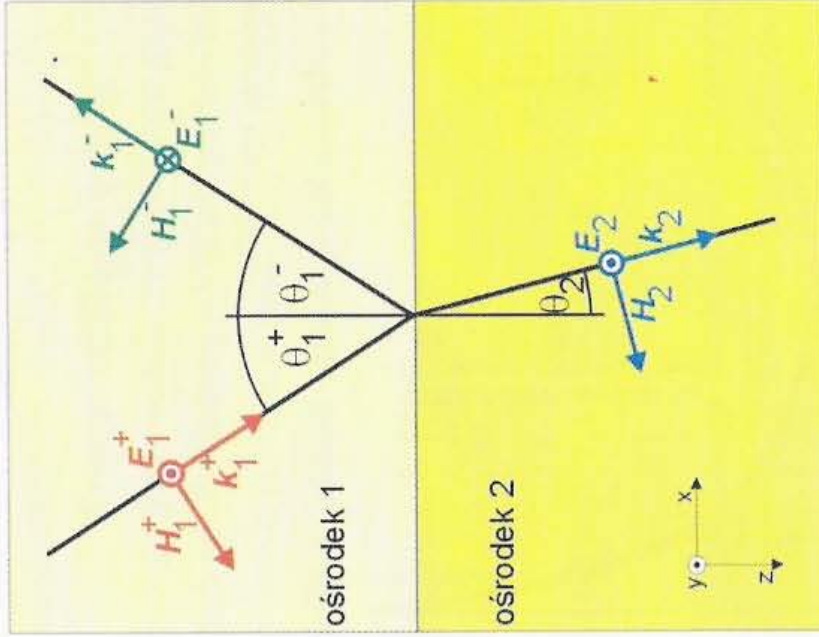
i odpowiednio ciągłość składowych stycznych natężenia pola elektrycznego, tzn.:

$$\overline{E}_\parallel^1 = \overline{E}_\parallel^2 \quad (42)$$



Rys. 9. Wybrane zależności pomiędzy względną stałą dielektryczną ϵ_r , elektryczną przewodnością właściwą σ , prędkością propagacji fali e.m. v oraz współczynnik tłumienia α , uwzględniane przy określaniu parametrów materiałów w modelu numerycznym.

Fig. 9. Some relationships between relative dielectric constant ϵ_r , electrical conductivity σ , electromagnetic wave velocity v and attenuation coefficient α , taken into account during construction of numerical model (A,D – Annan 2001; B,E – Reynolds 1999; C,F – Carcione i Seriani 2000).



Rys. 10. Odbicia fali poprzecznej (TEM) przy różnej jej polaryzacji: A – polaryzacja równoległa, B – polaryzacja prostopadła.
 Fig. 10. Reflection of Transverse Electromagnetic Wave (TEM) for different polarization: A – parallel polarization, B – perpendicular polarization (Morawski i Gwarek 1998).

Powyższe warunki graniczne decydują o zachowaniu się fali e.m. na granicy dwóch ośrodków i są podstawą, na której opierają się prawa odbicia i załamania fali elektromagnetycznej. Przy przejściu fali e.m. przez granicę (rys. 10) musi być spełnione prawo Snelliusa:

$$\frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_2} = \frac{v_1}{v_2} \quad (43)$$

Współczynniki odbicia R i transmisji T fali e.m. dla polaryzacji równoległej (\parallel) i prostopadłej (\perp) przedstawiają wzory:

$$R_{\parallel} = \frac{Z_2 \cdot \cos \theta_2 - Z_1 \cdot \cos \theta_1}{Z_2 \cdot \cos \theta_2 + Z_1 \cdot \cos \theta_1} \quad R_{\perp} = \frac{Z_2 \cdot \cos \theta_1 - Z_1 \cdot \cos \theta_2}{Z_2 \cdot \cos \theta_1 + Z_1 \cdot \cos \theta_2} \quad (44,45)$$

$$T_{\parallel} = \frac{2Z_2 \cdot \cos \theta_1}{Z_1 \cdot \cos \theta_1 + Z_2 \cdot \cos \theta_2} \quad T_{\perp} = \frac{2Z_2 \cdot \cos \theta_1}{Z_2 \cdot \cos \theta_1 + Z_1 \cdot \cos \theta_2} \quad (46,47)$$

gdzie: Z – impedancja, definiowana jako:

$$\frac{\bar{E}_{\perp}}{\bar{H}_{\perp}} = Z_f \quad Z = \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}} \quad (48,49)$$

Dla fali typu TEM impedancja falowa Z_f równa jest impedancji właściwej Z ośrodka.

W metodzie georadarowej operuje się pojęciem mocy współczynnika odbicia P_R [-] (Annan 2001) wyliczanym z zależności (50) i przyjmuje się, że musi on być większy od 0,01 aby rejestrować interpretowalne refleksy. Wartości P_R dla wybranych materiałów zestawiono w tabeli 3.

$$R = \frac{Z_1 - Z_2}{Z_1 + Z_2} = \frac{\sqrt{\epsilon_1} - \sqrt{\epsilon_2}}{\sqrt{\epsilon_1} + \sqrt{\epsilon_2}} \quad P_R = R^2 \quad (50)$$

Tabela 3. Wartości mocy współczynników odbicia P_R dla wybranych sytuacji.

Table 3. Power of reflection coefficient P_R for some situations.

	P_R [-]
Suchy (mokry) grunt piaszczysty – metal (rura)	0,07 (0,48)
Suchy (mokry) grunt piaszczysty – pustka wypełniona powietrzem	0,07 (0,48)
Suchy (mokry) grunt piaszczysty – pustka wypełniona wodą	0,46 (0,06)
Suchy (mokry) grunt piaszczysty – betonowy fundament	0,03 (0,15)

Analiza tabeli 3 pokazuje, że wzrost wilgotności ośrodka powoduje wzrost możliwości detekcyjnych metody, lecz jednocześnie rośnie tłumienie ośrodka (tabela 2), co ogranicza zasięg głębokościowy. Wzrost wilgotności gruntu (np. po opadach atmosferycznych) powoduje również wzrost rozdzielczości metody georadarowej (tabela 4) opisaną równaniami (51,52).

$$\Delta r \geq \frac{W \cdot v}{4} \quad \Delta l \geq \sqrt{\frac{W \cdot v \cdot h}{2}} \quad (51,52)$$

Gdzie: Δr – odległość w pionie pomiędzy dwoma obiektami; Δl – odległość w poziomie pomiędzy dwoma obiektami; W – szerokość połówkowa sygnału; h – głębokość do obiektu.

Tabela 4. Zmiana rozdzielczości pionowej Δr i poziomej Δl dla anten 200MHz przy różnym nasyceniu gruntu wodą.
Table 4. Changes of vertical Δr and horizontal Δl resolution due to water presence in the ground (for 200MHz antenna).

	Rozdzielczość pionowa Δr	Rozdzielczość pozioma Δl
Suchy grunt piaszczysty	$\Delta r \geq 0,22m$	$\Delta l_{5m} \geq 1,47m$ $\Delta l_{1m} \geq 2,55m$
Mokry grunt piaszczysty	$\Delta r \geq 0,07m$	$\Delta l_{5m} \geq 0,84m$ $\Delta l_{1m} \geq 1,46m$

Przedstawione pokrótce informacje na temat wpływu wilgotności ośrodka na współczynniki odbicia fali e.m. oraz na zmiany parametrów materiałowych, jak również na rozdzielczość, należy uwzględnić w modelowaniu. Dokładny opis wpływu wilgotności gruntu na pomiary i modelowanie numeryczne pola georadarowego można znaleźć m.in. w pracach Gołębiowski (2005), Marczak i in. (2005).

Odrębnym zagadnieniem w modelowaniu numerycznym dla profilowań georadarowych jest rozpraszanie fal elektromagnetycznych. Ze względu na złożoność modelu matematyczno-fizycznego, jak również skomplikowaną technikę modelowania takich sytuacji, opis tego typu zagadnienia został w artykule pominięty. Informacje na ten temat można znaleźć m.in. w Annan (2001), Gołębiowski (2005).

3.4. Źródła fali elektromagnetycznej w modelu numerycznym

Aby wymusić propagację fali elektromagnetycznej w modelu numerycznym należy przyjąć odpowiedni warunek początkowy, wprowadzając źródło fali na górnym brzegu modelu. W przypadku symulacji prowadzonych dla metody georadarowej stosuje się kilka typów źródeł fali e.m.:

- 1) Źródło punktowe (rys. 11A) – jest to źródło zdefiniowane w jednym oczku siatki na górnym brzegu modelu oraz grupa odbiorników. Stosuje się je w symulacjach profilowania prędkości CMP lub WARR.
- 2) Źródło w postaci fali płaskiej (rys. 11B) – jest to zbiór źródeł punktowych we wszystkich oczkach siatki na górnym brzegu modelu, gdzie w tych samych oczkach definiuje się odbiorniki. Stosowane, gdy morfologia terenu jest płaska lub ma jednostajny spadek.
- 3) Źródło typu *Scanning* (rys. 11D) - to symulacja przesuwania układu nadajnik-odbiornik (ze stałą odległością między nimi) po górnym brzegu modelu, co jest najbliższe rzeczywistej technice pomiarowej (rys. 1). Przy każdym kolejnym położeniu (A, B, C, ...) układu nadajnik-odbiornik przeliczane jest pole falowe w modelu. Źródło to stosuje się przy nieregularnej morfologii terenu, a dokładny jego opis można znaleźć m.in. w GPR-MAX User Guide (2003).
- 4) Źródła typu *Exploding Reflector* (rys. 11C) – to rozwiązanie numeryczne oparte jest na zasadzie Huygens'a; w uproszczeniu polega na przeniesieniu źródła fali e.m. z górnego brzegu modelu na granicę odbijającą po odpowiednim przeliczeniu energii fali, tłumienia, współczynników odbicia, prędkości, co wynika z parametrów materiałowych przyjętych w modelowaniu i odległości do granicy lub obiektu. Po odpowiednim „przeniesieniu” źródła, modeluje się propagację fali od momentu jej odbicia. Dokładny opis tego typu źródeł dla symulacji georadarowych można znaleźć m.in. w Carcione *et al.* (2002).

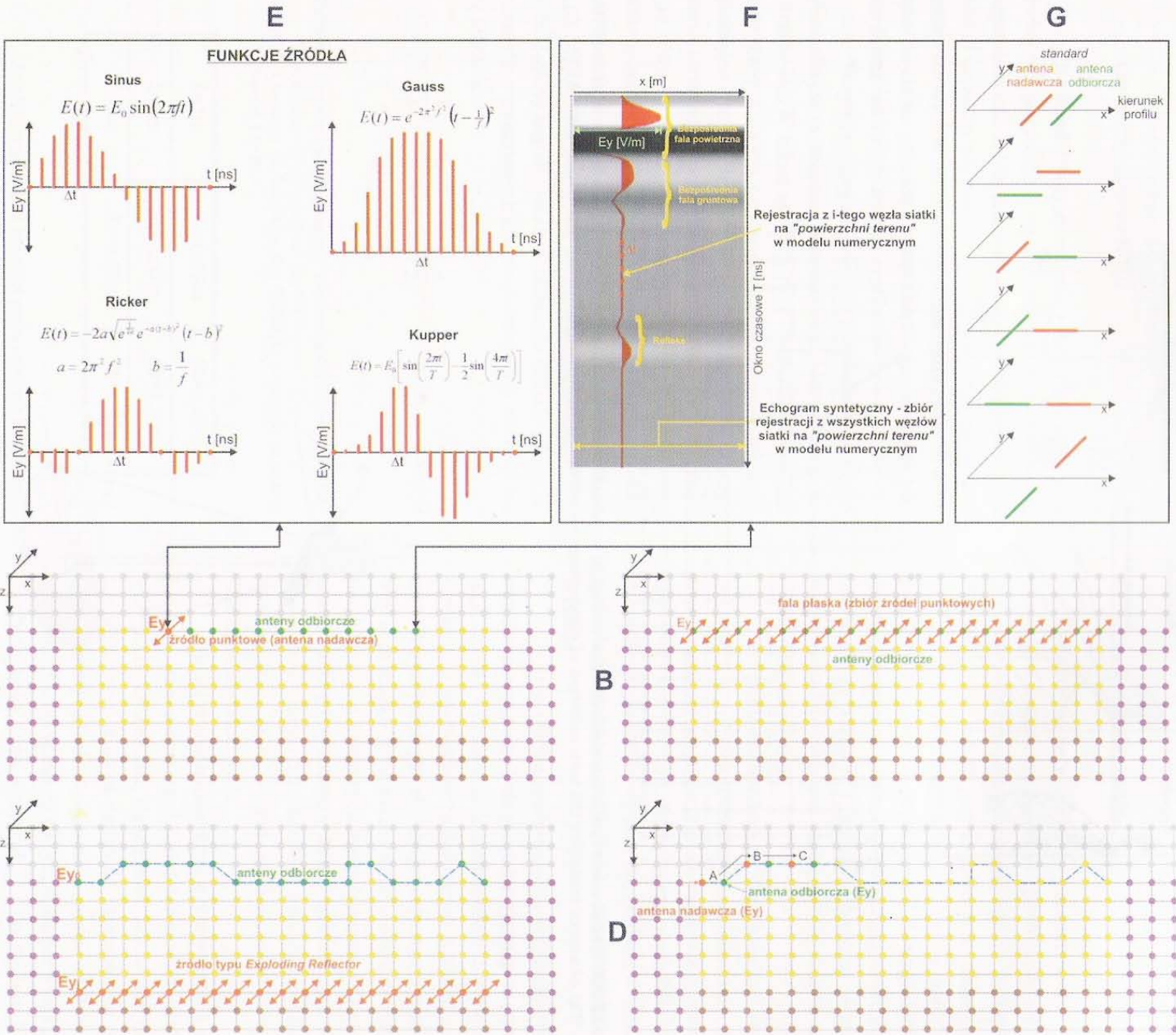
Bez względu na typ źródła wymuszającego propagację fali w modelu numerycznym symulowane jest ono poprzez wprowadzenie wektorów prądowych w określonych oczkach siatki. Wartość i zwrot wektorów źródła w kolejnych krokach obliczeniowych Δt sterowane są poprzez odpowiednią funkcję źródła (rys. 11E). Taka forma wymuszania propagacji fali w modelu numerycznym jest zgodna z rzeczywistością, gdzie przepływ impulsu prądowego w antenie nadawczej generuje propagację fali e.m. w gruncie. Rodzaj i parametry funkcji źródła dobiera się odpowiednio do rzeczywistego sygnału georadarowego w konkretnej aparaturze pomiarowej.

W odpowiednio rozmieszczonych odbiornikach (w zależności od typu źródła) rejestruje się natężenie pola elektrycznego fali odbitej powracającej na powierzchnię modelu (rys. 11F). Takie rozwiązanie jest zgodne z rzeczywistością, gdzie odbita fala e.m. docierając do powierzchni terenu generuje w antenie odbiorczej przepływ prądowy o odpowiednim natężeniu. Rejestrując wartości pola elektrycznego fali odbitej we wszystkich węzłach siatki na górnym brzegu modelu składa się je w kolekcje tras zwaną echogramem syntetycznym (rys. 11F).

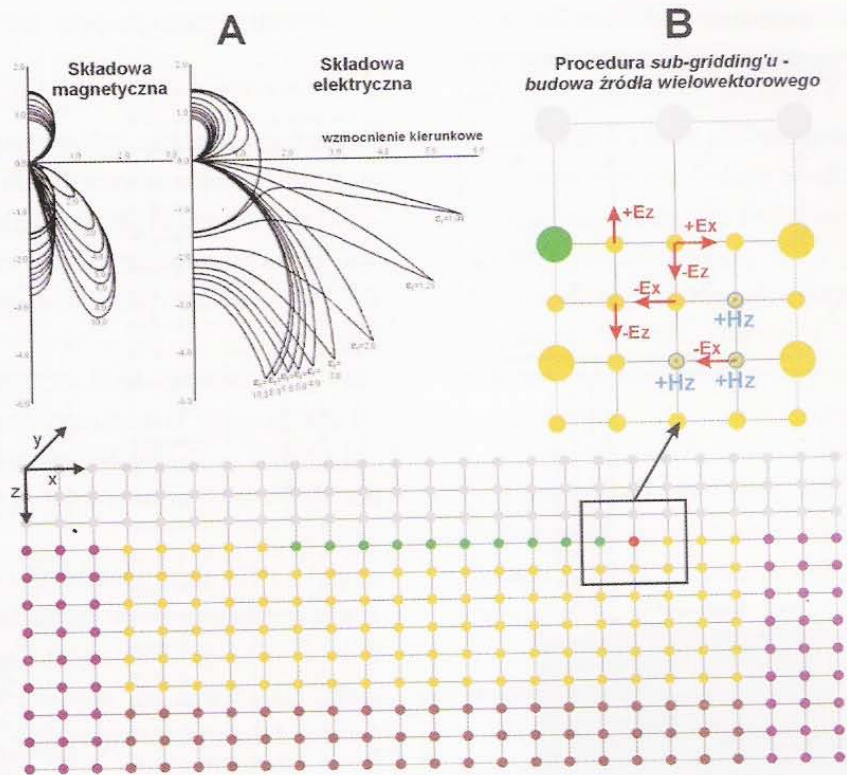
Ważnym etapem przy konstrukcji w modelu numerycznym układu nadajnik-odbiornik jest odpowiednie zorientowanie tego układu w stosunku do płaszczyzny modelu. W standardowym profilowaniu georadarowym anteny dipolowe są zorientowane prostopadle do linii profilu. Taką sytuację omówiono na rys. 11, gdzie składową E_y zdefiniowano zarówno w źródle jak i w odbiorniku. W zaawansowanych pomiarach terenowych stosuje się różne układy anteny nadawczej i odbiorczej (rys. 11G). W modelowaniu dla takich sytuacji należy odpowiednio zorientować układ nadajnik-odbiornik.

Opisane powyżej procedury konstrukcji źródła nie uwzględniają rzeczywistej radiacji fali e.m. z anteny dipolowej (rys. 12A), lecz są to rozwiązania wystarczająco dokładne przy analizie większości zagadnień interpretacyjnych.

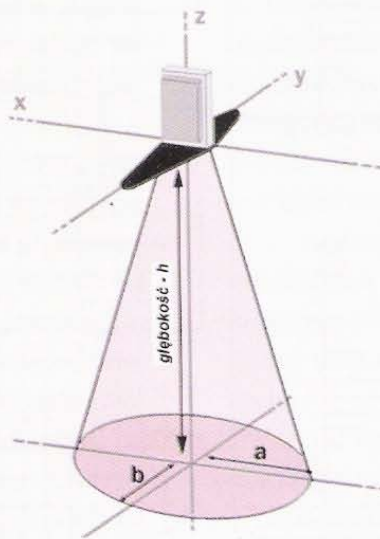
Od niedawna podejmowane są próby wprowadzenia do modelowania pola georadarowego źródła o radiacji zbliżonej do rzeczywistości (Carcione 1998, Holliger i Bergmann 1998). Rozwiązania takie opierają się na budowie dodatkowej gęstej siatki obliczeniowej (technika *sub-gridding'u*) i skonstruowanie w niej odpowiednie



Rys. 11. Najczęściej stosowane typy źródeł w modelowaniu pola georadarowego i sposób zapisu echogramu syntetycznego.
 Fig. 11. The most popular types of sources in numerical modelling of GPR wave field and the way of synthetic echogram registration.



Rys. 12. Sposób modelowania źródła fali elektromagnetycznej (B) o radiacji zbliżonej do rzeczywistej radiacji z anteny dipolowej (A).
 Fig. 12. Way of source modelling (B) with radiation of electromagnetic wave similar to real radiation from dipole antenna (A).



Rys. 13. Kształt strefy śledzenia.
 Fig. 13. Shape of footprint (Annan 2001).

go źródła wielowektorowego (rys. 12B) symulującego rzeczywistą radiację energii z anteny.

3.5. Modelowanie dwuwymiarowe (2D) czy trójwymiarowe (3D)?

Na dzień dzisiejszy nie ma na rynku aparatury georadarowej pozwalającej na prowadzenie pomiarów w pełnym systemie trójwymiarowym (3D). Trójwymiarowość badań uzyskuje się poprzez przeprowadzenie profilowań georadarowych w siatce profili, a następnie złożenie wyników na etapie cyfrowej analizy danych pomiarowych i interpolacji informacji między profilami.

W numerycznej analizie pola georadarowego istnieje możliwość rozwiązania układu równań Maxwella w przestrzeni 3D. W takiej sytuacji przy budowie modeli numerycznych należy odpowiedzieć na pytanie: jak duży powinien być 3. rozmiar modelu (y) biorąc pod uwagę zarówno technikę prowadzenia pomiarów – profilowanie, jak również wąski obszar radiacji energii z dipolowej anteny nadawczej, tzw. strefa śledzenia (*footprint*). Obszar ten (rys. 13) w kształcie elipsy o średnicach $2a$ i $2b$ (53,54) określa strefę, od której następują odbicie fali e.m. Zmiany kształtu strefy śledzenia w gruncie piaszczystym dla przykładowych trzech głębokości h zestawiono w tabeli 5.

$$a = \frac{\lambda}{4} + \frac{h}{\sqrt{\epsilon_r - 1}} \quad b = \frac{a}{2} \quad (53,54)$$

Tabela 5. Zmiany rozmiaru strefy śledzenia dla anteny 200MHz w gruncie piaszczystym ($\epsilon_r=9$).

Table 5. Changes of footprint for 200MHz antenna in sandy ground ($\epsilon_r=9$).

$h=1\text{m}$	$2a=0,96\text{m}$	$2b=0,48\text{m}$
$h=3\text{m}$	$2a=2,37\text{m}$	$2b=1,19\text{m}$
$h=5\text{m}$	$2a=3,79\text{m}$	$2b=1,89\text{m}$

Analiza wartości z tabeli 5 pokazuje, że modelowanie georadarowe w układzie 3D ma sens jedynie dla zmienności geometrii obiektów lub parametrów elektromagnetycznych w kierunku y tylko w obszarze o szerokości $2b$.

Z praktycznego punktu widzenia, dla większości sytuacji, modelowanie pola georadarowego da wystarczająco dokładne wyniki w układzie 2D.

4. Podsumowanie

Pomimo, że w artykule przedstawiono, po raz pierwszy w Polsce, tak obszerny opis techniki numerycznego modelowania pola georadarowego dla profilowań refleksyjnych, to jednak jest to tylko mały fragment całej problematyki związanej z zastosowaniem symulacji komputerowych dla metody georadarowej. Ze względu na ograniczoną objętość artykułu, nie poruszono w nim zupełnie zagadnień związanych z innymi technikami terenowych badań georadarowych, czy problematykę rozpraszania fal elektromagnetycznych.

Ze względu na coraz powszechniejsze używanie georadaru w różnych dziedzinach, znajdowanie nowych zastosowań dla tej metody oraz zwiększanie mocy obliczeniowej komputerów, numeryczne modelowanie pola georadarowego stanie się prawdopodobnie w niedalekiej przyszłości standardową techniką wspomagającą interpretację.

W artykule nie przedstawiono przykładów modelowania numerycznego pola georadarowego, ponieważ można je znaleźć w cytowaniach zamieszczonych w pierwszym rozdziale, a wymagałoby to dodatkowo dokładnego opisu technik interpretacyjnych echogramów syntetycznych, co wykracza daleko poza zakres niniejszego artykułu. Czytelników zainteresowanych zastosowaniem modelowania numerycznego w rozwiązywaniu konkretnych problemów interpretacyjnych z dziedziny metody georadarowej, autor odsyła m.in. do swoich publikacji, oraz cytowanych publikacji zagranicznych.

Modelowanie numeryczne jest nowoczesną metodą wspomaganą interpretacji badań terenowych, zwłaszcza w sytuacji gdy zawodzą standardowo stosowane techniki lub wkraczamy w nową dziedzinę zastosowania metody GPR. Należy jednak zdawać sobie sprawę z faktu, że modelowanie numeryczne da na tyle dokładne wyniki, na ile dokładne będą dane wprowadzone do modelu tj. stałe materiałowe, informacje geometryczne i in. Z tego powodu dla poprawności i jednoznaczności końcowej interpretacji, należy oprzeć ją zawsze o wszelkie dostępne

informacje, m.in. echogramy pomiarowe, echogramy syntetyczne, dane otworowe, informacje archeologiczne, geotechniczne i in.

Podziękowania

Praca została sfinansowana ze środków Akademii Górniczo-Hutniczej i zrealizowana w ramach badań własnych nr 10.10.140.886 i prac statutowych nr 11.11.140.06.

Bibliografia

- Annan A. P., 2001, *Ground Penetrating Radar – Workshop Notes*. Sensor and Software Inc., Canada.
- Berenger J. P., 1996, *Three-dimensional Perfectly Matched Layer for the Absorption of Electromagnetic Waves*. Journal of Comput. Physics, no.127, 363-379.
- Bergmann T., Robertsson J., Holliger K., 1996, *Numerical Properties of Staggered Finite Difference Solutions of Maxwell's Equations for Ground Penetrating Radar Modeling*. Geophys. Res. Letter, vol.23, no.1, 45-48.
- Bergmann T., Robertsson J., Holliger K., 1998, *Finite Difference Modeling of Electromagnetic Wave Propagation in Dispersive and Attenuating Media*. Geophysics, vol. 63, iss.3, 856-867.
- Bourgeois J. M., Smith G. S., 1996, *A Fully Three-dimensional Simulation of a Ground Penetrating Radar. FDTD Theory Compared with Experiment*. IEEE Trans. Geosciences Remote Sensing, vol. 34, no.1, 36-44.
- Carcione J. M., 1996a, *Ground Penetrating Radar: Wave Theory and Numerical Simulation in Lossy, Anisotropic Media*. Geophysics, vol. 61, no.6, 1664-1677.
- Carcione J. M., 1996b, *Ground Radar Simulation for Archeological Applications*. Geophysical Prospecting, no. 44, 871-888.
- Carcione J. M., 1998, *Radiation Patterns for 2D GPR Forward Modeling*. Geophysics, vol.63, iss.2, 424-430.
- Carcione J. M., Pinero F.L., Zamparo M., 2002, *Exploding Reflector Concept for Ground Penetrating Radar Modeling*. Annali di Geofisica, Włochy.
- Carcione J. M., Seriani G., 2000, *An Electromagnetic Modeling Tool for the Detection of Hydrocarbons*

- in the Subsoil*. Geophysical Prospecting, no.48, 231-256.
- Chen Y. H., Chew W. C., Oristaglio M. L., 1997, *Application of Perfectly Matched Layers to the Transient Modeling of Subsurface Electromagnetic Problems*. Geophysics, vol. 62, iss.6.
- Dahlquist G., Bjorck A., 1983, *Metody numeryczne*. PWN, Warszawa.
- Fornberg B., 2002, *Some Numerical Techniques for Maxwell's Equations in Different Types of Geometries*. University of Colorado, Department of Applied Mathematics, Boulder, USA.
- Fortuna Z., Macukow B., Wąsowski J., 1998, *Metody numeryczne*. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa.
- Gołębiowski T., 2006, *3D GPR measurements for archaeological application aiding in interpretation by numerical modeling*. Acta Geophysica Polonica, Warszawa – w druku.
- Gołębiowski T., 2004, *Wprowadzenie do metodyki interpretacji badań georadarowych przy użyciu procedury modelowania numerycznego*. Przegląd Geologiczny, vol.52, nr.7, Warszawa, 363-568.
- Gołębiowski T., 2005, *Modelowanie numeryczne pola georadarowego w badaniach gruntów skażonych substancjami ropopochodnymi*. Praca doktorska, AGH WGGiOŚ, Kraków, 192.
- Gołębiowski T., Karczewski J., 2003, *Modelowanie numeryczne georadarowego pola falowego przy użyciu metody pseudospektralnej PSFD*. Kwartalnik Geologia AGH, t. 29, z. 1-2, Kraków, 33-46.
- GPR-MAX User Guide, 2003, *Twórca – Antonis Giannopoulos*, University of Edinburgh, School of Engineering and Electronics, Institute for Infrastructure and Environment, Wielka Brytania.
- Holliger K., 2002, *Finite Difference Modeling of Ground Penetrating Radar Data*. 9-th International Conference on Ground Penetrating Radar, Santa Barbara, California, USA.
- Holliger K., Bergmann T., 1998, *Accurate and Efficient FDTD Modeling of Ground Penetrating Radar Antenna Radiation*. Geophys. Res. Letter, vol.25, no.20, 3883-3886.
- Mala GeoScience, 2005, Dokumentacja firmowa, Mala, Szwecja.
- Marcak H., Gołębiowski T., 2005, *Computer Simulation of Hydrocarbon Flow and Wave Field for Interpretation GPR Measurements in Contaminated Sites*. Materiały konferencyjne SAGEEP'05, Atlanta, 837-846.
- Marcak H., Gołębiowski T., Tomecka-Suchoń S., 2005, *Analiza możliwości wykorzystania georadarowych fal refrakcyjnych do lokalizacji zmian w budowie wałów przeciwpowodziowych*. Kwartalnik Geologia AGH, t. 31, z. 3, Kraków.
- Morawski T., Gwarek W., 1998, *Pola i fale elektromagnetyczne*. WNT, Warszawa.
- Mur G., 1981, *Absorbing Boundary Conditions for Finite Difference Approximation of Time-domain Electromagnetic Field Equations*. IEEE-Trans. Electromag. Compat., no. 23, 1073-1077.
- ReflexW Manual, 2005, *Sandmeier-Geo*, Karlsruhe, Niemcy.
- Reynolds J. M., 1999, *An Introduction to Applied and Environmental Geophysics*. John Wiley & Sons, Wielka Brytania.
- Roberts R. L., Daniels J. J., 1997, *Modeling Near-field GPR in Three Dimensions Using the FDTD Method*. Geophysics., vol. 62, no.4, 1114-1126.

Yee K. S., 1966, *Numerical Solution of Initial Boundary Value Problems Involving Maxwell's Equations in Isotropic Media*. IEEE Trans. Antenna. Propagation, no. 14, 302-307.

Summary

One of the most popular non-distractive geophysical method nowadays is Ground Penetrating Radar (GPR). GPR is the investigation method using electromagnetic waves in the range of 10MHz - 1GHz for probing the geological structures and finding underground objects. There are many kinds of GPR surveys techniques and GPR antennas, but in this paper only reflection profiling (fig. 1) for dipole, bistatic antennas (fig. 3, table 1) was described. The technical specification of GPR system assumed, in the paper, is on the basis of Mala GeoScience documentation (fig. 2). According to the technique of the terrain surveys, preliminary processing and interpretation are possible during the measurements (fig. 4). Frequently, due to complicated geological structures, anisotropy and heterogeneity etc., interpretation in the terrain becomes extremely difficult.

In the world the different techniques of aiding GPR data interpretation are being used. One of them is numerical modelling of electromagnetic (GPR) wave field (fig. 5). So far, this technique has been used very seldom in Poland, so that the author decided to describe it in a more detailed way. In the paper only the most popular nowadays technique of numerical modelling of GPR wave field, called *Finite Difference Time Domain Method* (FDTD), is presented.

The set of Maxwell's equations with assumed boundary conditions have to be solved in numerical analysis of the electromagnetic (GPR) wave field. These equations describe the distribution of electromagnetic field in the numerical model caused by GPR wave propagation (fig. 6). In the FDTD method the continuous, geological model (fig. 7) has to be transformed into discrete, numerical model (fig. 8A), what causes the transformation of Maxwell's equations and values of components (E_x , E_y , E_z , H_x , H_y , H_z) of electromagnetic field are solved only in the grid points (fig. 8B). Some techniques of changes of grid-zone shapes are applied to fit grid to the shape of the objects in discrete model (figs. 8E1 and 8E2).

In the numerical model the geological structures and anomaly-bodies are represented by different values of relative dielectric constant ϵ_r [-], relative magnetic permeability μ_r [-] and electrical conductivity σ [mS/m]

assumed in the grid points (figs. 8C and 8D; fig. 9; table 2). On the upper model boundary the layer with air properties is assumed, and on the other boundaries Absorbing Boundary Conditions are introduced (fig. 8F).

Depending on the type of numerical analysis for GPR method different kinds of electromagnetic wave sources are introduced to the top part of model; e.g.: point source, plane wave, scanning-source, exploding reflector (figs. 11A,B,C,D). These sources have to be fit to the characteristic of antenna (fig. 11E) and to the set of dipoles (fig. 11G).

The result of computer simulation is synthetic echogram, which is constructed by gathering the registration of Ey component of reflected wave (fig. 10) at all grid points on the top of the model. The possibility of registration of reflected electromagnetic wave is depended, during both terrain surveys and modelling, on the reflection

coefficient (table 3) and the resolution of method (table 4).

The two-dimensional (2D) measurements and modelling are standard nowadays in GPR method, but there can be found in literature results of three-dimensional (3D) modelling. The third dimension of 3D model must be applied on the basis of the consideration of footprint (fig. 13, table 5). Additionally, for advanced numerical analysis the radiation pattern of dipole antenna should be modelled (fig. 12).

Even though, the paper presents, first time in Poland, a rich description of the technique of numerical modelling for GPR reflection profiling, but only some part of all problems was considered. Due to limit of the paper many problems, like for example: other measurements techniques, way of synthetic echograms interpretation or scattering effects of georadar waves were omitted.

ZBIGNIEW KASINA¹, NASAR EL ZAWAM¹

RECOVERING NEAR SURFACE VELOCITY FIELDS BY MEANS OF TURNING RAY TOMOGRAPHY – MODEL STUDY

Key words:

geophysics, seismics, seismic tomography, turning ray tomography

Abstract

In the paper the analysis of the possibilities of recovering near surface velocity fields by means of tomographic inversion of first breaks on reflection seismics records is presented. The analysis was accomplished on synthetic records generated with the finite difference method in the acoustic variant. Two velocity models of near surface medium were considered: gradient model and the model of gradient layer over constant velocity basement. In the gradient layer the zone with anomalous velocity – decreased or increased in relation to surroundings – was been embedded. The modeling of theoretical wave pattern was realized using the Finite Difference Modeling procedure in seismic data processing system ProMAX. The analysis of the possibilities of recovering near surface velocity fields by means of tomographic inversion was carried out using procedures of turning ray tomography available in the ProMAX system. The effect of different tomographic inversion parameters on results of imaging near surface velocity fields was estimated.

ODTWARZANIE PRZYPOWIERZCHNIOWYCH ROZKŁADÓW PRĘDKOŚCI ZA POMOCĄ TOMOGRAFII FAL REFRAGOWANYCH – STUDIUM MODELOWE

Słowa kluczowe:

geofizyka, sejsmika, tomografia sejsmiczna, tomografia fal refragowanych

Abstrakt

W pracy przedstawiono analizę możliwości odtwarzania przypowierzchniowych rozkładów prędkości za pomocą inwersji tomograficznej pierwszych wstąpień rekordów sejsmiki refleksyjnej. Analizę przeprowadzono na rekordach syntetycznych wygenerowanych za pomocą metod różnic skończonych w wariancie akustycznym. W rozważaniach uwzględniono

¹Akademia Górniczo-Hutnicza; Wydział Geologii, Geofizyki i Ochrony Środowiska; Kraków.

dwa modele prędkościowe przypowierzchniowego ośrodka: model gradientowy oraz model warstwy gradientowej na podłożu o stałej prędkości. W warstwie gradientowej wprowadzono strefę o anomalnej – obniżonej lub podwyższonej w stosunku do otoczenia – prędkości. Modelowanie teoretycznego obrazu falowego wykonano za pomocą procedury Finite Difference Modeling w systemie przetwarzania danych sejsmicznych ProMAX. Analizę możliwości odtwarzania przypowierzchniowych rozkładów prędkości za pomocą inwersji tomograficznej wykonano wykorzystując procedury tomografii fal refragowanych dostępne w systemie ProMAX. Określono wpływ różnych parametrów inwersji tomograficznej na wyniki odwzorowania przypowierzchniowego pola prędkości.

