

Kartowanie i modelowanie węgłne do celów poszukiwań naftowych, podziemnego składowania dwutlenku węgla i geotermii w Polsce – rezultaty, narzędzia i potencjał

Bartosz Papiernik¹



Subsurface mapping and modelling for petroleum prospecting, CCS and geothermics in Poland – results, tools and potential. *Prz. Geol.*, 62: 856–861.

Abstract. Digital subsurface mapping on a wide scale started in Poland at the beginning of the 1990s. A team of the Department of Fossil Fuels was engaged in this activity from its beginning. In the first stage simple techniques were based on digitalization of archival maps, which gradually were replaced by development of local and regional maps based on 2D grids. In that period the most significant achievements of the team were Geothermal Atlases of the Polish Lowlands. After 2006, 3D grid-based techniques, comprising static structural and parametric models, gradually replaced the 2D grid-based techniques. They were used in completion of the 3D grid-based models lying behind the maps presented in Geothermal Atlases of the western part of the Polish Carpathians, the Carpathian

Foredeep and the eastern part of the Polish Carpathians. According to the world trends in the field of petroleum geology, quantitative petroleum resources assessments were carried out using 2D, 2.5 and 3D grid-based generation, migration and expulsion models. At the same time, numerous 3D static models for CCS purposed were developed. At present, our research moves toward better data integration, uncertainty assessment and 4D modelling for petroleum geology (especially unconventional hydrocarbons), geothermal resources and CCS purposes.

Keywords: static models, digital mapping, 2D grid, 3D grid

Kartowanie węgłne w Polsce od zawsze było związane w dużej mierze z poszukiwaniami naftowymi prowadzonymi głównie przez PGNiG S.A. Prace te obejmowały przede wszystkim lokalne opracowania bazujące na interpretacji sejsmiki. Ich wyniki nie przedostawały się na ogół do publicznego obiegu naukowego, ale dla potrzeb wewnętrznych były zestawiane w formie regionalnych map prospekcyjnych – strukturalnych, miąższości, parametrów zbiornikowych itp. (np. Wróbel 1984, 1988; Woźniak i in., 1987; Nowicki i in., 1990).

Szczegółowe dane przemysłowe z pewnym opóźnieniem były przekazywane do Państwowego Instytutu Geologicznego (PIG-PIB), gdzie podlegały reinterpretacji i czasami adaptacji, służąc za dane wejściowe do opracowania syntetycznych regionalnych map węgłnych w skalach od 1 : 1 000 000 do 1 : 200 000 (np. Sokołowski i in., 1969–1971; Dadlez, 1980; Pożaryski i in., 1983; Sokołowski i in., 1987). Do początku lat 90. ubiegłego wieku zarówno mapy wejściowe, jak i publikowane atlasy były opracowywane wyłącznie w formie analogowej. W tym czasie PGNiG S.A. zaczęło masowo wprowadzać cyfrowe techniki kartowania oparte na siatkach interpolacyjnych (grid 2D). Do dzisiaj jest to podstawowa technika kartowania ilościowego używana w polskim przemyśle naftowym.

W tym samym czasie PIG-PIB kontynuował opracowywanie i publikowanie map głównie w tradycyjnej formie, dokonując kompilacji i reinterpretacji lokalnych map sejsmicznych, danych otworowych i innych. Rezultatem tych prac było opracowanie wielu cennych map i atlasów w tradycyjnej formie (Modliński i in., 1990; Dadlez, 1998; Papiernik i in., 2000; Wagner i in., 2000; Kiersnowski i in., 2007a, b, c; Buła, Habryn i in., 2008) lub w formie roboczo wykorzystywanych formatów GIS – najczęściej plików

typu shp. Publikowane w ostatnim dwudziestolecu węgłne mapy strukturalne, miąższości, parametryczne należały do rzadkości (np. Kramarska i in., 1999; Jureczka i in., 2005; Barbacki i in., 2006, Solik-Heliasz i in., 2009).

