

Michał Kępiński

Polskie Górnictwo Naftowe i Gazownictwo S.A.

Uniwersytet Warszawski, Wydział Geologii

Zastosowanie modelowania niejawnego do budowy przestrzennych modeli geologicznych na przykładzie rejonu Jaślik (Karpaty zewnętrzne – Beskid Niski)

Najnowsze odkrycia w naukach o Ziemi są związane głównie z technologiami pozwalającymi na wizualizację przestrzenną. Trójwymiarowe modele przestrzenne stanowią obecnie najlepszą metodę wizualizacji budowy geologicznej w zależności od głębokości. Do tej pory przeważająca część modeli przestrzennych była i jest nadal oparta na zdjęciach sejsmicznych 2D i 3D oraz danych otworowych. Dane pochodzące z tych źródeł są stosunkowo drogie, w przeciwieństwie do pomiarów powierzchniowych. W artykule przedstawiono metodologię tworzenia przestrzennych modeli budowy geologicznej zbliżonych do rzeczywistości, opierającą się na zastosowaniu wyłącznie danych powierzchniowych, tj. map geologicznych, zdjęć satelitarnych, cyfrowych modeli terenu (DEM) i innych pomiarów terenowych związanych z kartografią geologiczną z wykorzystaniem metody modelowania niejawnego (ang. *implicit modelling*). Metodologię zilustrowano na przykładzie rejonu Jaślik (Beskid Niski), gdzie głównym elementem strukturalnym jest sigmoidalne wygięcie nasunięcia płaszczowiny cząstkowej Jasiela na płaszczowinę cząstkową Michowa, będące efektem działania uskoku rozrywającego (ang. *tear fault*). Przestrzenny model wglębnej budowy geologicznej omawianego obszaru pozwala lepiej zrozumieć geometrię struktur tektonicznych oraz wieloetapowy rozwój tej części Karpat zewnętrznych.

Słowa kluczowe: modelowanie niejawne, Karpaty zewnętrzne, modele 3D.

The use of implicit modeling to build three-dimensional geological models based on the example within the Jaśliska area (Outer Carpathians, Beskid Niski Mts.)

Recent discoveries in Earth sciences are mainly related to technologies which allow for spatial visualization. To date three-dimensional spatial models are the best method of visualization of geological structure in terms of depth. Until now, the major part of spatial models were, and still are based on 2D and 3D seismic surveys and well data. Data from these sources are relatively expensive as opposed to the surface measurements. Below is presented a methodology for creating three-dimensional models of the geological structure close to reality, based on the use of surface data only, i.e. geological maps, satellite images, digital elevation models (DEM) and other field measurements related to geological cartography using implicit modeling. The illustrated methodology is based on the example from the Jaśliska area (Beskid Niski), where the main structural element is a sigmoidal bend of Jasiel Nappe detachment, which is the effect of tear fault activity. Spatial model of the deep geological structure of the mentioned area allows for better understanding of the geometry of the tectonic structures and multi-step development of this part of the Outer Carpathians.