1. Introduction

The recovering of near surface velocity fields plays an essential role in seismic engineering interpretation as well as in the processing of seismic prospecting data. In the second case the correct definition of near surface velocity model determines the precision of static corrections estimation having main effect on the process of stacking in CDP method and on the reliability of the resulted time sections. Additionally, the reconstruction of near surface velocity model is treated as an important step of defining migration velocity model. The accuracy of this model determines the effectiveness of the most expensive and advanced processing procedure – migration known as the main tool of recognition geological medium with complicated structures.

In the presented paper the attention was paid to the evaluation of the possibilities of using first breaks on surface seismic records to recover near surface velocity fields by means of tomographic inversion realized in the variant of turning ray tomography. Such a tool found its place in the production seismic data processing systems (e.g. systems ProMAX and OMEGA) and has been the subject of the interest in the last years (ZHU 2002). In the analysis the tomographic procedures of ProMAX system were used.

The analysis was accomplished on synthetic records generated with the finite difference method in acoustic variant. Two velocity models of near surface medium were considered: gradient model and the model of gradient layer over constant velocity basement. In the gradient layer the zone with anomalous velocity – decreased or increased in relation to surroundings – was embedded. The modeling of theoretical wave pattern was realized using the Finite Difference Modeling procedure in seismic data processing system ProMAX.

The effect of different tomographic inversion parameters on results of imaging near surface velocity fields was estimated.

2. The construction of input data to tomographic inversion

Several gradient models of near surface medium with velocity anomalies was used in the analysis of tomographic inversion effectiveness. The first model was the gradient one with low velocity zone (fig. 1). The velocity was increasing from 800 m/s near the surface to 2900 m/s for the maximum depth 300 m. The zone with low velocity (800 m/s) was located in the range of depth 60-100 m and its width was 104 CDP (for CDP interval equal 5 m). The velocity model used in the modeling process contained 1200 CDPs. In the second model with high velocity anomaly the constant velocity layer was embedded in the gradient model with velocity 2500 m/s on depth 260 m and the velocity in the anomaly zone was changed from 800 m/s to 1500 m/s. For such a model we can observe the turning wave in the first gradient layer and the head wave generated on the boundary between the first and the second layer.

To model the full wave pattern of records with the finite difference method in acoustic variant the *Finite Difference Modeling (FDM)* procedure was applied in the processing system ProMAX. The surface point source was assumed with source signal in the version of minimum-phase Ricker signal with pick frequency 40 Hz. In the modeling process the traces of 10 split-spreads were generated. Each spread contained 601 receivers with the receiver interval equal to 10 m (2 CDPs). The shot interval was equal to 100 m (20 CDPs). The modeling was performed for the following effective dimensions of the grid: $\Delta x = \Delta z = 2.66$ m and for the time interval equal to $\Delta t =$

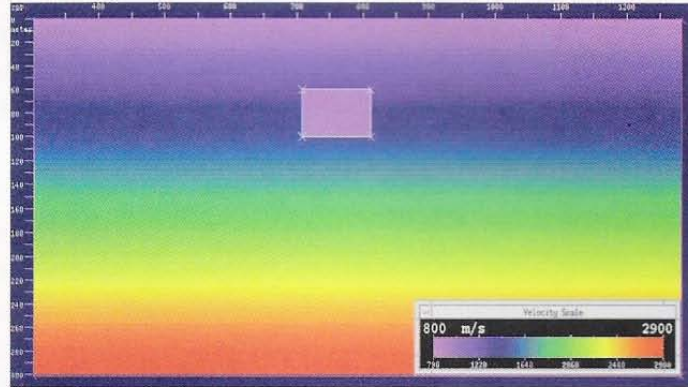


Fig. 1. Velocity model of the gradient medium with low velocity anomaly ($v = 800$ m/s); horizontal axis – CDP's number, vertical axis – depth in meters.

Ryc. 1. Model prędkościowy ośrodka gradientowego z niskoprędkościową anomalią ($v = 800$ m/s); oś pozioma – numery punktów CDP, oś pionowa – głębokość w metrach.

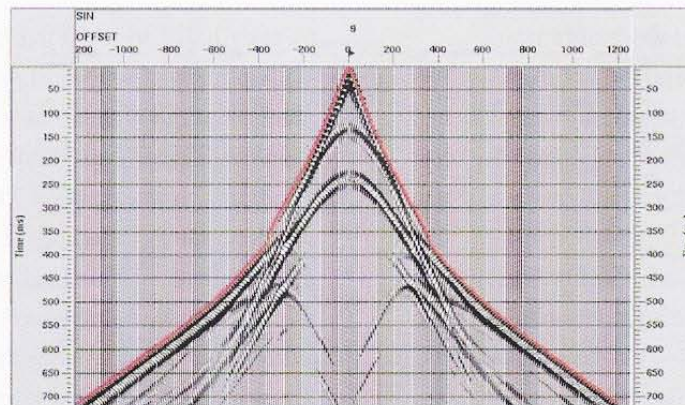


Fig. 2. Theoretical wave pattern of selected record obtained with FDM modeling for the first velocity model (from Fig. 1) with low velocity anomaly with results of first break picking marked (red); horizontal axis – offset in meters.

Ryc. 2. Teoretyczny obraz falowy wybranego rekordu uzyskanego za pomocą procedury modelowania FDM dla pierwszego modelu prędkościowego (z ryc.1) z niskoprędkościową anomalią, z naniesionymi wynikami punktowania pierwszych wstąpień (czerwony); oś pozioma – offset w metrach.

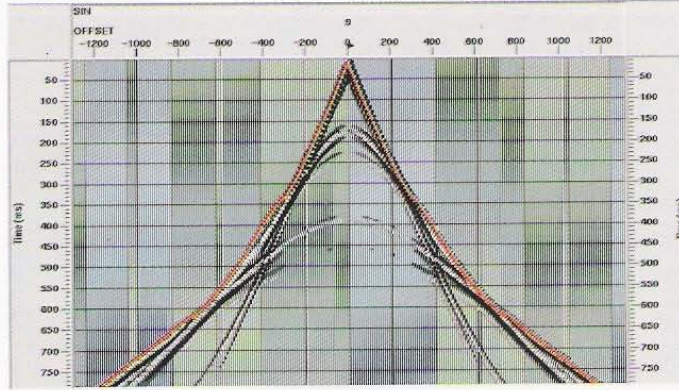


Fig. 3. Theoretical wave pattern of selected record obtained with FDM modeling for the second velocity model with high velocity anomaly with results of first break picking marked (red); horizontal axis – offset in meters.

Ryc. 3. Teoretyczny obraz falowy wybranego rekordu uzyskanego za pomocą procedury modelowania FDM dla drugiego modelu prędkościowego z wysokoprędkościową anomalią, z naniesionymi wynikami punktowania pierwszych wstąpień (czerwony); oś pozioma – offset w metrach.

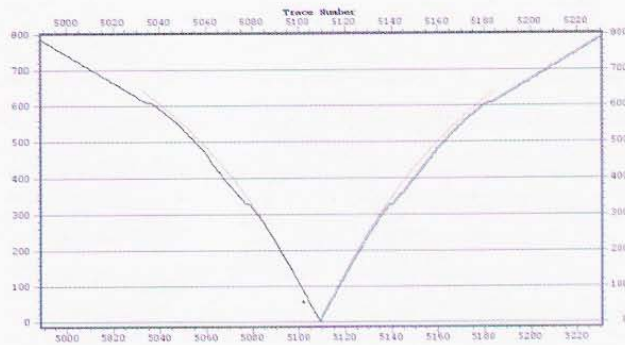


Fig. 4. The traveltimes graphs of turning wave (defined with picking first breaks – blue) in the medium with high velocity anomaly and calculated traveltimes (red) in the medium without velocity anomaly; horizontal axis – trace number, vertical axis traveltimes in ms.

Ryc. 4. Wykresy czasów przebiegu fali refragowanej (określonych na drodze punktowania pierwszych wstąpień – niebieski) w ośrodku z wysokoprędkościową anomalią oraz obliczonych czasów przebiegu (czerwony) fali w ośrodku bez anomalii prędkościowej; oś pozioma – numer trasy, oś pionowa – czasy w ms.

0.53 ms. These values of modeling parameters let us avoid numerical errors and assure calculation stability. The selected synthetic record calculated for the first velocity model (model with low velocity anomaly) is showed in fig. 2. The selected synthetic record calculated for the second velocity model (model with high velocity anomaly) is showed in fig. 3.

The next step of the preparation of input data to tomographic inversion was the defining the traveltimes of turning ray wave for the starting velocity model. The starting models were created from original velocity models (fig. 1, fig. 2) by removing the anomalous zone. Additionally, one starting gradient model in the case of the second velocity model was created using the interpretation of first breaks on model records without velocity anomaly by means of *Create Turning Ray Velocity* procedure available in the ProMAX system. The traveltimes for starting velocity model were defined using the *Turning Ray Tracing* procedure in the ProMAX system or were identified with first breaks traveltimes picked on the records without velocity anomaly. The example of the graph containing first breaks traveltimes from records with high velocity anomaly and the traveltimes calculated for the second starting velocity model by means of *Turning Ray Tracing* is illustrated in fig. 4.

The last step of the preparation of input data to tomographic inversion was to define time differences between picked and calculated (for starting velocity models) traveltimes using the *Compute Residual Travel Times* procedure available in the ProMAX system.

The tomographic inversion in the discussed variant of turning waves is realized in the ProMAX system with the *Turning Ray Tomography* procedure. According to the well known ray tomography theory (e.g. Kasina 2001) during the consecutive tomographic inversions, in which the resulted velocity field of previous inversion is – after the process of smoothing and adding constraints – the input velocity field to the next inversion, we obtain – for correct selection inversion parameters – the reducing of the differences between picked and calculated traveltimes. These differences are named residual traveltimes and their reduction is the basic criterion of the inversion effectiveness evaluation.

4. The parameters of tomographic inversion and the principles of their selection

The *Turning Ray Tomography* procedure takes the travel time deviations between picked travel times and those predicted for a starting model to adjust the velocity along the ray paths of the starting model to reduce the travel time deviations. The main parameters of *Turning Ray Tomography* comprise:

- minimum eigenvalue to invert,
- horizontal smoothing (in meters),
- vertical smoothing (in meters),
- damping factor (in seismic ray number),
- maximum residual travel time to use (in ms),
- norm (L2 or L1) used in the process of minimization of the objective function,
- defining model weighting input to the inversion.

The basic principles of parameter values selection are presented below:

- the value of ray damping should be equal to a fourth of the average ray density;
- if the residual travel times are not improved, then we use a smaller eigenvalue or less smoothing;
- the L1 norm is useful when your travel time picks are noisy or have many bad picks;
- variable model weighting can be used to disallow velocity variations in certain parts of the model and encourage them in others; we use the values of weights from the;
- a smaller value of eigenvalue inverts more subtle features, even features with some imposed smoothing, but increases noise effects; this value should be about 0,05 – 0,2;
- the scale of velocity field smoothing (parameter *horizontal smoothing*) should be decreased in consecutive iterations.

5. The analysis of the tomographic inversion effectiveness

The main goal of realized calculations was the evaluation of the effect of selection of tomographic inversion parameters on the accuracy of the reconstruction of near surface velocity fields. The precision of such reconstruction

was evaluated by means of the analysis of the resulted velocity fields, the difference between resulted and assumed velocity fields as well as the differences between picked and theoretically calculated traveltimes. These time differences are named residual traveltimes. Three consecutive iterations of tomographic inversion were accomplished for the selected parameters values and then the value of selected parameter was changed.

Three iterations of tomographic inversion were accomplished for established smoothing parameters of horizontal smoothing (600 m) and vertical smoothing (75 m) for established minimum eigenvalue 0.2. The resulted velocity field is showed in fig. 5. The anomalous velocity zone which the assumed position is marked by a white rectangle is difficult to interpret. The error of velocity estimation in this zone reaches values 100 - 230 m. The graph of residual traveltimes is presented in fig. 6. These times were reduced from the starting values (-4) ms - 24 ms to the values 0 ms - 13 ms after third inversion. The differences between residual traveltimes after second and third inversion were very small.

Introducing a variation of horizontal smoothing parameter in consecutive inversions from value 600 m, through the value of 300 m to the value of 150 m after the third inversion improved not so much the reconstruction of the anomalous zone (fig. 7) at the cost of some deformation of the deepest part of the velocity field below anomaly. We can observe essential decreasing of the residual traveltimes for the largest offsets to the value about 2 ms after the third inversion (fig. 8).

In the next step the calculations were accomplished for the established horizontal smoothing (600 m) and varying value of vertical smoothing through values 75, 50 and 25 in consecutive inversions. We observe decreasing residual traveltimes in the range of intermediate offsets. The application of vertical smoothing 25 m and varying horizontal smoothing parameter in consecutive inversions through values 600, 300 and 150 m brought the best reconstruction of the anomalous zone (fig. 9) and caused the essential reduction of residual traveltimes for small, intermediate and large offsets after the third inversion (fig. 10).

Beside the smoothing parameters the effect of other parameters was analyzed too. Decreasing the *mini-*

imum eigenvalue from a value of 0.2 to a value of 0.1 and established remaining parameters (horizontal smoothing 600 m, vertical smoothing 75 m) caused some lowering of residual traveltimes for the largest offsets. The effect of changing *damping parameter* marked only for intermediate and largest offsets. Among four values of this parameter (5, 10, 15, 20) for the value of 5.0 we can observe noticeable decreasing of residual traveltimes. The application of the norm L1 instead of the norm L2 didn't introduce - as one could expect for data with good quality of first break picks - essential changes.

In the above analysis it was assumed that the starting velocity model is the exact gradient model of the medium without anomaly. Two starting gradient models were additionally considered to evaluate the effect of error of defining starting model: one with vertical gradient increased by 10% (gradient value 7.7 m/s per meter) and the second one with gradient decreased by 10% (gradient value 6.3 m/s per meter). Differences of residual traveltimes for these two cases were essential only after the first inversion. After the second and the third inversion the residual traveltimes practically were the same. Lowering the value of a parameter named *Maximum travel time residual to use* from 10 to 5 after the second and the third inversion didn't decreased the maximum values of residual traveltimes in the zone of intermediate offsets.

Summing up the analysis results in the considered case of gradient model with low velocity anomaly we can state that:

- tomographic inversion lets us locate the low velocity anomaly; the accuracy of positioning is greater in the horizontal direction than in the vertical direction;
- the velocities in anomalous zone are reconstructed for considered iteration number with the error about 19-25% (the velocities are generally too high);
- the greatest lowering of the residual traveltimes can be observed after the first inversion;
- when the starting model is taken with error the model with lowered gradient is much better;
- using the gradual lowering of horizontal smoothing after consecutive inversions with lower value of vertical smoothing and lowered minimum

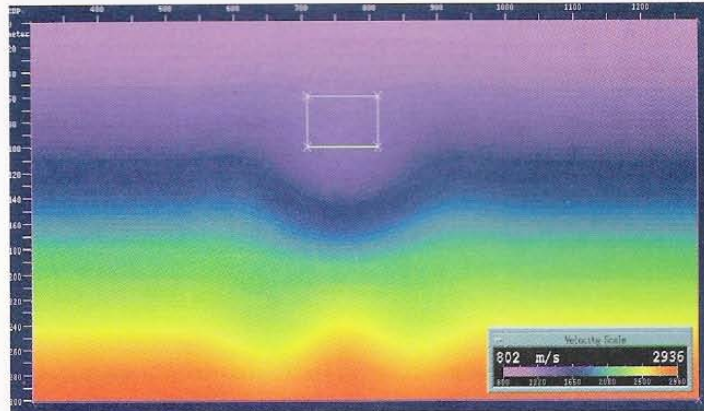


Fig. 5. The velocity field after 3 tomographic inversions without changing the parameter of horizontal (600 m) and vertical (75 m) smoothing; horizontal axis – CDP number, vertical axis – depth in meters.

Ryc. 5. Rozkład prędkości po 3 inwersjach tomograficznych bez dokonywania zmian parametru wygładzania poziomego (600 m) i pionowego (75 m); oś pozioma – numer CDP, oś pionowa – głębokość w metrach.

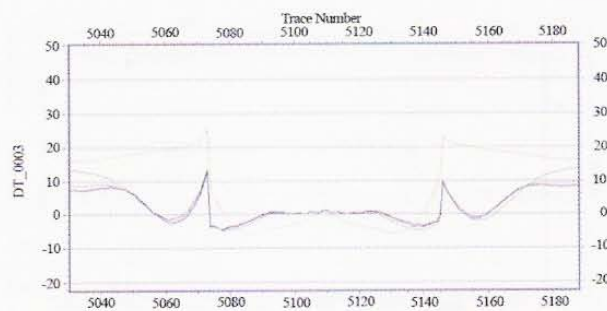


Fig. 6. The graphs of residual times before first inversion (orange), after first inversion (green), after second inversion (red), after third inversion (blue); parameter of horizontal smoothing 600 m, parameter of vertical smoothing 75 m; vertical axis – residual time in ms.

Ryc. 6. Wykresy czasów rezydualnych przed inwersją (pomarańczowy), po pierwszej inwersji (zielony), po drugiej inwersji (czerwony), po trzeciej inwersji (niebieski); parametr wygładzania poziomego 600 m, parametr wygładzania pionowego 75 m; oś pionowa – czas rezydualny w ms.

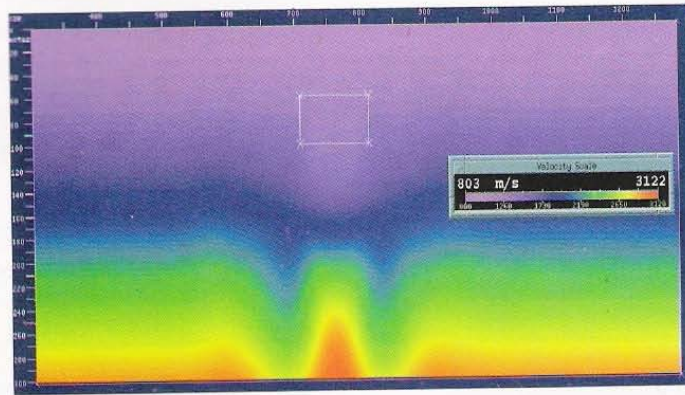


Fig. 7. The velocity field after 3 tomographic inversions for established value of vertical smoothing (75 m) and varying horizontal smoothing through the values 600, 300 and 150 m in consecutive inversions; horizontal axis – CDP number, vertical axis – depth in meters.

Ryc. 7. Rozkład prędkości po 3 inwersjach tomograficznych dla ustalonej wartości wygładzania pionowego (75 m) i zmieniającej się wartości poziomego wygładzania poprzez wartości 600, 300 i 150 m w kolejnych inwersjach; oś pozioma – numer CDP, oś pionowa – głębokość w metrach.

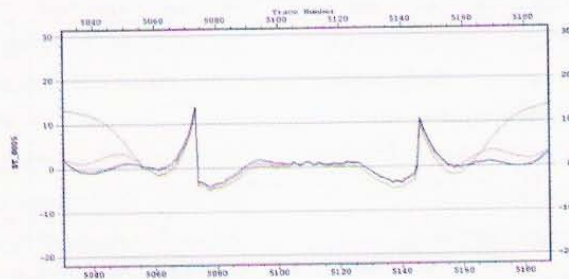


Fig. 8. The graphs of residual traveltimes calculated for established value of vertical smoothing (75 m) after first inversion (green), after second inversion (red), after third inversion (blue) for varying horizontal smoothing through the values 600, 300 and 150 m in consecutive inversions; vertical axis – residual traveltimes in ms.

Ryc. 8. Wykresy czasów rezydualnych obliczonych przy ustalonym parametrze wygładzania pionowego (75 m) po pierwszej inwersji (zielony), po drugiej inwersji (czerwony), po trzeciej inwersji (niebieski) przy zmianie parametru wygładzania poziomego od wartości 600 m, poprzez wartość 300 m do wartości 150 m w kolejnych iteracjach; oś pionowa – czas rezydualny w ms.

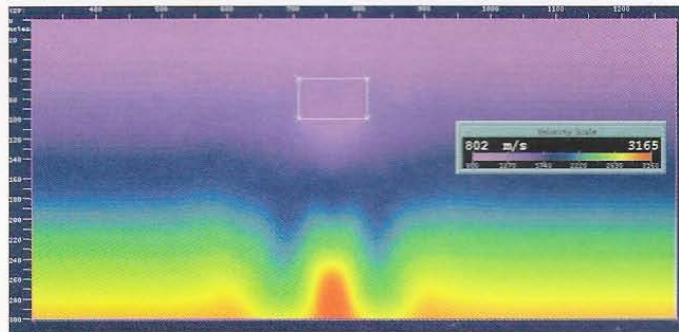


Fig. 9. The velocity field after 3 tomographic inversions for established value of vertical smoothing (25 m) and varying horizontal smoothing through the values 600, 300 and 150 m in consecutive inversions; horizontal axis – CDP number, vertical axis – depth in meters.

Ryc. 9. Rozkład prędkości po 3 inwersjach tomograficznych dla ustalonej wartości wygładzania pionowego (25 m) i zmieniającej się wartości poziomego wygładzania poprzez wartości 600, 300 i 150 m w kolejnych inwersjach; oś pozioma – numer CDP, oś pionowa – głębokość w metrach.

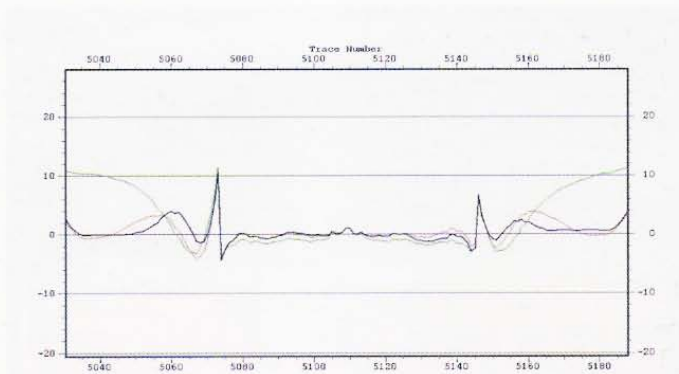


Fig. 10. The graphs of residual traveltimes calculated for established value of vertical smoothing (25 m) after first inversion (green), after second inversion (red), after third inversion (blue) for varying horizontal smoothing through the values 600, 300 and 150 m in consecutive inversions; vertical axis – residual traveltimes in ms.

Ryc. 10. Wykresy czasów rezydualnych obliczonych przy ustalonym parametrze wygładzania pionowego (25 m) po pierwszej inwersji (zielony), po drugiej inwersji (czerwony), po trzeciej inwersji (niebieski) przy zmianie parametru wygładzania poziomego od wartości 600 m, poprzez wartość 300 m do wartości 150 m w kolejnych iteracjach; oś pionowa – czas rezydualny w ms.

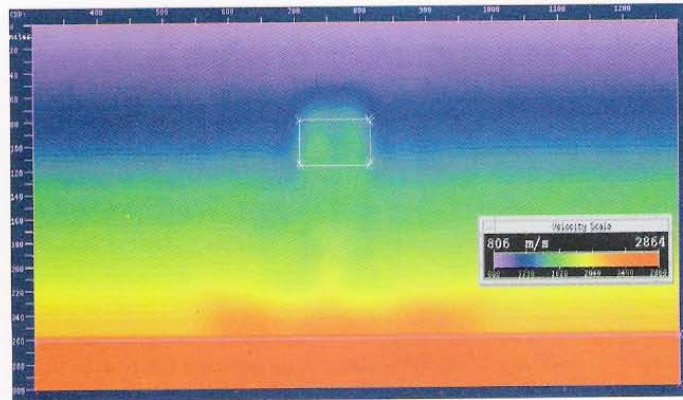


Fig. 11. The velocity field after 3 tomographic inversions in the case of gradient model with high velocity anomaly for established value of vertical smoothing (25 m) and varying horizontal smoothing through the values 600, 300 and 150 m in consecutive inversions; horizontal axis – CDP number, vertical axis – depth in meters.

Ryc. 11. Rozkład prędkości po 3 inwersjach tomograficznych w przypadku modelu gradientowego z anomalią wysokoprędkościową dla ustalonej wartości wygładzania pionowego (25 m) i zmieniającej się wartości poziomego wygładzania poprzez wartości 600, 300 i 150 m w kolejnych inwersjach; oś pozioma – numer CDP, oś pionowa – głębokość w metrach.

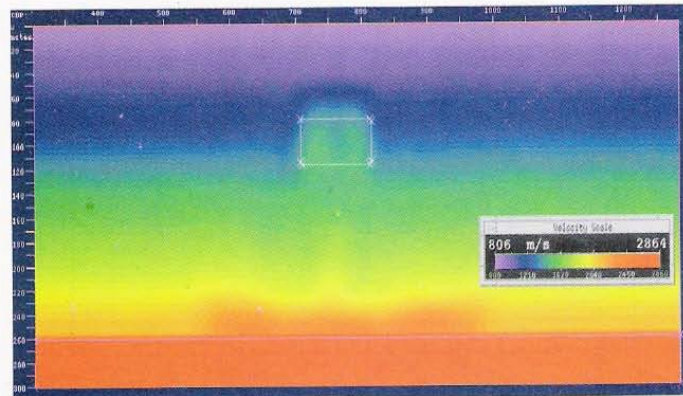


Fig. 12. The map of differences between assumed and resulted velocities after 3 inversions in the case of gradient model with high velocity anomaly; the graph on right side is defined on the vertical line crossing the central part of velocity anomaly.

Ryc. 12. Mapa różnic między założonymi i wynikowymi prędkościami po 3 iteracjach w przypadku modelu gradientowego z wysokoprędkościową anomalią; wykres po prawej stronie jest określony na linii pionowej przecinającej centralną część anomalii prędkościowej.

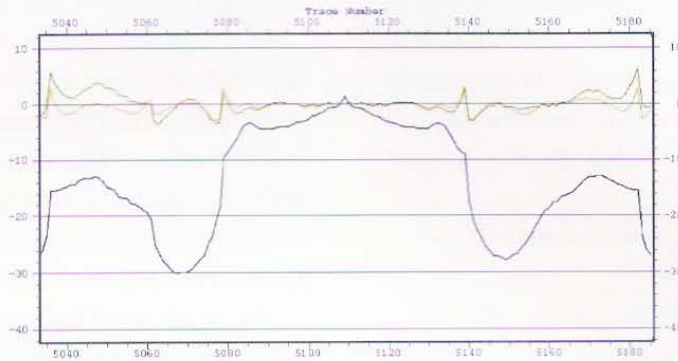


Fig. 13. The graphs of residual traveltimes in the case of gradient model with high velocity anomaly calculated for established value of vertical smoothing (25 m) after first inversion (green), after second inversion (red), after third inversion (blue) for varying horizontal smoothing through the values 600, 300 and 150 m in consecutive inversions; vertical axis – residual traveltimes in ms.

Ryc. 13. Wykresy czasów rezydualnych w przypadku modelu gradientowego z wysokopiędkościową anomalią obliczonych przy ustalonym parametrze wygładzania pionowego (25 m) po pierwszej inwersji (zielony), po drugiej inwersji (czerwony), po trzeciej inwersji (niebieski) przy zmianie parametru wygładzania poziomego od wartości 600 m, poprzez wartość 300 m do wartości 150 m w kolejnych iteracjach; oś pionowa – czas rezydualny w ms.

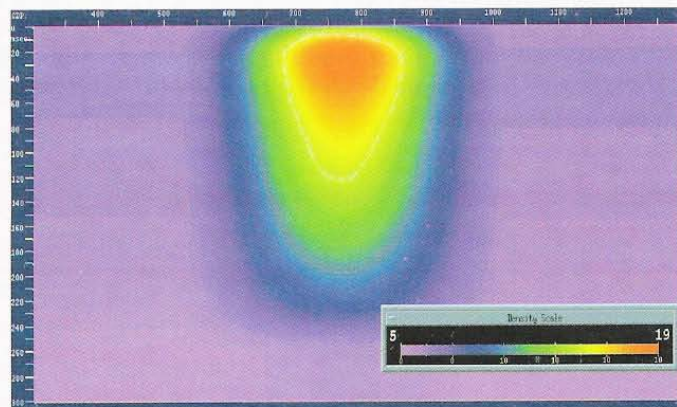


Fig. 14. The map of ray density in the case of gradient model with high velocity anomaly with marked area used for velocity weighting; horizontal axis – CDP's number, vertical axis – depth in meters.

Ryc. 14. Mapa gęstości promieni dla przypadku modelu gradientowego z wysokopiędkościową anomalią z zaznaczonym obszarem wykorzystanym do wagowania prędkości; oś pozioma – numery punktów CDP, oś pionowa – głębokość w metrach.

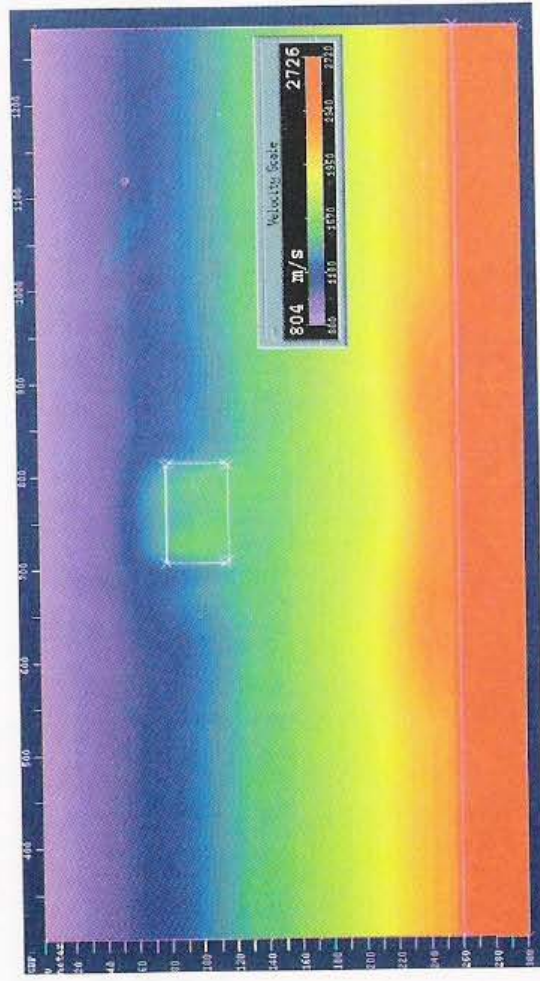


Fig. 15. The velocity field after 3 tomographic inversions in the case of gradient model with high velocity anomaly for established value of vertical smoothing (25 m), varying horizontal smoothing through the values 600, 300 and 150 m in consecutive inversions and application of velocity weighting; horizontal axis – CDP number, vertical axis – depth in meters.

Ryc. 15. Rozkład prędkości po 3 inwersjach tomograficznych w przypadku modelu gradientowego z anomalią wysokoprędkościową dla ustalonej wartości wygładzania pionowego (25 m), zmieniającej się wartości poziomego wygładzania poprzez wartości 600, 300 i 150 m w kolejnych inwersjach oraz przy zastosowaniu wagowania prędkości; oś pozioma – numer CDP, oś pionowa – głębokość w metrach.

eigenvalue made it possible to obtain reduction of residual traveltimes; this reduction appeared to be offset dependent.

The final calculations were accomplished to evaluate the effect of the model parameters on tomographic inversion effectiveness. The second model of the medium with gradient layer over constant velocity basement (2500 m/s) was considered. The high velocity anomaly (1500 m/s) was embedded in the gradient layer. In the starting model velocity anomaly was removed from the gradient layer. The calculations of the theoretical traveltimes were done using two ways. One way was to calculate traveltimes with the *Turning Ray Tracing* procedure. The second way was to pick first breaks on the synthetic records obtained with the *Finite Difference Modeling* procedure to create gradient medium using the *Create Turning Ray Velocity* procedure and then to calculate traveltimes with the *Turning Ray Tracing* procedure. The calculated traveltimes were used to define residual traveltimes. The inversion was accomplished for the following parameters: minimum eigenvalue 0.1, damping factor 5, vertical smoothing 25 m, horizontal smoothing changing from 600 m through 300 m to 150 m in the consecutive inversions. The inversions were realized with and without velocity weights.

The results of calculations for the case of inversion without velocity weights are showed in figs. 11-13. The location of velocity anomaly after the third inversion is very good in horizontal and vertical direction (fig. 11). The errors of the inversion presented in Fig. 12 in the form of map of differences between assumed and resulted velocities have generally small values with the exception of central part of anomaly (error values about -200 m/s) and the deepest part of the map in its central part (error values about 300 m/s). The residual traveltimes are significantly reduced after the third inversion from starting values about -20 ms to values about ± 4 ms (fig. 13). If we look at the ray density map (fig. 14) after the first inversion we can see that the significant velocity errors occur even in the area of higher ray density. If we treat this area as well illuminated and if we select it as the area with great velocity weights (that means as the area in which significant velocity changes are allowed) we will obtain after the third inversion the velocity field showed in fig. 15.

We can observe some improvement of velocity field reconstruction appearing as better smoothing its values in deeper part of the velocity field without significant changes of residual traveltimes (fig. 13). Applications of the picked times in computations of theoretical traveltimes practically didn't change the results of inversion.

6. Conclusions

The realized model computations and the analysis of tomographic inversion results made it possible to formulate the following conclusions:

- the procedures of tomographic inversion realized in seismic data processing ProMAX in the variant of turning ray tomography may be efficiently used to the reconstruction of near surface gradient velocity fields with anomalous zones basing on the picked first breaks of reflection seismics records;
- the effectiveness of tomographic inversion appeared to be much better in the case of high velocity anomalous zones embedded in the gradient medium;
- the selection of the proper values of tomographic inversion parameters made it possible to improve the quality of velocity field reconstructions and to minimize the values of residual traveltimes,
- the horizontal and vertical smoothing parameters appeared to be the most meaning ones among others;
- we can observe much better velocity reconstruction in horizontal direction then in vertical direction;
- the errors of velocity anomaly reconstruction can achieve values of about 25% in the case of low velocity anomaly and about 15% in the case of high velocity anomaly;
- we can observe a significant reduction of residual traveltimes after the first inversion in all considered cases.

The presented analysis was realized in the framework of statutory activity (project no. 1111.140.06, Department of Geophysics, Faculty of Geology, Geophysics and Environmental Protection, University of Science and Technology AGH) sponsored by KBN.

Bibliography

- Kasina Z., 2001, *Tomografia sejsmiczna*, Wydawnictwo Instytutu GSMiE PAN, Kraków.
- ZHU X., 2002, *Velocity imaging through complex near-surface structures by tomography*. Abstracts of EAGE 64th Conference & Exhibition – Florence, Italy, 27-30 May 2002, E-37.

