

GIS – woda w środowisku

Partner wydania – ESRI Polska

GIS – woda w środowisku

pod redakcją
Zbigniewa Zwolińskiego

Bogucki Wydawnictwo Naukowe
Poznań 2010

Recenzent: Paweł Churski

Okładka: Joanna Gudowicz, Maciej Sobczyk

© Copyright by Pracownia Analiz Geoinformacyjnych
Uniwersytetu im. Adama Mickiewicza, Poznań 2010

ISBN 978-83-61320-91-3

Bogucki Wydawnictwo Naukowe
ul. Górna Wilda 90, 61-576 Poznań
tel. +48 61 8336580
fax +48 61 8331468
e-mail: bogucki@bogucki.com.pl
www.bogucki.com.pl

Druk: Totem

Spis treści

Przedmowa	9
<i>Alfred Kaniecki</i>	
Obiekty wodne na starych przekazach kartograficznych	11
<i>Zbigniew Zwoliński</i>	
O homologiczności polskiej terminologii geoinformacyjnej	21
<i>Alfred Stach</i>	
Ocena przestrzenna opadów	31
<i>Wojciech Włodarski</i>	
Wprowadzenie do modelowania struktur geologicznych	59
<i>Leszek Gawrysiak</i>	
Symulacja spływu powierzchniowego w małych zlewniach z wykorzystaniem modelu LISEM	73
<i>Jarosław Jasiewicz</i>	
Analiza topologiczna sieci drenażu w programie GRASS	87
<i>Jacek Urbański, Lucyna Kryla-Straszewska</i>	
Monitoring i modelowanie jezior w systemach geoinformacyjnych	121
<i>Piotr Szukała, Bartosz Czernecki</i>	
Wizualizacja danych przestrzennych kartowania jaskiń oraz ich wykorzystania w badaniach topoklimatycznych	147
<i>Alfred Kaniecki</i>	
Mapa hydrograficzna Polski w skali 1:50 000	157
<i>Renata Graf</i>	
Hydroinformacja w infrastrukturze informacji przestrzennej	163
<i>Sławomir Królewicz</i>	
Konwersja zasobów analogowych Archiwum Kartograficznego WNGiG UAM do postaci cyfrowej.	179

Contents

Alfred Kaniecki

Water objects on ancient cartographic records 11

Zbigniew Zwoliński

About homology of Polish geoinformational terminology 21

Alfred Stach

Spatial estimation of precipitation 31

Wojciech Włodarski

Introduction to the modelling of geological structures 59

Leszek Gawrysiak

Simulation of overland flow in small catchments using LISEM model 73

Jarosław Jasiewicz

Topological analysis of drainage network with GRASS Software 87

Jacek Urbański, Lucyna Kryla-Straszewska

GIS modelling and environmental monitoring of lakes 121

Piotr Szukała, Bartosz Czernecki

Visualization of spatial cave surveying and it's utilisation
in topoclimatic studies 147

Alfred Kaniecki

Hydrographical map of Poland in scale 1:50 000 157

Renata Graf

Hydroinformation in the spatial information infrastructure 163

Sławomir Królewicz

Conversion of analogue resources in Cartographic Archive
of the FG&GS AMU to digital form 179

Autorzy

Bartosz Czernecki – Zakład Klimatologii, Instytut Geografii Fizycznej i Kształtowania Środowiska Przyrodniczego, Uniwersytet im. Adama Mickiewicza, 61-680 Poznań, Dziegielowa 27, nwp@amu.edu.pl

Leszek Gawrysiak – Pracownia Systemów Informacji Geograficznej, Instytut Nauk o Ziemi, Uniwersytet im. Marii Curii-Skłodowskiej, Al. Kraśnicka 2cd, 20-178 Lublin, leszek.gawrysiak@umcs.lublin.pl

Renata Graf – Zakład Hydrologii i Gospodarki Wodnej, Instytut Geografii Fizycznej i Kształtowania Środowiska Przyrodniczego, Uniwersytet im. Adama Mickiewicza, 61-680 Poznań, Dziegielowa 27, rengraf@amu.edu.pl

Jarosław Jasiewicz – Zakład Geologii i Paleogeografii Czwartorzędu, Instytut Geoekologii i Geoinformacji, Uniwersytet im. Adama Mickiewicza, 61-680 Poznań, Dziegielowa 27, jarekj@amu.edu.pl

Alfred Kaniecki – Zakład Hydrologii i Gospodarki Wodnej, Instytut Geografii Fizycznej i Kształtowania Środowiska Przyrodniczego, Uniwersytet im. Adama Mickiewicza, 61-680 Poznań, Dziegielowa 27, alkan@amu.edu.pl

Sławomir Królewicz – Zakład Gleboznawstwa i Teledetekcji Gleb, Instytut Geografii Fizycznej i Kształtowania Środowiska Przyrodniczego, Uniwersytet im. Adama Mickiewicza, 61-680 Poznań, Dziegielowa 27, skrol@amu.edu.pl

Lucyna Kryla-Straszewska – Pracownia Geoinformacji, Instytut Oceanografii, Uniwersytet Gdański, 81-378 Gdynia, Al. Marszałka Piłsudskiego 46, lucyna.kryla@gmail.com

Alfred Stach – Zakład Geoekologii, Instytut Geoekologii i Geoinformacji, Uniwersytet im. Adama Mickiewicza, 61-680 Poznań, Dziegielowa 27, frdstach@amu.edu.pl

Piotr Szukała – Zakład Geomorfologii, Instytut Geoekologii i Geoinformacji, Uniwersytet im. Adama Mickiewicza, 61-680 Poznań, Dziegielowa 27, pszuk@amu.edu.pl

Jacek Urbański – Pracownia Geoinformacji, Instytut Oceanografii, Uniwersytet Gdański, 81-378 Gdynia, Al. Marszałka Piłsudskiego 46, oceju@univ.gda.pl

Wojciech Włodarski – Zakład Geologii Środowiskowej, Instytut Geologii, Uniwersytet im. Adama Mickiewicza, 61-606 Poznań, Maków Polnych 16, wojtek@amu.edu.pl

Zbigniew Zwoliński – Pracownia Analiz Geoinformacyjnych, Zakład Geoekologii, Instytut Geoekologii i Geoinformacji, Uniwersytet im. Adama Mickiewicza, 61-680 Poznań, Dziegielowa 27, zbw@amu.edu.pl