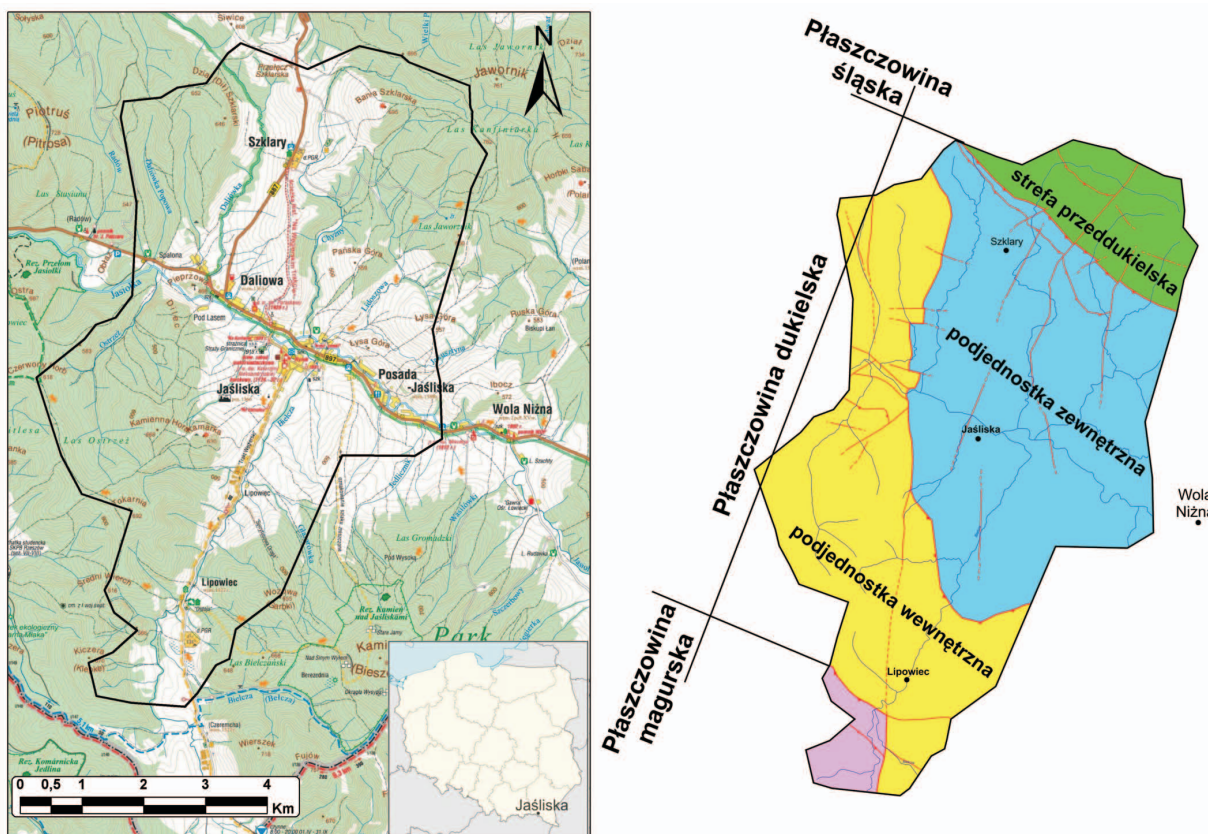
Key words: implicit modeling, Outer Carpathians, 3D models.

Wprowadzenie

W ostatnich latach znacznie wzrosło zainteresowanie geologicznymi modelami przestrzennymi. Do głównych wyzwań należy zaliczyć budowę modeli na podstawie danych niskiej jakości, która wynika przede

wszystkim z niewystarczającego pokrycia informacją geologiczną (co często wiąże się z minimalizacją kosztów) [9]. Zaletą konstrukcji modeli 3D jest możliwość ich późniejszej edycji wraz z dodawaniem nowych danych i zmianą poglądów na budowę i ewolucję rozważanego obszaru. Obecnie poszukiwania węglowodorów prowadzi się na obszarach o znacznie bardziej skomplikowanej budowie geologicznej niż jeszcze w poprzedniej dekadzie, co stanowi największe wyzwanie dla geologów budujących cyfrowe modele przestrzenne.

Celem niniejszej publikacji jest przedstawienie metodyki konstrukcji przestrzennych modeli wglębnej budowy geologicznej – dających możliwość graficznej wizualizacji geometrii wglębnych struktur geologicznych – na podstawie geologicznej kartografii powierzchniowej z wykorzystaniem metody modelowania niejawnego (ang. *implicit modelling*), dzięki której to metodyce możliwa będzie identyfikacja bądź weryfikacja genezy tychże struktur. Zbudowany model przedstawia fragment Beskidu Niskiego (Karpaty zewnętrzne) w rejonie Jaślik (rysunek 1A).



Rys. 1. A – mapa topograficzna badanego terenu (czarną linią zaznaczono granice modelu) [8]; B – szkic tektoniczny badanego terenu [7]

Ogólna charakterystyka obszaru badań

Przy budowie modelu wykorzystano mapę geologiczną autorstwa Kępińskiego [7] (rysunek 2D). Skartowany obszar zajmuje powierzchnię około 55 km² (około 6 × 10 km) i jest usytuowany wzdłuż potoku Jasiołka wraz z jego dopływami od wschodu: Jakusztyną, Lidoszową, Bielczą, Hyzną, Daliówką, Ostrzeszem i Daliówką Popową. Budowa geologiczna obszaru badań charakteryzuje się wysokim stopniem zaangażowania tektonicznego.