Streszczenie

W pracy przedstawiono analizę możliwości odtwarzania przypowierzchniowych rozkładów prędkości za pomocą inwersji tomograficznej pierwszych wstąpień rekordów sejsmiki refleksyjnej. Analizę przeprowadzono na rekordach syntetycznych wygenerowanych za pomocą metod różnic skończonych w wariancie akustycznym. W rozważaniach uwzględniono dwa modele prędkościowe przypowierzchniowego ośrodka: model gradientowy oraz model warstwy gradientowej na podłożu o stałej prędkości. W warstwie gradientowej wprowadzono strefę o anomalnej – obniżonej lub podwyższonej w stosunku do otoczenia – prędkości. Modelowanie teoretycznego obrazu falowego wykonano za pomocą procedury *Finite Difference Modeling* w systemie przetwarzania danych sejsmicznych *ProMAX*. Analizę możliwości odtwarzania przypowierzchniowych rozkładów prędkości za pomocą inwersji tomograficznej wykonano wykorzystując procedury tomografii fal refragowanych dostępne w systemie *ProMAX*. Określono wpływ różnych parametrów inwersji tomograficznej na wyniki odwzorowania przypowierzchniowego pola prędkości. Ocenę tego wpływu przeprowadzono w oparciu o wynikowe pola prędkości, mapy różnic między założonymi i wynikowymi polami prędkości oraz w oparciu o wykresy czasów rezydualnych (różnice

między czasami przebiegu dla wynikowych pól prędkości i czasami przebiegu dla założonych modeli seismologicznych ośrodka). Przeprowadzona analiza pozwoliła sformułować szereg szczegółowych wniosków. Dobór parametrów wygładzania pionowego i poziomego pól prędkości uzyskanych w trakcie kolejnych inwersji okazał się najistotniejszym narzędziem poprawy odwzorowań tomograficznych. Zaobserwowano znacznie większą dokładność tomograficznej rekonstrukcji pól prędkości w kierunku poziomym. W obrazie wynikowych pól prędkości czytelniej zaznaczyła się anomalia wysokoprędkościowa w ośrodku gradientowym, niż anomalia niskoprędkościowa. Błędy rekonstrukcji anomalii prędkościowej sięgały wartości 25% w przypadku strefy niskoprędkościowej oraz około 15 % w przypadku strefy wysokoprędkościowej. Zaobserwowano znaczącą redukcję czasów rezydualnych już po pierwszej inwersji tomograficznej we wszystkich rozpatrywanych przypadkach. Generalnie potwierdzono, że inwersja tomograficzna realizowana w systemie przetwarzania *ProMAX* w wariancie tomografii fal refragowanych może być efektywnie wykorzystywana do rekonstrukcji przypowierzchniowych gradientowych pól prędkości z anomaliami prędkościowymi w oparciu o wypunktowane czasy pierwszych wstąpień na rekordach sejsmiki refleksyjnej.

ANDRZEJ LEŚNIAK, GRZEGORZ PSZCZOŁA¹

ALGORYTMY GENETYCZNE W ROZWIĄZYWANIU ZAGADNIENÍ ODWROTNYCH W GEOFIZYCE

Słowa kluczowe:

Algorytmy genetyczne, zagadnienie odwrotne, lokalizacja wstrząsów sejsmicznych, sondowania elektrooporowe

Abstrakt

W artykule przedstawione zostały przykłady wykorzystania algorytmów genetycznych do rozwiązania typowych zagadnień odwrotnych, z jakimi mamy do czynienia w geofizyce. Przedstawiono krótką charakterystykę zagadnień odwrotnych i omówiono sposoby ich rozwiązania na drodze optymalizacji nieliniowej. Następnie zaprezentowano zasadę działania prostego algorytmu genetycznego, wraz z omówieniem poszczególnych jego etapów. W kolejnych rozdziałach przedstawiono dwa przykłady z dziedziny geofizyki. Pierwszym było określanie położenia źródeł wstrząsów sejsmicznych na podstawie pomiarów drgań zarejestrowanych siecią czujników, drugim określanie wartości miąższości i oporności warstw geologicznych na podstawie wykonanego sondowania elektrooporowego.

GENETIC ALGORITHMS FOR SOLVING INVERSE PROBLEMS IN GEOPHYSICS

Key words:

Genetic algorithm, inverse problem, seismic events location, resistivity sounding

Abstract

The examples of the application of genetic algorithms for solving typical geophysical inverse problems are presented in the paper. At the beginning, a short characteristic of the inverse problems was presented. The method of solving that problem was formulated as a nonlinear optimization problem. Afterwards the idea of simple genetic algorithm was introduced together with a discussion of its particular stages. In the next two sections examples of the application of the genetic algorithms in geophysics are presented in details. The first example is the location of the seismic sources. The second is the evaluation of the thicknesses and conduciveness of a layered medium using the resistivity sounding method.

¹ Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Geologii, Geofizyki i Ochrony Środowiska, Zakład Geoinformatyki i Informatyki Stosowanej, Kraków.

1. Wstęp

Rozwiązanie zagadnienia odwrotnego w geofizyce podobnie jak przeprowadzenie modelowania określonego pola geofizycznego (jest to tzw. zagadnienie proste) prowadzi do uzyskania cennych informacji dotyczących budowy badanego ośrodka geologicznego.

W praktyce zastosowań geofizyki zagadnienie odwrotne jest najczęściej rozważane dla przypadku dyskretnego. Jego głównym celem jest określenie nieznanymi wartości wektora parametrów $\vec{m} = [m_1, m_2, \dots, m_M]$ charakteryzującego ośrodek geologiczny na podstawie pomierzonych wartości wektora $\vec{d} = [d_1, d_2, \dots, d_N]$ określonego pola geofizycznego przy założeniu określonego modelu opisującego jego budowę (np. jego cech geometrycznych).

W artykule przedstawione zostaną przykłady wykorzystania algorytmów genetycznych do rozwiązania dwóch typowych zagadnień odwrotnych, z jakimi mamy do czynienia w geofizyce. Pierwszym przykładem jest określanie położenia źródeł emisji sejsmicznej, gdzie nieznanymi parametrami są trzy współrzędne przestrzenne tego źródła (tj. położenie hipocentrum wstrząsu) oraz czas jego wystąpienia. Wartości tych parametrów mogą być określone na podstawie zapisów drgań rejestrowanych na powierzchni Ziemi z wykorzystaniem aparatury sejsmicznej. Drugim przykładem mogą być sondowania elektrooporowe. W trakcie tych pomiarów rejestruje się różnicę potencjałów pomiędzy elektrodami pomiarowymi przy wzrastającej odległości elektrod zasilających. W wyniku rozwiązania zagadnienia odwrotnego możliwe jest określenie parametrów ośrodka np. dla modelu ośrodka warstwowanego miąższości i oporności poszczególnych warstw.

Zarówno w pierwszym, jak i drugim przypadku związek pomiędzy wektorem danych \vec{d} a wektorem parametrów modelu \vec{m} ma charakter nieliniowy, dany w postaci jawnej:

$$\vec{d} = \vec{g}(\vec{m}) \quad (1)$$

Rozwiązania zagadnienia odwrotnego sprowadza się w tym wypadku do znalezienia takich wartości parametrów (składowych wektora \vec{m}) by dane syntetyczne \vec{d}^{syn} jak najmniej różniły się od danych zarejestrowanych \vec{d}^{obs} . Proces ten sprowadza się do minimalizacji funkcji będącej

normą z różnicy obu wektorów najczęściej z wykorzystaniem jednej z norm L_p , np. normy L_2 :

$$\|\vec{e}\|_2 = \|\vec{d}^{obs} - \vec{d}^{syn}\|_2 = \sum_{i=1}^N |e_i|^2 \rightarrow \min \quad (2)$$

Funkcja ta (zwana **funkcją celu**) jest nieliniową funkcją wielu zmiennych (cztery zmienne w przypadku lokalizacji źródeł (x, y, z, t) , siedem dla klasycznego trójwarstwowego ośrodka płaskorównoległego $(h_1, \rho_1, h_2, \rho_2, h_3, \rho_3, \rho_4)$). Jak to pokazano, (Pszczola, Leśniak 2004; Strózik, Pszczola 2006) funkcja celu występująca w obu opisanych powyżej zagadnieniach charakteryzuje się obecnością wielu sąsiadujących ze sobą minimów lokalnych, często mających kształt szerokich dolin. Minimalizacja dla tego typu funkcji celu jest zagadnieniem bardzo trudnym. Ponieważ wynik minimalizacji metodami lokalnymi jest uzależniony od punktu startowego procesu minimalizacji, więc nie może być traktowany jako rozwiązanie globalne, to znaczy dostarczające rozwiązania \vec{m}^{est} , dla którego funkcja celu przyjmuje wartość minimalną dla całego zakresu zmienności argumentów $m_i^{min} \leq m_i \leq m_i^{max}$. Stąd należy wybrać do rozwiązania tego typu zagadnienia jedną z metod minimalizacji globalnej.

2. Klasyczny algorytm genetyczny

Algorytm genetyczny został pierwotnie pomyślany jako narzędzie do modelowania ewolucji populacji osobników, z których każdy był wyposażony w binarny kod genetyczny i poddanych presji określonego środowiska (Goldberg 1998). Algorytm ten przetwarza populację wybranych losowo osobników mających postać binarnych łańcuchów (chromosomów), które przechowują informację o konkretnych wartościach poszukiwanych parametrów modelu \vec{m} . Po wprowadzeniu mechanizmów przekształcania kodów wzorowanych na genetyce (krosowanie chromosomów, mutacja i selekcja) można zauważyć, że populacja wykazuje tendencje przystosowania do środowiska (krajobrazu adaptacyjnego) charakteryzowanego pewną funkcją zwaną funkcją przystosowania F . Przystosowanie danego osobnika to wartość określająca zdolność jego przeżycia w środowisku. Innymi słowy algorytm genetyczny prowadzi do określenia populacji potomnej, dla której większość osobników jest lepiej dostosowana do środowiska, tj. lepiej minimalizuje funkcję celu.

Dla potrzeb naszych badań funkcja przystosowania F była definiowana jako różnica pomiędzy maksymalną wartością funkcji celu a wartością funkcji celu dla danego osobnika:

$$m^i \rightarrow F(m^i) = f_{\max} - f(m^i) \quad (3)$$

Algorytm genetyczny w wersji prostej (SGA) przedstawiono na rys. 1. Składa się on z kilku etapów:

1. Inicjacji – w trakcie tego etapu powstaje początkowa populacja osobników losowo wybranych. Dla każdego z nich na etapie wstępnej oceny $P(0)$ jest obliczana wartość funkcji przystosowania według wzoru (3).
2. Reprodukcyj (działającej na przykład na zasadzie ruletki) – na tym etapie powstaje nowa populacja, do której kwalifikowane są osobniki z prawdopodobieństwem proporcjonalnym do funkcji przystosowania (osobniki najlepiej przystosowane są częściej replikowane); losowanie osobników do nowej populacji najczęściej odbywa się „ze zwracaniem” – tzn. dobrze przystosowany osobnik może być wylosowany wielokrotnie
3. Krzyżowania i mutacji – osobniki tworzące nową populację są krzyżowane pomiędzy sobą – dwa wylosowane osobniki (rodzice) wymieniają się pomiędzy sobą pulą genów o określonej długości i tworzą dwa osobniki potomne; chromosom może być prze-

cinany w jednym lub wielu punktach. Na etapie mutacji każdy gen może z małym prawdopodobieństwem zmienić swoją wartość na przeciwną.

4. Kolejnego obliczania funkcji przystosowania dla bieżącej populacji a następnie powrotu do kroku 2.

Etapy od drugiego do czwartego są powtarzane dopóki niespełnione zostanie określone kryterium zatrzymujące działanie algorytmu. Mogą to być kryteria bazujące na monitorowaniu funkcji przystosowania (np. kryterium maksymalnego kosztu (czasu) t_{\max} , kryterium zadowalającego poziomu funkcji przystosowania F_{\max} lub kryterium minimalnej szybkości poprawy) lub bazujące na monitorowaniu eksplorowanej przestrzeni genotypu (kryterium różnorodności populacji, kryterium zasięgu operatora mutacji) (Arabas 2001).

Omówione powyżej etapy działania algorytmu genetycznego zostały szczegółowo przedstawione w monografii (Goldberg 1998).

3. Przykład I – lokalizacja źródeł emisji sejsmicznej

Pierwszym z omawianych tu przykładów zastosowania algorytmów genetycznych do rozwiązywania konkretnych zagadnień odwrotnych w geofizyce było określenie położenia hipocentrum wstrząsu sejsmicznego. Lokalizacja źródła emisji fali sejsmicznej odbywała się na podstawie rejestracji czasów propagacji fali sejsmicznej ze źródła wstrząsu do sieci czujników (metoda czasowa „P” – rys. 2).

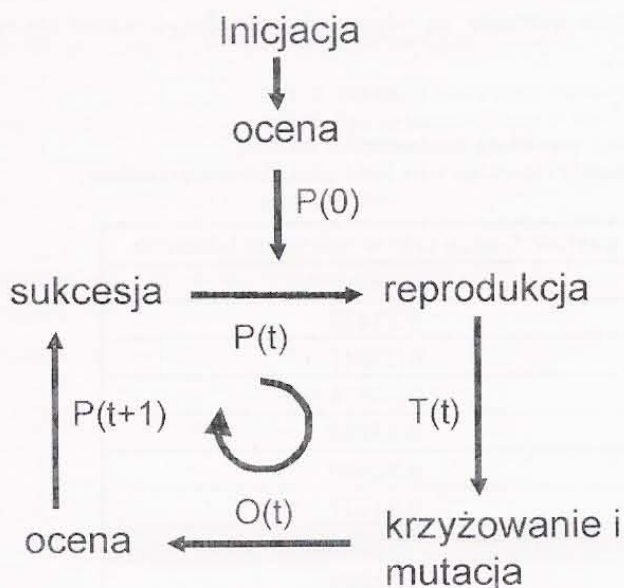
Dla przypadku ośrodka izotropowego dla którego prędkość propagacji fali sejsmicznej P ma wartość V funkcja celu ma postać (Pszczółka, Wit 2004):

$$f(x, y, z, t) = \sum_{i=1}^N \left[t_i - t - \sqrt{\frac{(x_i - x)^2 + (y_i - y)^2 + (z_i - z)^2}{V^2}} \right]^2 \quad (4)$$

gdzie: t_i – czas wystąpienia wstrząsu w punkcie o współrzędnych kartezjańskich x_i, y_i, z_i ,
 t – czas wystąpienia wstrząsu w punkcie o współrzędnych kartezjańskich x, y, z .

Do obliczeń wykorzystana została sieć stacji sejsmicznych z kopalni miedzi „Rudna” LGOM. W celu przedstawienia efektywności algorytmu genetycznego wybrano

Rys. 1. Schemat prostego algorytmu genetycznego.
 Fig.1. Diagram of the simple genetic algorithm.



silny wstrząs, wyraźnie zarejestrowany przez wszystkie czujniki. Ich położenie oraz czasy pierwszych wstąpień fali P przedstawiono w tabeli 1.

Dla analizowanego przypadku wykorzystano populację osobników o liczebności 10000. Osobnik był definiowany jako ciąg bitów, którego pierwsza, druga i trzecia część kodowały współrzędne (x,y,z) hipocentrum zaś czwarta czas wystąpienia wstrząsu (są to składowe wektora parametrów modelu \vec{m}). Każda z tych składowych była kodowana z użyciem 14 bitów. Przeprowadzono 25 iteracji

w których prawdopodobieństwo mutacji pojedynczego genu wynosiło 0.1. Począwszy od iteracji piętnastej osobniki zaczęły się grupować w minimach lokalnych w sposób zaznaczony na rys. 3 (w jego lewej części). Kolejne iteracje algorytmu genetycznego nie prowadziły do większej koncentracji rozwiązań w wybranym klastrze. Można stąd wnioskować, że rozwiązania otrzymywane dla ostatnich iteracji są położone w basenach atrakcji (przyciągania) związanych z minimami lokalnymi. Istotnym jest spostrzeżenie, że lokalizacja największych skupień nie ulegała zmianie w trakcie wykonywania ostatnich iteracji.

Tabela 1. Położenia czujników oraz czasy pierwszych wejść fali P dla wstrząsu 2003-08-08 06:23:09 z kopalni Rudna. Wybrano 10 najlepszych rejestracji.

Table 1. Sensors locations and P wave onsets for tremor 2003-08-08 06:23:09 from Rudna mine. The best recordings was chosen.

Nr geofonu	położenie czujnika			czas rejestracji fali P
	X [m]	Y [m]	Z [m]	t, [hh:mm:ss, ms]
1	35600	9585	-1040	06:23:13, 165
2	26595	7830	-532	06:23:14, 027
3	32303	5620	-329	06:23:12, 510
4	34029	4264	-798	06:23:12, 018
5	28825	5710	-703	06:23:13, 394
6	31799	4945	-741	06:23:12, 526
7	35778	9135	-1006	06:23:13, 088
8	30361	7590	-818	06:23:13, 281
9	28130	7900	-687	06:23:13, 739
10	33616	6034	-861	06:23:12, 300

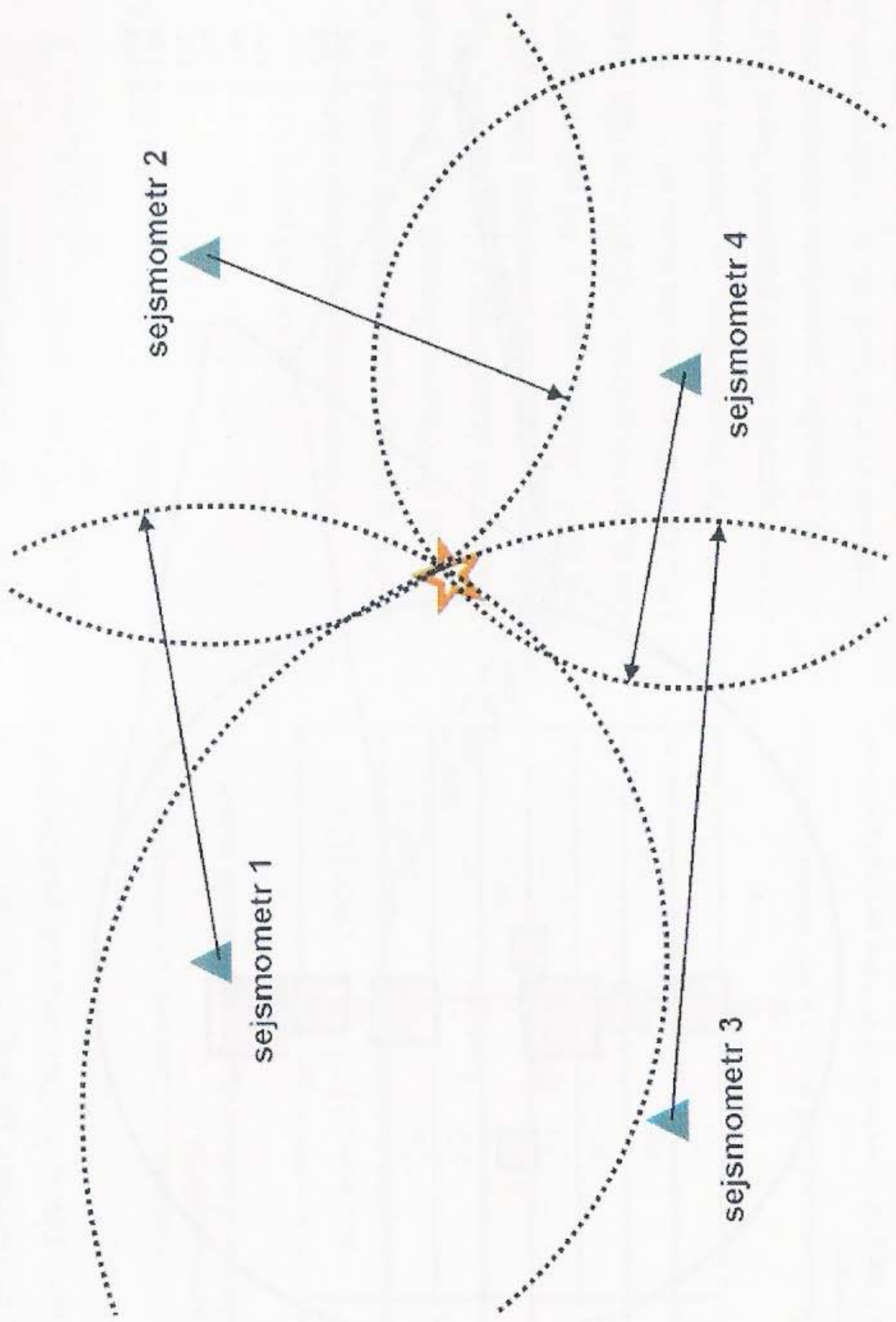
By otrzymać jedno rozwiązanie globalne w otrzymanym zbiorze rozwiązań zidentyfikowane zostały stabilne (występujące w ostatnich iteracjach) skupienia punktów oraz wyznaczone zostały centra tych skupień (rys. 3 w prawej jego części). Z tak określonych centralnych punktów każdego klastra uruchomiona została metoda minimalizacji lokalnej Powella (Press i in.1986). Metoda ta uruchamiana z każdego centralnego punktu klastra pozwala osiągnąć minimum lokalne związane z danym klastrzem. Jako minimum globalne uznajemy to spośród minimów lokalnych, w którym wartość funkcji celu jest najmniejsza. Wyniki uzyskane na drodze minimalizacji lokalnej dla ośmiu wybranych klastrów przedstawiono w tabeli 2. Jak widać minimalizacja lokalna dla przedostatniego przypadku jest minimum globalnym.

Warto zwrócić uwagę, że wartości funkcji celu otrzymane w wyniku minimalizacji lokalnej są do siebie bardzo zbliżone, zaś wartości zidentyfikowanych położenia hipocentrum wstrząsu im odpowiadające zdecydowanie się różnią.

Tabela 2. Minima lokalne znalezione algorytmem genetycznym z procedurą minimalizacji lokalnej.

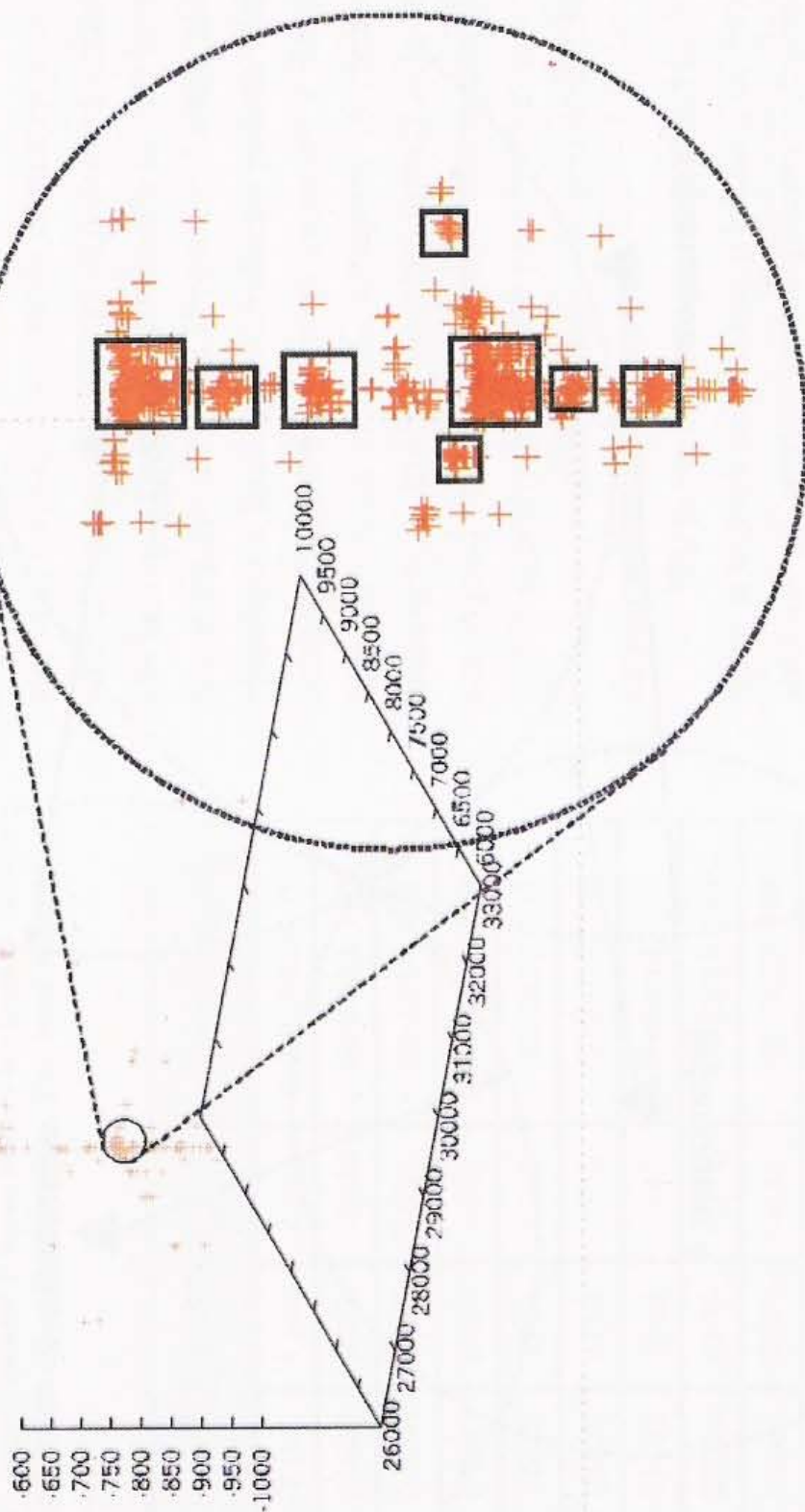
Table 2. The minimas of the target function identified using genetic algorithm with local minimization procedure.

położenie minimum lokalnego			wartość funkcji celu w minimum lokalnym
X [m]	Y [m]	Z [m]	f
35322	3568	-1165	0.23435
35203	3556	-621	0.23047
34954	3955	-1020	0.22874
35551	3133	-1048	0.23792
34951	3959	-997	0.22830
35537	3415	-1192	0.23737
34887	4004	-632	0.22683 minimum globalne
34920	3942	-974	0.22789



Rys. 2. Schemat ilustrujący metodę lokalizacji źródła wstrząsu w metodzie czasów P.
Fig. 2. The principle of the P wave method of tremors source location.

'15.txt' using 1 2:3



Rys. 3 Rozmieszczenie osobników po 25 iteracji algorytmu genetycznego w przestrzeni (x,y,z) oraz powiększony obraz w którym zidentyfikowano osiem stabilnych klastrow rozwiązań oznaczonych kwadratami.
Fig. 3 Specimen distribution after 25th iteration of the genetic algorithm in (x,y,z) space and the magnified picture contained eight identified stable clusters marked as squares.

4. Przykład II – zagadnienie odwrotne dla sondowań geoelektrycznych

Drugi przykład dotyczy rozwiązania zagadnienia odwrotnego w sondowaniach elektrooporowych, to znaczy określenia oporności i miąższości warstw na podstawie pomierzonych wartości oporności. W metodzie tej interpretuje się krzywą oporności pozornej otrzymaną w wyniku pomiaru różnicy potencjałów pomiędzy elektrodami pomiarowymi MN przy wzrastającej odległości elektrod zasilających AB. W interpretacji sondowań najczęściej przyjmuje się, że ośrodek geologiczny zbudowany jest z niewielkiej ilości płaskich, równoległych warstw o róż-

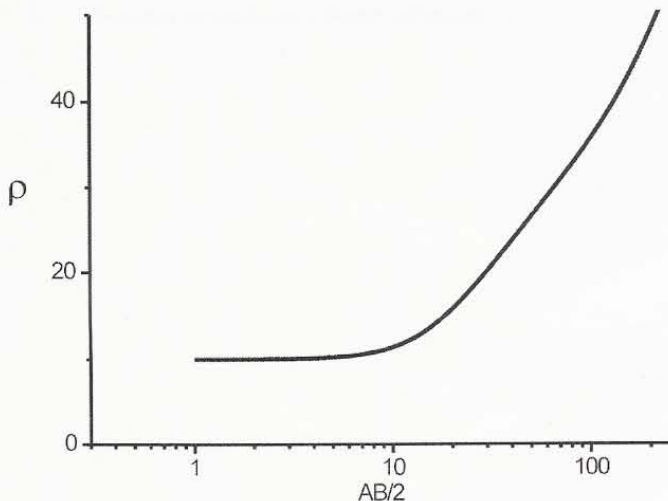
Tabela 3. Wartości miąższości i oporności wymodelowanego ośrodka geologicznego.

Table 3. Thicknesses and resistivities of the layered model.

Warstwa	Miąższość [m]	Opór [Ωm]
1	10	10
2	20	50
3	10	20
4	20	70
5	10	20
6	20	50
7	∞	100

Rys. 4. Wymodelowana oporność pozorna R^{obs} ośrodka siedmiowarstwowego.

Fig. 4. Calculated apparent resistivity R^{obs} for seven layers medium.



nych właściwościach elektrycznych. Aby zaprezentować efektywność algorytmu genetycznego w rozwiązaniu zagadnienia odwrotnego wygodnie było posłużyć się wymodelowanymi wartościami oporności pozornej. W tym celu obliczono krzywą oporności pozornej dla płaskorównoległego ośrodka siedmiowarstwowego. Wartości miąższości warstw i odpowiadających im oporności dla tego ośrodka przedstawiono w tabeli 3 zaś wymodelowaną krzywą oporności pozornej na rys. 4.

Z uwagi na zjawisko ekwiwalencji szukano rozwiązania w postaci ośrodka czterowarstwowego. Funkcja celu w tym wypadku miała postać:

$$f(\vec{h}, \vec{\rho}) = \ln \sum_{i=1}^N [R_i^{\text{obs}} - R_i^{\text{syn}}(h_1, \rho_1, h_2, \rho_2, h_3, \rho_3, \rho_4)]^2 \quad (5)$$

gdzie: h_i, ρ_i – odpowiednio miąższość o oporność i -tej warstwy

$R_i^{\text{obs}}, R_i^{\text{syn}}$ – to pomierzona i wymodelowana oporność pozorna ośrodka.

Wykorzystano populację o liczebności 5000 osobników, o prawdopodobieństwie mutacji 0.05. Z uwagi na większą ilość niewiadomych niż w poprzednim wypadku zwiększono licznę iteracji do pięciuset. Niewiadome były kodowane z użyciem dziewięciu bitów (512 podziałów założonego zakresu zmienności parametrów), co daje krok kwantowania zadania równy 0.2 m (dla miąższości warstw) i 0.2 Ωm (dla oporności warstw).

Zaobserwowano, że dopiero powyżej setnej iteracji rozwiązania zaczęły grupować się w lokalnych basenach atrakcji. Ponadto można było zauważyć, że proces ten przebiega znacznie wolniej, niż to miało miejsce dla funkcji celu w zagadnieniu lokalizacji wstrząsów. Najlepsze parametry uzyskane na drodze minimalizacji lokalnej, prowadzonej w identyczny sposób jak dla przykładu lokalizacji źródeł emisji, zamieszczono w tabeli 4. Na rys. 5 zaprezentowane

Tabela 4. Parametry modelu w minimum globalnym dla sondowania elektrooporowego.

Table 4. Model parameters obtained from global minimum of the target function for resistivity sounding.

Warstwa	Miąższość [m]	Opór [Ωm]
1	11	10
2	12	71
3	51	33
4		93

zostało zestawienie wartości parametrów założonych do modelowania z wartościami otrzymanymi w wyniku rozwiązania zagadnienia odwrotnego.

Powszechnie znaną cechą zagadnień odwrotnych w metodach geoelektrycznych jest obowiązująca zasada ekwiwalencji. Sprowadza się ona do tego, że przy założonym błędzie pomiarowym jednej krzywej sondowania (np. takiej jak na rys. 4) odpowiada wiele rozwiązań zagadnienia odwrotnego w postaci wektora parametrów modelu $\mathbf{m}(h_1, \rho_1, h_2, \rho_2, h_3, \rho_3, \rho_4, \dots)$. Rezultatem działania zasady ekwiwalencji jest brak istnienia jednoznacznego rozwiązania zagadnienia sondowań elektrooporowych. Zjawisko to można zaobserwować analizując wartości wektora parametrów modelu odpowiadające poszczególnym klastrom populacji, jakie pojawiają się dla końcowych iteracji algorytmu genetycznego.

Na rys. 6 przedstawiono dwie krzywe sondowań elektrooporowych. Krzywa czerwona to krzywa wyliczona dla parametrów z minimum globalnego – wartości miąższości i oporności dla tej krzywej przedstawia tabela 4. Krzywa niebieska została wyliczona dla parametrów z minimum lokalnego i jej parametry przedstawiono na rys. 6.

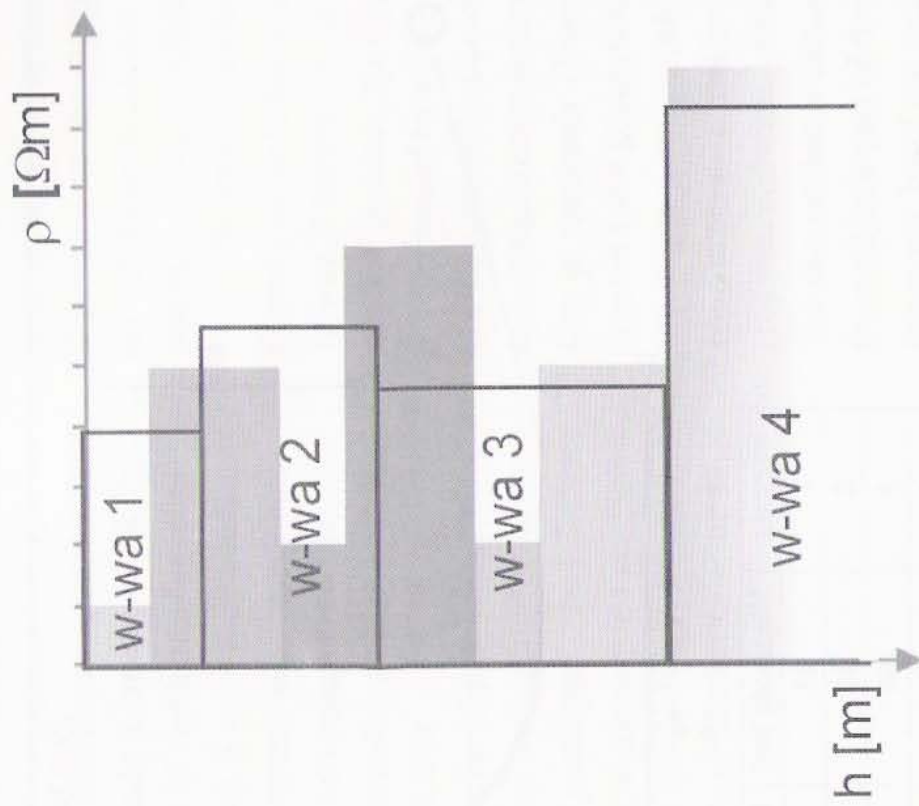
Jak łatwo zauważyć krzywe sondowań praktycznie pokrywają się na zaprezentowanym wykresie – obie w granicach błędu pomiarowego można uznać za nierozróżnialne a więc spełniają zadość zasadzie ekwiwalencji. Analiza ilości stabilnych klastrow jakie otrzymujemy w końcowych iteracjach działania algorytmu genetycznego oraz ich liczebności prowadzi więc do prostej oceny jakościowej zjawiska ekwiwalencji dla metody elektrooporowej.