Badacze z zespołu AGH, zwłaszcza Katedry Surowców Energetycznych (KSE) często byli mocno zaangażowani w powstawanie wymienionych opracowań, tworząc także swoje oryginalne opracowania kartograficzne (np. Górecki, 1990). Jednakże, od początku lat 90. XX w. zespół KSE AGH zaczął kreować unikatową w skali polskiej kartografii węgłnej metodykę kartowania ilościowego, wspieranego jakością wiedzą badaczy z innych ośrodków, szczególnie przemysłu naftowego i Państwowego Instytutu Geologicznego.

REGIONALNE KARTOWANIE CYFROWE – PIERWSZA FAZA

Podstawową metodą kartowania ilościowego w kartografii węgłnej jest od kilkadziesiąt lat metoda oparta na regularnych siatkach interpolacyjnych (RSI), tzw. gridach 2D, która obejmuje szeroki zakres technik obliczeniowych (szerszy przegląd: Harbaugh, 1977; Davis, 1986; Jones i in., 1986; Kushnir & Yarus, 1992; Dubrule, 1998, 2003; Chambers i in., 2000a, b). Mimo słabej elastyczności, silnego uzależnienia wyników od przestrzennego rozkładu danych, ograniczonej dokładności i tendencji do generowania „numerycznych” struktur (artefaktów), metoda ta została przyjęta przez przemysł naftowy na świecie jako najdogodniejsza, pozwalająca na szybkie, powtarzalne osiąganie wyników przez składanie wielu map cząstkowych, np. zastosowania konwersji czasowo-głębokościo-

¹ AGH Akademia Górniczo-Hutnicza im. St. Staszica w Krakowie, Wydział Geologii, Geofizyki i Ochrony Środowiska, al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków; papiern@geol.agh.edu.pl.

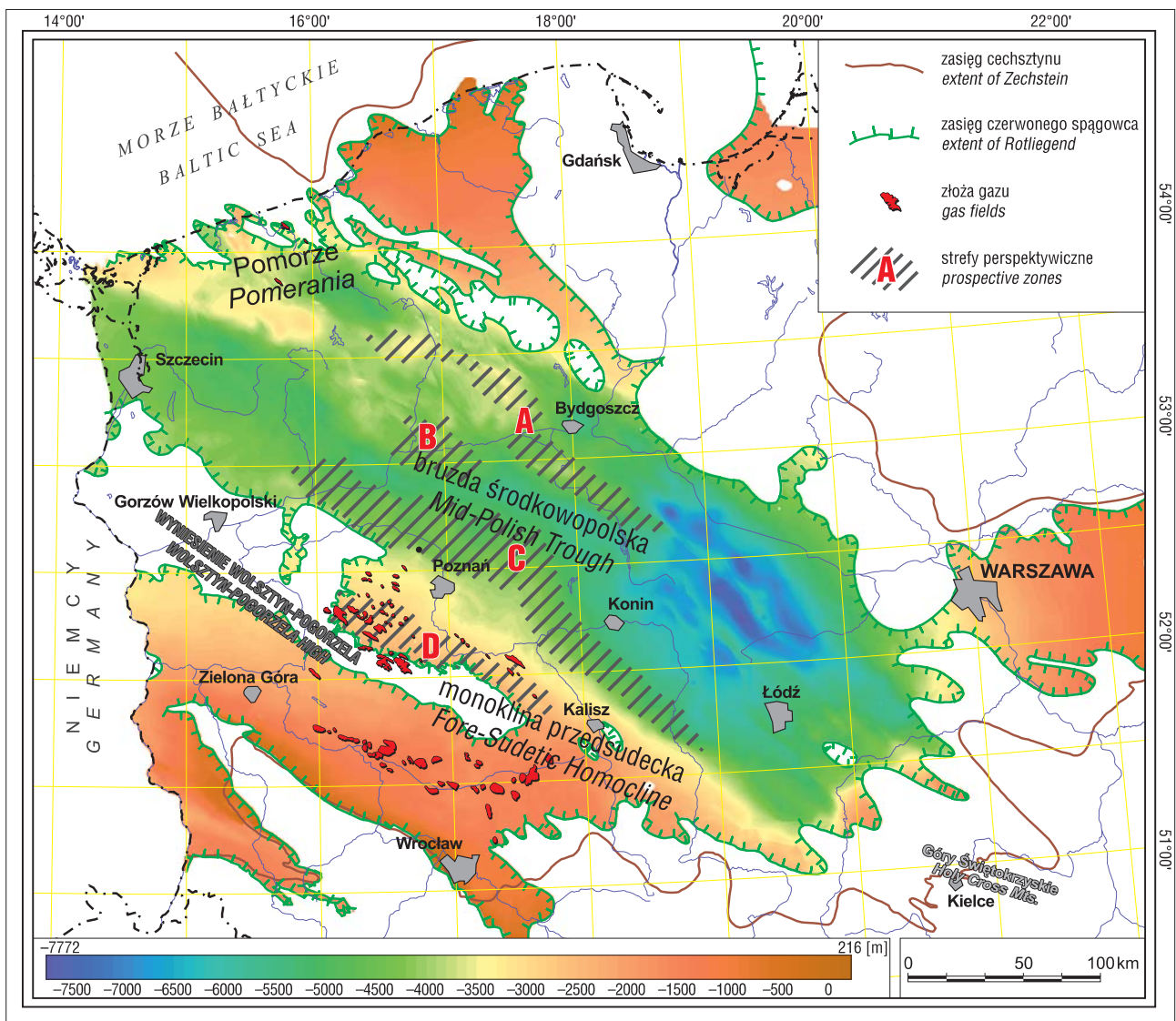
wej bazującej na mapach lub obliczanie zasobów węglowodorów metodą objętościową.