Na południowym zachodzie obszar kartowania obejmuje w niewielkim stopniu strefę Siar, należącą do płaszczowiny magurskiej. W obrębie arkusza SMGP Jaślika [2] jest ona reprezentowana na powierzchni przez skały nie starsze niż

dolny eocen. Są to pstry łupki, warstwy podmagurskie, piaskowce magurskie oraz warstwy malcowskie.

W centralnej części odsłaniają się utwory płaszczowiny dukielskiej, dzielącej się w tym rejonie na dwie jednostki niższego rzędu: południową płaszczowinę cząstkową Jasioła (podjednostka wewnętrzna) oraz północną płaszczowinę cząstkową Michowa (podjednostka zewnętrzna), oddzielone od siebie wyraźną powierzchnią nasunięcia (rysunek 1B). Druga z nich charakteryzuje się znacznym stopniem redukcji tektonicznej.

W obrębie terenu badań podjednostkę wewnętrzną reprezentuje fałd Czerenina–Kanasiówki–Tokarni. Jego przebieg

jest zbliżony do przebiegu nasunięcia podjednostki wewnętrznej na zewnętrzną. Jest on poprzecinany szeregiem uskokoń, z których najważniejszymi są (od zachodu): uskok Jasiołki, o przebiegu NWW–SEE, dochodzący do niego uskok Zyndranowej, o przebiegu SW–NE, oraz uskok Popadyny, o przebiegu południkowym. Ten ostatni łączy się z frontem nasunięcia podjednostki wewnętrznej na zewnętrzną, będącym jego przedłużeniem. Od uskoku Popadyny, na północ od wsi Czeremcha, odchodzą prostopadle dwa uskoki Bielczy [11].

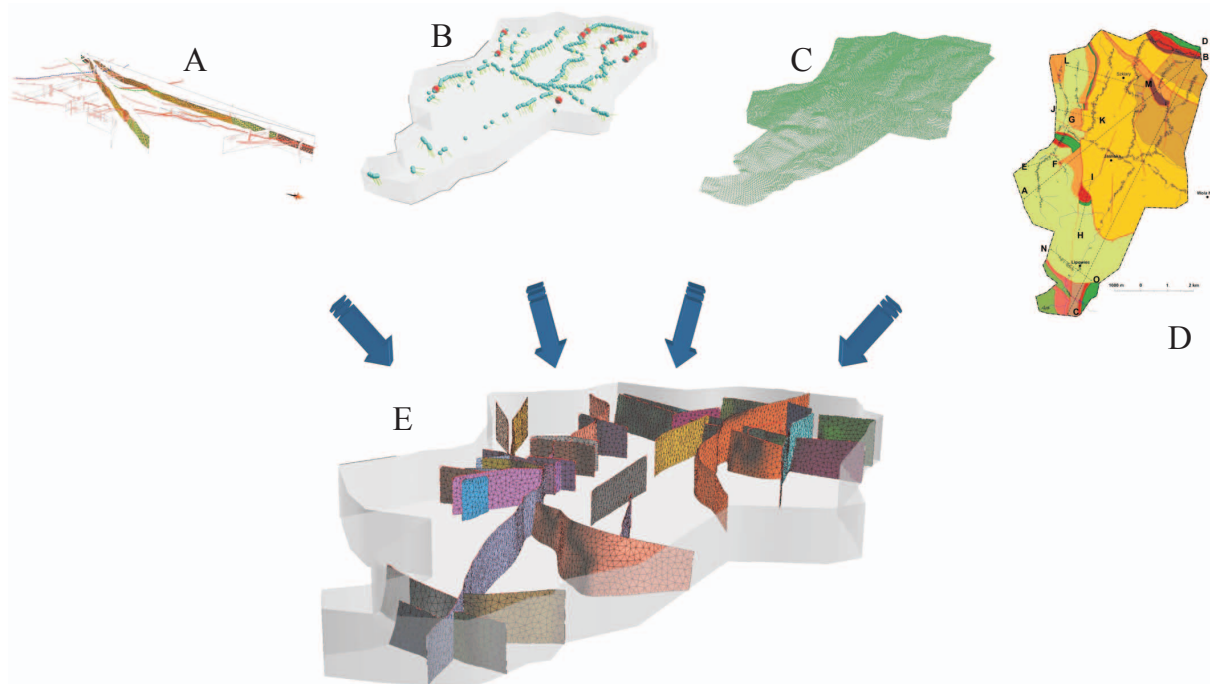
W części podjednostki zewnętrznej objętej badaniami w budowie strukturalnej wyróżnia się przede wszystkim fałd brzeżny, bezpośrednio nasunięty na płaszczowinę śląską. Na południe od fałdu brzeżnego znajduje się synklina, zbudowana z warstw krośnieńskich.