5. Wnioski

Reasumując – ponieważ większość zagadnień odwrotnych w geofizyce ma charakter nieliniowy, konieczne jest stosowanie metod globalnych. Wśród nich algorytmy genetyczne stanowią dobrze sprawdzoną i docenioną metodę, pozwalającą na efektywne rozwiązanie tego typu zadań. Wysoka efektywność jest osiągnięta dzięki możliwości bardzo prostego implementowania algorytmów genetycznych do obliczeń w klastrach komputerów lub na komputerach o architekturze równoległej. W przeciwieństwie do nie ewolucyjnych technik optymalizacyjnych algorytmy genetyczne zwracają nie jedno, lecz wiele rozwiązań. Konse-

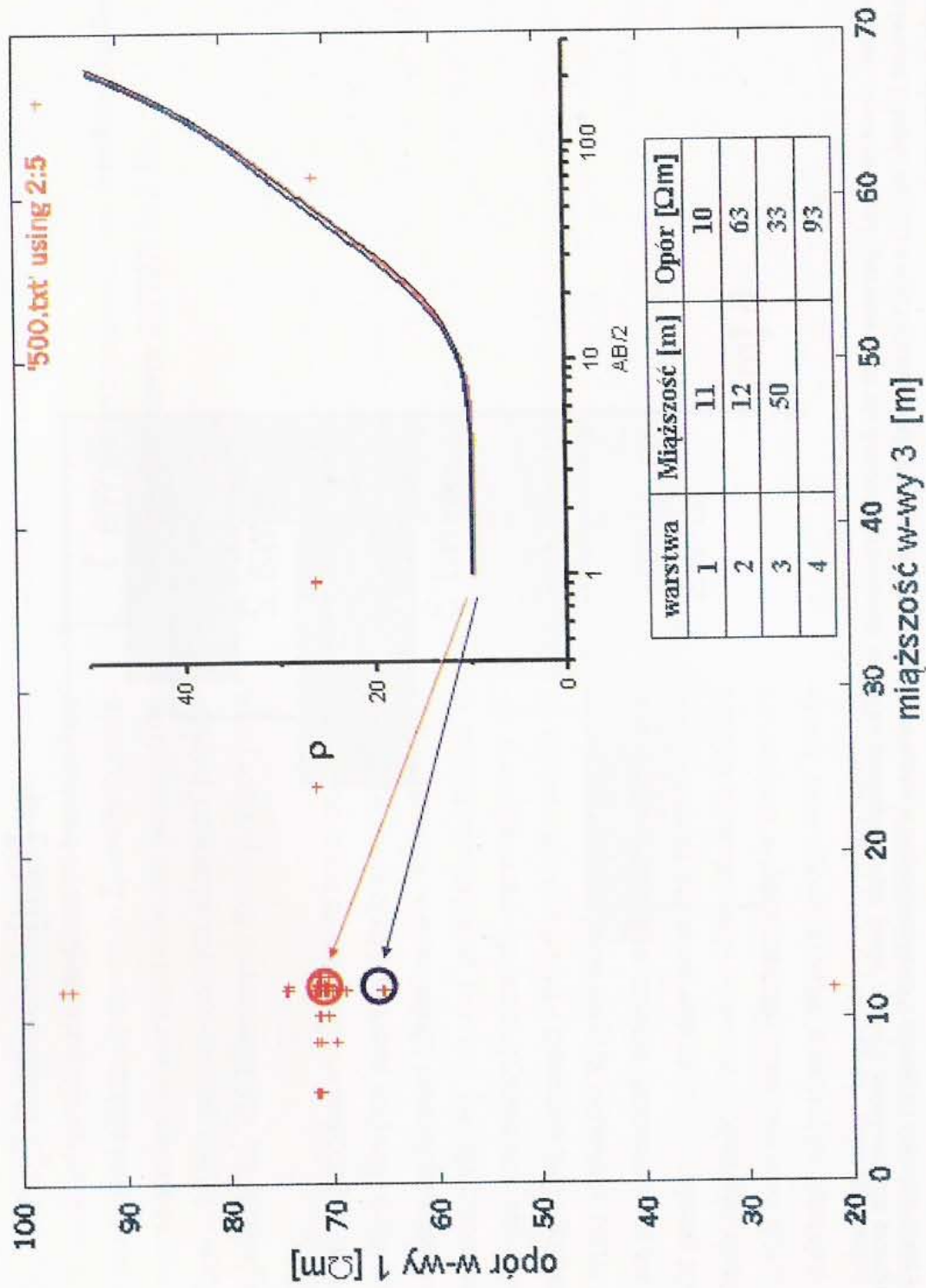
kwencją są charakterystyczne zalety i niedogodności tych metod. Zaletą jest możliwość oceny jakości uzyskiwanych rozwiązań, wgląd w rozkład błędów oraz analiza ich niejednoznaczności (ekwiwalencji). Niedogodnością algorytmów genetycznych w omawianych zagadnieniach jest konieczność kodowania binarnego, co pociąga za sobą możliwość zaistnienia problemu występowania pozornych minimum lokalnych. Stąd by uzyskać jedno, konkretne rozwiązanie zagadnienia odwrotnego należy użyć dodatkowo metody minimalizacji lokalnej.

Praca sfinansowana ze środków budżetowych na naukę, grant numer 4 T12B 042 28.



Rys. 5 Porównanie rzeczywistych parametrów siedmiowarstwowego ośrodka geologicznego, jakie zostały założone dla przeprowadzenia modelowań (słupki szare) z wartościami otrzymanymi w wyniku rozwiązania zagadnienia odwrotnego (ośrodek czterowarstwowy – słupki bezbarwne).

Fig. 5 Comparison of the true parameters of the seven layers medium (grey columns) with that ones calculated in inverse problem (for four layers medium – blank columns).



Rys. 6 Ilustracja zagadnienia ekwiwalencji w zagadnieniu odwrotnym dla metody sondowań elektrooporowych.
 Fig. 6 Example of the equivalence in inverse problem of resistivity sounding.

Bibliografia

- Arabas J., 2001, *Wykłady z algorytmów ewolucyjnych*. Wyd. Naukowo-Techniczne, Warszawa.
- Goldberg D., E., 1998, *Algorytmy genetyczne i ich zastosowanie*. Wyd. Naukowo-Techniczne, Warszawa.
- Press W. H., Flannery B. P., Teukolski S. A., Vetterling W. T., 1986, *Numerical recipes in C. The art of scientific computing*. Cambridge University Press, Cambridge.
- Pszczółka G., Leśniak A., 2004, *Non-linear optimization methods for small earthquake locations*. TASK Quarterly: Scientific Bulletin of Academic Computer Centre in Gdansk, 2004 vol. 8 no. 4 s. 583-590.
- Pszczółka G., Wit R., 2004, *Zastosowanie klasycznego algorytmu genetycznego do lokalizacji hipocentrum wstrząsów górniczych w ośrodku anizotropowym*. Geologia, t. 30, z. 3, s. 331-339.
- Stróżyk G., Pszczółka G., 2006, *Analiza niejednoznaczności zadania odwrotnego poprzez wykreślanie obszarów przyciągań potencjalnych rozwiązań – [w:] Zagadnienia interdyscyplinarne w górnictwie i geologii*, Prace Naukowe Instytutu Górnictwa Politechniki Wrocławskiej; nr 116, Seria: Konferencje; nr 47, s. 155-161.

Summary

The paper discusses the application of genetic algorithms complemented by local Powell minimization for solving inverse problems using two important geophysical methods – the seismic source location and resistivity sounding. The first important conclusion states that most of the geophysical inverse problems are non-linear and linearization of the problems (iterative solution of the successive linear systems) may lead to false solutions depending on the starting point of the algorithm. The straightforward solution of that disadvantage is the use of one of methods of non-linear optimization.

Genetic algorithms are the methods of minimization of – so the called target function in the specific stochastic way. It imitates the biological process of evolution. The number of points (the population) is processes. Each point is represented by a bit – string coding the model parameters (for example Cartesian coordinates of the seismic source and tremor occurrence time). After some manipulation of randomly chosen points the new population is created (new generation) in which individuals minimize the target function (when average value is considered). Four processes that produce offspring generations are: crossing, mutation, valuation and reproduction. In the first one two randomly chosen individuals interchange among themselves a part of the chain of the same length. In mutation one bit of the string changes its value to the opposite one. In the valuation step the value of the target function for each individual from the new population is evaluated. In reproduction the points reproduce with the probability proportional to the goodness of the solution that each string represents. After many generations the population splits into groups which enclose the deep minima of the target function. For each group the best point is chosen and the local minimization process (Powell method) is launched.

The discussed algorithm was used to find the global minimum of the four dimensional target function obtained in the problem of seismic sources location. The data (seismic recordings) from "Rudna" copper mine were used. After a small number of iterations the population of 10000 points splitted into eight clusters. Local Powell method launched from each cluster helps us to

find that one for which the target function reaches global minimum.

Another example of the inverse problem solution was the evaluation of the parameters of stratified media when the investigation method was the resistivity sounding. The minimization of seven dimensional spaces using genetic algorithm resulted in finding the thicknesses and resistivities of the layers. The discussion of the equivalence phenomenon was also presented and the method of its assessment was discussed.

MARIAN NOGA¹

PIONIER – POLSKI INTERNET OPTYCZNY

Słowa kluczowe:

informatyka, sieci komputerowe, przetwarzanie danych, przetwarzanie obrazów

Abstrakt

Polski Internet Optyczny jest programem, którego celem jest zbudowanie infrastruktury informatycznej nauki w Polsce, umożliwiającej prowadzenie badań w zakresie wyzwań współczesnej nauki, technologii usług i aplikacji. Program ten jest kontynuacją programu Komitetu Badań Naukowych, przyjętego w roku 1993. Rezultatem tego programu było powstanie sieci miejskich (MAN), 5 ośrodków komputerowych dużej mocy (KDM) oraz utworzenie sieci szerokopasmowej POL-34. Sieć PIONIER jest siecią szerokopasmową, aktualnie przepustowości 10GB/sek, technika transportowa oparta o DWDM, protokół sieciowy IP. Sieć PIONIER stanowi bazę dla nauki, edukacji, służby zdrowia, administracji i jest otwarta na wszelkie aplikacje wymagające technologii sieciowych.

POLISH OPTICAL INTERNET PIONIER

Key words:

computer science, networking, data processing, image processing

Abstract

The Programme called „Polish Optical Internet PIONIER”, planned for the period 2001-2005, is aimed as further infrastructure development for Polish scientific and academic institutes. It constitutes the continuation of the Committee for Scientific Research previous programme (1993-1999), the aim of which was the scientific infrastructure. The result of these projects are as follows: the establishment of 5 High Performance Computing (HPC) centers and 21 academic metropolitan networks as well, and the development of data bases and software. Also, an intelligent optical network - the Polish Optical Network - was developed, of the following properties: multichannel(the DWDM technics), bandwidth nx (10,40,...)

¹Akademia Górniczo-Hutnicza; Wydział Elektrotechniki, Automatyki, Informatyki i Elektroniki; Katedra Automatyki Napędu i Urządzeń Przemysłowych; Kraków.

Gb/sek and IP protocol. As a result, the uniform interurban fiber optics network was constructed. This network can be the development base for private networks of ATM standard, for SDH channels, for special applications optical lambdas and grids. The network will serve science, education, national health service and administrations applying equal and independent rules.

1. Wstęp

Środowisko naukowe było pierwszym środowiskiem w Polsce, które wprowadziło Internet do swojej codziennej działalności. Było to możliwe dzięki realizacji programu budowy infrastruktury informatycznej nauki, przyjętego przez Komitet Badań Naukowych w 1993 roku. Efektem realizacji tego programu było powstanie:

- 21 miejskich sieci akademickich (MAN),
- 5 ośrodków komputerowych dużej mocy (KDM),
- utworzenie szerokopasmowej sieci POL-34, działającej w technologii ATM,
- rozwój LAN w jednostkach naukowych,
- rozwój baz danych w jednostkach naukowych.

Sieci akademickie ukształtowały rynek Internetu w Polsce. Świadczą o tym dane statystyczne dotyczące przydziałów adresów IP dla użytkowników (Nakonieczny i in. 2002). I tak w roku 2001, łączny udział operatorów naukowo-akademickich wynosił 38% przyznanych przez TP S.A. Pierwsze lata realizacji tego programu wykazały, że sieci naukowe stanowiły rynek szerokopasmowego Internetu w Polsce. Rozwój usług tej sieci i obserwowane tendencje rozwojowe Internetu w Stanach Zjednoczonych i Europie Zachodniej doprowadziły do powołania w roku 2000 nowego programu rozwoju infrastruktury informatycznej nauki na lata 2001-2005 pt. PIONIER: Polski Internet Optyczny- Zaawansowane Aplikacje, Usługi i Technologie dla Społeczeństwa Informatycznego (Rychlicki i in. 2000) i (Nakonieczny i in. 2001).

W projekcie zakłada się realizację następujących celów:

1. Rozbudowa infrastruktury informatycznej nauki w Polsce do poziomu umożliwiającego prowadzenie badań w zakresie wyzwań współczesnej nauki, technologii, usług i aplikacji.
2. Wytwarzanie i przetestowanie pilotowanych usług i aplikacji dla społeczeństwa informatycznego stanowiących podstawę wdrożeń w nauce, edukacji, administracji i gospodarce.

3. Włączenie się Polski do konkurencji w zakresie tworzenia oprogramowania dla nowych zastosowań dla społeczeństwa informatycznego.

Opracowane, wytworzone i wdrożone w środowisku naukowym aplikacje, usługi i technologie mogą być wdrażane we wszystkich dziedzinach życia. Wdrożenia będą wymagały szerokiego udziału zainteresowanych instytucji w realizacji samego programu PIONIER poprzez tworzenie konsorcjów jednostek naukowych z zainteresowanymi instytucjami nienaukowymi w celu realizacji poszczególnych zadań programu. Do pilotażowej realizacji programu wybrano następujące aplikacje: komunikacyjne, nauki obliczeniowe, zdalne nauczanie, informacje przestrzenne telemedyczne, pracy grupowej.

2. Szerokopasmowa Sieć Optyczna w programie PIONIER

Do realizacji podstawowych celów programu PIONIER niezbędne było zaprojektowanie topologii sieci optycznej, dobór urządzeń aktywnych oraz połączenie jej z sieciami zagranicznymi.

Infrastruktura sieciowa, której realizację założono w programie PIONIER powinna spełniać następujące funkcje:

- Przenosić kanał łączności zagranicznej do poszczególnych MAN-ów tak, aby zapewnić równoprawny dostęp środowisk do połączeń zagranicznych, aktualnie kanał ten ma przepustowość 10 Gb/sek.
- Zapewnić szerokopasmowe, dedykowane kanały dla rozproszonych klastrów krajowych, rozproszonych pamięci, itp.
- Zapewnić szerokopasmowe kanały do połączenia w sieci krajowej i międzynarodowej specjalizowanych przyrządów (wirtualne laboratoria).

Takich wymagań nie spełnia, na odpowiednio niskim poziomie cenowym, żadna z sieci komercyjnych.

Z tego powodu należało podjąć budowę sieci światłowodowej, łączącej sieci miejskie (MAN).

Sieć powinna mieć następujące cechy:

- Być siecią nowej generacji, tj. inteligentną o parametrach o rząd wyższych od sieci komercyjnych, z komutacją optyczną i protokołem IP pracującym prawie bezpośrednio na światłowodzie.
- Technika transportową będzie DWDM (ang. Dense Wavelength Division Multiplexing), a równoległe kanały ("lambdy") powinny mieć przepustowość rzędu 10GB/sek, 40Gb/sek i więcej, w miarę rozwoju technologii oraz dostępności odpowiednich produktów.

Budowa ogólnopolskiej sieci optycznej rozpoczęła się w listopadzie 2001 roku od podpisania umów z partnerami środowiska naukowego. Sieć ta, oprócz bardzo nowoczesnych parametrów technicznych, wyprzedzających rozwiązania komercyjne, posiada wiele włókien światłowodowych w realizacjach międzymiastowych (średnio 12). Część tych włókien planuje się wykorzystać do budowy sieci regionalnych, które mogą być wykorzystane, np. dla administracji samorządowej, gminnej, państwowej itp., telemedycyny, zdalnego nauczania itp.

Porównanie sieci PIONIER z najbardziej zaawansowanymi technologiami zastosowań do budowy sieci optycznych środowisk akademickich i naukowych Stanów Zjednoczonych i Zachodniej Europy pozwala stwierdzić, że sieci te są na porównywalnym poziomie.

Porównanie sieci PIONIER i sieci NLR (National Lambda Rail) przedstawia rys.1. Na rys. 2 przedstawiono harmonogram czasowy budowy tych sieci, które praktycznie zostały uruchomione w tym samym okresie.

3. PIONIER - sieci nowej generacji

Sieć Pionier stanowi bazę do realizacji:

- krajowych projektów badawczo-rozwojowych,
- projektów europejskich w 5.PR i 6.PR.

Szybki rozwój nowoczesnych technologii, jaki dokonuje się w ostatnich latach, oferuje użytkownikom możliwość dostępu do nowych, zaawansowanych usług i informacji. Zaawansowane usługi, zgodnie z najnowszymi tendencjami organizowane są w struktury tzw. gridów. Struktury te umożliwiają wytwarzanie i udostępnianie

usług w sposób zintegrowany i powszechny, podobnie jak ma to miejsce w sieci energetycznej. Stąd nazwa tych struktur – gridy. Sieci, w których usługi takie mogą być oferowane, obejmują technologie optyczne w kręgosłupie sieci i powszechne, tanie sieci dostępne z możliwością dedykowania użytkownikowi szerokiego pasma przez nowe aplikacje i usługi. Polskie środowiska naukowe aktywnie uczestniczą w realizacji europejskich programów gridowych w ramach 5. Programu Ramowego. I tak, Cyfronet w Krakowie koordynował projekt CrossGrid (budżet 7 Meuro), w którym wśród 21 partnerów byli: Poznańskie Centrum Superkomputerowo-Sieciowe i ICM Uniwersytetu Warszawskiego.

Poznańskie Centrum Superkomputerowo-Sieciowe (PCSS) koordynowało projekt Gridlab (budżet 5,9 Meuro), w których wśród partnerów są trzy czołowe ośrodki gridowe z USA i dwie firmy komputerowe (SUN, HP). Projekt ten był ukierunkowany na wytwarzanie narzędzi dla aplikacji gridowych.

Na kwotę 35 Meuro przeznaczoną na projekty gridowe w 5. Programie Ramowym, Polska uczestniczyła w projektach obejmujących 15 Meuro, co jest odzwierciedleniem naszej pozycji w tym zakresie. Podstawą polskiej aktywności i uczestnictwa w projektowaniu gridowym było utworzenie centrów KDM, które połączone siecią szerokopasmową umożliwiły prowadzenie prac nad metakomputerami i utworzenie struktury klastra krajowego rys. 3.

Przytoczone fakty świadczą o tym, że polskie ośrodki naukowe podejmując współpracę z ośrodkami zagranicznymi stają się w pełni ich partnerami.

Innymi usługami rozwojowymi w sieci są:

– Edukacja (e Learning)

Edukacja jest jednym z najważniejszych obszarów budowy społeczeństwa informatycznego. W programach europejskich olbrzymią wagę przykładają się do zapewnienia dostępu do elektronicznych treści dla wszystkich, promowanie i nabywanie umiejętności posługiwania się technologiami cyfrowymi, tworzenie nawyków uczenia się przez całe życie i warunków do powstawania treści edukacyjnych o najwyższej jakości. Środowisko akademickie jest ściśle związane z realizacją tych celów, co stworzy równe szanse na dostęp do wiedzy dla wszystkich.

Program PIONIER stworzył pilotowe aplikacje w zakresie: wspomaganie nauczania, dostępu do Internetu oraz telenauczania.

Wraz z budową ogólnopolskiej infrastruktury sieciowej, budowane są struktury regionalne i pilotowe rozwiązania sieci dostępowych. Koncepcja użytkowania tych sieci zakłada stosowanie techniki sieci wirtualnych i dedykowanie określonych zasobów do konkretnych gridów. Jest całkowicie realne powstanie gridu edukacyjnego (edu GRID).

Zadaniem środowiska naukowego powinno być opracowanie standardów i wytworzenie wzorcowych rozwiązań w zakresie programów edukacyjnych oraz dostępu do szerokopasmowych sieci optycznych w tym technologii mobilnych, które powinny stworzyć podstawowy dostęp do treści edukacyjnych w szkołach i kampusach uniwersyteckich. Jednym z podstawowych warunków powodzenia tego przedsięwzięcia jest powszechny dostęp do treści cyfrowych. Na bazie istniejącej infrastruktury sieciowej rozwija się sieć bibliotek cyfrowych rys. 4.

– Telemedycyna

Celem aplikacji telemedycznych jest tworzenie środowiska informacyjnego, wspomagającego rozwój usług telemedycznych dla jednostek naukowych i usługowych. Aplikacja powinna zapewnić dostęp do najnowszych osiągnięć medycznych, zdalny nadzór nad pacjentem oraz obejmować utworzenie wirtualnego konsultanta medycznego, z przekazem zarówno głosu, jak i obrazu wysokiej jakości w wydzielonym dla tego celu paśmie transmisyjnym. Problematyka ta została przedstawiona i wdrożona przez Krakowskie Centrum Telemedycyny i Medycyny Zapobiegawczej (KTCM) w zakresie kardiologii.

Aplikacje telemedyczne były przedmiotem badań w szeregu projektach europejskich z udziałem polskich grup badawczych (6WINIT, CROSSGRID, EGEE i inne).

– Telewizja interaktywna

Celem projektu jest stworzenie instalacji pilotowej umożliwiającej udostępnienie w szerokopasmowej sieci komputerowej programu TVP S.A. w trybie bezpośrednim i interaktywnym oraz materiałów filmowych i dźwiękowych o charakterze edukacyjnym, naukowym, a także kulturalnym, w trybie interaktywnym „na żądanie”. Źródłem tych

materiałów będą zbiory programowe (po ucyfrowieniu) telewizji publicznej.

Dla realizacji tych działań środowisko akademickie reprezentowane przez poznańskie Centrum Superkomputerowo Sieciowe, Akademickie Centrum Komputerowe Cyfronet AGH, wspólnie z firmą ATM S.A. (jako wykonawcą) podjęli się wykonania projektu badawczego – celowego: system udostępniania sygnału audiowizualnego w Polskim Internecie optycznym PIONIER. Projekt celowy MNiI nr 6 T11 067 2001C/5677.

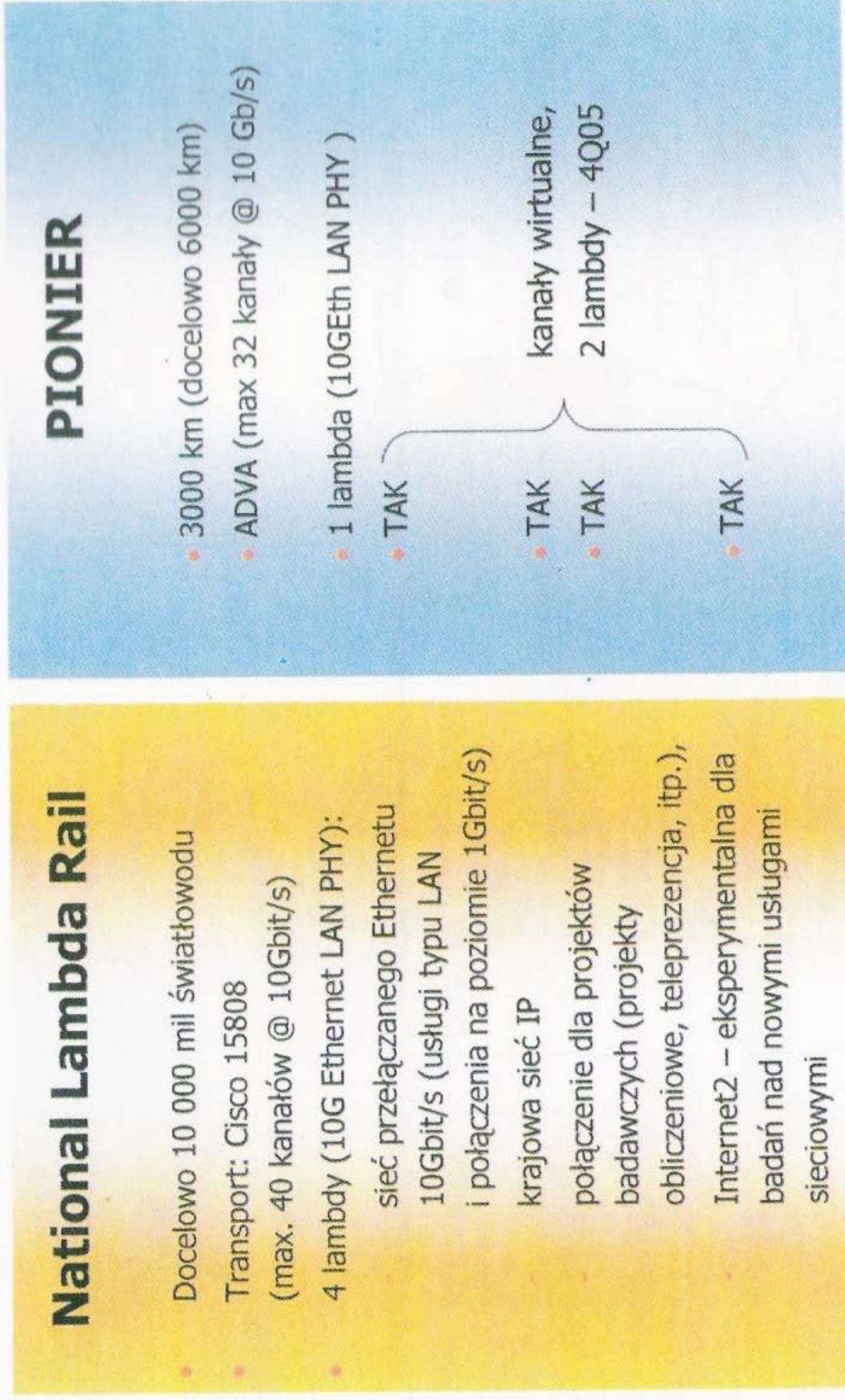
Projekt ma za zadanie zbudowanie infrastruktury umożliwiającej udostępnienie w szerokopasmowej sieci komputerowej PIONIER programu TVP S.A. w trybie bezpośrednim i interaktywnym oraz bogatych materiałów filmowych i dźwiękowych o charakterze edukacyjnym, naukowym, czy też kulturalnym w trybie interaktywnym „na żądanie”. Multimedialna forma przekazu przeznaczona jest dla użytkowników posiadających komputery włączone w sieć Internet. Składa się ona z pliku zawierającego następujące elementy: obraz ruchomy i dźwięk naturalny poddane silnej kompresji (ale o stosunkowo wysokiej jakości audiowizualnej), obraz ruchomy i dźwięk przeznaczone do syntezy, obrazy w standardzie map bitowych i napisy. Strategia rozwoju nowych technik przekazu w ramach Internetu dotyczy dwóch elementów: sieci łączącej o dostatecznej przepływności wraz z dodatkowym wyposażeniem oraz systemu optymalizacji ruchu strumieni sieciowych połączonego z systemem przyznawania licencji. Szczegółowy opis architektury systemu jest zawarty w pracy *Architektura systemu dystrybucji treści dla telewizji interaktywnej* (Czyrnek i in. 2005).

– Wirtualne laboratoria

Jednym z ważnych efektów badań naukowych w zakresie zastosowań gridów i sieci PIONIER jest projekt VLBI- wirtualne laboratorium.

Dzięki współpracy radioteleskopów zlokalizowanych w odległych miejscach i łączeniu obserwacji przeprowadzonych przez wiele radioteleskopów otrzymuje się wyniki porównywalne z wynikami, jakie można by uzyskać przy zastosowaniu hipotetycznego radioteleskopu o średnicy anteny równej odległości między współpracującymi radioteleskopami. Wprowadza to nową jakość w badaniach

SIECI NOWEJ GENERACJI - PORÓWNANIE



Rys. 1. Sieci nowej generacji – porównanie.
Fig. 1. New generation networks – comparison.

GRIDY

POLSKIE PROJEKTY GRIDOWE

PROGRESS
Stworzenie średniościsłego dostępu do wiedzy obliczeniowych realizowanych przez Klaster Komputerów SPM
<http://progress.pwr.pl>

SGIgrid
Realizacja wielkiej skali i optymalizacja do zastosowań w mikroprocesorach laboratoryjnych SGI
<http://www.sgi.com.pl/pl/sgigrd/>

CLUSTERIX
Krajowy Klaster Liczowy
<http://www.clusterix.pwr.pl/>

Superkomputer na żądanie (np. dla obliczeń gotycznych)

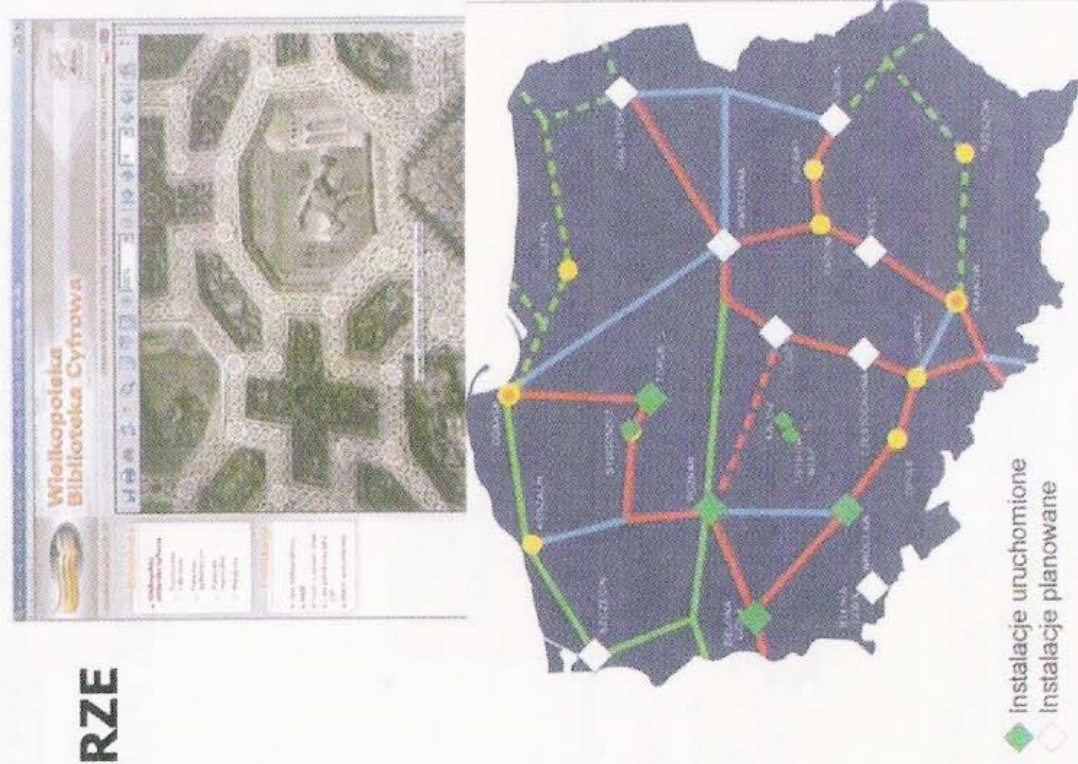
Centrum zapasowe dla IMGW
Równie szanse w dostępie do aparatury laboratoryjnej

Tworzysz leków swojej generacji? Optymalizacja spalania w silnikach lotniczych? Wspierasz zespołów kryzysowych?

Rys. 3. Gridy - Polskie projekty gridowe.
Fig. 3. Grids - Polish grid projects.

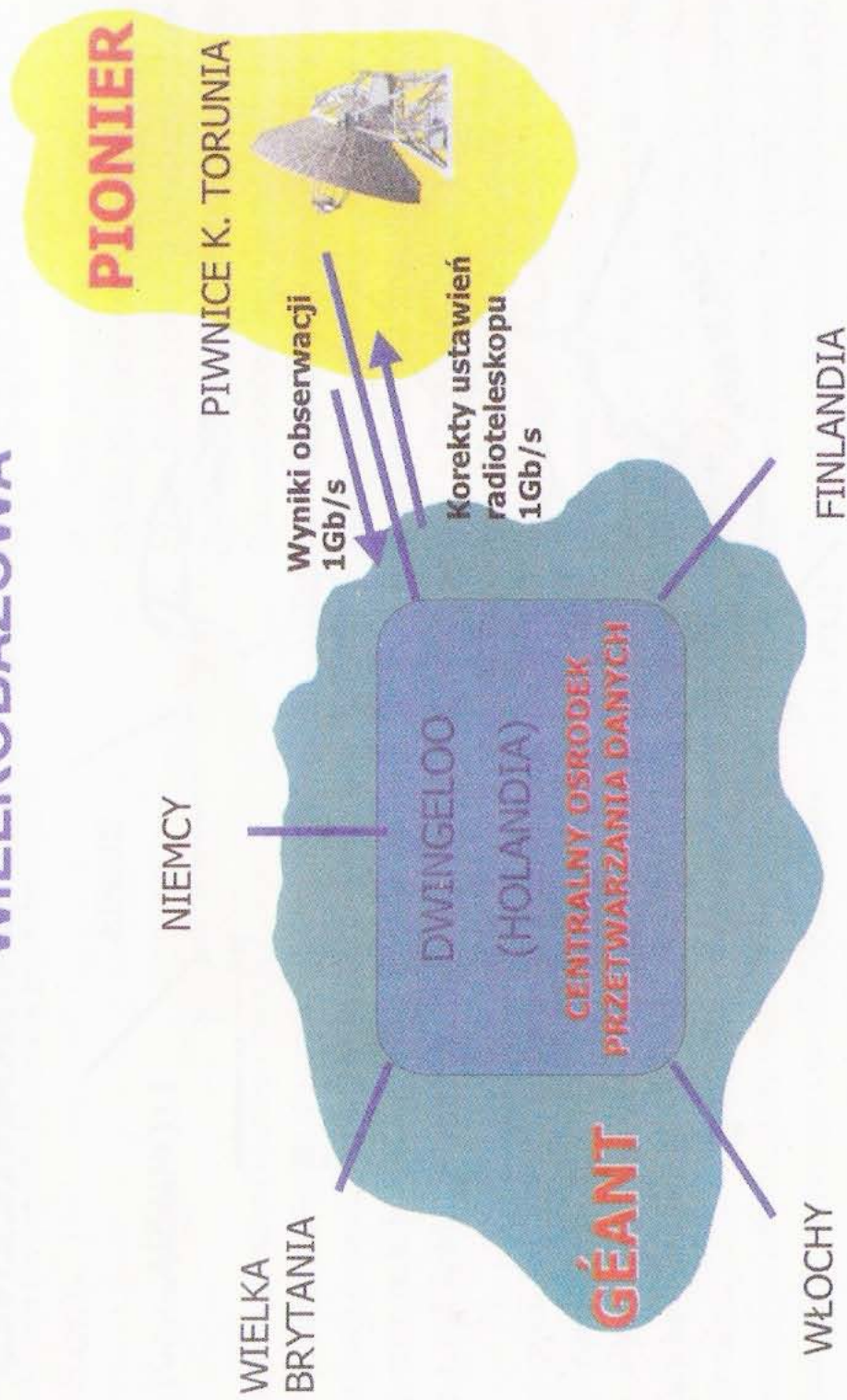
Sieć bibliotek cyfrowych w PIONIERZE

- Rozwój regionalnych bibliotek cyfrowych (12 ośrodków)
- Nowe usługi i aplikacje wykorzystujące zasoby bibliotek cyfrowych
- Powiązanie z systemami katalogowymi
- Funkcje użytkowe
 - Dostęp publiczny i dla zarejestrowanych użytkowników
 - Ochrona przed kopiowaniem i zapisem
 - Subskrypcja, wyszukiwanie, wystawy
 - Różnorodność formatów: html, pdf, DjVu, XML, i in.
 - Jednolita forma komunikacji i wymiany informacji



Rys. 4. Sieci bibliotek cyfrowych w Pionierze.
Fig. 4. Digital libraries networks in PIONIER.