Wykorzystanie metody kartowania opartej na RSI rozpoczęło się na AGH u schyłku lat 80. XX w., wraz z wejściem metod komputerowych do prospekcji naftowej. Na początku techniki te były szeroko stosowane przez zespół prof. Juchy na Wydziale Wiertnictwa, Nafty i Gazu AGH (np. Jucha, 1995), jednakże od początku lat 90. stały się one specjalnością Wydziału Geologii, Geofizyki i Ochrony Środowiska, a szczególnie zespołu Katedry Surowców Energetycznych.

Wysoka efektywność metody spowodowała, że była ona wykorzystywana do realizacji ilościowych badań naftowych obejmujących analizy migracji i generacji oraz szacowania zasobów prognostycznych węglowodorów (Kuśmirek i in., 1991–1994; Górecki i in., 1998; Maćkowski i in., 2000), a także do obliczania zasobów wód geotermalnych w kompleksach zbiornikowych mezozoiku i paleozoiku na Niżu Polski (Górecki, 1995, 2006a, b). Prace realizowane w tej fazie rozwojowej obejmowały również wczesne próby przestrzennego (3D) geomodelowania, wykonywane z użyciem oprogramowania Stratamodel fir-

my Landmark Graphics Corporation (Maćkowski i in., 2000; Papiernik i in., 2007). Wykorzystywane procedury obliczeniowe i stosowane oprogramowanie były ciągle ulepszone w trakcie opisywanej fazy. Pierwsze regionalne mapy (modele) zespół KSE AGH opracował na początku lat 90. XX w., poczynając od modeli karpaccich (Kuśmirek i in., 1991–1994). Mapy wchodzące w skład tych projektów zostały wykonane z użyciem prostych programów działających w środowisku DOS, takich jak RockWorks i Surfer. Obejmowały one stosunkowo niewielkie obszary, a kartowane parametry były przedstawiane z niewielką rozdzielczością, jako tzw. gładkie trendy.