Profil utworów podjednostki wewnętrznej rozpoczyna się tutaj od górnokredowych średnio- i gruboławicowych piaskowców inoceramowych tworzących kulminacje morfologiczne. Powyżej występują eoceńskie warstwy hieroglifowe, a nad nimi znacznie mniej miąższe piaskowce z Mszanki. Najwyższym wydzieleniem profilu są tutaj warstwy menilitowe, obejmujące rogowce, margle z Jawornika (warstwy podcergowskie), piaskowce i łupki cergowskie oraz łupki menilitowe. Profil podjednostki zewnętrznej różni się od wewnętrznej brakiem w jego dolnej części warstw łupkowych oraz ciśnieńskich. Ponadto w podjednostce tej nad łupkami menilitowymi znajdują się warstwy przejściowe

oraz krośnieńskie wraz z wkładkami wapieni jasielskich. Również miąższości odpowiadających sobie wydzieleni litostratygraficznych różnią się w znacznym stopniu pomiędzy obiema podjednostkami.

Na północ od płaszczowiny dukielskiej znajduje się płaszczowina śląska, reprezentowana przez strefę przeddukielską, dzielącą się pod względem strukturalnym na szereg łusek, z których w granicach terenu badań znajduje się najbardziej południowa z nich – łuska Bukowicy. Łuska ta wykazuje duży stopień komplikacji tektonicznych, objawiający się szeregiem poprzecznie ją przecinających uskokoń, które często znajdują swoją kontynuację również w płaszczowinie dukielskiej. Płaszczowina śląska, w północnym obrzeżeniu terenu badań, pod względem facjalnym nie różni się od profilu płaszczowiny cząstkowej Michowa. Do różnic jednakże można zaliczyć brak występowania warstw inoceramowych i wkładek wapieni jasielskich, a także znaczące różnice miąższościowe [2].

Sigmoidalne wygięcie nasunięcia płaszczowiny cząstkowej Jasiela na płaszczowinę cząstkową Michowa, widocznego na obrazie kartograficznym, jest skutkiem działania uskoku rozrywającego [7], którego mechanizm powstawania ma źródło w różnym tempie skracania tektonicznego obu skrzydeł uskoku jeszcze w trakcie ruchów fałdowo-nasuwczych [4]. Powstanie uskoku rozrywającego należy wiązać z hipotetycznym wyniesieniem starszego podłoża, które blokowało fałdowanie się wschodniego skrzydła uskoku [7].



Rys. 2. Elementy składowe modelu

A – wykorzystane do modelowania przekroje geologiczne zorientowane w przestrzeni 3D wraz ze zdigitalizowanymi granicami geologicznymi; B – terenowe pomiary orientacji warstw; C – cyfrowy model terenu (DEM) obszaru badań; D – mapa geologiczna rejonu Jaślisk (Beskid Niski) wraz z zaznaczonymi liniami przekrojów geologicznych oraz granicami modelu [7]; E – stworzony w oprogramowaniu GOCAD model uskokoowy wraz z granicami modelu

Metodyka badań

Obecnie budowa modeli przestrzennych stanowi rutynowy element przy poszukiwaniu i wydobywaniu węglowodorów. Stało się to głównie dzięki zastosowaniu sejsmiki 3D. Inną metodą pozyskiwania danych jest wykorzystanie pomiarów terenowych oraz regularnego rozmieszczenia przekrojów 2D (w regularnej siatce). Kolejną metodą jest użycie wyłącznie danych powierzchniowych, w tym interpolacji w głąb pomiarów biegów i upadów horyzontów i powierzchni uskoków.