Przedmowa

Środowisko geograficzne Ziemi jest niezwykle zróżnicowane pod wieloma względami. W jego funkcjonowaniu ważną rolę odgrywa woda, występująca pod różnymi postaciami i w różnych sferach: atmosferze, litosferze, pedosferze, biosferze oraz nakładającej się na nie i przenikającej przez nie antroposferze. Złożone układy i relacje, jakie występują pomiędzy wodą a pozostałymi elementami środowiska przyrodniczego, powodują, że poznanie natury funkcjonowania wody staje się doniosłe nie tylko z punktu widzenia naukowego czy teoretycznego, ale może przede wszystkim z punktu widzenia aplikacyjnego, utylitarnego, przemysłowego czy gospodarczego. W ostatnich latach, kiedy ludzkość doświadcza licznych przejawów procesu globalnego ocieplenia, można zaobserwować zintensyfikowane, ekstremalnie wzmożone oddziaływanie wody na funkcjonowanie geoekosystemów, geotopów i biocenoz, codzienne życie i gospodarkę człowieka. W badaniach wody węzłową rolę pełnią zarówno zapisy dawnych jej zachowań, jak i współczesne stacjonarne i zdalne rejestracje począwszy od kropli deszczu i rosy czy intercepcji na powierzchni ziemi poprzez krążenie glebowe i gruntowe, wypływy wód podziemnych, organizację sieci drenażu w postaci spływów powierzchniowych, cieków, strumieni, potoków i rzek aż do retencji wody na obszarach podmokłych, ale także w stawach, zbiornikach zaporowych, jeziorach, morzach i oceanach. Badania te coraz częściej zmierzają do modelowania obiegu wody od prostych modeli opad–odpływ po niezmiernie skomplikowane, wielowymiarowe modele, obejmujące po kilkadziesiąt parametrów sterujących i kontrolujących zachowania wody w środowisku. Tym procesom modelowania, również o znamionach prognozytycznych, coraz częściej w sukurs przychodzą narzędzia, procedury i analizy geoinformacyjne rozwijane na gruncie systemów informacji geograficznej (ang. *GIS* – *geographical information system*) oraz nauki o informacji geograficznej (ang. *GISc* – *geographical information science*). Na tle współczesnych badań hydrograficznych i hydrologicznych powiązanych z analizami przestrzennymi, geoinformacyjnymi w skalach od lokalnej przez regionalną do globalnej rozwija się nowa sfera poznania cywilizacyjnego na miarę XXI wieku, a mianowicie hydroinformacja. Jest ona ściśle powiązana ze stanowioną właśnie w Europie i w Polsce infrastrukturą informacji przestrzennej, której najwyraźniejszym wyznacznikiem jest uchwalenie i implementacja dyrektywy INSPIRE. Jeśli uzupełnić te działania ramową dyrektywą wodną oraz dyrektywą w sprawie oceny ryzyka powodziowego i zarządzania nim, to rysuje się szerokie pole badawczo-aplikacyjne, w którym strategiczną rolę winni odgrywać nie tylko hydrografowie, hydrologowie czy geografowie, ale również analitycy i operatorzy z zakresu geoinformacji.

Widząc powyższe twórcze możliwości dla społeczności geograficznej i kontynuując zapoczątkowane w zeszłym roku warsztaty geograficzne poświęcone problematyce GIS-owskiej, Komitet Nauk Geograficznych Polskiej Akademii Nauk pozy-

tywnie zaopiniował propozycję Pracowni Analiz Geoinformacyjnych Uniwersytetu im. Adama Mickiewicza w Poznaniu organizacji kolejnych warsztatów, które tym razem podejmują tematykę różnych przejawów funkcjonowania wody w środowisku geograficznym. Zarówno zajęcia warsztatowe, jak i zawartość prezentowanej książki nie wyczerpują zagadnień, które winny być omówione przy tak szerokim spektrum problematyki wodnej w przyrodzie nieożywionej i ożywionej oraz w zarządzaniu środowiskiem, życiu i gospodarce człowieka, ale można wyrazić nadzieję, że treści te staną się przyczynkiem do rozszerzania idei geoinformacji i hydroinformacji, że dotychczasowa wiedza hydrologiczna wraz z geoinformacyjną mogą jeszcze ukazać coś, czego wcześniej nawet nie podejrzewano, że wiele powtarzalnych analiz będzie można zautomatyzować i zastosować je do wciąż uaktualnianych i nowych hydrodanych i geodanych.

Nasza inicjatywa, podobnie jak w roku ubiegłym, została doceniona i poparta przez *ESRI Polska*, która na terenie naszego kraju jest firmą wiodącą w zakresie popularyzowania systemów informacji geograficznej nie tylko w jednostkach edukacyjnych, ale także na wielu polach różnych zastosowań, w tym w zakresie gospodarowania wodą. Misja tej firmy jest skutecznie realizowana w trakcie zajęć warsztatowych, które skupiają geografów ze wszystkich ośrodków akademickich w kraju, łącznie z tymi, w których jeszcze nie jest zaimplementowane oprogramowanie *ESRI*.

Wyrażam wdzięczność Komitetowi Nauk Geograficznych Polskiej Akademii Nauk, a szczególnie Przewodniczącemu KNG Profesorowi Andrzejowi Kostrzewskiemu, za przychylność i popieranie wszelkich inicjatyw geoinformacyjnych na różnych forach, które służą rozwojowi systemów informacji geograficznej w Polsce. Dziękuję również Prezesowi *ESRI Polska* Lechowi Nowogrodzkiemu za ciągłe wspieranie naszych edukacyjnych przedsięwzięć w środowisku geografów polskich. W imieniu autorów i swoim składam podziękowanie recenzentowi Profesorowi Pawłowi Churskiemu za skrupulatne zaznajomienie się z treścią poszczególnych rozdziałów oraz zasugerowanie konstruktywnych uwag dla autorów.

Zbigniew Zwoliński

Wojciech Włodarski

Wprowadzenie do modelowania struktur geologicznych

Introduction to the modelling of geological structures

Zarys treści: Modelowanie struktur geologicznych stanowi główny komponent modelowania geologicznego, rozumianego jako technologia efektywnej integracji, przetwarzania i wizualizacji danych geologicznych, geofizycznych czy geochemicznych w środowisku 3D GIS. W ramach modelowania struktur geologicznych generuje się podstawę strukturalną, która opisuje własności geometryczne i relacje topologiczne między elementami strukturalnymi, tj. warstwy skalne, izolowane ciała magmowe, struktury solne i uskoki. Budowa osnowy strukturalnej przebiega w dwóch etapach: w pierwszym etapie modeluje się powierzchnie elementów strukturalnych, np. powierzchnie stropu/spągu warstw skalnych; w drugim etapie generuje się bryły ograniczone wymodelowanymi powierzchniami. Powierzchnie i bryły są reprezentowane w postaci siatek strukturalnych i niestructuralnych.

Słowa kluczowe: model geologiczny, osnowa strukturalna, modele bryłowe, diagramy ażurowe, mapy ścięcia poziomego

Abstract: Modelling of geological structures is major component of geological modelling. This modelling is related to 3D GIS technology that provides flexible tools for integration, analysis and visualization of geological, geophysical and geochemical data. These data are used to create a 3D structural framework which describes geometrical properties and topological relationships between structural elements such as rock layers, more isolated magmatic bodies, salt structures and faults. The modelling of geological structures involves two steps – first the modelling of surface structural elements (bottom and upper surfaces of rocks layers, fault surfaces). The second step involves the building of solid models from surfaces. Surface and solid models are represented by structural and unstructural meshes.

Keywords: geological model, structural framework, solid models, fence diagrams, horizontal section maps

Wstęp

Postrzeganie świata realnego jako struktury wielowymiarowej było i jest naturalnym paradygmatem w geologii. Świadczą o tym dość liczne analogowe opracowania kartograficzne, zarówno współczesne, jak i historyczne, sięgające pierwszej połowy XVIII wieku (Culshaw 2003). Specyficzny język mapy oraz zasady intersekcji geologicznej wypracowane przez kilka pokoleń geologów pozwalają odwzorować całą złożoność trójwymiarowej budowy geologicznej na mapach jako modelach dwuwymiarowych. Ponadto niemal standardem każdego analogowego

opracowania kartograficznego jest prezentacja budowy geologicznej wybranych wycinków litosfery na przekrojach geologicznych.