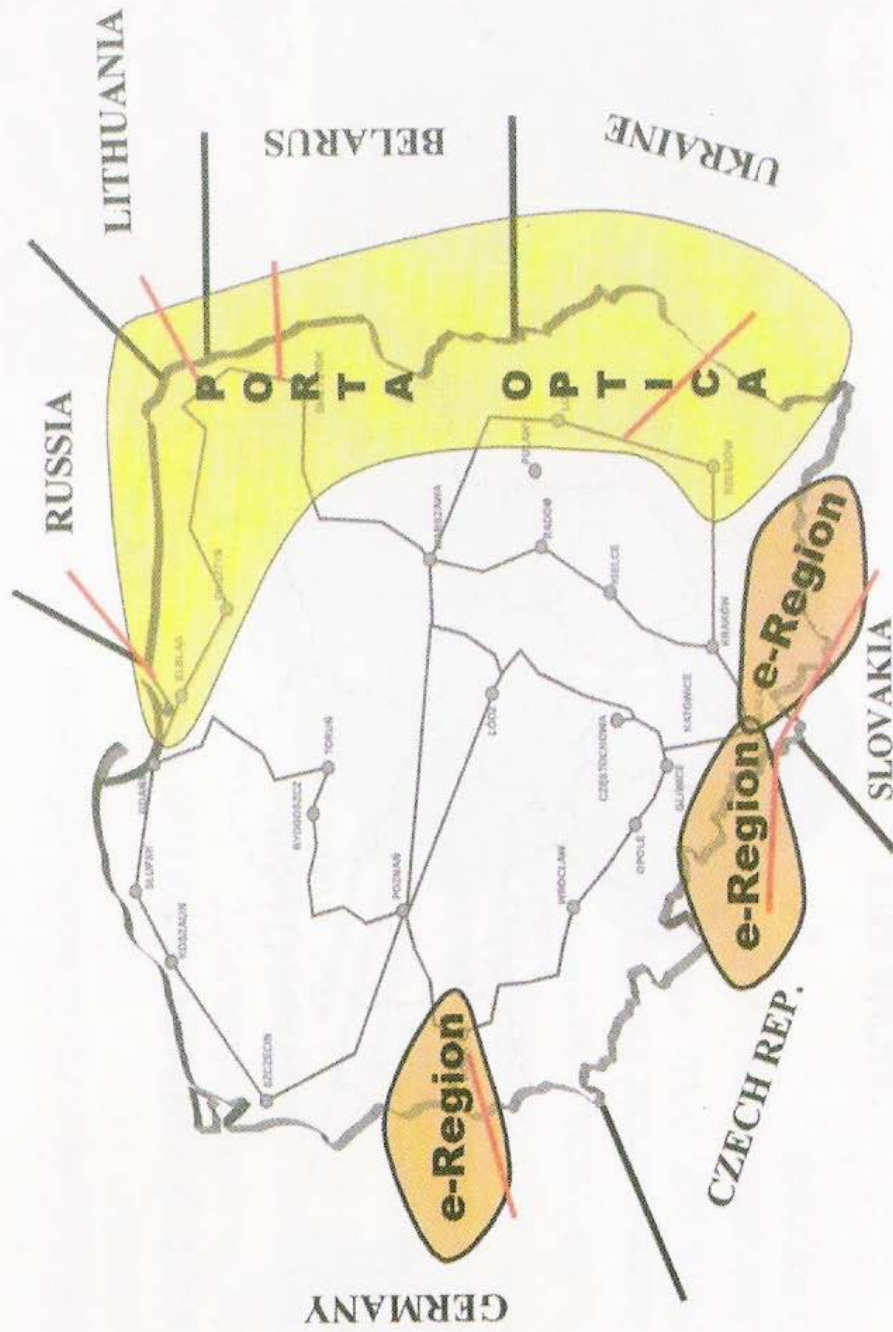
VLBI: RADIOWA INTERFEROMETRIA WIELKOBAZOWA



Rys. 5. VLBI: Radiowa Interferometria Wielobazowa.

Fig. 5. VLBI: Multibase Radio Interferometry.

PIONIER DLA ROZWOJU REGIONALNEJ WSPÓŁPRACY ZAGRANICZNEJ



Rys. 6. Pionier dla rozwoju regionalnej współpracy zagranicznej.
Fig. 6. PIONIER Project - for the international cooperation development.

radioastronomicznych, znacznie zwiększając rozdzielczość uzyskanych wyników w porównaniu z wynikami obserwacji pojedynczego radioteleskopu rys. 5.

4. Regionalna współpraca zagraniczna

Program PIONIER już w fazie projektowania architektury sieci zakładał ściśle powiązanie sieci optycznej z sieciami naszych sąsiadów. Zostały przewidziane punkty styków leżące w pobliżu naszych granic. Stworzyło to warunki do regionalnej współpracy w ramach eRegionów nie tylko w zakresie badań naukowych w ramach projektów europejskich, ale również dla integracji gospodarczej, edukacji i innej rys. 6.

5. Podsumowanie

Program budowy Polskiego Internetu Optycznego PIONIER stworzył platformę dla środowiska naukowego, szkół, instytucji samorządowych, administracji państwowej i wszystkich tych, którzy odczuwają potrzebę dostępu do wiedzy, technologii cyfrowych i informacji zapewniając mu:

- nowoczesne rozwiązania technologiczne na poziomie krajów o najwyższej technologii;
- możliwość współdziałania wielu resortów i instytucji na wszystkich etapach rozwoju, budowy i eksploatacji;
- dostęp do infrastruktury teleinformatycznej niezbędnej dla aktywnego i twórczego uczestnictwa w badaniach naukowych w skali globalnej.

Bibliografia

- Binczewski A., Mayer N., Nabrzyski J., Starzak S., Stroiński M., Węglarz J., 2001, *First experiences with the Polish Optical Internet*. Computer Networks, Vol. 37, Issue 6, p. 747-760
- Czyrnek M., Kuśnierek E., Maurel C., Stroiński M., 2005., *Architektura systemu dystrybucji treści dla telewizji interaktywnej*, Materiały konferencyjne KKRRiT, Kraków.
- Dokument przygotowany na podstawie opracowania wykonanego przez zespół w składzie: Rychlewski J., Węglarz J., Starzak S., Stroiński M., Nakonieczny M., 2000, przy udziale Lesynga B., Nogi M., Niezgódki M., Sasiedzkiego P., Żenkiewicz J.: *PIONIER- Polski Internet Optyczny: Zaawansowane Aplikacje, Usługi i Technologie dla Społeczeństwa Informacyjnego*, Warszawa.
- Kleiber M., Węglarz J., 2002, *Polski Internet Optyczny jako wkład nauko w budowie społeczeństwa informacyjnego*. Materiały konferencyjne PIONIER2002, Poznań, s.11-22.
- Nakonieczny M., Noga M., Sasiedzki P., Starzak S., Stroiński M., 2001, *Infrastruktura Polskiego Internetu Optycznego i jej znaczenie dla społeczeństwa informacyjnego*. Kongres eGospodarki, Warszawa.
- Nakonieczny M., Noga M., Sasiedzki., Starzak S., Stroiński M., 2002, *Możliwość wykorzystania infrastruktury Polskiego Internetu Optycznego dla administracji*. Materiały konferencyjne PIONIER 2002, Poznań, s. 31-42.
- Noga M., 2005, *PIONIER – Polski Internet Optyczny*, Zeszyty problemowe- Maszyny Elektryczne nr 72/2005, str.141-143.

Summary

The scientific community was first in Poland to introduce the Internet into everyday activity. It was possible thanks to the development programme of the computing and networking infrastructure, accepted by the state Scientific Research Committee in 1993. This programme aimed at the establishment of:

- 21 metropolitan area networks (MAN);
- 5 HPC computer centers;
- POL-34 broadband network based upon the ATM technology;

and at the development of:

- LAN's in scientific units;
- Databases in scientific units.

Academic networks played a very important role in the Internet market dynamic increase. Statistical data concerning the IP addresses (Kleiber 2002) confirm this.

The development of relevant services combined with the world trends observation were principal reasons for the establishment, in 2000, for the five years period (2001-2005), of the new infrastructure development programme, namely, **PIONIER** (acronym an abbreviation of its Polish name: **Polish Internet Optical**) – Advanced Applications, Services and Technologies for the Information Society (Nakonieczny *et al.* 2001).

The PIONIER programme aimed at:

1. widening the computing and networking infrastructure in Poland to the level which enables the most advanced scientific and technological research, answering the contemporary challenges;
2. Generation and testing the pilot applications and services for the information society;

3. Poland's active accession into development of programming of new applications for the information society.

Applications, services and technologies elaborated by a scientific community may be useful in the wide range of everyday life domains. Good results can be achieved only through a good cooperation and true involvement of consortia of scientific and non-scientific institutions in the execution of respective jobs.

Following applications have been selected as the pilot ones: communication, calculations, e-learning, telemedicine and working groups.

To achieve the above goals, the PIONIER infrastructure should fulfill following functions:

- all MAN customers should have an equal access to the European main network GEANT (now GEANT-2) of the 10 GB/sec. transmission;
- all local clusters and storage elements should have an access to dedicated broadband channels;
- the same should be assured for virtual laboratories.

Commercial networks can fulfill these requirements but their prices are quite high. So, the construction of the scientific F/O (Fiber Optic – light pipe) network, connecting all MAN's, was the reasonable solution.

Such a new generation network should be an "intelligent" one, i.e. of parameters of one magnitude order higher than the commercial ones, with an optical commutation and with the IP protocol working nearly directly on F/O. DWDM (Dense Wavelength Division Multiplexing) technology should be applied and parallel channels ("lambdas") should have a transmission approx. 10 Gb/sec, 40 Gb/sec, and more, depending on the technology progress.

TOMASZ PIROWSKI¹

INTEGRACJA DANYCH TELEDETEKCYJNYCH POCHODZĄCYCH Z RÓŻNYCH SENSORÓW – PROPOZYCJA KOMPLEKSOWEJ OCENY SCALONYCH OBRAZÓW²

Słowa kluczowe:

teledetekcja, integracja obrazów, przetwarzanie obrazowe, ocena wizualna, ocena formalna

Abstrakt

Artykuł przedstawia propozycję kompleksowej oceny obrazów syntetycznych otrzymywanych różnymi metodami na drodze integracji danych wielospektralnych i panchromatycznych. W pierwszej części dokonano przeglądu stosowanych dotychczas rozwiązań formalnych, graficznych i wizualnych. Zestawienie to uzupełniono o odpowiednie odwołania do literatury, a formuły matematyczne zostały opracowane w ujednocionej formie.

Wśród metod formalnych wskazano najbardziej przydatne wskaźniki statystyczne, w tym wskaźniki syntetyczne, które w ogólny sposób charakteryzują zestaw scalonych obrazów. Na ich podstawie sformułowano metodę tzw. „diagramu wyników”, która pozwala na równoczesną analizę zmienności i współzależności dwóch parametrów, mianowicie uczytelnienia informacji (AIL) i zniekształcenia tematycznego (nQ).

Zaproponowano metodę wizualną opartą o odrębną punktację walorów przestrzennych i spektralnych, co zapewniło relatywnie dużą obiektywność oceniania. Efektem końcowym jest macierzowe pogrupowanie obrazów wg ich podobieństwa i przydatności do fotointerpretacji.

W obu podejściach - formalnym i wizualnym – uzyskano możliwość uniwersalnej selekcji scalonych obrazów do zbioru rozwiązań najlepszych. W części końcowej podjęto dyskusję na temat stopnia zgodności oceny formalnej i wizualnej.

THE INTEGRATION OF REMOTE SENSING DATA ACQUIRED WITH VARIOUS SENSORS – A PROPOSAL OF MERGED IMAGE ASSESSMENT

Key words:

remote sensing, satellite data fusion, merging, image processing, visual assessment, formal assessment

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

²Praca wykonana w ramach badań statutowych AGH nr 11.11.150.459.

Abstract

The article presents an attempt to assess merged images obtained with the use of different methods of integrating multispectral and panchromatic data. The first part of the article is a review of current formal, graphic and visual assessment approaches. The bibliography on the above methods is listed and the symbols used in mathematic formulas are unified.

In the formal methods there have been appointed the most useful statistic indices. Among these there are synthetic indices to characterise a given set of merged images. The diagram of results method is based on the above indices. It analyses simultaneously changes and correlations between two parameters. All this helps with the interpretability of information (AIL) and thematic distortion (nQ).

A visual method based on different valuation of spatial and spectral properties was proposed. It assured relatively objective assessment. The final result is the grouping of images according to their concordance and usefulness in photo interpretation.

In both, formal and visual approaches there was established a universal ability to select the merged images in order to choose the most useful merging method for a particular task. An attempt to compare the level of concordance between formal and visual assessment is shown in the last part of the article.

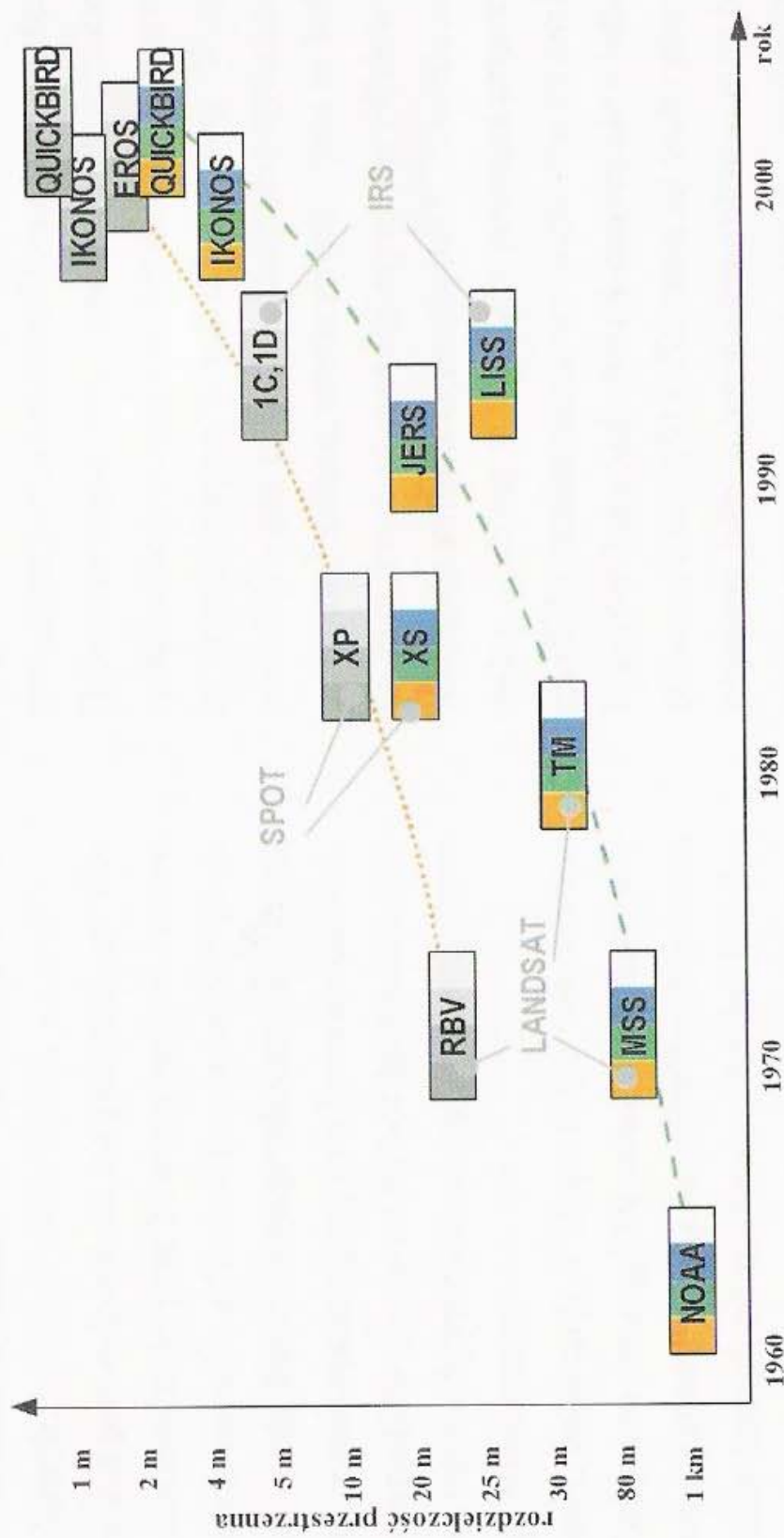
1. Wstęp

Od początku pozyskiwania teledetekcyjnych danych z pułapu satelitarnego występuje różnica w terenowej rozdzielczości przestrzennej obrazów rejestrowanych w trybie wielospektralnym i panchromatycznym a mianowicie: rozdzielczość przestrzenna kanału panchromatycznego jest wielokrotnie wyższa, niż kanałów spektralnych. Wynika to z bariery technologiczno-konstrukcyjnej będącej konsekwencją samej natury zdalnej rejestracji odbitego promieniowania. Konstruowane sensory – kosztem poszerzenia zakresu długości fal rejestrowanego promieniowania elektromagnetycznego – podwyższają zdolność przestrzenną generowanego obrazu. I odwrotnie: zawężenie pozyskiwanego sygnału do wąskiego pasma promieniowania jest możliwe do osiągnięcia tylko kosztem rezygnacji z wysokich rozdzielczości. Wynika to z faktu, że wymiar terenowy chwilowego pola widzenia (IFOV), reprezentowany na obrazie cyfrowym przez pojedynczy piksel, musi być na tyle duży, aby zapewnić wymagany poziom luminacji rejestrowanej przez sensor przy wymaganym minimalnym stosunku sygnału do szumu (Mróz 2001).

Pogodzenie dwóch postulatów, a to: wysokiej rozdzielczości przestrzennej oraz wysokiej rozdzielczości spektralnej obrazów teledetekcyjnych prowadzi do konstruowania platform satelitarnych, z których równocześnie, bądź zamiennie rejestruje się oba typy obrazów: wielospek-

tralne o niższej oraz panchromatyczne o wyższej rozdzielczości. Pomimo wciąż zmieniających się przestrzennych i spektralnych możliwości pozyskiwania danych proporcja tych dwóch rodzajów zobrazowań utrzymuje się w granicach od około 2:1 do 5:1 na korzyść obrazów panchromatycznych (rys. 1). Dotyczy to zarówno rejestracji sensorów z satelitów starszej generacji (np. systemy SPOT i LANDSAT z lat 80-tych), jak i obecnych (np. LANDSAT 7, SPOT 5, IRS) w tym satelitów nowej generacji (IKONOS, QUICKBIRD).

Z tego powodu już u progu rozwoju teledetekcji satelitarnej powstała idea integracji obrazów rejestrowanych za pomocą sensorów o wysokiej rozdzielczości spektralnej i relatywnie niskiej rozdzielczości przestrzennej z obrazami panchromatycznymi o wielokrotnie wyższej rozdzielczości przestrzennej. W literaturze techniki realizujące to zadanie noszą nazwę fuzji, integracji czy scalania (*ang. merging, image data fusion, band sharpening*), a proces ten odbywa się na poziomie piksela. Oznacza to łączenie na niskim poziomie przetwarzania – w odniesieniu do zmierzonych parametrów fizycznych. Obrazy wejściowe poddawane są wstępnemu przetwarzaniu, a produktem jest syntetyczny obraz, na którym jest prowadzona dalsza analiza informacji. Wyższe poziomy integracji – decyzyjny bądź obiektyw – są zazwyczaj wykorzystywane przy łączeniu innych zestawów danych (nie tylko obrazowych), np. obrazów multitemporalnych czy symultanicznych obrazów wielo-



Rys. 1. Rozdzielczość przestrzenna wybranych multispektralnych i panchromatycznych danych satelitarnych.
 Fig. 1. Spatial resolution of the chosen multispectral and panchromatic satellite data.

spektralnych zarejestrowanych z różnych platform satelitarnych (Pohl i Genderen 1998; Pirowski 2004).

Łączenie informacji obrazowej należy rozpatrywać w wielu aspektach. Dlatego dla wyboru optymalnej technologii, prowadzącej do maksymalnego zwiększenia wzrostu informacji, należy odpowiedzieć na kilka istotnych pytań (Pohl i Genderen 1998):

jaki jest cel stawiany przez użytkownika, do czego mają być wykorzystane obrazy?

jakie typy danych lub ich kombinacja będą optymalne dla rozwiązania określonego zagadnienia?

jaki jest najlepszy poziom i algorytm połączenia informacji z posiadanych danych?

jaki jest niezbędny zakres wstępnego przetworzenia danych?

Najważniejsza jest odpowiedź na pierwsze ze stawianych pytań. Determinuje ona bowiem wybór danych dla rozwiązania zagadnienia, a te – w powiązaniu z określonym kryterium oceny końcowego produktu – wpływają na wybór poziomu, a następnie algorytmu łączenia danych. W większości przypadków zarówno wybór techniki łączenia danych, jak i ustalenie kryteriów oceny końcowego produktu wymagają testowania.

W niniejszej publikacji właśnie temu ostatniemu zagadnieniu poświęcono szczególną uwagę, przedstawiając propozycję kompleksowej oceny obrazów uzyskiwanych w procesie łączenia danych na poziomie piksela. Bo chociaż do dnia dzisiejszego opracowano szereg zaawansowanych algorytmów integracji danych teledetekcyjnych, to jednak nie wszystkie spełniają naczelny postulat, w myśl którego zabieg scalania nie powinien redukować ani za nadto zniekształcać informacji spektralnej (Mularz 2001). Zatem opracowanie kompleksowej, a zarazem jak najbardziej uniwersalnej metody oceny jest niezwykle przydatne dla kontroli otrzymywanych syntetycznych obrazów, a przez to umożliwia wybór optymalnej techniki integracji danych dla konkretnego zagadnienia.

2. Metody oceny wyników integracji

– state of the art

Ocena jakości syntetycznych obrazów spektralnych opiera się o zgodne założenie, że spektralne zniekształcenie obrazu po integracji powinno być możliwie niskie przy

maksymalnym możliwym wprowadzeniu informacji przestrzennej (Chavez i in., 1991; Munechika 1993; Wald i in., 1997). Próby porównywania jakości syntetycznych produktów podejmowane były przez różnych autorów. Literaturowy przegląd pozwala wydzielić trzy główne grupy ocen: wizualne, graficzne i formalne.

2.1. Metody wizualne

Opierają się na wizualnej fotointerpretacji produktów lub półproduktów procedur scalania danych. Były pierwszymi wykorzystywanymi do oceny integracji danych (Chavez 1986; Hallada i Cox, 1983). Kompozycje barwne – oparte o obrazy syntetyczne i oryginalne – są ze sobą nawzajem porównywane. Ocena walorów tematycznych (zachowania wejściowej informacji spektralnej) oraz stopnia czytelności szczegółów przebiega jednocześnie, a wyniki są komentowane w sposób opisowy. W niektórych przypadkach – gdy celem scalania jest wyłącznie wzmocnienie walorów fotointerpretacyjnych – jest to jedyne zastosowane kryterium akceptacji wyników (Welch i Ehlers 1987). Niekiedy autorzy oceniają lub kontrolują wizualnie półprodukty scalania, np. obrazy jasności procedur transformacji PCA (analiza składowych głównych) lub IHS (przestrzeń kolorów jasność-odcień-nasycenie) lub obrazy różnic (Chavez i in. 1991). Najczęściej waloryzacja wizualna jest używana jako jeden z elementów oceny obok używanego innego aparatu pomiarowego np. graficznego i/lub formalnego (Chavez i in. 1991; Cliché i in. 1985; Hill i in. 1999; Mróz 2001; Raptis i in. 1998; Rigol i Chica-Olmo 1998; Steinnocher 1999; Aiazzi i in. 1999; Ranchin i Wald 2000; Terretez 1997; Vaughan i Oune 1998).

Pojawiają się próby sformalizowania oceny wizualnej, głównie ze względu na rosnącą ilość porównywanych ze sobą obrazów oraz dywersyfikację kryterium oceny (zachowanie oryginalnej informacji tematycznej przestaje być jedynym kryterium). Np. oceny wizualne oparte o punktacje kompozycji barwnych w kontekście uzyskania użyteczności dla konkretnego celu prezentują Mularz i in. (2000a, 2000b). Garguet-Duport i in. (1996) oceniają użyteczność odrębnie dla wybranych kategorii terenu. Pellemans i in. (1993) wykonują waloryzacje w oparciu o zespół niezależnie oceniających doświadczonych fotointerpretatorów, a wynikiem końcowym są średnie z przyznanych punktów.

Vrabel (1996) proponuje wizualną metodę określania „efektywnej rozdzielczości terenowej” pikselu obrazu scalonego. Wykorzystuje logarytmiczną zależność pomiędzy wielkością terenową pikselu, a oceną użyteczności obrazu (NEL/IAD, 1994). W oparciu o uzyskane wyniki formułuje ogólne zasady obliczeń wymagające jedynie podania wejściowych rozdzielczości obrazów scalanych. Temat ten został rozwinięty w rozdziale 2.3.

2.2. Metody graficzne

Należą do nich różnorodne porównania graficzne wykonywane w oparciu o parametry i dane uzyskane z obrazów syntetycznych. Do takich analiz należą np.: krzywe spektralne, profile spektralne, porównanie histogramów gęstości optycznej obrazów, analiza na wykresach zmian wartości parametrów statystycznych.

Krzywe spektralne wykreślane są w oparciu o wskazane niewielkie obszary reprezentujące wybrane rodzaje pokrycia terenu. Próbką odpowiedzi spektralnych dla danego obiektu jest uśredniana. Porównanie oryginalnych krzywych z uzyskanymi na obrazach scalonych stanowi podstawę do określenia stopnia zniekształcenia informacji spektralnej na poszczególnych typach użytkowania (Chavez i in. 1991; Zhang 1999; Garguet-Duport i in. 1996).

Zhang (1999) proponuje wykonywać profile spektralne poprzez wybrane fragmenty sceny. Obrazy scalone pozbawione znaczących zniekształceń posiadają profile o większych amplitudach i lokalnych skokach wartości jasności w stosunku do kształtu oryginalnego, ale nie są to zmiany istotne. Duże różnice przebiegu krzywych w stosunku do oryginałów wskazują na wysokie zniekształcenie spektralne obrazów.

Analiza kształtu histogramu obrazu pozwala wstępnie ocenić skalę zmian częstości występowania jasności pikseli na obrazie. Jest graficzną metodą określenia zachowania średniej jasności spektralnej sceny i wariancji danych na obrazie (Carper i in. 1990; Hill i in. 1999; Mróz 2001; Garguet-Duport i in. 1996). Rezultaty liczbowe można otrzymać stosując podejścia formalne.

W metodach, gdzie poprzez zmianę parametrów (np. wag, wielkości okna filtracji) można otrzymać zestaw różnej jakości obrazów syntetycznych, zachodzi w pewnych przypadkach potrzeba śledzenia zmian parametrów formal-

nych w postaci graficznych wykresów lub zestawień. Taka prezentacja wyników, szczególnie pomiędzy dużą ilością danych, ułatwia wzajemne porównania, poszukiwanie współzależności czy określenie granicznych parametrów dla użyteczności obrazów. Przykładem tego typu zestawień są prace Béthune i in. (1997, 1998).

2.3. Metody formalne

Poprzez obliczenie parametrów statystycznych otrzymuje się formalną charakterystykę informacji zawartej na obrazie. Zaproponowano szereg narzędzi do oceny jakości scalanych danych pod względem walorów spektralnych i przestrzennych. Opierają się one o analizę pojedynczych obrazów syntetycznych w relacji do oryginalnych wyciągów spektralnych i obrazu panchromatycznego.

Dokonywane są próby ustalenia metodologii oceny spektralnej wyników scalania (Wald i in. 1997; Wald 2000) oraz opracowania syntetycznej oceny działania metody (Munehika i in. 1993; Ranchin i Wald 2000; Wald 2000; Mularz i in. 2000a, 2000b). Celem jest uzyskanie jednego parametru, którego działanie byłoby uniwersalne dla różnych zestawów scalanych danych (niezależne np. od ilości obrazów, rozdzielczości, kalibracji sensora), a przy tym proste do interpretacji i oceny jakości spektralnej scalonego zestawu danych.

2.3.1. Parametry wykorzystywane do oceny zniekształcenia spektralnego

Analiza formalna zniekształcenia spektralnego pojedynczych obrazów bazuje na operowaniu na wartościach jasności pikseli (WJP). Stosuje się trzy generalne rozwiązania:

obliczanie wprost zależności pomiędzy obrazami scalonymi a oryginalnymi (np. korelacje, różnice, średni błąd kwadratowy pomiędzy jasnością odpowiadających sobie pikseli porównywanych obrazów itd.);

o odrębne opracowanie charakterystyki obrazu scalonego i oryginalnego, a następnie porównanie zgodności ich parametrów (np. entropia obrazu, wariancja, średnia jasność sceny itd.);

utworzenie obrazu różnic pomiędzy zarejestrowanym obrazem oryginalnym i utworzonym z nie-

go obrazem syntetycznym, a następnie opracowanie jego charakterystyki (np. średnia jasność, wariancja, ilość pikseli równa zero itd.).

Poniżej zestawiono używane miary parametryczne wraz z krótkimi komentarzami i odwołaniami literaturowymi.

a) współczynnik korelacji (r) pomiędzy obrazem oryginalnym (MS) a skalonym (F)

$$r_{MS}(b) = \frac{\sum_{x=1}^n \sum_{y=1}^m [(MS(x, y, b) - MS_{sr}(b)) * (F(x, y, b) - F_{sr}(b))]}{[\sum_{x=1}^n \sum_{y=1}^m [MS(x, y, b) - MS_{sr}(b)]^2 * \sum_{x=1}^n \sum_{y=1}^m [F(x, y, b) - F_{sr}(b)]^2]^{1/2}} \quad (1)$$

$$MS_{sr}(b) = \sum_{x=1}^n \sum_{y=1}^m MS(x, y, b) / [n * m] \quad (2)$$

$$F_{sr}(b) = \sum_{x=1}^n \sum_{y=1}^m F(x, y, b) / [n * m] \quad (3)$$

Gdzie:

$MS(x, y, b)$ – obraz spektralny w rozdzielczości obrazu panchromatycznego, zmultiplikowane piksele;

$F(x, y, b)$ – syntetyczny obraz spektralny po fuzji;

$F_{sr}(b)$, $MS_{sr}(b)$ – średnia wartość jasności pikseli na obrazie;

b – identyfikacja kanału spektralnego;

n, m – ilość kolumn i wierszy obrazu o rozdzielczości przestrzennej równej obrazowi panchromatycznemu.

Jest to najpopularniejszy i jeden z pierwszych używanych parametrów (Carper i in. 1990; Shettigara 1992; Prinz i in. 1997; Terratez 1997; Béthune i in. 1997; Rigol i Chica-Olmo 1998; Raptis i in. 1998; Bretschneider i Kao 2000; Mularz 2001). Wielkość (r) wskazuje na siłę związku informacji zawartych na nowym obrazie ze swoim oryginałem. Idealna wartość wynosi $r=1$ (nie dochodzi do utraty informacji spektralnej na skalonym obrazie). Wadą parametru jest brak kontroli nad średnią jasnością sceny obrazu – występujące różnice pomiędzy średnią jasnością obrazu skalonego a oryginału nie wpływają na wartość (r).

b) różnica średniej jasności scen porównywanych obrazów

$$RJ(b) = F_{sr}(b) - MS_{sr}(b) \quad (4)$$

c) średnia bezwzględna różnica jasności odpowiadających sobie pikseli porównywanych obrazów (Garguet-Duport 1996; Zhou i in. 1998):

$$RJB(b) = \sum_{x=1}^n \sum_{y=1}^m |F(x, y, b) - MS(x, y, b)| / [n * m] \quad (5)$$

d) relatywna średnia różnica jasności odpowiadających sobie pikseli na porównywanych obrazach – tzw. *Deviation Index* – DI (Béthune i in. 1997, 1998):

$$DI(b) = \sum_{x=1}^n \sum_{y=1}^m [|F(x, y, b) - MS(x, y, b)| / MS(x, y, b)] / [n * m] \quad (6)$$

e) różnica wariancji obrazów (Shettigara 1992; Garguet-Duport 1996):

$$RW(b) = |\sum_{x=1}^n \sum_{y=1}^m [F(x, y, b) - F_{sr}(b)]^2 / [n * m] - \sum_{x=1}^n \sum_{y=1}^m [MS(x, y, b) - MS_{sr}(b)]^2 / [n * m]| \quad (7)$$

f) średni błąd kwadratowy RMS jasności pikseli obrazu po fuzji w stosunku do odpowiadających im jasności pikseli oryginalnych (Munehika i in. 1993):

$$RMS(b) = [\sum_{x=1}^n \sum_{y=1}^m [F(x, y, b) - MS(x, y, b)]^2 / [n * m]]^{1/2} \quad (8)$$

h) entropia obrazu (Liao i in. 1998; Béthune i in. 1997):

$$E(b) = - \sum_{i=1}^w P(i) * \log_2 P(i) \quad (9)$$

Gdzie: $P(i)$ – prawdopodobieństwo wystąpienia na obrazie pikseli o jasności na poziomie i .

Często wykorzystuje się tzw. obraz różnic powstały w wyniku odejmowania od siebie WJP obrazu syntetycznego i obrazu oryginalnego (10). Na takim obrazie oblicza się średnią jasność (11) i odchylenie standardowe (12). Następnie, w oparciu o te wartości, oblicza się RMS dla obrazu syntetycznego (13).

$$OR(x, y, b) = F(x, y, b) - MS(x, y, b) \quad (10)$$

g) średnia jasność obrazu różnic – alternatywa droga obliczenia $RJ(b)$ ze wzoru (4):

$$OR_{sr}(b) = \sum_{x=1}^n \sum_{y=1}^m OR(x, y, b) / [n * m] \quad (11)$$

h) odchylenie standardowe:

$$\delta OR(b) = [\sum_{x=1}^n \sum_{y=1}^m [OR(x, y, b) - OR_{sr}(b)]^2 / [n * m]]^{1/2} \quad (12)$$

Wtedy wzór (8) można zastąpić:

$$RMS(b) = [OR_{sr}(b)^2 + \delta OR(b)^2]^{1/2} \quad (13)$$

Operowanie obrazami różnic jest najczęściej spotykaną metodą pomiarową w procesie integracji. Standardowo używanym parametrem jest RMS oraz ilość pikseli równych 0 (lub zbliżonych do 0, przyjmuje się pewien próg) wyrażona w procentach wszystkich pikseli obrazu. Ta wielkość jest liczbą pikseli na nowym obrazie syntetycznym, która nie uległa w ogóle zmianie spektralnej (dla przyjętego progu równego 0) lub uległa zmianie uznanej za nieistotną (jeśli przyjmuje się próg większy od wartości 0).