Wykorzystanie wyłącznie przekrojów 2D do konstrukcji modeli 3D poprzez interpolację informacji geologicznej pomiędzy nimi wymaga założenia, że taka interpolacja może właściwie odwzorować budowę geologiczną. Proces interpolacji i ekstrapolacji w tej metodzie często ignoruje dowiązanie do biegów i upadów (realnych), co w oczywisty sposób może prowadzić do błędnej interpretacji.

W niniejszej pracy metodologia jest ukierunkowana na optymalizację wykorzystania danych terenowych oraz wiedzy o wgłębnej budowie strukturalnej przy konstrukcji modelu 3D.

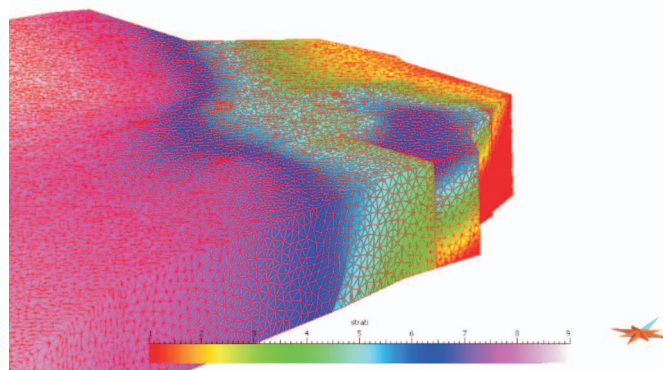
Dhont, Luxey i Chorowicz [5] zaprezentowali metodologię tworzenia modeli wyłącznie na podstawie powierzchniowych map geologicznych oraz cyfrowych modeli terenu (DEM) bez pomiarów terenowych. Jednakże takie podejście wymaga relatywnie prostej budowy geologicznej, którego to założenia orogen karpacki, a zwłaszcza rejon Jaślisk, nie spełnia. W takim przypadku uzyskanie efektu zbliżonego do rzeczywistości bez pomiarów terenowych jest praktycznie niemożliwe. Ponadto w celu przyspieszenia budowy modelu zastosowano metodę *implicit modelling*.

Tradycyjne metody modelowania przestrzennego (*explicit modelling*) wykorzystują zbiór trójkątów do zdefiniowania złożonej powierzchni [3]. Współrzędne trójkątów są jednoznacznie zdefiniowane i mogą być szybko przetworzone w obraz powierzchni. Tego rodzaju metody wymagają digitalizowania konturów złożonych obiektów przestrzennych w dyskretnych sekcjach. W efekcie otrzymuje się dwuwymiarowe krzywe, które należy połączyć, aby otrzymać obraz trójwymiarowy. Następnie przeprowadza się triangulację w celu zbudowania przestrzennego obiektu. W drodze interpretacji granic geologicznych należy dodatkowo wyznaczyć lokalne trendy, np. zmiana biegu warstw. Digitalizacja obiektów geologicznych poprzez tradycyjne pikowanie ma szereg ograniczeń, z których można wymienić przede wszystkim: czasochłonność, niemożność automatycznego odświeżenia wymodelowanych powierzchni po wgraniu nowych danych, niezależne budowanie każdej powierzchni.

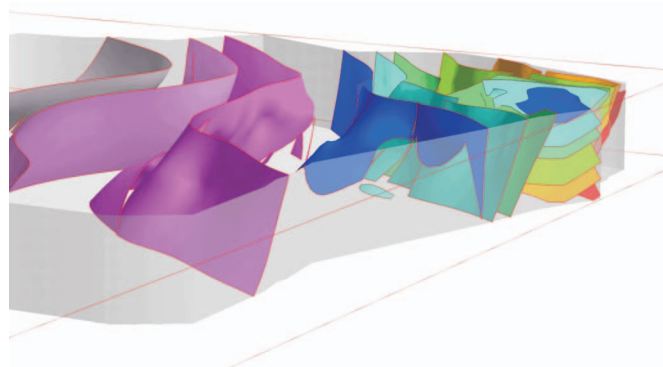
Powyższe argumenty skłoniły autora do wykorzystania alternatywnej metody *implicit modelling*, której istotą jest przypisanie modelowanej przestrzeni funkcji matematycznej.