Od ponad dwóch dekad obserwuje się rozwój zaawansowanej technologii cyfrowej ukierunkowanej na zagadnienia trójwymiarowego modelowania struktur geologicznych. Technologia ta wywodzi się z systemów komputerowego wspomagania grafiki (ang. *Computer Aided Design, CAD*). Niemniej jednak tradycyjne narzędzia dostępne w systemach CAD, stosowane z powodzeniem w inżynierii środowiska czy architekturze, okazały się niewystarczające wobec złożoności modelowanych struktur geologicznych (Turner 2006). Złożoność ta odnosi się nie tylko do geometrii struktur geologicznych, ale także do specyficznych relacji topologicznych między poszczególnymi elementami strukturalnymi. Niekiedy w procesie modelowania istotna jest potrzeba uwzględnienia nieciągłości granic między elementami strukturalnymi.

Technologia modelowania struktur geologicznych stanowi rozszerzenie metod i narzędzi zaimplementowanych w tradycyjnych systemach informacji geograficznej (Turner 2006). Rozpoznanie struktur geologicznych w obrębie litosfery wymaga innego podejścia w procesie modelowania przestrzeni geograficznej niż to, które powszechnie stosuje się dla opisu zjawisk powierzchniowych dotyczących np. topografii, hydrologii czy innych elementów środowiska. Kluczowym elementem omawianej technologii jest to, iż pozwala ona na efektywną integrację różnorodnych danych geologicznych i geofizycznych w trójosiowym układzie współrzędnych x, y, z , a przede wszystkim umożliwia wykonywanie interaktywnych operacji przestrzennych w odniesieniu do wymodelowanych elementów strukturalnych (Raper 1989, Baojun i in. 2009).

Modelowanie struktur geologicznych jest głównym komponentem tzw. modelowania geologicznego (ang. *geological modelling*) lub geomodelowania¹ (ang. *geomodelling*) (Turner 2006, Robinson i in. 2008) (ryc. 1). Obejmuje ono zestaw metod i procedur numerycznych pozwalających na modelowanie własności topologicznych i geometrycznych w odniesieniu do elementów strukturalnych, tj. warstw geologicznych, bardziej wyizolowanych ciał magmowych lub struktur solnych, żył czy wreszcie różnego rodzaju uskoków (Mallet 2002). Elementy strukturalne stanowią tzw. ośnowę strukturalną (ang. *structural framework*) (np. Ringrose i in. 2008) budowanego modelu geologicznego (geomodelu), w ramach której można przeprowadzić dodatkowe modelowanie przestrzennej zmienności własności petrofizycznych czy geochemicznych skał (ryc. 1).

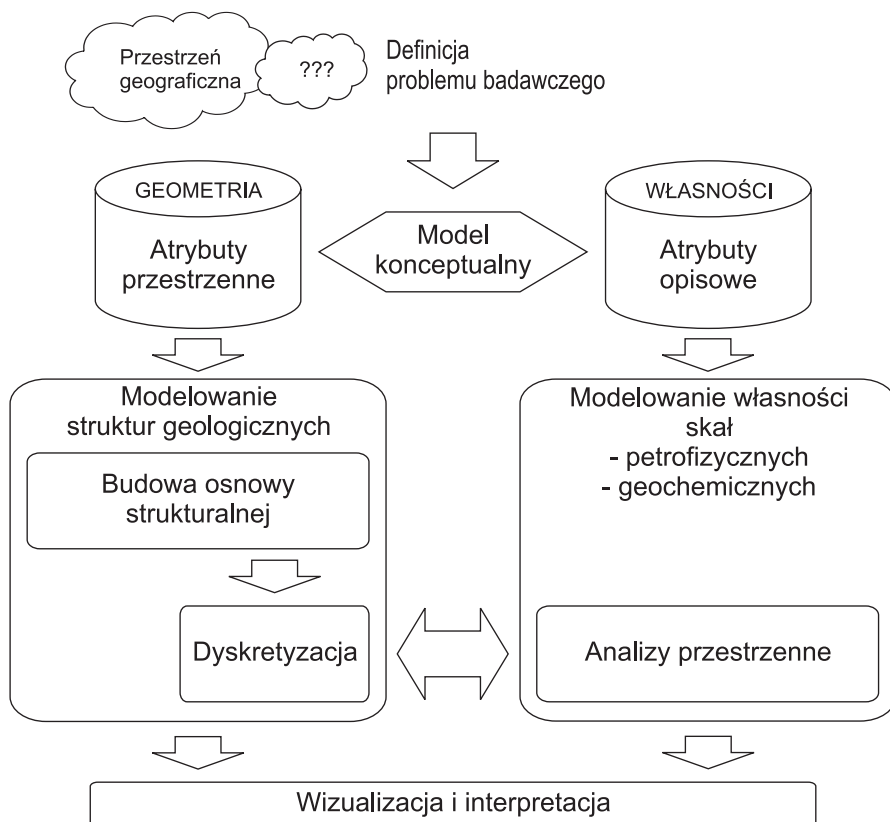
Istnieje wiele przykładów modelowania struktur geologicznych, którego nadrzędnym celem jest przestrzenne rozpoznanie dróg migracji płynów porowych, a w konsekwencji ustalenie lokalizacji pułapek złożowych (Robinson i in. 2008). Częstym zabiegiem jest modelowanie cech petrofizycznych w odniesieniu do kilku skał przestrzennych: w mikroskali (głównie w odniesieniu do przestrzeni porowej ujętej z punktu widzenia wielkości porów oraz ich kształtu), w makroskali (w nawiązaniu do zróżnicowania facjalnego skał osadowych), w megaskali (w odnie-

¹ Geomodelowanie odnosi się do modelowania danych przestrzennych, geodanych i nie jest ograniczone tylko do modelowania geologicznego. Por. definicja GIS wg Koshkariova i in. (1989) – przyp. red.

sieniu do poszczególnych elementów strukturalnych) i wreszcie w gigaskali (dla regionalnych jednostek strukturalnych, w tym basenów sedymentacyjnych) (Ringrose i in. 2008).

Modelowanie struktur geologicznych w znaczącym stopniu ułatwia rozpoznawanie korelacji przestrzennych między różnymi elementami strukturalnymi, pozwalając tym samym testować hipotezy badawcze, wreszcie może ono prowadzić do lepszego zrozumienia istoty badanych zjawisk. Stąd modelowanie to znajduje szerokie zastosowanie w tektonice, górnictwie, przemyśle naftowym, geologii inżynierskiej, hydrogeologii i innych pokrewnych dziedzinach.

Przedmiotem niniejszej pracy jest prezentacja podstawowych zagadnień dotyczących modelowania struktur geologicznych, głównie w kontekście jego rozwoju w ciągu ostatnich kilku lat. Zagadnienia te są ilustrowane w oparciu o model geologiczny opracowany dla strefy rowu Kleczewa we wschodniej Wielkopolsce. Na obecnym etapie wdrażania modelu bazuje on głównie na danych otworowych poszukiwawczych i hydrogeologicznych, pozyskanych dzięki wieloletniej współpracy autora z Kopalnią Węgla Brunatnego „Konin”. Należy podkreślić, iż większość analizowa-



Ryc. 1. Schemat modelowania geologicznego (Turner 2006, zmienione)

Fig. 1. Overview of the geological modelling (Turner 2006, modified)

nych otworów jest rozmieszczona regularnie w siatce 200×200 m. Obraz uzyskany z modelu geologicznego jest od lat konfrontowany z profilami geologicznymi, które są sukcesywnie odsłaniane w wyniku prowadzonej eksploatacji górniczej (Włodarski 2009). Wymodelowane elementy strukturalne są poddawane analizie porównawczej ze względu na przestrzenny rozkład makrostruktur pozytywnych i negatywnych, a także na ich kształt. Ponadto w tej analizie uwzględnia się wyniki szczegółowych badań mezostrukturalnych (Włodarski 2009).