Począwszy od połowy lat 90. wzrosła złożoność wykonywanych map strukturalnych, miąższości i parametrycznych (np. średniej porowatości, przepuszczalności, mineralizacji, refleksyjności witrynu itp.). Opracowywane wówczas RSI generowano z wykorzystaniem programu ZMAP Plus (LGC). Opracowywane siatki miały rozdzielczość horyzontalną uzależnioną od skali całego projektu, jednakże najbardziej dokładne RSI, wykonywane dla Niżu Polski, miały rozdzielczość 1000×1000 m i składały się z ok. 1 000 000 węzłów. Mapy obliczano z zastosowaniem



Ryc. 1. Mapa stropu czerwonego spągowca – przykład regionalnej mapy strukturalnej opartej na gridzie 2D (wg Batora i in., 2013)
Fig. 1. Structural map of the Rotliegend top – an example of 2D grid-based regional structural map (after Botor et al., 2013)

opracowanych w KSE złożonych schematów przetwarzania, dostosowanych do treści map (np. Papiernik i in., 2001a, b; Papiernik, 2002, 2010; Papiernik i in., 2004a, b; Botor i in., 2013), pozwalających na interpretacyjne połączenie rozmaitych zbiorów danych, takich jak: cyfrowane mapy archiwalne, dane sejsmiczne, dane otworowe, cząstkowe modele numeryczne (ryc. 1). W przypadku map strukturalnych wypracowane schematy pozwalają również zminimalizować ryzyko generowania błędnych rozwiązań, niezależnych od sąsiednich powierzchni strukturalnych, czy też eliminować niezgodności modeli cyfrowych i danych wejściowych (Papiernik, 1998; Papiernik i in., 2005).

REGIONALNE KARTOWANIE CYFROWE ORAZ MODELOWANIE PRZESTRZENNE 3D – FAZA WSPÓŁCZESNA

W połowie pierwszej dekady bieżącego wieku zespół KSE zaczął w geomodelowaniach używać oprogramowania Petrel (*Schlumberger Information Solutions*). Wykorzystanie tego narzędzia całkowicie zmienia schematy przetwarzania i pozwala przenieść rozwiązania problemów geologicznych z formatu map (2.5D) w przestrzeń trójwymiarową (3D), a nawet czterowymiarową (modelowania dynamiczne – 4D).

Typowy schemat przetwarzania stosowany w geomodelowaniu z użyciem Petrela obejmuje modelowanie strukturalne wykorzystujące RSI (gridy 2D) lub rzadziej sieci trójkątów (TIN). Pozwala on odwzorować uskoki, kompleksy strukturalne, kartowane w skali sejsmicznej lub mniejszej, i w końcu wprowadzić do modelu elementy architektury wewnętrznej, związane ze sposobem uwarstwienia wydzielonych kompleksów (*layering*). Kolejnym krokiem geomodelowania niezbędnym we współczesnych poszukiwaniach naftowych, inżynierii złożowej, sekwestracji dwutlenku węgla czy geotermii, jest tzw. modelowanie parametryczne. Cała procedura modelowania strukturalnego i parametrycznego bywa określana jako tzw. modelowanie statyczne. Wynik modelowania statycznego jest uzależniony od szerokiego zakresu procedur i metod przetwarzania, poczynając od interpretacji strukturalno-tektonicznej i sejsmiki przez kartowanie, analizy sedimentologiczne, analizy atrybutów sejsmicznych, modelowanie prędkości, konwersję czasowo-głębokościową, interpretacje petrofizyczne po metody geostatystyczne (więcej patrz: np. Deutsch & Journel, 1992; Dubrule, 1998, 2003; Cosentino, 2001; Mallet, 2002, 2008; Coburn i in., 2007; Robinson i in., 2008; Zakrevsky, 2011). W obecnej chwili Petrel™ wydaje się być najbardziej zaawansowanym i kompletnym pakietem programów, pozwalającym na przeprowadzenie pełnej procedury interpretacji i modelowania statycznego z elementami modelowania dynamicznego procesów generacyjnych (Petromod™) lub złożowych (Eclipse™). Podobne programy innych producentów, takie jak Decision Space (Halliburton), RMS (Roxar), Kingdom (IHS), czy nawet najbardziej wyrafinowane GOCAD oraz SKUA-GOCAD (Paradigm), nie pozwalają na tak szeroki zakres modelowania.