Konkretne powierzchnie są efektem ekstrakcji triangulacji ze stworzonego modelu. Ekstrahowana powierzchnia nie jest konstruowana bezpośrednio, jak przy modelowaniu *explicit*, ale stanowi skończoną aproksymację rzeczywistej powierzchni geologicznej. Zastosowane przybliżenie w stosunku do zwykłej interpolacji jest de facto minimalizacją funkcji błędu, gdyż nie jest ona zdeterminowana punktowo.

W przeciwieństwie do modelowania *explicit* za pomocą funkcji *implicit* można opisać praktycznie każdy kształt. Tym samym jest to narzędzie, dzięki któremu staje się możliwe modelowanie skomplikowanych struktur tektonicznych, np. fałdów o złożonej geometrii [3]. Metody *implicit* rozpatrują powierzchnie geologiczne jako powierzchnie ekwipotencjalne przestrzeni skalarnej, reprezentowanej przez tetradryczną siatkę przestrzenną stworzoną dzięki interpolacji dostępnych danych z wykorzystaniem metod krigingu czy radialnych funkcji bazowych [1, 9]. Powierzchnie *implicit* są dwuwymiarowymi kształtami geometrycznymi zdefiniowanymi w przestrzeni trójwymiarowej R^3 . Modelowanie *implicit* jest funkcją uwikłaną opartą na trzech zmiennych: $f(x, y, z) = C$, gdzie $C = constans$. Ta cecha sprawia, że struktury o wielokrotnej składowej pionowej (np. wysady solne), jakie często występują w ośrodkach geologicznych, stają się



Rys. 3. Przestrzeń skalarna stworzona do celów modelowania *implicit*



Rys. 4. Wyekstrahowane powierzchnie *implicit*

opisywalne. Tego typu modelowanie niejawne daje możliwość generowania powierzchni o dowolnej rozdzielczości. W przestrzeni *implicit* punkty definiujące daną powierzchnię stratygraficzną muszą mieć tę samą wartość, która reprezentuje wiek powierzchni lub średnią miąższość liczoną od

horyzontu referencyjnego [1]. Takie podejście staje się coraz popularniejsze ze względu na dostępność większych mocy obliczeniowych, będących w stanie tworzyć przestrzenie skalarne (rysunek 3) z uwzględnieniem rzeczywistych danych wsadowych [1].

Wykorzystane oprogramowanie

Pierwszy etap, obejmujący przygotowanie danych (mapy geologiczne, cyfrowy model terenu, pomiary terenowe) do modelu, zrealizowano przy użyciu oprogramowania ArcGIS. Wyeksportowane pliki w formacie SHP zaimportowano do aplikacji Paradigm GOCAD, w której zrealizowano drugi etap projektu, polegający ściśle na budowie modelu przestrzennego wgłębnej budowy geologicznej. Wybrane oprogramowanie wykorzystuje zaawansowane algorytmy,

w tym DSI (*Discret Smooth Interpolation*) oraz StructuralLab, umożliwiające konstruowanie i późniejszą analizę złożonych modeli przestrzennych [12]. Algorytm DSI pozwala na dowiązanie wielu wartości pionowej osi Z dla tej samej pary współrzędnych płaskich X, Y [10]. Wtyczka StructuralLab umożliwia tworzenie i swobodną przebudowę powierzchni *implicit* z danych o małej gęstości pokrycia oraz pomiarów położenia warstw.