Organizacja danych przestrzennych stosowanych w modelowaniu geologicznym

Poszczególne elementy strukturalne, a także ich petrofizyczne czy geochemiczne właściwości można odwzorować w systemach informatycznych za pomocą dwóch podstawowych klas modeli danych kartograficznych, tj. modelu wektorowego oraz modelu rastrowego (ryc. 2, 3). W sposób oczywisty obydwie klasy odnoszą się przede wszystkim do obiektów trójwymiarowych.

Istotą modelu wektorowego są atrybuty przestrzenne określone przez współrzędne x , y , z , odniesione bądź to do pojedynczych punktów, bądź też do węzłów, na których rozpięte są obiekty o bardziej złożonej geometrii. Obok obiektów takich, jak punkt, linia czy poligon, na uwagę zasługują proste formy bryłowe w kształcie cylindrów, słupów oraz równoległościanów (ryc. 2). Osobną, niezwykle ważną kategorię stanowią tzw. siatki niestrukturalne (ang. *unstructured meshes*), pozwalające odwzorować zarówno powierzchnie (siatki powierzchniowe), jak i bryły (siatki przestrzenne) o złożonej geometrii (Turner 2006; ryc. 3). Są to siatki nieregularne, których podstawowe elementy strukturalne mają różne rozmiary i są reprezentowane przez trójkąty, czworościany, sześciściany (dwupiramidy trójkątne) lub dwunastościany. Siatki trójkątne są siatkami powierzchniowymi, niemniej jednak pozwalają one odwzorować w pełni trójwymiarowe powierzchnie w porównaniu do siatek definiowanych w modelu TIN.

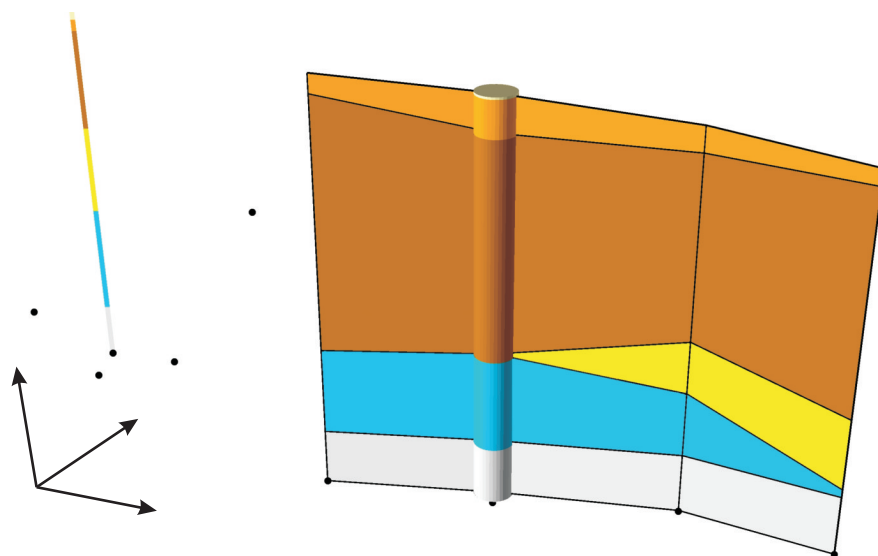
Należy jeszcze wspomnieć o tzw. wymiernych powierzchniach B-sklejanych (powierzchniach NURBS) (ang. *Non-Uniform Rationale B-Spline*), aproksymowanych we fragmentach za pomocą wielomianów względnie niskiego stopnia (najczęściej stopnia drugiego bądź trzeciego) (Kiciak 2005, Sprague, Kemp 2005). Są to powierzchnie charakteryzujące się wysokim stopniem wygładzenia.

Odwzorowanie obiektów trójwymiarowych w formacie rastrowym jest realizowane w oparciu o przestrzenne siatki strukturalne (ang. *structured meshes*) (ryc. 3). Najczęściej stosuje się siatki wokselowe, które dzielą analizowaną przestrzeń na regularne komórki sześciennie zwane wokselaми (ang. *voxel – volume element*). Pomimo ogromnej prostoty, z tą strukturą danych wiąże się jeden dość poważny problem, a mianowicie bardzo duże obciążenie pamięci komputera. Nawet niewielka rozdzielczość siatki, np. $100 \times 100 \times 100$ wokseli w kierunku osi x , y , z , powoduje, że otrzymany model geologiczny będzie składał się z miliona komórek (Turner 2006). Oczywiście w wielu projektach badawczych tworzy się modele geologiczne

o znacznie większej rozdzielczości, składające się z dziesiątek czy setek milionów woksli. Trzeba przy tym pamiętać, iż wzdłuż osi pionowej obserwuje się zwykle dużo większe zróżnicowanie elementów strukturalnych oraz właściwości petrofizycznych czy geochemicznych skał aniżeli w kierunkach poziomych, co wpływa na znaczącą redukcję pionowych rozmiarów woksela, a tym samym wymusza wyraźny wzrost pionowej rozdzielczości modelu.

Wobec dużych rozmiarów plików przechowujących modele geologiczne o strukturze siatki wokselsej, opracowano model siatki (ang. *octree*), który umożliwia zapis danych przestrzennych w postaci woksli bądź ich zhierarchizowanych agregatów (ryc. 3). Hierarchiczna agregacja woksli odbywa się poprzez podział przestrzeni 3D zgodnie z zasadą drzewa ósemkowego (Turner 2006), analogicznie do zasady drzewa czwórkowego stosowanej przy agregacji komórek w dwuwymiarowych mapach rastrowych (Eckes 2006).

Innym modelem danych, pozwalającym „oszczędnie” dzielić przestrzeń trójwymiarową modelu geologicznego na komórki elementarne jest tzw. model siatki