W stosunkowo krótkim czasie procedury modelowania 3D zaczęto intensywnie wykorzystywać do celów kartowania (Górecki i in., 2008; Doornenbal i in., 2010). Pozwalają one zwiększyć dokładność schematów przetwarzania, opartych na wykorzystaniu programów Petrel™ i Petro-

mod™, w poszukiwaniach węglowodorów konwencjonalnych i niekonwencjonalnych (Wygrala, 2011; Górecki i in., 2013), a także do szacowania zasobów prognostycznych (Górecki i in., 2008), czy też do regionalnych prognoz bazujących na zmienności strukturalnej, fałdalnej i parametrycznej (Papiernik i in., 2010). Najwięcej doświadczeń w dziedzinie modelowań statycznych 3D zespół KSE zdobył dzięki regionalnym projektom badawczym z dziedziny szacowania zasobów geotermalnych dla obszarów Karpat Zachodnich (Górecki, 2011), zapadliska przedkarpackiego (Górecki, 2012) oraz Karpat Wschodnich (Górecki, 2013) (ryc. 2). Każdy z tych projektów kończył się opracowaniem w formie Atlasu, a publikowane w nich mapy bazowały na mapach wyprowadzonych ze złożonych, wielokompleksowych modeli zbudowanych z wielu milionów oczek siatki, obliczonych z wykorzystaniem unikalnych schematów przetwarzania modelowania strukturalno-parametrycznego (Górecki, 2011, 2012).

Modelowania strukturalno-parametryczne stanowiły również podstawę wstępnej analizy możliwości wykorzystania gorących suchych skał (HDR) dla celów energetyki odnawialnej na Niżu Polski (Sowiński i in., 2013) (ryc. 3).

Inny silny impuls do szybkiego wprowadzenia metod modelowania 3D dała realizacja projektów badawczych dotyczących możliwości geologicznego składowania dwutlenku węgla:

- koordynowanego przez PIG-PIB narodowego programu Ministerstwa Środowiska, pt. „Rozpoznanie formacji i struktur do bezpiecznego składowania CO₂ wraz z ich programem monitorowania” (Chełmiński i in., 2010; Wójcicki i in., 2012);

- realizowanego przez PGNiG S.A. i AGH 7. programu ramowego SiteChar UE w temacie 5. Energia.

Doświadczenia zebrane w trakcie realizacji wymienionych projektów wykazują możliwość wzajemnego wykorzystania wyników modelowania oraz danych ilościowych i jakościowych wchodzących w skład modeli w różnych skalach.