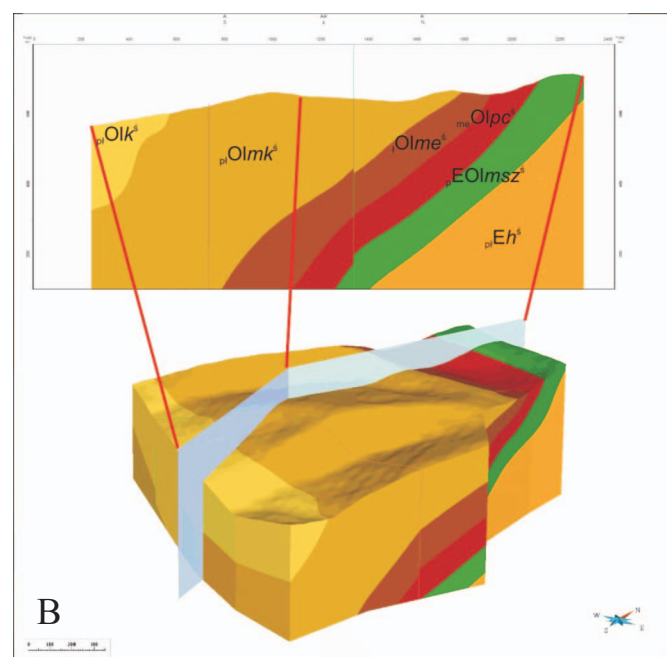
Budowa modelu

Realizację projektu rozpoczęto od stworzenia bazy danych obejmującej wszelkie istniejące dane powierzchniowe oraz przekroje geologiczne z rejonu badań (rysunki 2A–D). Po digitalizacji zgromadzonym danym nadano odpowiednią georeferencję (PUWG-92). Ten etap prac wykonano w aplikacji ArcGIS firmy Esri.

Przygotowany materiał wgrano do aplikacji Paradigm GOCAD, gdzie został zorientowany w przestrzeni trójwymiarowej. Przebieg wykorzystanych przekrojów (rysunek 2D) był optymalizowany pod kątem rzeczywistych upadów, tj. prostopadle do biegu warstw. Ze względu na sigmoidalny trend głównych kierunków budowy geologicznej tego obszaru wykluczyło to możliwość stworzenia regularnej siatki. Zasięg mapy geologicznej autorstwa Kępińskiego [7] przyjęto za granice modelu. W kierunku Z model został ograniczony od dołu na wysokości 100 m n.p.m. Model zamyka od góry powierzchnia cyfrowego modelu terenu.

W modelu uskokowym uwzględniono wszystkie uskoki kartometryczne z mapy autorstwa Kępińskiego [7]. Ze względu na brak bezpośrednich informacji dotyczących orientacji tychże uskoków w przestrzeni przyjęto pionowe upady dla wszystkich dyslokacji poza płaszczyznami nasunięć, które modelowano jako uskoki listryczne.

Gotowy model uskokowy (rysunek 2E) wraz z pomiarami terenowymi biegu i upadu warstw oraz granicami wydzielen geologicznych zdigitalizowanych z mapy i przekrojów posłużył z odpowiednio dobraną rangą jako dowiązanie do dalszych modelowań uwzględniających metodę *implicit*.



Ryc. 5. A – podział modelowanego obszaru na domeny strukturalne; B – model strukturalny domeny obejmującej jednostkę śląską wraz z przekrojem poprzecznym

Z wygenerowanego wolumenu wyekstrahowano powierzchnie (rysunek 4), które wraz z wcześniej stworzonymi powierzchniami uskoku zostały wykorzystane do konstrukcji finalnego modelu strukturalnego (rysunek 5B). Duża powierzchnia

modelowanego obszaru obejmująca jednostki o odmiennej budowie strukturalnej implikowała konieczność wydzielenia domen o spójnym charakterze strukturalnym, w granicach których dokonano modelowań niższego rzędu (rysunek 5A) [6].

Podsumowanie

Modelowanie przestrzenne wglębnej budowy geologicznej obszaru o skomplikowanej budowie strukturalnej wyłącznie na podstawie danych powierzchniowych, zakładające wysokie podobieństwo do aktualnej budowy, do niedawna wydawało się niemożliwe. Budowa modelu bryłowego rejonu Jaślisk pokazuje, że stosując funkcję *implicit*, można szybko uzyskać model zbliżony do rzeczywistej budowy geologicznej. Brak konieczności ręcznej digitalizacji modelowanych powierzchni uwidacznia praktyczne zastosowanie omawianej metody.