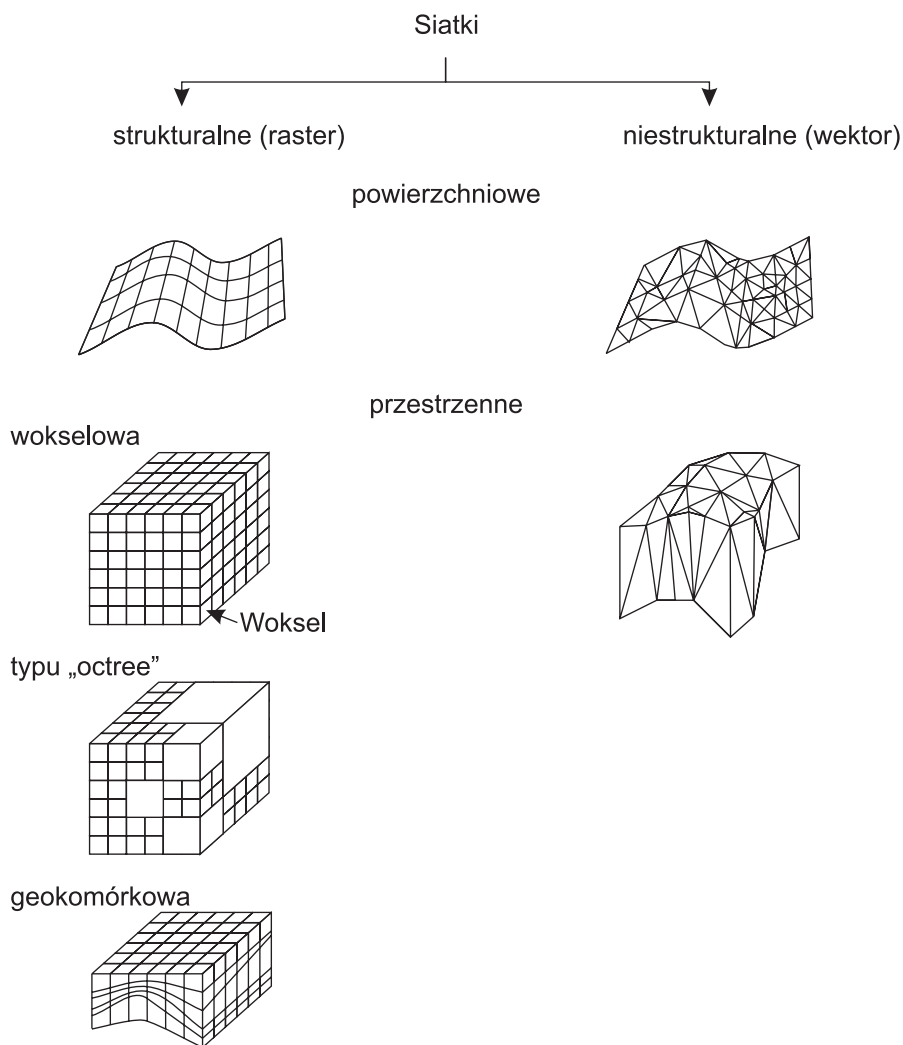
Objaśnienia

	holocen: piaski, mułki, torfy		złod. Odrzy: piaski, żwiry
	złod. Wisły: gliny		miocen górny: iły, mułki
	złod. Odrzy, Warty: gliny		miocen środkowy: węgle brunatne

Ryc. 2. Przykłady prostych trójwymiarowych obiektów wektorowych odwzorowujących lokalizację i geometrię stropu węgla brunatnych (punkty), otwory geologiczne (linie i cylindry) oraz przekrój geologiczny (poligony)

Fig. 2. Examples of simple three-dimensional vector objects showing localisation and geometry of: lignite bottom surface (points), well logs (lines and cylinders), and cross-section (polygons)

geokomórkowej² (ang. *geocellular*) (ryc. 3). Jego istota polega na tym, iż komórki elementarne mogą wykazywać istotne zmiany swoich rozmiarów w kierunku osi pionowej z, przy stałych rozmiarach wzdłuż osi poziomych (Turner 2006). Dzięki temu można bardziej efektywnie modelować zmienność pionową elementów strukturalnych (np. miąższości warstw) czy też własności petrofizycznych i geochemicznych skał, uwzględniając przy tym stosunkowo małą ich zmienność w kie-



Ryc. 3. Uproszczona typologia siatek stosowanych w modelowaniu geologicznym
Fig. 3. Simplified typology of meshes applied in the geological modelling

² Siatki geokomórkowe stosowane są także w trakcie innych procedur modelowania nie tylko geologicznego – przyp. red.

runku poziomym. Siatka geokomórkowa pozwala odwzorować naturalną dynamikę zmian obserwowaną w obrębie środowisk sedymentacyjnych.

Niejako na marginesie należy jeszcze wspomnieć o powierzchniowych siatkach strukturalnych (ryc. 3). Są to siatki dwuwymiarowe, które pozwalają odwzorować powierzchnie w przestrzeni 2,5D. Są one szeroko stosowane przy modelowaniu rzeźby terenu w systemach geoinformacyjnych. Można je również wykorzystać przy modelowaniu struktur geologicznych, aczkolwiek z pewnymi ograniczeniami. Dla przykładu, nie można odwzorować takich elementów strukturalnych, jak fałdy obalone lub fałdy leżące, gdyż powierzchnie skrzydeł grzbietowych i brzuszných nachylają się w tym samym kierunku, co wymusza potrzebę dwukrotnego zdefiniowania rzędnej modelowanej powierzchni w tym samym punkcie węzłowym siatki, osobno dla skrzydła grzbietowego i osobno dla skrzydła brzusznego. Model dwuwymiarowej siatki strukturalnej dopuszcza jednak możliwość zdefiniowania tylko jednego atrybutu opisowego w danym punkcie węzłowym siatki. Z tego też względu można napotkać trudności, modelując bardziej złożone elementy strukturalne, np. ciała magmowe czy struktury solne o często dość skomplikowanych kształtach z udziałem przewieszek.

Ogólna koncepcja modelowania struktur geologicznych

Dane źródłowe

Proces modelowania struktur geologicznych opiera się na dość szerokim wachlarzu różnorodnych danych źródłowych, takich jak: dane otworowe, dane geofizyczne, mapy geologiczne, archiwalne przekroje geologiczne, bezpośrednie obserwacje terenowe struktur geologicznych czy wreszcie dane odnośnie do rzeźby terenu (zarówno źródłowe dane topograficzne, jak i cyfrowy model wysokościowy – DEM) (ryc. 4). Podstawowym źródłem danych są niewątpliwie dane otworowe, dotyczące zarówno charakterystyk litologicznych i stratygraficznych rdzeni, jak i cech petrofizycznych uzyskanych w oparciu o metody geofizyki otworowej. Ich doskonałym uzupełnieniem są przekroje geologiczne, które pozwalają wstępnie rozpoznać styl strukturalny budowy geologicznej modelowanego obszaru, a w szczególności geometrię uskoku (Kaufman, Martin 2008). Przekroje geologiczne zwykle stanowią efekt analizy profili sejsmicznych (Goleby i in. 2006), ponadto ich źródłem mogą być dane grawimetryczne (Martelet i in. 2004). W obrębie masywów górskich dość silnie rozczłonkowanych przez erozję dobrą, choć mającą swoje ograniczenia metodą sporządzania przekrojów geologicznych, jest analiza obrazu intersekcyjnego warstw geologicznych i struktur tektonicznych z powierzchnią terenu (Chiles i in. 2004, Tomaszczyk i in. 2009). Obraz intersekcyjny jest odwzorowany na powierzchniowych szczegółowych mapach geologicznych. Dobrym podkładem do jego analizy wydaje się cyfrowy model wysokościowy, który pozwala na trójwymiarową wizualizację powierzchniowej budowy geologicznej.