Niekiedy dla uniezależnienia się od jednostek i współczynników kalibracji sensora podaje się obliczone parametry średniej różnicy jasności obrazu RJ(b) (14) oraz RMS(b) (15) w postaci względnej tj. obliczonej w stosunku do średniej jasności sceny oryginalnej (Ranchin i Wald 1997; Raptis i in. 1998; Wald i in. 2000):

$$OR_{sr\%}(b) = RJ_{\%}(b) = 100 * OR_{sr}(b) / MS_{sr}(b) \quad (14)$$

$$RMS_{\%}(b) = 100 * RMS(b) / MS_{sr}(b) \quad (15)$$

Podejście prowadzące do uporządkowanej oceny jakości procedur scalania danych przedstawiają Wald i in. (1997), Ranchin i Wald (2000), Wald (2000). Proponują zastosować do oceny następujące wytyczne:

obraz syntetyczny, ponownie zdegradowany do oryginalnej rozdzielczości, powinien być możliwie identyczny z oryginalnym;

obraz syntetyczny powinien być możliwie identyczny z obrazem, jaki dostarczałby odpowiadający mu sensor o rozdzielczości równej syntetycznemu obrazowi;

wielospektralny, syntetyczny zestaw zobrazowań powinien być możliwie identyczny z zestawem obrazów wielospektralnych, które dostarczałby odpowiadający im sensor skanujący w rozdzielczości równej syntetycznym obrazom.

Realizację pierwszych dwóch wytycznych autorzy prowadzą za pomocą klasycznych rozwiązań (10), (14), (15) (o ile dla drugiej wytycznej dysponuje się odpowiednimi danymi). Trzecie rozwiązanie wymaga opracowania metody, która pozwoli ocenić łącznie nie jeden kanał, ale ich zestaw. Wald (2000) dowodzi o potrzebie przyjęcia jednej wartości opisującej syntetycznie jakość scalonych obrazów, gdyż analiza szeregu otrzymywanych parametrów z pojedynczych kanałów jest nieefektywna i trudna do uogólnienia dla przeciętnego użytkownika. Wald zakłada, że nowa miara powinna spełniać trzy wymagania:

niezależności od jednostek i współczynników kalibracji instrumentu sensora;

niezależności od ilości kanałów spektralnych (warunek konieczny żeby porównać obrazy syntetyczne otrzymane z różnych sensorów, o różnej liczbie kanałów);

niezależności od krotności wzrostu rozdzielczości przestrzennej (stosunku rozdzielczości obrazu panchromatycznego do rozdzielczości obrazu spektralnego).

Próbie skonstruowania tego typu jednostki podjął wcześniej Munechika (1993). Podał wzór na obliczanie tzw. błędu całkowitego metody (*Total Error*) sumując z wszystkich kanałów błędy kwadratowe odchyłek pomiędzy obrazem po fuzji a oryginałem:

$$TE(k) = \sum_{b=1}^k RMS(b) \quad (16)$$

Ten wzór nie spełnia żadnego z postawionych warunków, a szczególnie pierwszego. Ranchin i Wald (2000) przedstawili parametr RASE (*Relative Average Spectral Error*) określający średni względny błąd spektralny dla dowolnej ilości kanałów:

$$RASE_{\%} = 100 / M_{sr}(k) * [1/k \sum_{b=1}^k RMS(b)^2]^{1/2} \quad (17)$$

$$M_{sr}(k) = 1 / k \sum_{b=1}^k MS_{sr}(b) \quad (18)$$

Gdzie: $M_{sr}(k)$ – średnia jasność sceny dla k obrazów.

RASE jest wyrażone w [%] i charakteryzuje średnie wyniki uzyskiwane daną metodą. Spełnia warunek pierwszy i drugi. Takie podejście zastosowali m.in. Mularz i in. (2000a). Wald (2000) rozwija to rozwiązanie do tzw. *new Quantity* spełniającego wszystkie trzy warunki:

$$nQ_{oryg\%} = 100 * P_r / MS_r * [1/k \sum_{b=1}^k RMS(b)^2 / MS_{sr}(b)^2]^{1/2} \quad (19)$$

Gdzie: P_r , MS_r – rozdzielczość łączonych zobrazowań.

2.3.2. Parametry wykorzystywane do oceny wzmocnienia przestrzennego

W przeciwieństwie do szeregu parametrów określających zniekształcenie spektralne, funkcjonuje bardzo ograniczona ilość formalnych propozycji pomiaru wzmocnienia przestrzennego scalonych obrazów. Zhou i in. (1998)

wręcz twierdzą, że „nie znaleźli w dostępnej im literaturze metod szacowania jakości przestrzennej, poza metodami wizualnymi”. Powyższe zastrzeżenie autorów pada pomimo tego, że funkcjonuje od dawna w literaturze współczynnik korelacji (r) jako miara zgodności obrazu panchromatycznego z obrazem scalonym (20) (Carper i in. 1990; Chavez i in. 1991; Terratez 1997; Prinz i in. 1997; Bretschneider i Kao 2000; Vaughan i Oune 1998; Rigol i Chica-Olmo 1998; Wiemker i in. 1998). Jest on interpretowany jako wskaźnik zakresu wprowadzenia informacji przestrzennej do obrazu spektralnego. Im wyższy współczynnik (r), tym większa ilość informacji przestrzennej znajduje się na obrazie. Wadą tego podejścia jest fakt, że na wartość parametru wpływa nie tylko zgodność informacji przestrzennej, lecz również zgodność informacji tematycznej.

$$r_{\text{P}}(b) = \frac{\sum_i^m \sum_j^n [(P(x, y) - P_{sr}) * [F(x, y, b) - F_{sr}(b)]]}{[\sum_i^m \sum_j^n [P(x, y) - P_{sr}]^2 * \sum_i^m \sum_j^n [F(x, y, b) - F_{sr}(b)]^2]^{1/2}} \quad (20)$$

$$P_{sr} = \sum_{x=1}^n \sum_{y=1}^m P(x, y) / [n * m] \quad (21)$$

Gdzie: P_{sr} – średnia wartość jasności pikseli na obrazie PAN.

Wady tej unikają Zhou i in. (1998) stosując filtrację górnoprzepustową w oknie 3x3 na obu obrazach: panchromatycznym i syntetycznym. Dopiero przefiltrowane dane są ze sobą korelowane. W metodzie tej czyni się założenie, że filtracja górnoprzepustowa pozbawia obrazy informacji tematycznej a pozostawia przestrzenną. Innymi słowy, dane przestrzenne unikalne dla obrazu panchromatycznego są skoncentrowane w wysokich częstotliwościach. Zhou i in. wykorzystują do przetwarzania laplasjan zdefiniowany za pomocą maski 3x3 (22).

$$HPF_{3 \times 3}(i, j) = \begin{bmatrix} -1 & -1 & -1 \\ -1 & +8 & -1 \\ -1 & -1 & -1 \end{bmatrix} \quad (22)$$

Taka filtracja ma bezkierunkowy charakter i jej wynikiem jest wykrycie i podkreślenie na obrazie wszystkich krawędzi i konturów obiektów niezależnie od kierunków ich przebiegu (Tadeusiewicz i Korohoda 1997). Krawędzie - pozbawione walorów spektralnych – są porównywane ze sobą poprzez określenie wzajemnej ich ko-

relacji ($r_{\text{HP}3}$) (23) (24) (25). Im wyższa jest wartość bezwzględna (r), tym więcej informacji przestrzennej ze zobrazenia panchromatycznego zostało „załadowane” do kanałów spektralnych. Współczynnik ten wykorzystali w badaniach m.in. Li J. (2000) oraz Bretschneider i Kao (2000). Wzory (24) i (25) są przykładem konwolucji (spłotem funkcji) dyskretnej. Wzór (23) dla obliczenia (r) przyjmuje uproszczoną formę w stosunku do (20), ponieważ obrazy po filtracji górnoprzepustowej posiadają średnią WJP równą zero.

$$r_{\text{HPF}3 \times 3}(b) = \frac{\sum_i^m \sum_j^n [PHP_{3 \times 3}(x, y) * FHP_{3 \times 3}(x, y, b)]}{[\sum_i^m \sum_j^n PHP_{3 \times 3}(x, y)^2 * \sum_i^m \sum_j^n FHP_{3 \times 3}(x, y, b)^2]^{1/2}} \quad (23)$$

$$PHP_{3 \times 3}(x, y) = \sum_{i=-1}^1 \sum_{j=-1}^1 P(x + i, y + j) * HPF_{3 \times 3}(i, j) \quad (24)$$

$$FHP_{3 \times 3}(x, y, b) = \sum_{i=-1}^1 \sum_{j=-1}^1 F(x + i, y + j, b) * HPF_{3 \times 3}(i, j) \quad (25)$$

Gdzie:

$PHP_{3 \times 3}(x, y)$ – wynik filtracji górnoprzepustowej obrazu panchromatycznego w oknie 3x3;

$FHP_{3 \times 3}(x, y, b)$ – wynik filtracji górnoprzepustowej syntetycznego obrazu spektralnego w oknie 3x3;

Vrabel (1996, 2000) proponuje metodę określania jakości przestrzennej zobrażeń łączącą rozwiązania analityczne z fotointerpretacją. Podstawą metody jest określanie efektywnej rozdzielczości terenowej pikseli obrazu scalonego poprzez punktację w skali 0-100 (0 – obraz po integracji jest tak samo użyteczny jak przed, 100 – obraz po integracji jest użyteczny tak jak hipotetyczny prawdziwy obraz w podwyższonej rozdzielczości). Następnie przeprowadzane jest oszacowanie z wykorzystaniem opracowanej przez NEL/IAD (1994) zależności pomiędzy jakością obrazu a terenową wielkością pikseli:

$$F_{re} = MS_r * (MS_r / P_r)^{u/100} \quad (26)$$

Gdzie:

MS_r – terenowa rozdzielczość pikseli obrazu spektralnego;

P_r – terenowa rozdzielczość pikseli obrazu PAN;

F_{re} – efektywna terenowa rozdzielczość pikse-
la obrazu po integracji;

u – „użyteczność” obrazu scalonego ocenia-
na wizualnie w skali 0-100;

Vrabel przeprowadził testy na wielu różnych kombinacjach danych. Punktację walorów przeprowadzał zespół doświadczonych fotointerpretatorów, a wzajemna zgodność ich ocen była analizowana metodami statystycznymi. W oparciu o uzyskane wyniki Vrabel podał wzory (27) i – wg niego dokładniejszy – (28) opracowane dla kombinacji danych o wielkości pikseli w granicach 5 m – 30 m. Formuły pozwalają określić w przybliżeniu wartość F_{re} bez uciekania się do żmudnej procedury oceny wizualnej:

$$F_{re1} = MS_r - 0,94 * (MS_r - P_r) \quad (27)$$

$$F_{re2} = 1,103 * P_r - 0,004 * P_r^2 + 0,001 * MS_r^2 + 0,37 \quad (28)$$

Nie znaleziono w literaturze prób opracowania syntetycznego parametru określania wzmocnienia informacji przestrzennej na zestawie zobrazowań, który pozwalałby – w analogiczny sposób jak wskaźniki TE (16), RASE (17) czy nQ (19) dla informacji spektralnej – scharakteryzować w uogólniony sposób przeciętne uczytelnienie uzyskiwane daną metodą.

3. Propozycja kompleksowej oceny obrazów scalonych

Poniżej przedstawiono próbę opracowania uniwersalnych kryteriów oceny formalnej i oceny wizualnej produktów obrazowych, jakie można otrzymać stosując różnego rodzaju algorytmy integracji. Przy ocenie formalnej podstawowym założeniem było dokonanie prawidłowej selekcji wskaźników, aby na podstawie wybranych móc scharakteryzować w sposób syntetyczny jakość zestawu danych obrazowych, zarówno pod kątem zniekształcenia spektralnego (ocena tematyczna), jak i pod kątem wzmocnienia szczegółami obrazów (ocena przestrzenna). W drugim kroku dokonano próby skojarzenia obu wybranych parametrów celem wskazania zbioru najkorzystniejszych wyników spośród uzyskiwanych z dowolnej ilości metod integracji.

Z kolei dla proponowanej metodyki oceny wizualnej przygotowano odpowiedni klucz fotointerpretacyjny, który w sposób możliwie obiektywny pozwala na niezależną

ocenę właściwości przestrzennych i tematycznych kompozycji barwnych, a przez to pozwala wybrać metody scalania, które w obu tych kategoriach uzyskują wysokie noty.

3.1. Diagram wyników

W wyniku testów za najlepszy wskaźnik do syntetycznej oceny obrazów pod względem tematycznym wybrano $nQ_{orig\%}$ (19). Badania prowadzono na jednym zestawie multisensorycznych danych (TM i IRS-PAN), dlatego też uproszczono oryginalną postać parametru (19) do formuły (29) rezygnując we wzorze z ilorazu rozdzielczości przestrzennej łączonych obrazów.

$$nQ_{\%} = 100 * [1/k \sum_{b=1}^k RMS(b)^2 / MS_{st}(b)^2]^{1/2} \quad (29)$$

Wielkość nQ jest wyrażona w [%] dla dowolnej ilości kanałów (np. całej metody bądź kompozycji barwnej). Jest odporna na błędy związane z kalibracją i zmianą jednostek. Proporcje występowania błędu spektralnego w kanałach nie są obojętne dla wartości końcowej parametru – ta wada występowała w przypadku RASE (18) – ponieważ RMS dla danego kanału bezpośrednio we wzorze odnosi się do jego średniej jasności.

Dla przykładu: przy identycznej sumie błędów RMS dla rozważanego zestawu syntetycznych obrazów (ustalony parametr TE ze wzoru (16)) najniższe wartości nQ wystąpią, gdy błędy w kanałach będą rozłożone proporcjonalnie do ich średniej odpowiedzi spektralnej. Parametr RASE nie ulegnie zmianie bez względu na rozkład błędów, nawet w skrajnym przypadku, gdy zniekształcenie będzie posiadał tylko jeden kanał. Natomiast oba parametry (RASE i nQ) będą reagować, gdy przy ustalonym TE kanały będą miały wyższe średnie jasności sceny (relatywne błędy spektralne będą maleć). Duża wrażliwość parametru nQ jest korzystna, ponieważ zapewnia zarówno prostotę i uniwersalność oceny (wartość parametru wyrażono w %) jak i reaguje na duże dysproporcje w obciążaniu błędami kanałów w rozpatrywanym zestawie danych obrazowych.

W celu określenia ilości informacji przestrzennej zawartej na obrazach scalonych wykorzystano propozycję Zhuo i in. (1998) – $r_{HPF3x3}(b)$ (23). Wskaźnik $r_{HPF3x3}(b)$ jest czuły na zgodność krawędzi (szczegółów) zawartych na

obrazie panchromatycznym z zawartymi na scalonym wy-cięgu spektralnym. Dla lepszej interpretacji jego wartości przyjęto rozwiązanie o stosowaniu wartości R^2 (współczynnika determinacji korelacji) i wyrażeniu go w [%] (30). Wtedy wartość parametru $IL_{\%}$ można interpretować jako stopień obecności krawędzi na scalonym obrazie spektralnym w stosunku do znajdujących się w kanale panchromatycznym:

$$IL_{\%}(b) = 100\% * r_{HP3}(b)^2 \quad (30)$$

Zaproponowano syntetyczny parametr określający średnie wzmocnienie przestrzenne dla KB lub dla pełnego zestawu kanałów. Jest on oparty o średnią arytmetyczną współczynników $IL_{\%}$ (31).

$$AIL_{\%} = 1/k \sum_{b=1}^k IL_{\%}(b) \quad (31)$$

Dzięki powyższym parametrom $nQ_{\%}$ i $AIL_{\%}$ możliwe jest opracowanie czytelnych rankingów opartych o pojedyncze kryteria jakości przestrzennej i spektralnej obrazów scalonych różnymi metodami. Jest to pierwsza wskazówka dla wnioskowania na temat ich przydatności (bądź nie). Tego typu podejście, jednak oparte o inne wskaźniki, stosują m. in. Béthune i in. (1998), Zhou i in. (1998), Bretschneider i Kao (2000), Mularz i in. (2000b), Ranchin i Wald (2000). Analizy tego typu są wystarczające dla formalnego oszacowania charakteru działania danej metody. Wielkość wskaźnika dla konkretnego produktu scalania, porównana do pozostałych wyników, daje orientację, co do skali i rozpiętości występujących wartości wskaźników opisujących błędy spektralne lub wzmocnienie przestrzenne. Co istotniejsze, prowadzi też do ustalenia względnej pozycji w zestawieniu z pozostałymi obrazami. W konsekwencji pozwala ocenić daną metodę scalania na tle innych rozwiązań. W zależności od użytego wskaźnika ocena może przebiegać na różnym stopniu szczegółowości oraz dotyczyć stopnia wzmocnienia przestrzennego bądź stopnia zniekształcenia oryginalnej informacji tematycznej. Dla przykładu oparta o RMS (8) pozwala analizować pojedyncze kanały spektralne, oparta o $nQ_{\%}$ (29) – kompozycje barwne lub pełne zestawy danych spektralnych.

Wydaje się, że często formułowane, w oparciu o fragmentaryczne porównania (jak wyżej przedstawione rankingi $nQ_{\%}$ i $AIL_{\%}$), wnioski o przewadze i/lub większej przydatności jednych rozwiązań nad innymi są zbyt pochopne.

W badaniach prezentowanych w publikacjach odczuwa się przede wszystkim brak odniesienia do stopnia wzmocnienia przestrzennego obrazów, a w takim przypadku jedynym kryterium formalnym pozostaje stopień zachowania oryginalnej informacji tematycznej. W oparciu o takie kryteria formułowali oceny m.in. Béthune i in. (1997), Terretz (1997), Hill i in. (1999), Ranchin i Wald, (2000), Wald (2000). W mniejszości występują badania, gdzie ocena formalna dotyczy zarówno wzmocnienia przestrzennego obrazów, jak i zmian w informacji spektralnej. Tego typu rankingi metod – jednakże prowadzone odrębnie dla obu charakterystyk obrazów (spektralnych i tematycznych) – ujęli w swoich badaniach np. Vaughan i Oune, (1998), Zhou (1998), Bretschneider i Kao (2000), Mularz i in. (2000a, 2000b). Ogólny zarzut, jaki można postawić takim podejściom, to brak uniwersalności oraz zazwyczaj ograniczona ilość metod i algorytmów scalania poddawana testom.

Właściwa selekcja danych powinna opierać się o porównania uwzględniające w sposób spójny wzajemne zależności skali zniekształcania informacji spektralnej do uzyskiwanej skali wzmocnienia przestrzennego. W badaniach literaturowych brak tego typu podejść, dlatego autor opracował metodę, która realizuje powyższy postulat kompleksowej deszyfracji charakterystyk produktów scalania. Stanowi ona próbę formalnego wskazania optymalnych metod scalania, co w dziedzinie integracji obrazów jest pionierskim podejściem. Metoda ta została nazwana „diagram wyników” z uwagi na swoją postać formalno-graficzną.

Przy studiowaniu par wartości wskaźników formalnych – $nQ_{\%}$ i $AIL_{\%}$, nasuwa się wniosek, że łączy je pewna współzależność, powtarzająca się dla produktów otrzymanych różnymi metodami scalania, a mianowicie wzrost wzmocnienia przestrzennego obrazu idzie w parze ze zwiększeniem zniekształcenia spektralnego – i odwrotnie. Właściwe byłoby wskazanie metody, która charakteryzowałaby się najlepszą relacją wzmocnienia przestrzennego do zniekształcenia spektralnego. Niemożliwe jest jednak wskazanie jednego rozwiązania, a jedynie metody relatywnie najlepsze dla konkretnego poziomu wzmocnienia przestrzennego bądź zniekształcenia spektralnego, ponieważ oba wskaźniki nie są ze sobą wprost porównywalne. Wyznaczenie takiego zbioru rozwiązań ze wszystkich dostępnych możliwe jest właśnie dzięki użyciu „diagramu

wyników”. Metoda ta została uznana przez autora za najbardziej precyzyjną i miarodajną – alternatywne próby waloryzacji poszczególnych parametrów formalnych, a następnie łączna ich punktacja zbyt upraszczały wyniki i wprowadzały niejednoznaczność w ich interpretacji.

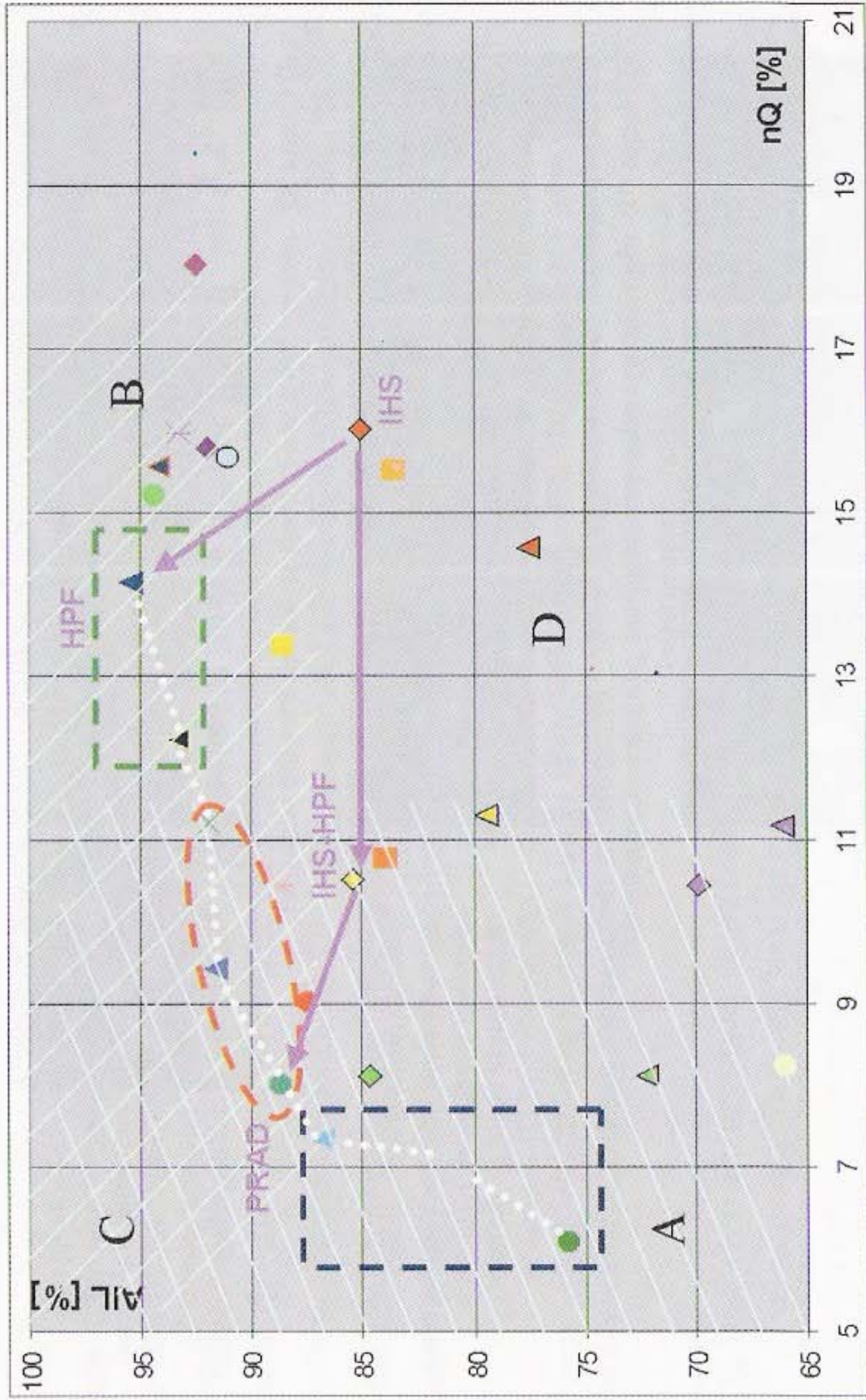
Na pojedynczym diagramie wyników umieszcza się punkty reprezentujące pary wskaźników formalnych uzyskanych dla wybranej KB (trypletu kanałów) lub pełnego zestawu kanałów. Rys. 2 przedstawia przykładowy układ punktów reprezentujący wyniki scalania uzyskane przy pomocy trzydziestu testowanych metod. Obszary zakreślane dzielą wynikowe zestawy obrazów na charakteryzujące się wzajemnym podobieństwem wartości jednego ze wskaźników: niskiego $nQ_{\%}$ i/lub wysokiego $AIL_{\%}$. Te kombinacje wartości parametrów posłużyły do wyznaczenia 4. charakterystycznych stref na diagramie: „A”, „B”, „C” i „D”. Strefa „C” wyznacza wyniki o najlepszej relacji obu wskaźników formalnych: na obrazach po fuzji relatywnie wysokie wzmocnienie przestrzenne jest uzyskiwane kosztem stosunkowo niewielkiego zniekształcenia spektralnego. Z kolei zestawy obrazów ze strefy „A” charakteryzują się niskim zniekształceniem spektralnym oraz niskim uczytelnieniem. Natomiast w strefie „B” lokuja się wyniki o dużym wzmocnieniu przestrzennym osiąganym kosztem dużego zniekształcenia tematycznego. Dla pozostałych obrazów (strefa „D”) zanotowano bardzo niekorzystne relacje wskaźników $nQ_{\%}$ i $AIL_{\%}$ (zniekształcenie spektralne jest bardzo wysokie, a wzrost uczytelnienia niewielki), co dyskwalifikuje metody ich scalania.

Graficzna analiza relacji wzajemnego położenia punktów pozwala na precyzyjne określenie zbioru rozwiązań o najkorzystniejszych relacjach formalnych parametrów $nQ_{\%}$ i $AIL_{\%}$ (lub odpowiednio RMS i $IL_{\%}$ w przypadku analizy pojedynczych kanałów). Wyznacza go krzywa (przerwana biała linia) łącząca punkty leżące na zewnątrz całego zestawu rozwiązań: od niskiego wzmocnienia przestrzennego, aż do wysokiego, przy możliwie niskim do osiągnięcia zniekształceniu spektralnym. Przesuwając się po wyznaczonej krzywej otrzymuje się kolejne zestawy scalonych danych o różnych charakterystykach formalnych.

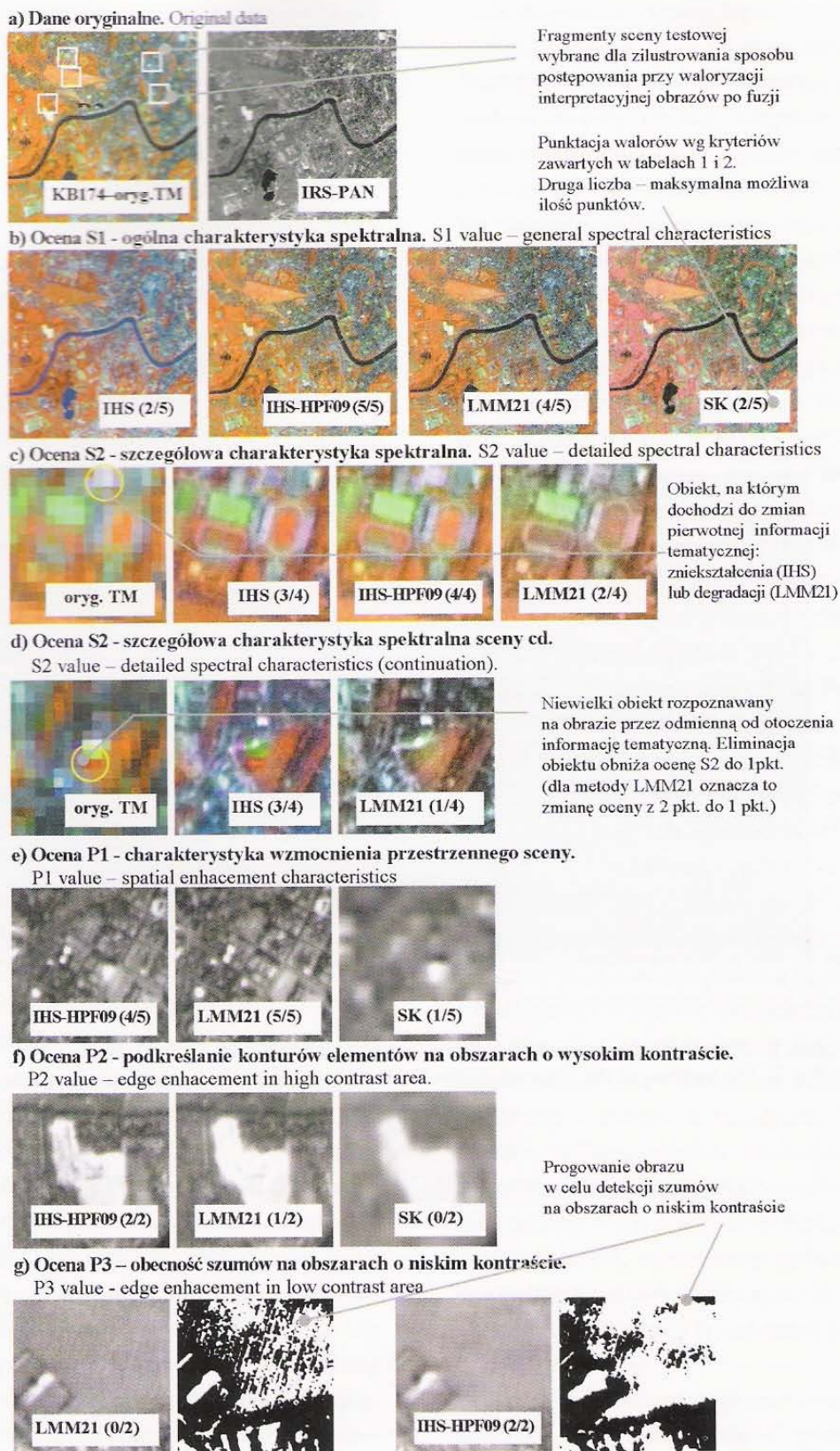
Wraz ze wzrostem ilości ładowanej informacji przestrzennej rośnie zniekształcenie spektralne syntetycznych produktów obrazowych. Cechą wspólną najkorzystniejszych rozwiązań jest to, że nie istnieją żadne inne, dla któ-

rych notowano by lepszą formalną zależność skali wzmocnienia przestrzennego do zniekształcenia spektralnego. Innymi słowy: wszystkie pozostałe metody mogą zostać zastąpione przynajmniej jednym alternatywnym rozwiązaniem leżącym na wyznaczonej krzywej. Taka zamiana jednego zestawu scalonych obrazów na drugi poprawia przynajmniej jeden ze wskaźników formalnych przy niezmiennym drugim, a z reguły oba ulegają poprawie. Wtedy stosunek pomiędzy ilością informacji przestrzennej a zniekształceniem spektralnym jest lepszy niż wcześniej. Taka konstatacja dotycząca całego zbioru rozwiązań pozwala na wykluczenie części metod pod względem formalnym. Zmiana metody integracji jest najbardziej pożądana w przypadku, gdy wynik scalania reprezentowany przez punkt leży daleko od wyznaczonej krzywej. Na rys. 2. przykładowo przedstawiono za pomocą strzałek pozytywny skutek rezygnacji ze standardu scalania – metody IHS (opartej o transformację do przestrzeni barw IHS) leżącej na granicy strefy „D”(!), na rzecz rozwiązania HPF (metoda oparta o filtrację górnoprzepustową w oknie 9x9) leżącego w strefie „B”, na krzywej najkorzystniejszych rozwiązań lub na rzecz autorskiej propozycji IHS-HPF (metoda mieszana) leżącej w strefie „C”. W pierwszym przypadku następuje poprawa obu parametrów ($nQ_{\%}$ o około 2%, $AIL_{\%}$ o około 10%), w drugim – tylko zniekształcenia spektralnego $nQ_{\%}$, ale za to w bardzo dużym stopniu (o około 6%). Ponieważ metoda IHS-HPF nie leży na wyznaczonej krzywej, można ją zastąpić kolejną metodą (np. propozycją PRAD opartą o właściwości teksturalne obrazu), aczkolwiek poprawa parametrów nie będzie już tak znacząca. Selekcja tego typu i rezygnacja z części metod może być wykonana w przekroju pojedynczych kanałów, różnych kompozycji barwnych lub generalnie w oparciu o uśrednione wyniki z całego zestawu scalonych obrazów. W wyniku dostaje się nie jedno, lecz zbiór najlepszych możliwych rozwiązań, a ostateczny wybór jest uzależniony od konkretnych potrzeb użytkownika i jego oczekiwań, co do zachowania informacji tematycznej bądź wzbogacenia obrazów w szczegóły.

Podsumowując: wykorzystanie zaproponowanego narzędzia – diagramu wyników – pozwala, w oparciu o formalne procedury wyeliminować metody charakteryzujące się niekorzystnymi zależnościami $AIL_{\%}$ i $nQ_{\%}$ (cała strefa „D”, częściowo „A” i „B”), co byłoby praktycznie niemożli-



Rys. 2. Metoda diagramu wyników. Wyznaczenie zbioru najkorzystniejszych wyników.
 Fig. 2. The method of the diagram of results. Determining the best integration results.



Rys. 3. Ocena wizualna metod integracji. Fragmenty testowanego obszaru w KB 174. Przykładowe wyniki 4 metod scalania.
Fig. 3. Visual assessment of integration methods. Composite image (bands 174). Example results for 4 fusion methods (IHS, LMM-local mean matching, SK-band replacement, IHS-HPF).

we do zrealizowania przez odrębne analizy oparte na pojedynczych wskaźnikach. To podejście umożliwia również wskazanie zbioru teoretycznie najkorzystniejszych rozwiązań i w jego obrębie dokonanie podziału na grupy produktów o zbliżonych cechach (na rys. 2. zilustrowano to prostokątami i elipsą).

3.2. Klucz fotointerpretacyjny

Ranking walorów interpretacyjnych przeprowadzono w oparciu o technikę punktacji kompozycji barwnych. Tego typu podejście zastosowali m. in. Mularz (2001) oraz Pellemans i in. (1993). W odróżnieniu od poprzedników poszukiwano rozwiązań pozwalających na obiektywną ocenę dużej ilości danych tak, aby określić ogólną przydatność interpretacyjną kompozycji barwnych (KB) po fuzji, a następnie je uszeregować. Okazało się, że taka próba jest skazana na niepowodzenie, ponieważ walory KB są z reguły zbyt trudne do jednoznacznej oceny. Dlatego zamiast przeprowadzenia pojedynczego, syntetycznego rankingu zastąpiono to rozwiązaniem prowadzącym do pogru-

powania metod wg pewnych charakterystycznych cech wizualnych. Tego typu analiza umożliwia sformułowanie wniosków dotyczących skuteczności stosowania metod scalania dla określonych celów. Dla realizacji powyższych zamierzeń zdecydowano się na odrębną ocenę walorów wizualnych związanych z informacją tematyczną oraz odrębną związaną ze stopniem uczytelnienia obrazów. W obu przypadkach dokonano dalszych podziałów i punktowano poszczególne elementy/cechy obrazów według ustalonych kryteriów (tab. 1. – walory tematyczne, tab. 2. – wzmocnienie przestrzenne). Rozbicie ocen na kilka części składowych umożliwiło szeregowanie metod według różnych aspektów oraz dokonywanie stopniowej syntezy wyników, aż do próby całościowej waloryzacji. Takie podejście zapewniło też możliwie wysoką obiektywność ocen.

Przy waloryzacji KB w aspekcie ogólnej charakterystyki spektralnej sceny (tab. 1., wskaźnik S1) kierowano się zasadą wierności spektralnej w stosunku do oryginału. Zgodnie z nią nie były punktowane korzystne dla wizualnej interpretacji zniekształcenie tematyczne (kolorystyczne),

Tabela 1. Kryteria oceny wizualnej metod pod kątem zachowania informacji spektralnej.
Table 1. Visual assessment criteria for spectral information preservation.