Z cyfrowego modelu przestrzennego (DEM), map geologicznych oraz terenowych pomiarów biegu i upadu struktur geologicznych udało się stworzyć pełny model przestrzenny badanego obszaru, obrazujący jego skomplikowany charakter strukturalny.

Stworzony model rejonu Jaślisk ze względu na skomplikowaną tektonikę jest modelem uproszczonym, wykonanym w celu przedstawienia użyteczności metod *implicit* przy modelowaniach na obszarach o wieloetapowej ewolucji tektonicznej.

Prosimy cytować jako: Nafta-Gaz 2015, nr 9, s. 655–660

Artykuł nadesłano do Redakcji 19.06.2015 r. Zatwierdzono do druku 21.07.2015 r.

Literatura

- [1] Caumon G., Gray G., Antoine Ch., Titeux M.: *Three-dimensional implicit stratigraphic model building from remote sensing data on tetrahedral meshes: theory and application to a regional model of La Popa Basin, NE Mexico*. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing 2013, vol. 51, no. 3, s. 1613–1621.
- [2] Cieszkowski M., Slaczka A., Zuchiewicz W.: *Szczegółowa mapa geologiczna Polski, 1056 – Jaśliska*. Państwowy Instytut Geologiczny, 1988.
- [3] Cowan E., Beatson R., Ross H., Fright W., McLennan T., Evans T., Carr J., Lane R., Bright D., Gillman A., Oshust P., Titley M.: *Practical Implicit Geological Modelling*. 5th International Mining Geology Conference, Bendigo 2003.
- [4] Dadlez R., Jaroszewski W.: *Tektonika*. Wydawnictwa Naukowe PWN, Warszawa 1994.
- [5] Dhont D., Luxey P., Chorowicz J.: *3-D modeling of geological maps from surface data*. AAPG Bull. 2005, vol. 89, s. 1465–1474.
- [6] Fernández O., Muñoz J.A., Arbués P., Falivene O., Marzo M.: *Three-dimensional reconstruction of geological surfaces: An example of growth strata and turbidite systems from the Ainsa basin (Pyrenees, Spain)*. AAPG Bull. 2004, vol. 88, s. 1049–1068.
- [7] Kepinski M.: *Uwarunkowania strukturalne powstania sigmoidy w rejonie Jaślisk (Karpaty Zewnętrzne – Beskid Niski)*. Praca magisterska. Arch. Inst. Geol. Podst. UW, 2012.
- [8] Mapa Beskid Niski Online – część wschodnia, Wydawnictwo Compass, wydanie III, 2005, <http://www.beskidniski.pl/mapa/bnwsch.html> (dostęp: sierpień 2012).
- [9] McInerney P., Goldberg A., Calcagno P., Courrioux G., Guillen R., Seikel R.: *Improved 3D geology modelling using an implicit function interpolator and forward modelling of potential field data*. Proceedings of Exploration 07: Fifth Decennial International Conference on Mineral Exploration 2007, s. 919–922.
- [10] Piatkowska A., Czuryłowicz K., Przyłucka M.: *Model przestrzenny struktury solnej Inowrocław a wizualizacja przemieszczeń powierzchni terenu zarejestrowanych na podstawie badań interferometrycznych*. Przegląd Geologiczny 2014, vol. 62, nr 2, s. 97–102.
- [11] Slaczka A., Bober L., Chowaniec J., Cieszkowski M., Gierat-Nawrocka D., Zuchiewicz W.: *Objasnienia do szczegółowej mapy geologicznej Polski – Arkusz Jaśliska*. Państwowy Instytut Geologiczny 1991.
- [12] Tomaszczyk M., Rubinkiewicz J., Borecka A.: *Przestrzenny model utworów eocenu numulitowego pomiędzy Doliną Małej Łąki a Doliną Lejowa w Tatrach*. Przegląd Geologiczny 2009, vol. 57, nr 1, s. 68–71.



Mgr Michał KĘPIŃSKI
Polskie Górnictwo Naftowe i Gazownictwo SA
ul. Kasprzaka 25
01-242 Warszawa
E-mail: michal.kepinski@pgnig.pl

Uniwersytet Warszawski
Wydział Geologii
ul. Żwirki i Wigury 93
02-089 Warszawa
E-mail: mkepinski@uw.edu.pl