Integracja danych źródłowych

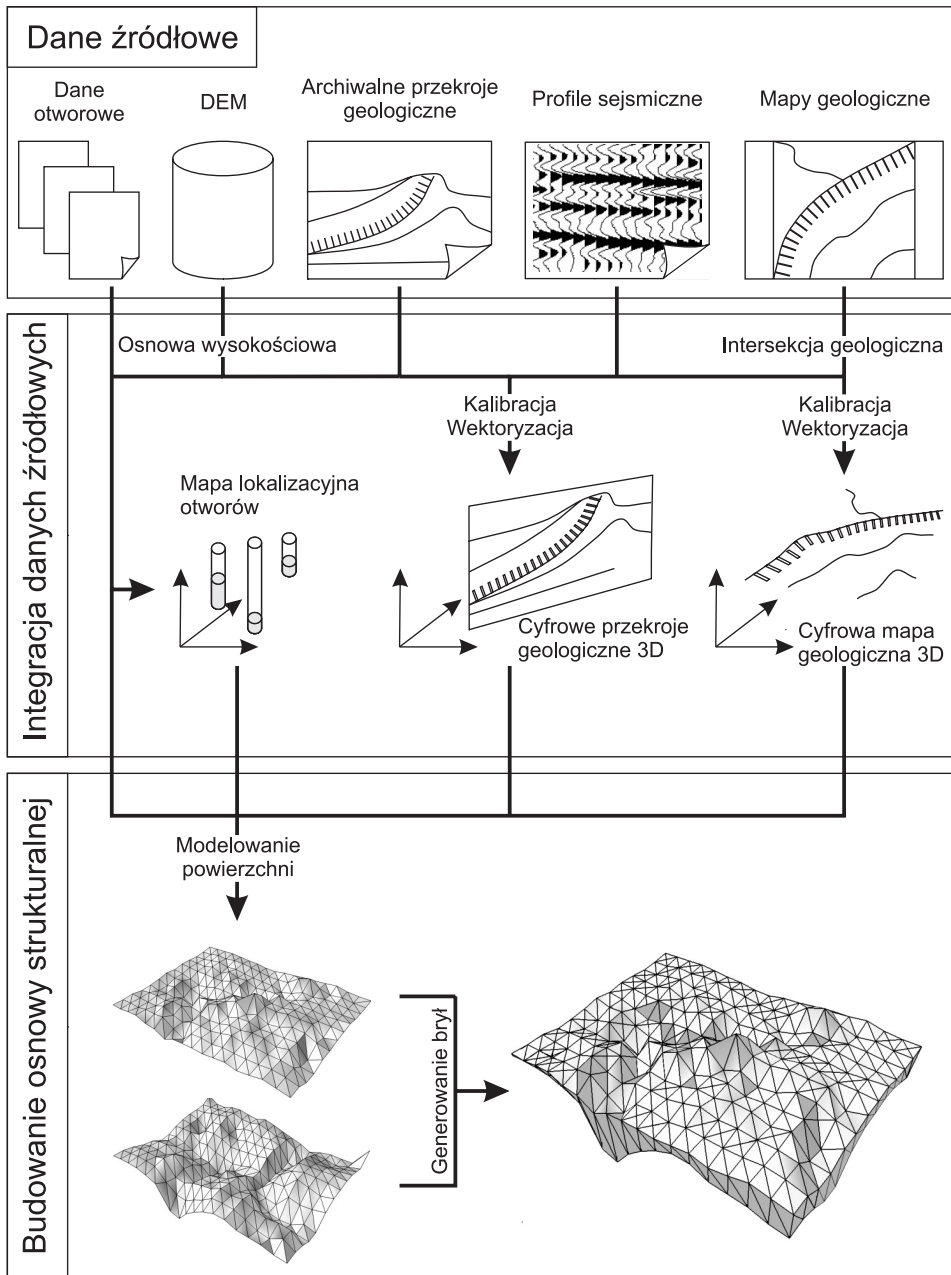
Nadrzędnym celem integracji danych źródłowych w ramach spójnego systemu informacji geograficznej jest ich harmonizacja pod względem geometrycznym, topologicznym i semantycznym (Bielecka 2006). W przypadku harmonizacji danych źródłowych wykorzystywanych do modelowania struktur geologicznych należy brać pod uwagę wielowymiarowy charakter obiektów naturalnych opisywanych przez te dane. Z tego względu już sam proces kalibracji czy transformacji danych dokonuje się nie tylko w ramach określonego bazowego układu współrzędnych, ale także w nawiązaniu do konkretnej osnowy wysokościowej (ryc. 4). Jako podstawową osnowę wysokościową wykorzystuje się cyfrowy model wysokościowy (Kaufmann, Martin 2008). Dodatkowo, funkcję osnowy mogą pełnić rzędne zalegania stropu/spągu horyzontów litologicznych rozpoznanych wierceniami, szczególnie stosowane przy kalibracji profili sejsmicznych. Wielowymiarowość obiektów geologicznych znacznie komplikuje relacje topologiczne między obiektami. Dla przykładu, elementy strukturalne odwzorowywane na wektoryzowanych przekrojach geologicznych nie mogą przecinać powierzchni terenu. Ponadto ich przebieg musi ściśle nawiązywać do lokalizacji oraz rzędnych zalegania stropu/spągu warstw skalnych nawierconych otworami, nie mówiąc już o konieczności uwzględnienia rzeczywistych bądź pozornych kątów nachylenia przy odwzorowywaniu elementów strukturalnych w nawiązaniu do pomiarów ich orientacji.

Budowanie osnowy strukturalnej modelu geologicznego

Budowanie osnowy strukturalnej modelu geologicznego zazwyczaj przebiega dwuetapowo. Najpierw modeluje się powierzchnie geologiczne, natomiast w drugim etapie generuje się bryły zawierające się między wymodelowanymi powierzchniami (Lemon, Jones 2003, Turner 2006, Kaufmann, Martin 2008, Baojun i in. 2009) (ryc. 4). Powierzchnie geologiczne nawiązują głównie do przebiegu uskoków oraz stropu/spągu warstw skalnych o określonej litologii czy wieku.

Modelowanie powierzchni przeprowadza się w oparciu o różnorodne metody, których dobór zależy od charakteru modelowanej powierzchni, złożoności jej kształtu, a także ilości danych źródłowych czy ich przestrzennego rozmieszczenia (Caumon i in. 2009). Należy tu wymienić metody triangulacji Delanuyaya, a ponadto interpolację metodami DSI (ang. *Discrete Smoth Interpolation*) oraz krigingu. W przypadku modelowania powierzchni geologicznych, które wykazują podobną dynamikę zmian ukształtowania, z powodzeniem stosowana jest interpolacja metodą kokrigingu (Calgano i in. 2008). W zależności od przyjętej metody modelowania, powierzchnie mogą być reprezentowane w postaci siatki powierzchniowej zarówno strukturalnej, jak i niestrukturalnej.

Modelując powierzchnie geologiczne, należy uwzględnić relacje topologiczne między nimi. Relacje te stanowią odbicie naturalnych procesów geologicznych, tj. sedymentacji, erozji oraz deformacji. Podstawowa reguła topologiczna mówi, iż dwie powierzchnie nie mogą się nawzajem przecinać (Turner 2006, Caumon i in. 2009). Tym samym reguła ta wymusza konieczność definicji powierzchni przeci-



Ryc. 4. Schemat modelowania struktur geologicznych

Fig. 4. Flowchart of geological structures modelling

nającej i przecinanej. Zwykle powierzchnia przecinająca jest reprezentowana przez spąg młodszej warstwy skalnej lub powierzchnię uskoku. W pierwszym przypadku powierzchnia przecinająca będzie odwzorowywać naturalną powierzchnię niezgodności erozyjnej, w drugim należy ją traktować jako powierzchnię tektoniczną i ewentualnie powierzchnię niezgodności kątowej. Trzeba jednak pamiętać, iż w architekturze basenów sedymentacyjnych znane jest następstwo warstw skalnych tworzących tzw. niezgodność wstępującą (ang. *onlap unconformity*), kiedy warstwy młodsze przykrywają częściowo struktury pozytywne zbudowane ze skał starszych (Porębski 1996). W takim przypadku powierzchnia przecinająca będzie związana ze stropem warstwy starszej w stosunku do wieku skał ograniczonych powierzchniami przecinanymi. Należy podkreślić, iż wszystkie kontakty między powierzchniami muszą być oparte na wspólnych granicach, a tym samym na wspólnych punktach węzłowych siatek (Mallet 2002, Lemon, Jones 2003). Jedynie dla powierzchni uskoku dopuszcza się możliwość ich wygasania w przestrzeni między powierzchniami spągu i stropu danej warstwy skalnej (Caumon i in. 2009).