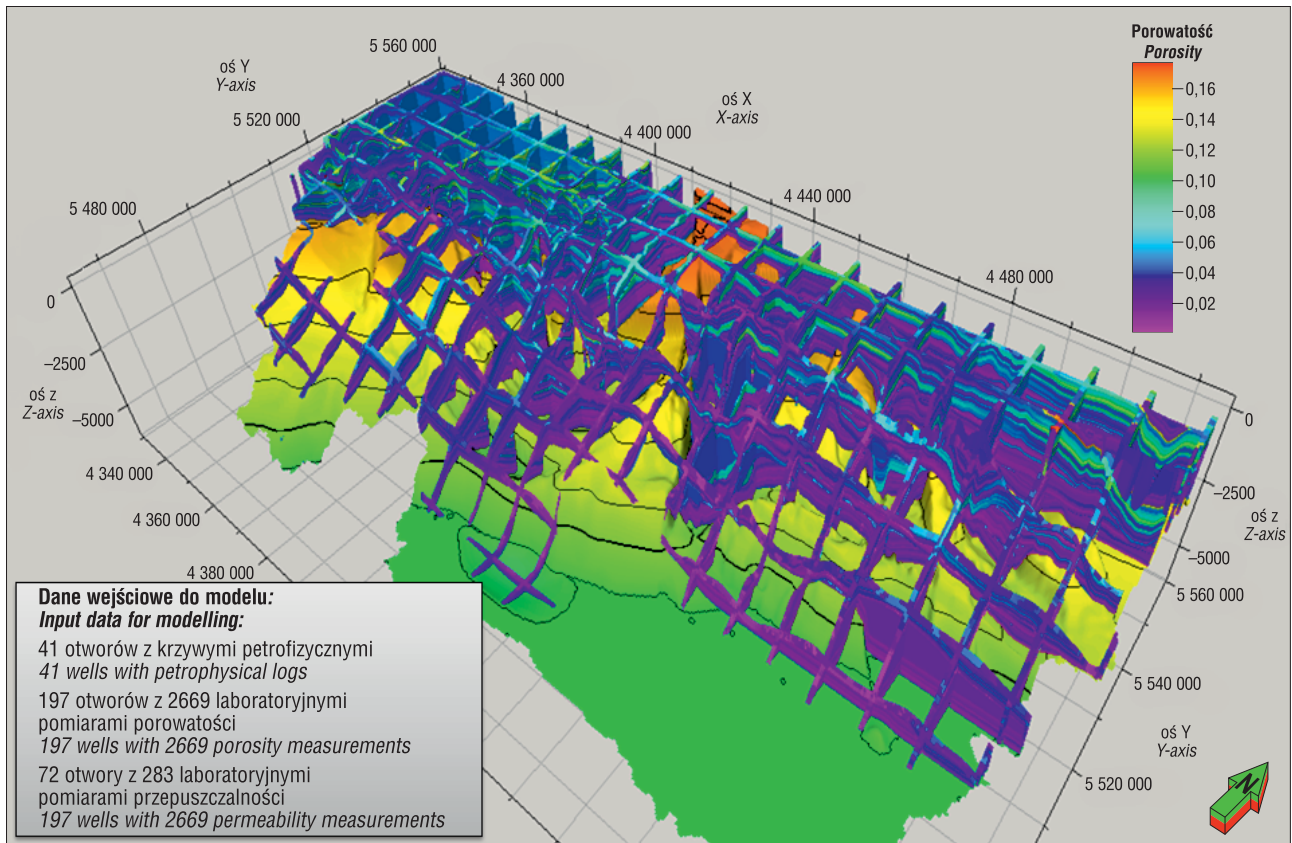
W obecnej chwili technologia modelowań 3D wkracza w Polsce bardzo szeroko w proces poszukiwań naftowych. Na AGH jest ona obecnie wcielana do poszukiwań węglowodorów niekonwencjonalnych w ramach Krajowego Programu NCBIR Blue Gas – Polski Gaz Łupkowy.

PODSUMOWANIE

Modelowania statyczne 3D ułatwiają lepsze zrozumienie wglębnej budowy geologicznej, jednak warunkiem pełnego wykorzystania tej metody, z korzyścią dla lepszego rozpoznania budowy geologicznej i określenia potencjału ekonomicznego, byłoby jednak wdrożenie nowych regionalnych programów kartowania wglębnego podejmowanych z inicjatywy firm naftowych i instytucji rządowych, np. Ministerstwa Środowiska.

Wprowadzenie programu regionalnego kartowania i modelowania może przyczynić się do wyeliminowania lub zmniejszenia subiektywności kartowania w ramach poszczególnych opracowań sejsmicznych, standardowo prowadzącego do tworzenia znaczących błędów brzegowych na mapach sejsmicznych w przeszłości i obecnie.