S1	Ogólna charakterystyka spektralna sceny (ocena prowadzona w małej skali): ocena głównych kategorii pokrycia terenu i dużych obszarów	Punkty
1	zachowana informacja spektralna, jasność sceny i kontrast zbliżone do oryginału	5
2	niewielkie zmiany spektralne lub niewielka zmiana jasności sceny lub degradacja barw	4
3	zniekształcenie spektralne lub zmiana jasności sceny lub duża degradacja barw lub równoczesne wystąpienie niekorzystnych efektów wymienionych w pkt. 2.	3
4	duże zniekształcenie spektralne lub równoczesne wystąpienie niekorzystnych efektów wymienionych w pkt. 3.	2
5	drastyczne zniekształcenie spektralne lub równoczesne wystąpienie niekorzystnych efektów wymienionych w pkt. 4.	1
S2	Szczegółowa charakterystyka spektralna (ocena prowadzona w dużej skali): ocena zachowywania informacji spektralnej na szczegółach i małych obiektach	
6	zachowywana informacja spektralna w kontekście otoczenia	4
7	niewielkie zmiany spektralne nie prowadzące do utraty rozróżnialności obiektu od otoczenia, degradacja na małych obiektach informacji spektralnej	3
8	zniekształcenie spektralne małych obiektów prowadzące do obniżenia walorów obrazu, artefakty (pojawianie się fałszywych obiektów barwnych), obwódki wokół obiektów lub duża degradacja informacji spektralnej na małych obiektach	2
9	usuwanie informacji spektralnej z małych obiektów prowadzące nawet do usunięcia obiektów ze sceny, pojawianie się dużej ilości artefaktów	1

np. zwiększające kontrast, czy podkreślające różnorodność pewnych elementów sceny. Podstawą oceny był test porównawczy wzmocnionej przestrzennie KB (rys. 3b) z obrazem referencyjnym – KB opartą na danych oryginalnych, sprzed integracji (rys. 3a). Ocena walorów interpretacyjnych KB bez tego typu odniesienia do wzorca jest dyskusyjna.

Dla oceny zachowania informacji spektralnej na małych obiektach (S2) analizowano szczegółowo obraz w dużej skali. Przykład na rys. 3c przedstawia analizę kompleksu sportowego o wyraźnie zgeometryzowanych obiektach o różnej odpowiedzi spektralnej. Informacja przestrzenna dominuje nad spektralną po fuzji metodą LMM21 (metoda oparta o lokalne charakterystyki międzykanałowe), co prowadzi do utraty zróżnicowania spektralnego pomiędzy obiektami (S2 = 2 pkt.). IHS jest przykładem formuły, która lokalnie, na określonych obiektach lub strefach obrazu wprowadza zniekształcenie tematyczne (przykład obiektu zmieniającego oryginalną barwę został wskazany na KB, S2 = 3 pkt.). W specyficznych okolicznościach, gdy obiekty są niewielkie i rozróżnialne tylko ze względu na cechy spektralne a nie geometryczne, może dojść do całkowitej ich utraty po scaleniu obrazów. Tego typu sytuację przedstawiono na rys. 3d dla obrazu po integracji metodą LMM21 (z powodu tej wady nastąpiła zmiana wartości S2 z początkowej 2 na 1 pkt.).

Przy analizie wzrostu czytelności degradowano kompozycje barwne do postaci obrazów panchromatycznych, aby wykluczyć wpływ walorów barwnych na ocenę. Analiza była prowadzona w dużej skali dla każdej z trzech składowych oceny (tab. 2. – P1, P2, P3). Przeciętne uczytelnienie obrazu (P1) było waloryzowane w różnych partiach obrazu. Przykład 3e ilustruje rozpiętość poziomu wzmocnienia uzyskiwanego dla różnych metod integracji. Dla oceny podkreślania konturów na strefach o wysokim kontraście (P2) jako pól testowych użyto wielkopowierzchniowych terenów przemysłowych, handlowych i komunikacyjnych oraz obszarów, na których prowadzono duże inwestycje budowlane (rys. 3f). Dla takich obiektów rejestrowana oryginalna odpowiedź spektralna charakteryzowała się skrajnymi wartościami (duży kontrast z otoczeniem – jednolite strefy o bardzo niskiej lub bardzo wysokiej jaskrawości). Trzecim ocenianym elementem (P3) na obrazach po fuzji była obecność szumów związana z prążkowaniem kanału panchromatycznego IRS-PAN.

To niekorzystne zjawisko wystąpiło z różną intensywnością w zależności od KB i wykorzystanej metody integracji obrazów. Związane z szumami obniżenie czytelności obrazów oceniono na obszarach o niskim kontraście, na których efekt ten ulegał wyeksponowaniu (rys. 3g).

Tabela 2. Kryteria oceny wizualnej metod pod kątem wzrostu czytelności i podkreślenia konturów.
Table 2. Visual assessment criteria for interpretability and edges enhancement.

P1	Charakterystyka wzmocnienia przestrzennego sceny	Punkty
1	bardzo wysokie uczytelnienie	5
2	wysokie uczytelnienie	4
3	przeciętne uczytelnienie	3
4	niskie uczytelnienie	2
5	brak uczytelnienia lub bardzo niskie	1
P2	Obszar o wysokim kontraście – podkreślanie konturów elementów	
6	wysokie uszczegółowienie	2
7	przeciętne uszczegółowienie	1
8	brak uszczegółowienia	0
P3	Obszar o niskim kontraście – obecność szumów	
9	brak lub niewielka, nie utrudniająca interpretacji	2
10	widoczna, w niewielkim stopniu wpływająca na interpretację	1
11	duża, utrudniająca interpretację	0

Dla syntetycznego podziału metod według ich walorów interpretacyjnych zgeneralizowano skale ocen do dwóch głównych: punktacji zachowania walorów tematycznych WT (32) oraz punktacji walorów przestrzennych WP (33). Dalsza synteza wyników do pojedynczego rankingu opartego o łączną punktację WT i WP mijiała się z celem, ponieważ doprowadziłyby do niejednoznaczności wyników. Na przykład metody o wysokich walorach tematycznych i niskim uczytelnieniu zajmowałyby równorzędne pozycje z metodami charakteryzującymi się odwrotnymi relacjami obu powyższych walorów.

$$WT = S1 + S2 \quad (32)$$

$$WP = P1 + P2/2 + P3/2 \quad (33)$$

Zaproponowano macierzowy układ pogrupowania przydatności metod oparty o zadeklarowane przedziały punktacji dla WT i WP. W ten sposób zostało wyodrębnionych 9. grup metod o podobnej charakterystyce scalonych obrazów, z których cztery wskazano jako przydatne do wizualnej interpretacji. Analizę tą metodą przeprowadza się odrębnie dla każdej z testowanych KB. Dla końcowego, syntetycznego zestawienia możliwe jest uśrednienie wyników WT i WP z wszystkich testowanych KB.

Metody, które uznano za nieprzydatne to takie, dla których $WT < 7$ pkt. i/lub $WP < 4,5$ pkt. Te graniczne wartości zostały przyjęte po analizie możliwych do wystąpienia kombinacji cech obrazów i odzwierciedlających je ocen ($S1, S2, P1, P2, P3$). Dla walorów tematycznych tak niska punktacja oznacza KB, która charakteryzuje się dużym ogólnym zniekształceniem spektralnym sceny ($S1 \leq 2$ pkt.) lub niższym ($S1 > 2$ pkt.), ale przy dużych wadach tematycznych drobnych elementów ($S2 < 3$ pkt.). Dla wzmocnienia przestrzennego wyniki $WT < 4,5$ pkt. oznaczają, że kompozycja barwna posiada co najwyżej przeciętne uczytelnienie ($P1 \leq 3$ pkt.), ewentualnie wysokie ($P1 = 4$ pkt.), ale z wadami (metoda nie wzmacnia obiektów kontrastowych i równocześnie wprowadza duże szумы – odpowiednio $P2 = 0$ pkt. i $P3 = 0$ pkt.). Krótką charakterystykę czterech grup wskazanych jako przydatne oraz przyjęte przedziały punktacji dla wartości WT i WP zawiera tab. 3.

Przydatność obrazów z grupy „A” do wizualnej interpretacji jest najwyższa z wszystkich testowanych. Użytkiwane uczytelnienie obrazów jest wysokie a informacja spektralna wizualnie nie odbiega od wzorca sprzed fuzji. W pozostałych grupach notuje się wady związane ze zbyt

Tabela 3. Zestawienie wydzielonych charakterystyk dla KB na podstawie oceny wizualnej.
Table 3. Assessment key for colour composit images based on visual evaluation v.

		WT - Walory tematyczne, punktacja wg (32)	
		9	7-8
	Pkt.		
WP Walory przestrzenne, punktacja wg (33)	6-7	GRUPA „A” * KB o wysokim uszczegółowieniu lub średnim (w tym na obszarach jasnych) przy braku szumów; * brak zniekształcenia spektralnego zarówno dla całej sceny jak i dla małych obiektów	GRUPA „B” * KB o wysokim uszczegółowieniu lub średnim (w tym na obszarach jasnych) przy braku szumów; * niewielkie lub średnie zniekształcenie lub degradacja informacji spektralnej na całej scenie lub na małych obiektach
	4,5-5,5	GRUPA „C” * KB o średnim uszczegółowieniu z możliwością wystąpienia szumów oraz braku informacji na obszarach jasnych; * brak zniekształcenia spektralnego zarówno dla całej sceny jak i dla małych obiektów	GRUPA „D” * KB o średnim uszczegółowieniu z możliwością wystąpienia szumów oraz braku informacji na obszarach jasnych; * niewielkie lub średnie zniekształcenie lub degradacja informacji spektralnej na całej scenie lub na małych obiektach

małym wzmocnieniem przestrzennym (grupa „C”), niewielkim zniekształceniem tematycznym (grupa „B”) lub obie te wady jednocześnie (grupa „D”).

4. Konkluzje

Syntetyczne wskaźniki nQ_s i AIL_s – wraz z opracowaną autorską metodą „diagramu wyników” – z powodzeniem mogą być stosowane do ogólnej oceny działania metod integracji. Podstawową zaletą stosowania „diagramu wyników” jest możliwość wydzielenia z całego zbioru metod i algorytmów tej części, dla której relacje wzmocnienia przestrzennego do zniekształcenia spektralnego są najlepsze. W tak wyselekcjonowanym zbiorze rozwiązań dużo łatwiejsze jest wskazanie metody najlepszej dla rozwiązania konkretnego problemu, dla którego jest przeprowadzane scalanie danych.

Opracowana metoda wizualnej oceny charakteryzuje się relatywnie dużą obiektywnością. Zaproponowany macierzowy układ pogrupowania metod zapewnia określenie przydatności w oparciu o walory tematyczne i przestrzenne kompozycji barwnych.

Przeprowadzona waloryzacja wizualna koresponduje tylko ze wskaźnikami formalnymi związanymi z oceną uczytelnienia obrazów (AIL_s). Oznacza to, że parametr AIL_s może być traktowany jako wstępny indyktor przydatności interpretacyjnej metod pod kątem uczytelnienia treści obrazu. Natomiast wartość średniego błędu spektralnego nQ_s pozwala określić w przybliżeniu przydatność danych do dalszego ich przetwarzania numerycznego, natomiast nie determinuje przydatności dla celów interpretacyjnych. I odwrotnie: pomimo notowanych dobrych walorów interpretacyjnych, obraz może cechować – niedostrzegalne w analizie wizualnej – wysokie zniekształcenie tematyczne.

Nie opracowano uniwersalnej metody integracji danych i nie należy oczekiwać, że to nastąpi. Nie można bowiem otrzymać scalonych obrazów o wysokim uczytelnieniu, a przy tym pozbawionych zniekształcenia spektralnego. Badania prowadzone przez autora wykazały, że te dwie cechy obrazów otrzymanych na drodze fuzji są z sobą powiązane, a ich relacja zależy przede wszystkim od wyboru metody scalania. Kluczowe jest wskazanie rozwiązań, które kosztem mniejszego zniekształcenia informacji

tematycznej dadzą większe uczytelnienie. W obliczu dużej ilości algorytmów oraz różnorodnych zestawów danych poddawanych integracji jest to zadanie niezwykle trudne i czasochłonne. Wydaje się, że zaproponowana kompleksowa ocena stanowić może przydatne narzędzie do prawidłowej selekcji tego typu i do wyboru trafnej metody integracji, tak, aby syntetyczny produkt obrazowy miał jak najwyższą przydatność dla rozwiązania postawionego problemu.

Bibliografia

- Aiazzi B., Alparone L., Baronti S., Pippi I., 1999, *Fusion of 18 m MOMS-2P and 30 m Landsat TM multi-spectral data by the generalized Laplacian pyramid*, International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, vol. 32.
- Béthune S., Muller F., Donnay J. P., 1997, *Adaptive intensity matching filters: a new tool for multi-resolution data fusion*, AGARD conference proceedings 595, Multi-Sensor Systems and Data Fusion for Telecommunications, Remote Sensing and Radar, Lisbon-Portugal.
- Béthune S., Muller F., Donnay J. P., 1998, *Fusion of multispectral and panchromatic images by local mean and variance matching filtering techniques*, Fusion of Earth Data, Sophia Antipolis.
- Bretschneider T., Kao O., 2000, *Image fusion in remote sensing*, Proceedings of the 1st Online Symposium of Electronic Engineers.
- Carper T. J., Lillesand T. M., Kiefer R. W., 1990, *The use of intensity-hue-saturation transformations for Merging SPOT panchromatic and multispectral image data*, Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, Vol. 56, No. 4.
- Chavez P. S., Jr., 1986, *Digital Merging of Landsat TM and digitized NHAP data for 1:24,000-scale image mapping*, Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, Vol. 52, No. 10.
- Chavez P. S., Jr., S. C. Sides, J. A. Anderson, 1991, *Comparison of three different methods to merge multiresolution and multispectral data: Landsat TM and SPOT panchromatic*, Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, Vol. 57, No. 3.
- Cliché G., F. Bonn, P. Teillet, 1985, *Integration of the SPOT panchromatic channel into its multispectral mode for image sharpness enhancement*, Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, Vol. 51, No. 3.
- Garguet-Duport B., J. Girel, J. M. Chassery, G. Pautou, 1996, *The use of multiresolution analysis and wavelets transform for merging SPOT panchromatic and multispectral image data*, Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, Vol. 62.
- Hallada W. A., Cox S., 1983, *Image sharpening for mixed spatial and spectral resolution satellite systems*, Proc. Of the 17th International Symposium on Remote Sensing of Environment.
- Hill J., C. Diemer, O. Stöver, Th. Udelhoven, 1999, *A local correlation approach for the fusion of remote sensing data with different spatial resolutions in forestry applications*, International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. 32.
- Li J., 2000, *Spatial quality evaluation of fusion of different resolution images*, The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Amsterdam.
- Liao Y., T. Wang, W. Zheng, 1998, *Quality analysis of synthesized high resolution multispectral imagery*, Asian Conference on Remote Sensing, Manila.
- Mróz M., 2001, *Podwyższenie rozdzielczości przestrzennej obrazów wielospektralnych Landsat 7 ETM+ przy wykorzystaniu właściwych teksturalnych i radiometrycznych kanału panchromatycznego*, Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji, Vol. 11.
- Mularz S., 2001, *Teledetekcyjny monitoring środowiska kopalń odkrywkowych*, w: Nowoczesne technologie w geodezji i inżynierii środowiska, Konferencja naukowa z okazji jubileuszu 50-lecia Wydziału Geodezji Górniczej i Inżynierii Środowiska, Kraków.
- Mularz S., Drzewiecki W., Pirowski T., 2000, *Merging Landsat TM images and airborne photographs for monitoring of open-cast mine area*, XIX Kongres ISPRS, International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Amsterdam.
- Mularz S., Drzewiecki W., Pirowski T., 2000, *Thematic information content assessment of aerial and satellite data fusion*, – Cadastre, Photogrammetry, Geoinformatics – Modern Technologies and Development Perspectives. Proceedings of 2nd International Conference, Lviv, National University „Lvivska Polytechnica”.
- Munehika C. K., Warnick J. S., Salvaggio C., Schott J. R., 1993, *Resolution enhancement of multispectral image data to improve classification accuracy*, Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, Vol. 59.

- NEL, National Exploitation Laboratory, 1994, *General Image Quality Equation User's Guide*, Version 3.
- Pellemans A. H. J. M., Jordans R. W. L., Allewijn R., 1993, *Merging multispectral and panchromatic SPOT images with respect to the radiometric properties of the sensor*, Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, Vol. 59.
- Pirowski T., 2004, *Integracja obrazów satelitarnych o różnej rozdzielczości*, [w:] Katalog wystawców X międzynarodowych targów GEA - materiały szkoleniowe, Kraków.
- Pohl C., Genderen J. L. Van, 1998, *Multisensor image fusion in remote sensing: concepts, methods and applications*, Int. J. Remote Sensing, Vol. 19.
- Prinz B., Wiemker R., Spitzer H., 1997, *Simulation of high resolution satellite imagery from multispectral airborne scanner imagery for accuracy assessment of fusion algorithms*, Sensors and Mapping from Space, Hannover.
- Ranchin T., Wald L., 2000, *Fusion of high spatial and spectral resolution images: the ARSIS concept and its implementation*, Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, Vol. 66.
- Raptis V. S., Vaughan R. A., Ranchin T., Wald L., 1998, *An assessment of different data fusion methods for the classification of an urban environment*, Fusion of Earth Data, Sophia Antipolis, France.
- Rigol J. P., Chica-Olmo M., 1998, *Merging remote-sensing images for geological-environmental mapping: application to the Cabo de Gata-Níjar Natural Park, Spain*, Environmental Geology 34.
- Shettigara V. K., 1992, *A generalized component substitution technique for spatial enhancement of multispectral images using a higher resolution data set*, Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, Vol. 58.
- Steinnocher K., 1999, *Adaptive fusion of multisource raster data applying filter techniques*, International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, vol. 32.
- Tadeusiewicz R., P. Korohoda, 1997, *Komputerowa analiza i przetwarzanie obrazów*, Wydawnictwo Postępu Telekomunikacji, Kraków.
- Terrettaz P., 1997, *Comparison of different methods to merge SPOT P and XS data. Evaluation in an urban area*, Proceedings of the 17th ERSeL Symposium on Future trends in remote sensing, Denmark.
- Vaughan R., Oune O., 1998, *The fusion of TM, SPOT, IRS and KFA data for urban change detection in Tripoli*, Fusion of Earth Data, Sophia Antipolis, France.
- Vrabel J., 1996, *Multispectral imagery band sharpening study*, Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, Vol. 62.
- Vrabel J., 2000, *Multispectral imagery advanced band sharpening study*, Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, Vol. 66.
- Wald L., 2000, *Quality of high resolution synthesized images: is there a simple criterion?*, Fusion of Earth Data, Sophia Anipolis, France.
- Wald L., Ranchin T., Mangolini M., 1997, *Fusion of satellite images of different spatial resolutions: assessing the quality of resulting images*, Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, Vol. 63.
- Welch R., Ehlers M., 1987, *Merging multiresolution SPOT HRV and Landsat TM data*, Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, Vol. 53.
- Wiemker R., Prinz B., Meister G., Franck R., Spitzer H., 1998, *Accuracy assessment of vegetation monitoring with high spatial resolution satellite imagery*, Contribution to the ISPRS ECO BP'98, Budapest.
- Zhang Y., 1999, *A new merging method and its spectral and spatial effects*, International Journal of Remote Sensing, Vol. 20.
- Zhou J., Civco D. L., Silander J. A., 1998, *A Wavelet transform method to merge Landsat TM and SPOT panchromatic data*, Int. J. Remote Sensing, Vol. 19.

Summary

The article presents an attempt to assess merged images obtained with the use of different methods of integrating multispectral and panchromatic data. The process of image merging is result of the fact that there is a difference in spatial resolution of images acquired in multispectral and panchromatic mode. Spatial resolution of panchromatic band is few times higher than of spectra band. The idea of image merging appeared at the beginning of the development of satellite remote sensing. Numerous methods and algorithms to fulfill the task have been suggested but none of them has become universal. Each of them to some extent affects the original thematic information. A universal approach to assess a given merging method has become a must today. It is necessary to be able to assess and properly select one.

The first part of the article is a review of current formal, graphic and visual assessment approaches. The bibliography on the above methods is listed and the symbols used in mathematic formulas are unified.

In the formal methods there have been appointed the most useful statistic indices. Among these there are synthetic indices to characterise a given set of merged images. The diagram of results method is based on the above indices. It analyses simultaneously changes and correlations between two parameters. All this helps with the interpretability of information (AIL) and thematic distortion (nQ). The parameter AIL is a mean based on correlation coefficients. They are obtained through the comparison of high-pass filtered panchromatic and merged multispectral images. The AIL figure is given in percentages. It can be interpreted as an average level of edge preserva-

tion on the merged image in comparison with the panchromatic image. The parameter nQ is a mean based on RMS value describing spectral distortion on synthetic spectral images. The parameter is given in percentages of the average brightness of all spectra bands.

A visual method based on different valuation of spatial and spectral properties was proposed. It assured a relatively objective assessment. The final result is the grouping of images according to their concordance and usefulness in photo interpretation. In this way nine groups were defined. Four were appointed as useful for visual interpretation to put this procedure into practice a photo interpretation key was suggested. According to its standards, the interpretability and concordance of the image are assessed separately. These two features are evaluated separately either for a whole scene or for individual objects.

In both, formal and visual approaches there was established a universal ability to select the merged images in order to choose the most useful merging method for a particular task. This allows analysing many image obtained in merging processes with various algorithms applied. An attempt to compare the level of concordance between formal and visual assessment is shown in the last part of the article. A similarity in the aspect of interpretability was noticed. This suggests that a formal assessment approach could replace a lengthy process of comparing and selecting images based on photo interpretation. No such correlation was noticed in the aspect of spectral distortion. It means that in order to classify an image as one of low thematic distortion, it is necessary to state it not only on the basis of interpretative features but also with the use of statistic methods.

WŁODZIMIERZ WÓJCIK¹

MODEL RZEKI RABY Z WYKORZYSTANIEM PROGRAMU QUAL2E

Słowa kluczowe:

modelowanie, jakość wód, rzeka Raba, QUAL2E

Abstrakt

W pierwszej części artykułu dokonano charakterystyki górnej zlewni rzeki Raby a następnie dokonano podziału rzeki z uwzględnieniem charakterystyk hydrometrycznych oraz jakości wody. Charakterystyka hydrauliczno-geometryczna w przekrojach kontrolnych posłużyła do wyznaczenia współczynników regresji funkcji w programie QUAL2E, a na podstawie wybranej serii pomiarowej wykonano kalibrację modelu rzeki. Następnie, na tak wyznaczonym modelu rzeki, wykonano symulacje następujących wariantów zdarzeń: (1) symulacja sytuacji awaryjnej w oczyszczalni ścieków Mszana Dolna, (2) symulacja poprawy jakości wody w Rabie po zrealizowaniu Projektu ZGDGRiK „Kompleksowy program utrzymania czystości wód zlewni Raby od źródeł do zapory w Dobczycach”.

Otrzymane wyniki pozwalają wyciągnąć ważne wnioski, jak też dają materiał do dalszych analiz. Jednym z nich jest stwierdzenie duże niekorzystne zmiany w rzece Raba na ostatnim odcinku od Myślenic do Zbiornika Dobczyckiego – sugerujące dopływ większych zanieczyszczeń niż w dostępnych dokumentacjach. Natomiast awaria oczyszczalni w Mszanie Dolnej może mieć katastrofalny wpływ na rzekę Raba.

MODEL OF THE RABA RIVER WITH THE APPLICATION OF QUAL2E PROGRAM

Key words:

modeling, water quality, Raba River, QUAL2E

Abstract

The first part of the paper describes features and limitations of the QUAL2E program as well as its most important used equations, variables assumptions, initial and boundary conditions for simulations of fate of selected pollutants and water quality variables in water bodies. For better understanding of the modeling goal and assumptions, the watershed is characterized too.

¹Akademia Górniczo-Hutnicza; Zakład Kształtowania i Ochrony Środowiska; Kraków.

Then, the model of the Upper Raba River was built up, including the river segmentation, estimation of the coefficients and constants, as well as calibration of the model.

The simulation of water quality was done for two cases: (1) failure of the wastewater treatment plant in Mszana Dolna, (2) implementation of ZGDGRiK Project of the construction of 10 wastewater treatment plants.

The received results showed a potential of catastrophic impact of the discharge of untreated wastewater from Mszana Dolna City on the quality of the Raba River. Moreover, the research suggests, that there is a more serious discharge of wastewater nearby and below Myślenice then shown in the available records.

1. Wstęp

Matematyczne modelowanie wód powierzchniowych umożliwia m.in. stworzenie bazy danych o rzece (McGarity 2000, Adamski 1996). Na podstawie raz opracowanej charakterystyki rzeki, można analizować wpływ wielu zdarzeń, sytuacji, planów modernizacyjnych gospodarki wodno-ściekowej, planowanych nowych źródeł zanieczyszczeń na rzekę itp. Dobrze opracowany model rzeki, może stanowić też narzędzie pomocne przy uregulowaniach prawnych (np. przy wydawaniu decyzji administracyjnych, jak np. pozwoleń wodno-prawnych), pomóc dobrać optymalną inwestycję ochronną, dokonywać handlu pobieraniem wody lub odprowadzania ścieków itp.

Obecnie istnieje wiele programów do modelowania wód powierzchniowych, ale w dalszym ciągu standardem są wymienione poniżej wybrane modele amerykańskie – posiadające ponadto tę zaletę w Polsce, że można je otrzymywać darmowo z USEPA:

1. QUAL2E (Enhanced Stream Water Quality Model)
2. WASP5 (Water quality Analysis Simulation Program)
3. HSPF (Hydrological Simulation Program – FORTRAN)
4. SWMM (Stormwater Management Model)

Model QUAL2E symuluje najważniejsze reakcje cykliów nutrientów, produkcji alg, BZT, reaerację oraz efekty tych procesów na bilans tlenu. Pozwala symulować do 15 związków chemicznych. Głównym celem autorów programu było stworzenie pomocniczego narzędzia w planowaniu zagospodarowania zlewni, dla określenia maksymalnego dopuszczalnego odprowadzanego ładunku zanieczyszczeń do rzeki. Jest uznawany za standardowe oprogramowanie jakości wód powierzchniowych.

Program WASP5 cechuje się uwzględnieniem dynamiki zmian zanieczyszczeń bakteriologicznych, toksycznych związków organicznych oraz metali ciężkich.

Program HSPE integruje modelowanie jakości wody w cieku z hydrologią zlewni z uwzględnieniem symulacji spływu powierzchniowego z zanieczyszczonych gleb oraz interakcji z osadami

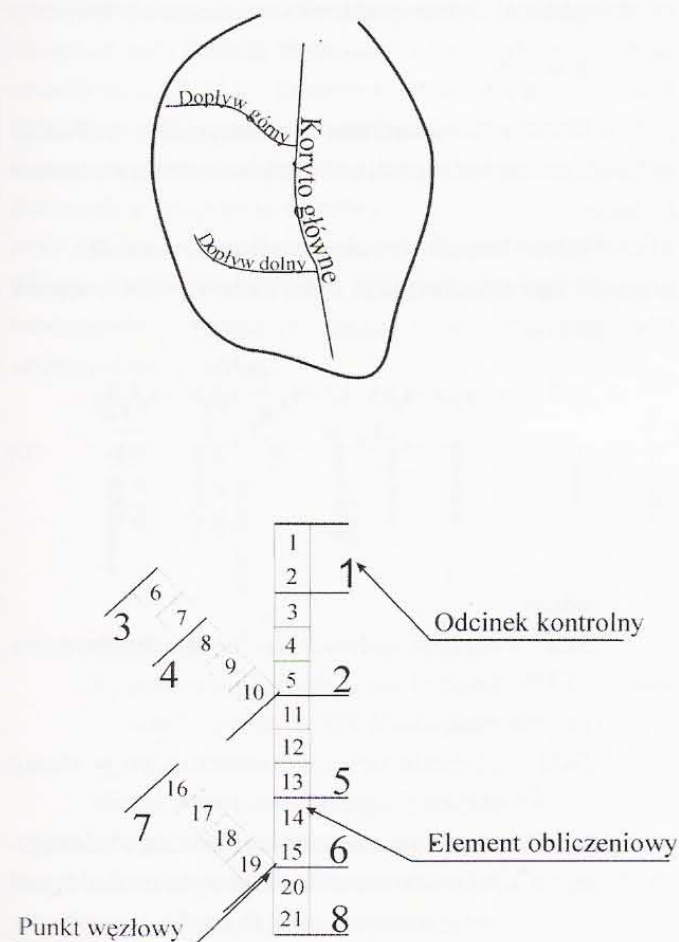
Program SWMM jest stosowany głównie do symulacji przepływu wody i ścieków oraz zmian jakości w kanałach, rurach, zbiornikach retencyjnych. Wykorzystywane najczęściej dla terenów zurbanizowanych.

2. Charakterystyka Programu QUAL2E (I rzędu)

Program QUAL2E jest kolejnym programem w serii ciągle usprawnianych programów QUAL (następna wersja to QUAL2E-UNCAS). Może być traktowany jako standard, który stanowi szkielet wielu komercyjnych programów do symulacji jakości wód powierzchniowych sprzedawanych przez prywatne firmy. Ważną sprawą przy dobrej realizacji modelu jest zaistnienie warunków dobrego wymieszania wody ze ściekami.

Punktem wyjścia przy każdym modelowaniu wód powierzchniowych – w tym wykorzystując QUAL2E – jest **odzworowanie systemu rzecznoego**. Podstawowym elementem składowym systemu QUAL2E jest tzw. **element obliczeniowy** utożsamiany z objętością kontrolną, dla którego sprawdzone są równania bilansu masy oraz reakcji chemicznych. Wszystkie elementy obliczeniowe muszą posiadać jednakową długość. W programie QUAL2E wyróżnia się 7 rodzajów elementów obliczeniowych: element początkowy (górnny) cieku, element standardowy, element bezpośrednio powyżej węzła, element węzłowy, element końcowy (dolny) cieku, element z dopływem

punktowym oraz element z poborem wody. Elementy obliczeniowe cechują się jednakowymi charakterystykami hydro-geometrycznymi i parametrami jakościowymi. Przykładowy schemat odwzorowania rzeki przedstawiono na rys. 1.



Rys. 1. Transformacja przykładowego systemu rzeczno dla potrzeb programu QUAL2E.

Fig. 1. Transformation of a river system for the use in QUAL2E Program

Program QUAL2E pozwala na symulacje w rozgałęzionych drzewiasto sieciach rzecznych do 15 wskaźników, których lista obejmuje: tlen rozpuszczony, BZT, temperaturę, algi pod postacią chlorofilu, azot organiczny, amoniak, azotany, azotyny, fosfor organiczny, fosfor rozpuszczony, bakterie coli, dowolny wskaźnik zanieczyszczeń rozkładalnych, 3 dowolne wskaźniki zanieczyszczeń nierozkładalnych.

Funkcji wymuszających rozumiane są dane wejściowe do modelu określają warunki brzegowe de-

terminujące przebieg symulacji. Wśród danych tych można wyróżnić dane o przepływach oraz dane o jakości wody.

Program QUAL2E wyróżnia następujące 4 rodzaje funkcji wymuszających.

- Dopływ do elementu początkowego (górnego) – stanowi górny warunek brzegowy systemu i obejmuje dane o natężeniu i jakości dopływu do górnego przekroju elementu początkowego z położonej wyżej (niemodelowanej) części cieku.
- Dopływy punktowe – obejmują dane o wielkości i jakości odpływów z oczyszczalni ścieków komunalnych, przemysłowych oraz wód opadowych.
- Dopływy/odpływy liniowe – funkcja ta modeluje równaniami rozłożony na długości odcinka dopływ powierzchniowy lub ucieczkę wody z cieku do dalszych warstw wodonośnych i obejmuje dane o parametrach ilości i jakościowych tego przepływu.
- Stężenia wskaźnika na granicy dolnego przekroju elementu końcowego – stanowiące dolne warunki brzegowe systemu (opcjonalnie). Wykorzystywane przy modelowaniu odcinków ujściowych rzek do dużych zbiorników o znacznym rozcieńczeniu.

Podstawowe zależności obliczeniowe (II rząd) Równanie bilansu masy.

Jest rozwiązywalne w układzie jednowymiarowym, zintegrowane numerycznie w czasie i przestrzeni dla każdego wskaźnika jakości. Uwzględnia ono efekty adwekcji, dyspersji i rozcieńczenia oraz reakcji wewnętrznych:

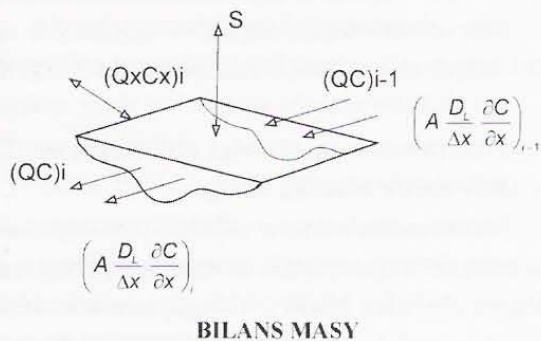
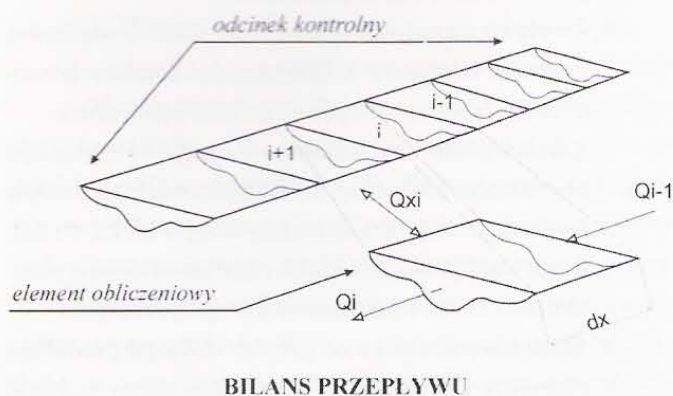
$$V \frac{\partial c}{\partial t} = \underbrace{\frac{\delta(AD_L \frac{\partial c}{\partial x})}{\partial x}}_{\text{akumulacja}} dx - \underbrace{\frac{\delta(A * U * c)}{\partial x}}_{\text{dyspersja}} dx + V \underbrace{\frac{dc}{dt}}_{\text{adwekcja}} + s \underbrace{}_{\text{reakcje wewn}} + \underbrace{s}_{\text{źródło zewn}} \quad (1)$$

gdzie:

- V – objętości kontrolna (elementu obliczeniowego) (m³),
- C – stężenie wskaźnika (g/m²),
- A – pole przekroju poprzecznego strumienia (m²),
- D_L – współczynnika dyspersji (m²/d),
- U – prędkość średnia strumienia (m/s),
- s – zewnętrzne źródła wskaźnika (g/m³).

Fizyczną interpretację równania 1 przedstawia rys. 2, przy czym różniczkę dx zastąpiono różnicami skończonymi.

Charakterystyki hydrogeometyczne rzeki poszczególnych odcinków rzecznych opisywane są zależnościami pomiędzy średnią prędkością i natężeniem przepływu oraz pomiędzy średnią głębokością i natężeniem przepływu (rys. 2):



Rys. 2. Fizyczna interpretacja bilansu masy oraz bilansu przepływu.