Wymodelowane powierzchnie geologiczne oraz powierzchnie uskoku stanowią szkielet, na którego bazie generuje się bryły odniesione do warstw skalnych (ryc. 4). Najbardziej popularna metoda generowania brył polega na odwzorowaniu ich geometrii tylko za pomocą ograniczających je powierzchni (ang. *boundary representation*) (Lemon, Jones 2003, Caumon i in. 2004). W wielu przypadkach stosuje się też metodę tzw. rozciągania w pionie (ang. *extrusion*) (Mallet 2002). Polega ona na tym, iż dolną powierzchnię geologiczną (np. spągu warstwy) rozciąga się pionowo do wysokości zalegania powierzchni górnej (np. stropu warstwy). Proces rozciągania stosuje się zarówno w odniesieniu do siatek strukturalnych, jak i niestukturalnych. Należy jeszcze wspomnieć o wtórnym procesie dyskretyzacji (ang. *discretisation*), mającym na celu podział modelowanej przestrzeni na elementarne trójwymiarowe komórki siatki strukturalnej lub niestukturalnej (Turner 2006) (ryc. 1). Generowana w tym procesie siatka przestrzenna uwzględnia strukturę siatek powierzchniowych zdefiniowanych na etapie modelowania powierzchni geologicznych oraz uskoku. W oparciu o siatkę przestrzenną można przeprowadzić modelowanie zmienności cech geofizycznych czy geochemicznych warstw skalnych. Do modelowania wykorzystuje się różnorodne narzędzia geostatystyczne i analizy przestrzennej. Wyniki takiego modelowania mogą stanowić podstawę do definiowania nowych elementów osnowy strukturalnej.

Eksploracja i wizualizacja geomodelu

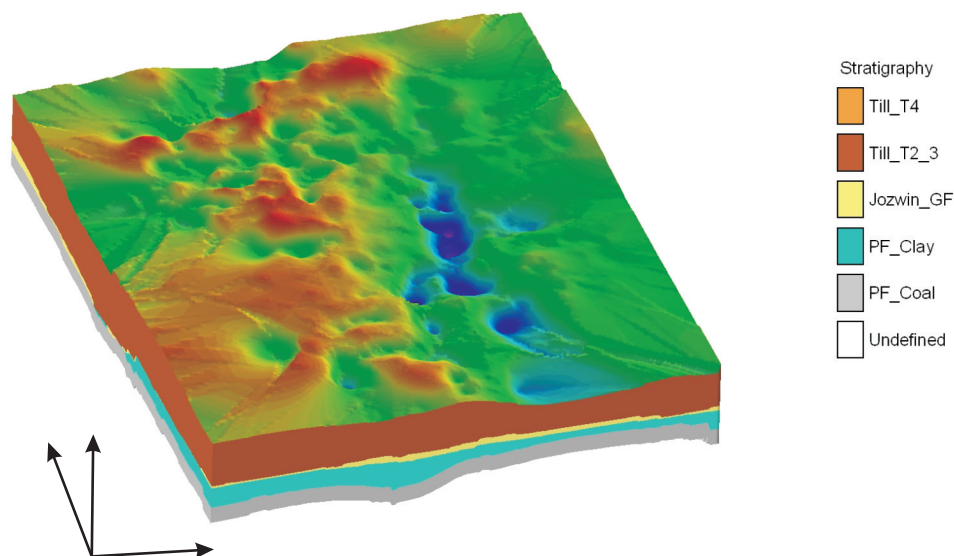
Interaktywna eksploracja geomodelu pozwala na trójwymiarowe wizualizacje struktur geologicznych, które mogą być realizowane w kilku co najmniej postaciach: modeli bryłowych, przekrojów geologicznych, diagramów ażurowych, trójwymiarowych modeli powierzchni, a także map ścieżca poziomego.

Za pomocą modeli bryłowych (ang. *solid model*) można przedstawić trójwymiarową geometrię pojedynczej warstwy skalnej, kilku warstw skalnych odniesionych do wybranej wspólnej ich cechy oraz kompletnej sekwencji warstw. Można zatem

mówić o modelach bryłowych odkrytych i zakrytych. Szczególną rolę pełnią modele bryłowe odkryte (ryc. 5), odniesione do powierzchni niezgodności erozyjnej i/lub kątowej. Ukazują one morfologię paleopowierzchni erozyjnej wraz z przestrzennym rozmieszczeniem wychodni skał starszych i przebiegiem struktur tektonicznych. Modele bryłowe odkryte tworzy się poprzez usuwanie z geomodelu brył odniesionych do poszczególnych warstw skalnych.

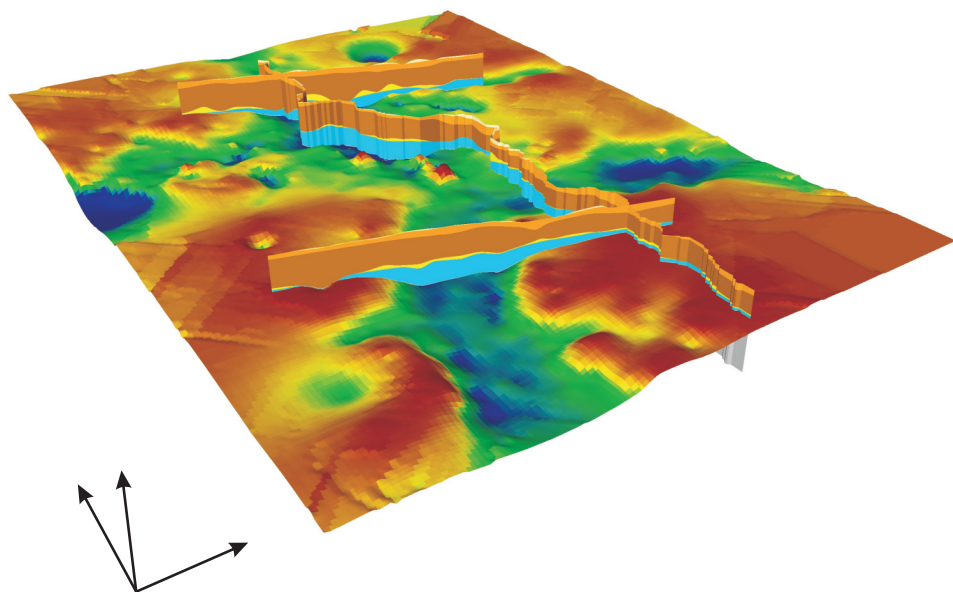
Przekroje geologiczne stanowią efekt pionowego rozcięcia geomodelu wzdłuż linii przekroju zdefiniowanej w dowolnym kierunku. Często generuje się sekwencję wielu przekrojów geologicznych zwaną diagramem ażurowym (ang. *fence diagram*) (ryc. 6). Należy wspomnieć, iż istnieje osobna kategoria przekrojów geologicznych, opartych tylko na danych z wierceń. W tym przypadku linię przekroju prowadzi się między kolejnymi lokalizacjami otworów geologicznych. Z racji bardzo uproszczonego przebiegu granic geologicznych w postaci prostych linii zdefiniowanych między otworami, przekroje te można traktować jako diagramy korelacyjne (ryc. 2).

Trójwymiarowe modele powierzchni (ang. *3D surface model*) tworzy się w efekcie zestawienia kilku powierzchni geologicznych w postaci stosu wielowarstwowego,



Ryc. 5. Model bryłowy odkryty bez utworów holocenu i zlodowacenia Wisły dla strefy rowu Kleczewa. Objaśnienia skrótów stratygraficznych: Till_T4 – gliny zlodowacenia Wisły; Till_T2_T3 – gliny zlodowacenia Odry i Warty; Jozwin_GF – osady wodnolodowcowe serii z Józwiną (zlodowacenie Odry); PF_Clay – iły formacji poznańskiej z miocenu górnego; PF_Coal – węgle brunatne formacji poznańskiej miocenu środkowego

Fig. 5. Backstripped solid model without the Holocene and Vistulian strata, obtained for the Kleczew Graben zone. Explanation for stratigraphic legend: Till_T4 – Vistulian till; Till_T2_T3 – Odranian and Wartanian till; Jozwin_GF – glaciofluvial sediments from Józwin Formation (Odranian glaciation); PF_Clay – Upper Miocene Poznań Formation clays; PF_Coal – Middle Miocene Poznań Formation lignites



Ryc. 6. Diagram ażurowy na tle trójwymiarowego modelu powierzchni stropu węgla brunatnych. Symbolizacja kolorami poszczególnych warstw na przekrojach geologicznych jak na rycinach 2 i 5

Fig. 6. Fence diagram and 3D surface model of lignites upper surface. Symbology of structural elements represented on diagram is similar as symbology used in figures 2 and 5

przecinanego dodatkowo powierzchniami uskoków. Tego typu wizualizacje wykorzystuje się przy szczegółowej interpretacji geometrycznej struktur odwzorowanych na poszczególnych powierzchniach geologicznych, przy ewentualnym ich nawiązaniu do przebiegu uskoków czy współczesnej powierzchni terenu (Kemp 2000, Caumon 2009). Pojedyncze trójwymiarowe modele powierzchni często stanowią podkład dla przekrojów geologicznych lub diagramów ażurowych (ryc. 6).

Mapy ścicia poziomego (ang. *horizontal section map*) generuje się w rezultacie poziomego rozcięcia geomodelu wzdłuż zadanych rzędnych. Są to mapy planisekcyjne, odwzorowujące obraz intersekcyjny elementów strukturalnych na płaszczyźnie horyzontalnej (Kotański 1990). Zaletą tego typu wizualizacji, szczególnie jeśli generowane są w sposób interaktywny, jest możliwość prześledzenia czasoprzestrzennej dynamiki zmian w odniesieniu do kształtu odwzorowywanych elementów strukturalnych, ich przestrzennego ułożenia oraz wzajemnych relacji topologicznych. W oparciu o mapy ścicia poziomego można wyróżnić struktury pogrzebane, odziedziczone i nałożone.

Podsumowanie

Dokonany przegląd rodzajów modeli geologicznych, procedur modelowania geologicznego oraz dostępnych powszechnych źródeł danych dla modelowania struktur

geologicznych świadczy o dużych walorach systemów geoinformacyjnych w zastosowaniach geologicznych. Przykłady różnych aspektów tego modelowania dla strefy rowu Kleczewa we wschodniej Wielkopolsce zostały zilustrowane na załączonych rycinach. Uzyskane obrazy z modelu geologicznego Kleczewa są weryfikowane z profilami geologicznymi, które sukcesywnie są odsłaniane w wyniku prowadzonej eksploatacji przez górnictwo odkrywkowe.

Literatura

- Baojun W., Bin S., Zhen S., 2009. A simple approach to 3D geological modelling and visualisation. *Bull. Eng. Geol. Env.*, 68: 559–565.
- Bielecka E., 2006. Systemy informacji geograficznej. Teoria i zastosowania. Wydawnictwo PJWSTK.
- Calcagno P., Chiles J.P., Courrioux G., Guillen A., 2008. Geological modelling from field data and geological knowledge. Part I. Modelling method coupling 3D-potential field interpolation and geological rules. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 171: 147–157.
- Caumon G., Collon-Drouaillet P., Le Carlier de Veslud C., Viseur S., Sausse J., 2009. Surface-based 3D modelling of geological structures. *Math. Geosci.*, 41: 927–945.
- Chiles J.P., Aug C., Guillen A., Lees T., 2004. Modelling the geometry of geological units and its uncertainty in 3D from structural data: the potential-field method. *Proceedings of International Symposium on Orebody Modelling and Strategic Mine Planning*, Perth, Australia, 22–24 November 2004, s. 313–320.
- Culshaw M., 2003. Bridging the gap between geoscience providers and the user community. [W:] M.S. Rosenbaum, A.K. Turner (red.), *New Paradigms in Subsurface Prediction*, Springer-Verlag, Berlin–Heidelberg, s. 7–26.
- de Kemp E.A., 2000. 3-D visualization of structural field data: examples from the Archean Caopatina Formation, Abitibi greenstone belt, Quebec, Canada. *Computers & Geosciences*, 26: 509–530.
- Eckes K., 2006. Modele i analizy w systemach informacji przestrzennej. Wydawnictwa AGH, Kraków: 1–97.
- Goleby B.R. i in., 2006. An integrated multi-scale 3D seismic model of the Archaean Yilgarn Craton, Australia. *Tectonophysics*, 420: 75–90.
- Kaufmann O., Martin T., 2008. 3D geological modelling from boreholes, cross-sections and geological maps, application over former natural gas storages in coal mines. *Computers and Geosciences*, 34: 278–290.
- Kiciak P., 2005. Podstawy modelowania krzywych i powierzchni: zastosowania w grafice komputerowej. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa.
- Kotański Z., 1990. Geologiczna kartografia wgłębną. Wydawnictwa Geologiczne, Warszawa.
- Lemon A.M., Jones N.L., 2003. Building solid models from boreholes and user-defined cross-sections. *Computers and Geosciences*, 29: 547–555.
- Mallet J.L., 2002. *Geomodelling. Applied geostatistics*. Oxford University Press, New York.
- Martelet G., Calcagno P., Gumiaux C., Truffert C., Bitri A., Gapais D., Brun J.P., 2004. Integrated 3D geophysical and geological modelling of the Hercynian Suture Zone in the Champtocéaux area (south Brittany, France). *Tectonophysics*, 352: 117–128.
- Porębski Sz., 1996. Podstawy stratygrafii sekwencji w sukcesjach klastycznych. *Przegląd Geologiczny*, 44: 995–1006.

- Raper J.F., 1989. The 3D geoscientific mapping and modelling system: a conceptual design. [W:] J.F. Raper (red.), Three dimensional applications in geographic information system. Taylor and Francis, London, s. 11–19.
- Ringrose P.S., Martinus A.W., Alvestad J., 2008. Multiscale geological reservoir modelling in practice. [W:] A. Robinson, P. Griffiths, S. Price, J. Hegre, A. Muggeridge (red.), The Future of Geological Modelling in Hydrocarbon Development. Geological Society of Special Publication, 309: 123–134.
- Robinson A., Griffiths P., Price S., Hegre J., Muggeridge A., 2008. The Future of Geological Modelling in Hydrocarbon Development. Geological Society of Special Publication, 309: 1–226.
- Sprague K.B., de Kemp E.A., 2005. Interpretive tools for 3-D structural geological modelling. Part II. Surface design from sparse spatial data. *Geoinformatica*, 9: 5–32.
- Tomaszczyk M., Rubinkiewicz J., Borecka A., 2009. Przestrzenny model utworów eocenu numulitowego pomiędzy Doliną Małej Łąki a Doliną Lejową w Tatrach. *Przegląd Geologiczny* 57: 68–71.
- Turner K.A., 2006. Challenges and trends for geological modelling and visualisation. *Bull. Eng. Geol. Env.*, 65: 109–127.
- Włodarski W., 2009. Analiza strukturalno-kinematyczna kompleksu deformacji glacictonicznych w strefie rowu Kleczewa (elewacja konińska, wschodnia Wielkopolska). *Prace Państwowego Instytutu Geologicznego*, 194: 75–100.