Fig. 2. Physical interpretation of mass balance and flow balance.

$$U = a * Q^b \quad (2)$$

$$H = c * Q^d \quad (3)$$

gdzie:

a, b, c, d – współczynniki i wykładniki empiryczne określone dla każdego elementu na podstawie krzywych konsumpcyjnych,

Q – natężenie przepływu

Po obliczeniu prędkości z równania (3) można wyznaczyć dla każdego elementu obliczeniowego przekrój poprzeczny z równania ciągłości:

$$A = Q/U \quad (4)$$

Dyspersja jest przyjmowana jako zagadnienie jednowymiarowe w oparciu o formułę Fishera, uzależniając współczynnik dyspersji podłużnej od parametrów hydraulicznych rzeki:

$$D_L = 3.11 * K * n * U * H^{5/6} \quad (5)$$

gdzie: K to bezwymiarowy współczynnik dyspersji

$$K = \frac{D_L}{HU^*}$$

Reakcje wewnętrzne zostaną poniżej omówione tylko dla trzech wybranych wskaźników – tlenu, azotu oraz fosforu.

Bilans zawartości tlenu rozpuszczonego oraz procesy jego transformacji opisywane są następującym równaniem :

$$\frac{dDO}{dt} = k_2(DOS - DO) + \alpha_3\mu A - \alpha_4\mu A - k_1L - k_4\frac{1}{H} - \alpha_5\beta_1N_1 - \alpha_6\beta_2N_2 \quad (6)$$

akumulacja	reakcja	fotosynteza	oddychanie	biodegradacja	SZT	nityfikacja 1° NH ₃ do NO ₂	nityfikacja 2° NO ₂ do NO ₃
------------	---------	-------------	------------	---------------	-----	--	--

gdzie:

SZT – oznacza sedymentacyjne zapotrzebowanie tlenu,

t – czas,

DOS – stężenie tlenu rozpuszczonego w stanie saturacji (g/m³),

k₂ – współczynnik natlenienia wody (1/dzień),

α₃ – jednostkowa ilość tlenu wytwarzana w procesie fotosyntezy (g O₂/ g A),

μ – stała wzrostu lokalnego alg (1/ d),

α₄ – jednostkowa ilość tlenu zużywana przez algi na oddychanie (g O₂/ g A),

ρ – stała oddychania alg (1/ d),

k₁ – współczynnik rozkładu BZT (1/d),

L – stężenie BZT (g / m³),

k₄ – jednostkowe zapotrzebowanie tlenu dla sedymentującego osadu (g/ m²d),

H – średnia głębokość strumienia (m),

α₅ – jednostkowa ilość tlenu pobierana w procesie utleniania amoniaku (g O/ g N),

β₁ – stała biochemicznego utleniania amoniaku (1/ d),

N₁ – stężenie azotu w postaci amoniakalnej (g N/ m³),

α_6 – jednostkowa ilość tlenu pobierana w procesie utleniania NO_2 do NO_3 (g O/ g N),

β_2 – stała biochemicznego utleniania NO_2 do NO_3 (1/d),

N_2 – stężenie azotu w postaci NO_2 (g N/ m^3).

Współczynnik natlenienia wody jest najczęściej wyrażany jako funkcja głębokości i prędkości strumienia przepływu a QUAL2E umożliwia wybór jednego z ośmiu sposobów szacowania jego wartości. Współczynniki k są zależne od temperatury i można je korygować według podanych w programie wzorów,

Bilans **Biochemicznego Zapotrzebowania Tlenu** wykonywany jest z uwzględnieniem procesu biodegradacji związków organicznych oraz procesów sedymentacji osadów:

$$\frac{dL}{dt} = k_1 L - k_3 L \quad (7)$$

akumulacja
biodegradacja
sedymentacja

gdzie:

k_3 jest współczynnikiem redukcji BZT spowodowanej sedymentacją zanieczyszczeń (1/d).

Bilans **azotu** jest określany z uwzględnieniem azotu organicznego, azotu amonowego, azotanów oraz azotynów. Przykładowe równanie bilansu dla azotu amonowego przedstawia równanie (8):

$$\frac{dN_1}{dt} = \beta_3 N_4 - \beta_1 N_1 - \frac{\sigma_3}{d} - F_1 \alpha_1 \mu A \quad (8)$$

akumulacja
mineralizacja
nitryfikacja i°
NH₄ do NO₂
sedymentacja
wzrost alg

gdzie:

σ_3 – stała przejścia azotu amonowego do osadów (gN/ m^2d),

F_1 – część azotu amonowego pobrana przez algi (-),

$$F_1 = \frac{P_N N_1}{P_N N_1 + (1 - P_N) N_3}$$

P_N – współczynnik preferencji azotu amonowego (-),

N_2 – stężenie azotu w postaci NO_2 (gN/ m^3).

Natomiast równanie bilansu dla azotu organicznego:

$$\frac{dN_4}{dt} = \alpha_1 \rho A - \beta_3 N_4 - \beta_4 N_4 \quad (9)$$

akumulacja
oddychanie
mineralizacja
sedymentacja

gdzie:

N_4 – stężenie azotu organicznego (gN/ m^3),

α_1 – jednostkowy udział azotu w biomase algi (gN/ gA),

A – stężenie biomasy algi w wodzie (gA/ m^3),

β_3 – stała mineralizacji azotu organicznego do amonowego (1/ d),

W programie QUAL2E obieg **fosforu** określają następujące równania:

Fosfor organiczny P_1 :

$$\frac{dP_1}{dt} = \alpha_2 \rho A - \beta_4 P_1 - \sigma_5 P_1 \quad (10)$$

akumulacja
oddychanie
mineralizacja
sedymentacja

gdzie:

α_2 – udział fosforu w biomase algi (gP/ gA),

β_4 – stała czasowa ubytku fosforu organicznego w wyniku obumierania algi (1/ d),

σ_5 – stała sedymentacji dla fosforu organicznego (1/d).

Fosfor rozpuszczalny P_2 (g/ m^3):

$$\frac{dP_2}{dt} = \beta_4 P_1 + \frac{\sigma_2}{d} - \alpha_2 \mu A \quad (11)$$

akumulacja
mineralizacja
sedymentacja
oddychanie

gdzie σ_2 jest stałą przejścia fosforu rozpuszczalnego do osadów (1/ d).

3. Opis zlewni rzeki Raba (I rzędu)

Raba jest lewobrzeżnym dopływem Górnej Wisły. Zbiera wodę ze zlewni o powierzchni 1537 km². Przepływa przez trzy regiony hydrograficzne Polski: Karpaty Zewnętrzne-Beskidy, Pogórze Karpackie, oraz Kotlinę Sandomierską w strefie karpackiej znajduje się 86% dorzecza i to stanowi o tym, że ma ona charakter rzeki górskiej.

Obszar, który został objęty modelowaniem, to dorzecze Górnej Raby o powierzchni 685 km², do przekroju w Osieczanach na długości 71.2 km. Jest to część karpacka zlewni Raby. Obejmuje obszar górski, który tworzy w części północno-zachodniej Beskid Średni, przechodzący w kierunku południowym i południowo-wschodnim w Beskid Wyspowy. Do niego z kolei od południa przylegają Gorce, u stóp których znajdują się źródła rzeki. Za Myślenicami Raba wpływa do Zbiornika Dobczyckiego, rezeruaru wody pitnej dla miasta Krakowa. Jakość wody w Zbiorniku zależy przede wszystkim od stopnia zanieczyszczenia rzeki Raby. W celu ochrony wód Zbiornika Dobczyckiego został opracowany przez Biprokom Kraków S.A. Kraków, na zlecenie Związku Gmin Dorzecza Górnej Raby i Krakowa, „Kompleksowy program utrzymania czystości wód zlewni Raby od źródeł do zapory w Dobczycach”. Projekt ten zakładał m.in. stworzenia systemu oczyszczania ścieków na terenie zlewni rzeki Raby poprzez wybudowanie kilku oczyszczalni ścieków.

Powierzchnia zlewni do przekroju w Osieczanach wynosi 685 km². Obszar zlewni charakteryzuje się dużym zróżnicowaniem wysokościowym: około 31% znajduje się na wysokości pomiędzy 250-500 m n.p.m., 48% w przedziale 500-700 m n.p.m., 20 % w przedziale 700-1000 m n.p.m., i 1% powyżej 1000 m n.p.m.

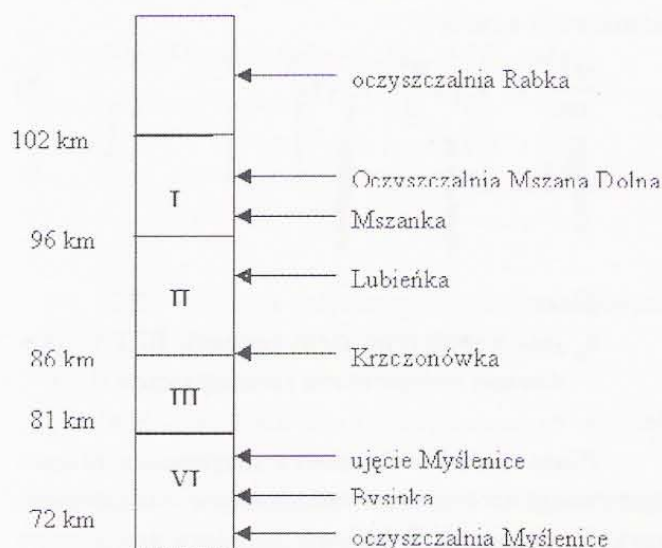
4. Model rzeki Raba (I rzędu)

Opracowanie modelu rzeki Raby polegało na odpowiednim podziale rzeki z uwzględnieniem charakterystyk hydrogeometrycznych i jakości wody na podstawie posiadanych wyników pomiarów w przekrojach pomiarowych wykonywanych przez Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej oraz Wojewódzkiej Inspekcji Ochrony Środowiska. Dodatkowymi informacjami były badania

hydrogeologiczne zlewni Raby, bilans zanieczyszczeń zlewni (Pawlik-Dobrowolski i in. 1992, Wieczysty 1993) oraz badania Zbiornika Dobczyckiego (Mazurkiewicz-Boroń 2000).

Przyjęto długość odcinka obliczeniowego równą 1 km oraz wyznaczono podział na 4 przekroje kontrolne jak na rys. 3.

Na podstawie wybranej serii pomiarowej wykonano kalibrację modelu rzeki. Nie udało się znaleźć tego samego dnia dla monitoringu jakości rzeki oraz pomiarów hydrometrycznych, dlatego dla kalibracji skorzystano z danych WIOŚ oraz IMGW których część była po 3 dniach od daty pomiarów jakości.



Rys. 3. Podział rzeki Raba na odcinki kontrolne.
Fig. 3. The Raba River control sections.

Tabela 1. Współczynniki funkcji (2) i (3) opisujących własności hydrauliczno-geometryczne rzek Raba.

Table 1. Coefficients of functions (2) and (3) describing hydraulic-geometric property of the Raba River.

Przekrój kontrolny	Współczynniki charakterystyki			
	a	b	c	d
102 - 96	0,6649	0,4713	0,2257	0,2058
96 - 86	0,1841	0,7047	0,3703	0,1135
86 - 81	0,1841	0,7047	0,3703	0,1135
81 - 71	0,2288	0,4506	0,1348	0,3511

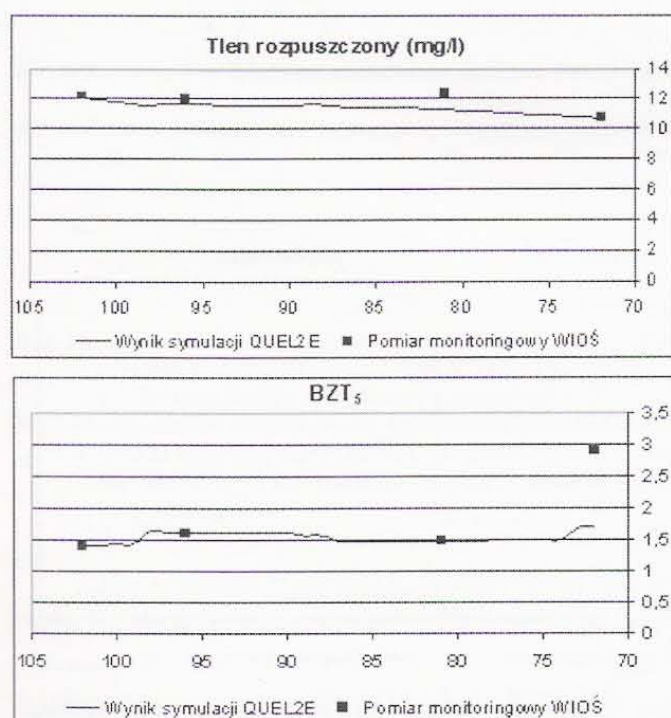
Charakterystyka hydrauliczno-geometyczna w przekrojach kontrolnych posłużyła do wyznaczenia współczynników funkcji (2) i (3) w programie QUAL2E (tab. 1).

5. Symulacja (I rzędu)

W celu weryfikacji modelu wyniki pomiarów porównano do wyników symulacji (rys. 4 i 5). Można zauważyć nieprawidłowości na ostatnim odcinku rzeki – w okolicy Myślenic. Wyniki monitoringu WIOŚ wykazują znaczne zanieczyszczenia związkami organicznymi (odbiegające od wyników symulacji), co może wskazywać na ukryte duże źródło zanieczyszczenia na tym odcinku.

Tak opracowany model został wykorzystywany m.in. do analizy dwu sytuacji:

1. awaria w oczyszczalni ścieków Mszana Dolna prowadzi do niekontrolowanego dopływu nieoczyszczonych ścieków do rzeki Raba,
2. realizowaniu Projektu ZGDGRiK pt. „Kompleksowy program utrzymania czystości wód



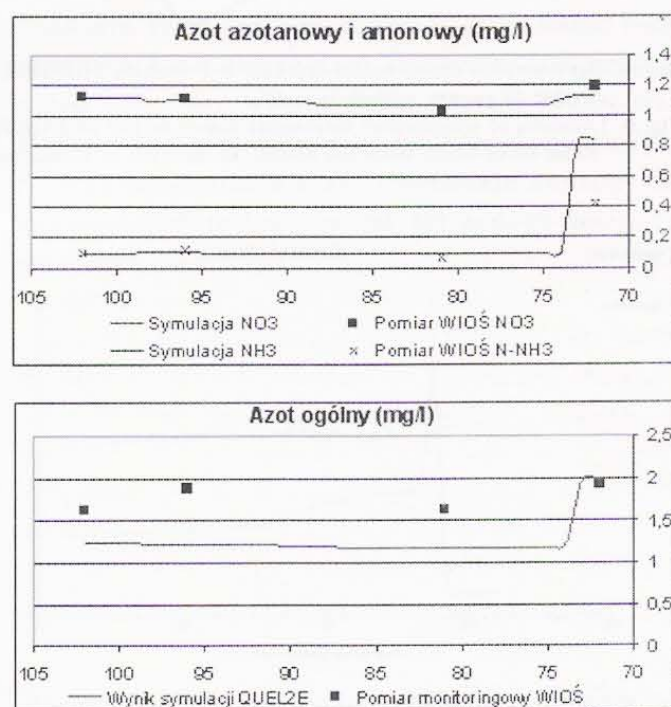
Rys. 4. Zmiany zawartości tlenu rozpuszczonego oraz BZT₅ w rzece Raba na odcinku od Mszany Dolnej (102km) do Myślenic (71km) [w mg/ dcm³].

Fig. 4. Changes of concentration of Dissolved Oxygen and BOD₅ in the Raba River from Mszana Dolna (102km) to Myślenice (71km) [in mg/dcm³].

zlewni Raby od źródeł do zapory w Dobczycach” (Biprokom 2001), polegającego na wybudowaniu 10 oczyszczalni (rys. 6).

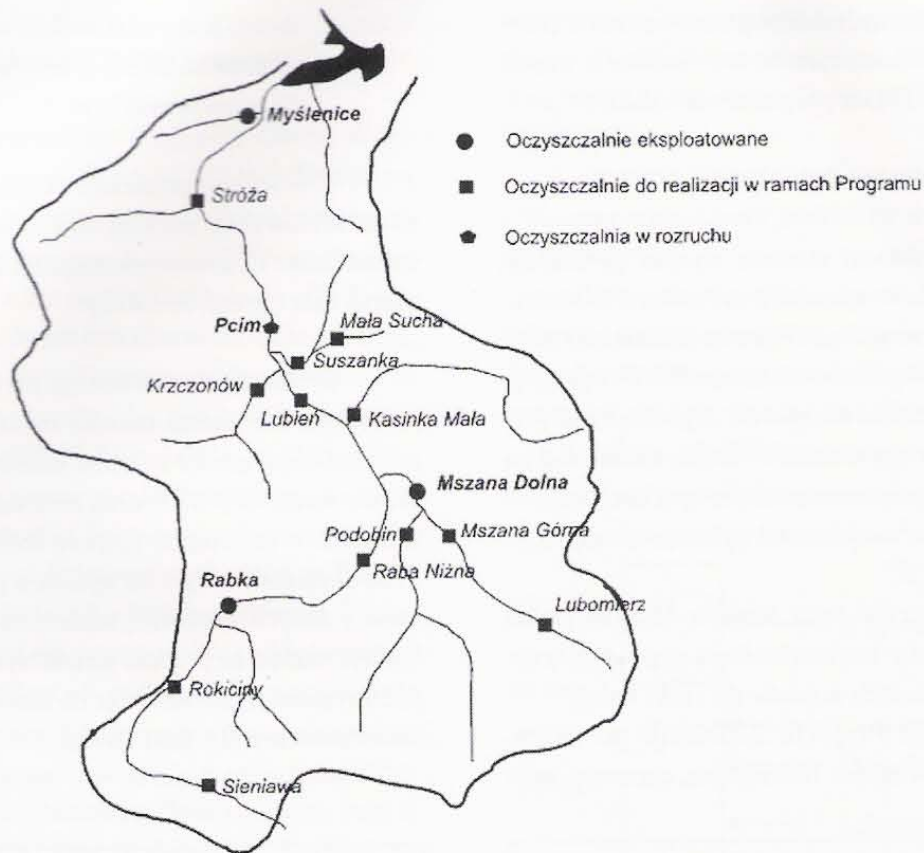
Z uwagi na ograniczoność danych zdecydowano się na modelowanie zmienności tylko 6 podstawowych wskaźników: tlen rozpuszczony, BZT₅, azotany, azot amonowy, azot ogólny, fosforany.

Symulacja dla pierwszego przypadku wykazała duże zagrożenie dla jakości rzek na znacznym odcinku poniżej ewentualnego zrzutu ścieków surowych. Zwłaszcza gwałtownie wzrosłoby BZT₅ oraz azot ogólny (rys. 7 i 8). Na szczęście w mniejszym stopniu obniżyłaby się zawartość tlenu rozpuszczonego, co wynika z górskiego charakteru rzeki i dużych zdolności natleniania się wody. Dlatego istnieje szansa, że procesy samooczyszczania się wód będą podtrzymane doprowadzając do biochemicznego rozkładu zanieczyszczeń (Dojlido 1995).



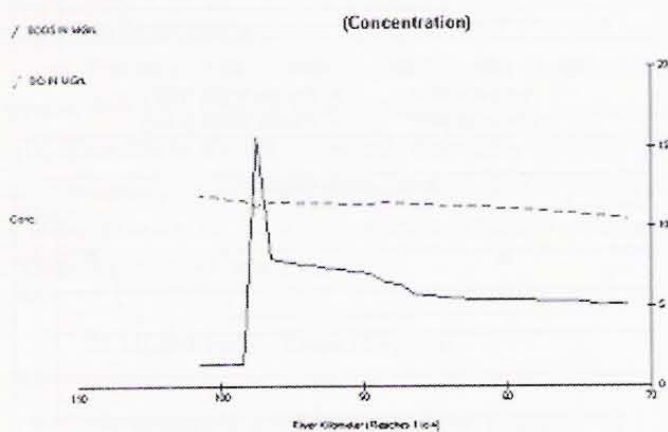
Rys. 5. Zmiany zawartości azotu amonowego, azotanów oraz azotu ogólnego w rzece Raba na odcinku od Mszany Dolnej (102 km) do Myślenic (71 km) [w mg/ dcm³].

Fig. 5. Changes of concentration of Ammonia Nitrogen, Nitrates, and Total Nitrogen in the Raba River from Mszana Dolna (102km) to Myślenice (71km) [in mg/dcm³].



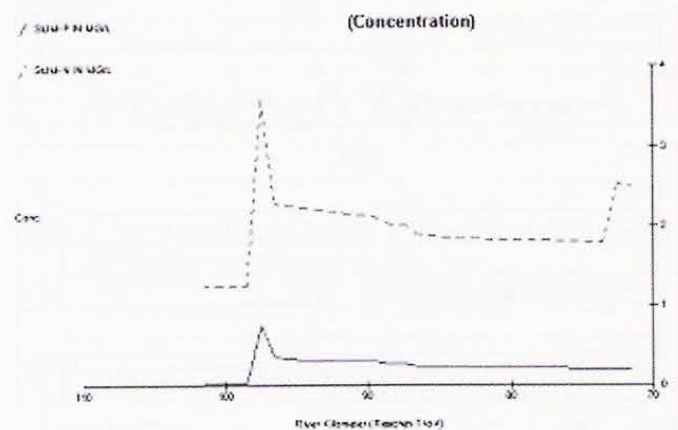
Rys. 6. Usytuowanie oczyszczalni ścieków w Projekcie ZGDGRiK pt. „Kompleksowy program utrzymania czystości wód zlewni Raby od źródeł do zapory w Dobczycach”.

Fig. 6. Location of wastewater treatment plants in the ZGDGRiK Project entitled „Integrated program of water quality control in the Raba River basin from the source to the dam in Dobczyce”.



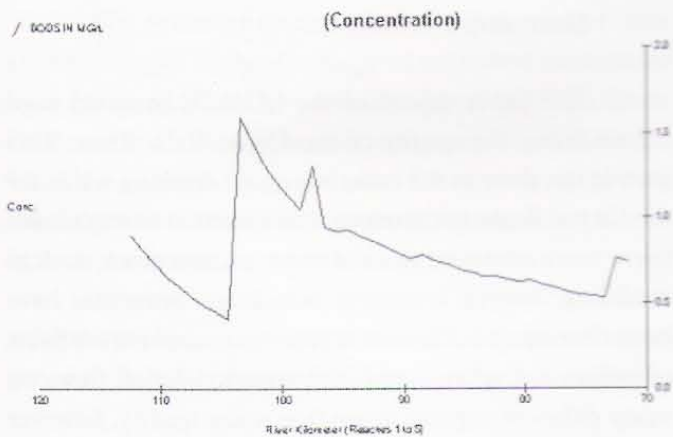
Rys. 7. Symulacja zmian BZT₅ oraz tlenu rozpuszczonego dla zrzutu ścieków surowych z Mszany Dolnej (98km) [w mg/dcm³]. Legenda: DO – tlen rozpuszczony, BOD₅ – BZT₅, x – dystans [km], y – stężenie [w mg/dcm³].

Fig. 7. Simulation of changes of BOD₅ and Dissolved Oxygen in the case of discharging raw wastewater from Mszana Dolna City (98km). [in mg/dcm³]. x – distance [km], y – concentration [mg/dcm³].



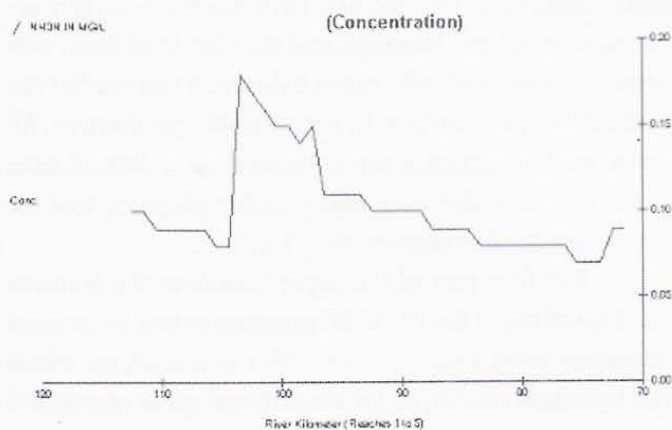
Rys. 8. Symulacja zmian fosforu ogólnego oraz azotu ogólnego dla zrzutu ścieków surowych z Mszany Dolnej (98km) [w mg/dcm³], x – dystans [km], y – stężenie [w mg/dcm³].

Fig. 8. Simulation of changes of Total Phosphorous and Total Nitrogen in the case of discharging raw wastewater from Mszana Dolna City (98km) [in mg/dcm³], x – distance [km], y – concentration [mg/dcm³].



Rys. 9. Symulacja zmian BZT₅ w Rabie z uwzględnieniem budowy 10 oczyszczalni ścieków [w mg/ dcm³], x – dystans [km], y – stężenie [w mg/dcm³].

Fig. 9. Simulation of changes of BOD₅ in the case of construction of 10 wastewater treatment plants [in mg/ dcm³], x – distance [km], y – concentration [mg/dcm³].



Rys. 10. Symulacja zmian azotu amonowego w Rabie z uwzględnieniem budowy 10 oczyszczalni ścieków [w mg/ dcm³], x – dystans [km], y – stężenie [w mg/dcm³].

Fig. 10. Simulation of changes of Ammonium Nitrogen in the case of construction of 10 wastewater treatment plants [in mg/ dcm³], x – distance [km], y – concentration [mg/dcm³].

Dla drugiego przypadku otrzymane wyniki symulacji wskazują na bardzo duży wpływ na rzekę zanieczyszczeń punktowych (rys. 9 i rys. 10) – głównie dopływ ścieków z oczyszczalni z Rabki (103km), Mszany Dolnej (98km) oraz Myślenic (72km). Zwłaszcza niekorzystny jest wpływ ścieków z Rabki, mimo założenia, że oczyszczone ścieki będą spełniać obowiązujące normy. Wydaje się konieczna jeszcze większa rozbudowa istniejącej oczyszczalni, uzupełniając konwencjonalny ciąg

technologiczny np. o III stopień oczyszczania dla głębszego usunięcia substancji organicznej, azotu oraz związków refrakcyjnych. Ponadto należy dokonać kolejnych studiów i symulacji zakładających budowę kolejnych mniejszych oczyszczalni.

6. Wnioski (I rzędu)

Program QUAL2E jest cennym narzędziem w ocenie stanu zanieczyszczenia rzek oraz wpływu źródeł zanieczyszczeń na jakość wody. Jest łatwy do adaptacji do warunków polskich

Już wstępnie wykonane symulacje dały cenny materiał do analiz obecnej sytuacji, jak też modyfikacji programów ochrony wód górnej Raby. Jednym z nich są stwierdzone duże niekorzystne zmiany w rzece Raba na ostatnim odcinku od Myślenic do Zbiornika – sugerujące dopływ większych zanieczyszczeń, niż w dostępnych dokumentacjach. Natomiast ewentualna awaria oczyszczalni w Mszanie Dolnej może mieć katastrofalny wpływ na Rabę. Można też zauważyć, że budowa wg. Projektu ZGDGRiK 10 oczyszczalni bardzo poprawi jakość wody w rzece ale w dalszym ciągu najbardziej niekorzystny wpływ będą mieć ścieki z Rabki, Mszany Dolnej oraz Myślenic. Należy rozważyć rozbudowę oczyszczalni w Rabce oraz Myślenicach z zastosowaniem bardziej zaawansowanych technologii, jak też budowę kolejnych mniejszych oczyszczalni.

Bibliografia

- Adamski W., 1996, *Modelowanie zmian jakości wód*, Koszalin.
- Biprokom, 2001, „Studium wykonalności programu inwestycyjnego pt. *Kompleksowy program utrzymania czystości wód zlewni Raby od źródeł do zapory w Dobczycach*”, Kraków S.A.
- Dojlido J. R., 1995, *Chemia wód powierzchniowych*, Białystok.
- Dyrektywa Rady UE 75/440/EWG.
- Dyrektywa Rady UE 91/676/EWG.
- Mazurkiewicz-Boroń G., 2000, *Zbiornik Dobczycki. Ekologia-Eutrofizacja-Ochrona*, Kraków.
- McGarity A. E., 2000, *Water Quality Management*, CRS Press.
- Pawlik-Dobrowolski J., 1992, (red.) *Opracowanie bilansu zanieczyszczeń obszarowych*, Kraków.
- Wieczysty A., 1993, *Zlewnia Raby jako obszar alimentacji wód i zanieczyszczeń dla zbiornika retencyjnego w Dobczycach*, Kraków.

Summary

The paper describes the QUAL2E program used for modeling the quality of the Upper Raba River. This part of the river is the main source of drinking water for the City of Krakow, therefore, it is essential to implement there more advanced tools of water management, such as modeling. Several computer simulation programs have been developed in the recent years to examine the effects of pollution discharge and contaminated runoff flows on many different aspects of surface water quality, however the QUAL programs are considered as standard programs and are widely used throughout the World. The QUAL2E segments the system into river reaches comprised of equally spaced elements. The channel should be well-mixed vertically and laterally with steady state hydraulics. This model simulates the major reactions of nutrient cycles, algal production, benthic and carbonaceous oxygen demand, atmospheric reaction, and the effects of these processes on the dissolved oxygen balance. It can predict the concentrations of up to 15 water quality parameters. All water quality variables are simulated on a diurnal time scale. It is intended as a water quality planning tool for developing total maximum daily loads.

The first part of the paper describes the features and limitations of the QUAL2E program as well as its most important used equations, variables assumptions, initial and boundary conditions for simulations of fate of selected pollutants and water quality variables in water bodies.

For better understanding of the modeling goal and assumptions, the watershed is characterized too.

In the second part, the model of the URRW was built up, including the river segmentation, estimation of the coefficients and constants, as well as calibration of the model. The data collected by the Institute of Meteorology and Water Management and Voivodship Inspectorate of Environmental Protection were used for model calibration.

The simulation of water quality in URRW was done for two cases: (1) failure of the wastewater treatment plant in Mszana Dolna, (2) implementation of ZGDGRiK Project of the construction of 10 wastewater treatment plants.

The received results showed a potential of catastrophic impact of the discharge of untreated wastewater from Mszana Dolna City on the quality of the Raba River. Particularly, there will be a drastic increase of BOD and Total Nitrogen on a long distance. Fortunately, a substantial decrease of dissolved oxygen is not expected due to high flow velocity and reaeration.

The construction of proposed 10 plants will not solve the problem of pollution control. Discharge of wastewater from Rabka City and Myslenice City will cause the

water quality to drop on a large distance, despite the wastewater treatment proceeding according to current standards. It appears that more advanced treatment is necessary in those proposed wastewater treatment plants. Also, some additional smaller plants along the Raba River should be considered too. It is planned to make some simulation of such cases in the future research.

Moreover, the research suggests that there is a more serious discharge of wastewater nearby and below Myslenice then shown in the available records.

KRONIKA PRAC KOMISJI

W okresie od 1 października 2005 roku do 30 czerwca 2006 odbyły się następujące posiedzenia naukowe Komisji:

12 października 2005 roku z referatem prof. dr. hab. inż. Mariana Nogi (Akademia Górniczo-Hutnicza, Akademickie Centrum Komputerowe CYFRONET) pt. „PIONIER – Polski Internet Optyczny”.

9 listopada 2005 roku z referatem dr. hab. Piotra Wernera (Uniwersytet Warszawski, Pracownia Edukacji Komputerowej) pt. „Uwarunkowania przestrzenne rozwoju infrastruktury społeczeństwa informacyjnego w Polsce”.

14 grudnia 2005 roku z referatem dr. inż. Janusza Magiery (Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie, Wydział Geologii, Geofizyki i Ochrony Środowiska Katedra Złóż Surowców Skalnych), pt. „Wykrywanie powierzchni zrównań metodą przestrzennej analizy numerycznego modelu terenu. Przykład z Alp Wschodnich”.

11 stycznia 2006 roku z referatem dr. inż. Wojciecha Drzewieckiego (Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie, Wydział Geodezji Górniczej i Inżynierii Środowiska, Zakład Fotogrametrii i Informatyki Teledetekcyjnej) pt. „Analiza krajobrazowo-ekologiczna sposobu użytkowania terenu metodą potencjałów częściowych krajobrazu z wykorzystaniem systemów informacji geograficznej”.

8 lutego 2006 roku z referatem dr. inż. Urszuli Marmol (Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie, Wydział Geodezji Górniczej i Inżynierii Środowiska, Zakład Fotogrametrii i Informatyki Teledetekcyjnej) pt. „Filtrowanie danych wysokościowych pochodzących z lotniczego skanera laserowego”.

8 marca 2006 roku z referatem dr. inż. Tomisława Gołębiowskiego (Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie, Wydział Geologii, Geofizyki i Ochrony Środowiska, Zakład Geofizyki) pt. „Technologia modelowania numerycznego pola georadarowego przy pomocy metody FDTD”.

12 kwietnia 2006 z referatem dr. inż. Tomasza Pirowskiego (Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie, Wydział Geodezji Górniczej i Inżynierii Środowiska, Zakład Fotogrametrii i Informatyki Teledetekcyjnej) pt. „Integracja danych teledetekcyjnych pochodzących z różnych sensorów – propozycja kompleksowej oceny scalonych obrazów”.

10 maja 2006 roku z referatem dr. inż. Roberta Olszewskiego (Politechnika Warszawska, Wydział Geodezji i Kartografii, Instytut Fotogrametrii i Kartografii, Zakład Kartografii) pt. „Modelowanie rzeźby terenu w kartografii klasycznej i współczesnej”.

14 czerwca 2006 z referatem dr. inż. Piotra Wężyka (Akademia Rolnicza w Krakowie, Wydział Leśny, Katedra Ekologii Lasu, Laboratorium GIS i Teledetekcji) pt. „Wykorzystanie technologii skaningu

laserowego (LiDAR) w leśnictwie i ochronie przyrody”

Streszczenia wygłoszonych referatów ukazały się w kolejnym tomie „Sprawozdań z czynności i posiedzeń PAU”.

Ukazał się kolejny numer 7 „Geoinformatica Polonica” (za rok 2005) o objętości 142 strony, zamieszczono 9 artykułów.

W części organizacyjnej kolejnych posiedzeń omawiano sprawy:

- prezentowania referatów na najbliższych posiedzeniach Komisji;
- przygotowywania publikacji w kolejnych rocznikach „Geoinformatica Polonica”
- współdziałania 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”.

W roku 2006 przyjęto w skład komisji jednego członka: dr inż. Piotra Wężyka.

Komisja Geoinformatyki liczy obecnie 41 członków. W obecnym składzie Komisji znajdują się przedstawiciele następujących dyscyplin:

nauk informatycznych – 5 osób,
geologii – 8 osób,
geofizyki – 6 osób,
geografii – 3 osoby,
geodezji – 6 osób
kartografii – 1 osoba,
fotogrametrii i teledetekcji – 6 osób,
nauk górniczych – 2 osoby,
geomechaniki – 2 osoby,
nauk leśnych – 1 osoba
inżynierii środowiska – 1 osoba.

W roku 2005 nastąpiła zmiana redaktora naczelnego rocznika „Geoinformatica Polonica”. Jest nim obecnie prof. Kazimierz Twardowski (AGH), uprzednio sekretarz redakcji.

Komisja Geoinformatyki PAU była współorganizatorem ogólnopolskiego sympozjum interdyscyplinarnego p.n. „Geoinformacja zintegrowanym narzędziem badań przestrzennych” które odbyło się w Warszawie 7-9 listopada 2005 roku. Członkowie Komisji wygłosili 10 referatów i prowadzili obrady w 3 sesjach.

Od roku 2003 trwają intensywne prace Komisji nad wielojęzycznym słownikiem geoinformatycznym. Powołano zespoły tematyczne pod kierunkiem specjalistów. Całością kieruje vice-przewodniczący Komisji prof. Józef Jachimski. Uruchomiono program do interaktywnego edytowania i przeglądania zawartości słownika.

przewodniczący
Janusz KOTLARCZYK

sekretarz
Ryszard ŚLUSARCZYK