Jednorodna regionalna interpretacja strukturalna i tektoniczna danych sejsmicznych, połączona z opracowaniem

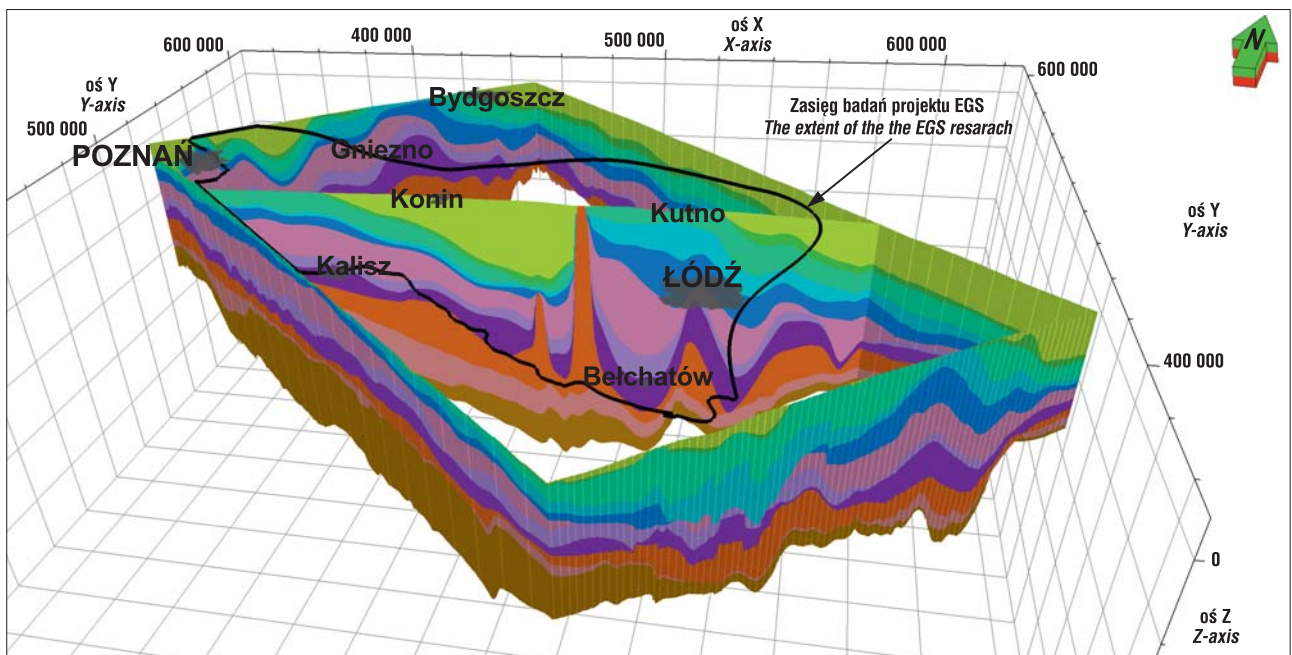


Ryc. 2. Model trendu porowatości nierozdzielonych utworów płaszczowiny skolskiej we wschodniej części Karpat w Polsce (Górecki, 2013)
Fig. 2. Generalized model of porosity in the eastern part of Skole Nappe in the Polish Carpathians (Górecki, 2013)

regionalnego modelu prędkości, zniweluje lokalne błędy interpretacyjne oraz poprawi ciągłość wyników przez lepsze odwzorowanie trendów regionalnych widocznych wyłącznie w szerszej skali. Proponowana reinterpretacja nie powinna spowodować znaczącej modyfikacji odwzorowania stref wyniesionych, które były obiektem poszukiwań naftowych, jednakże ilościowe wyniki interpretacji

stref obniżonych oraz przebiegu dyslokacji mogą być znacząco różne od wyników archiwalnych.

Proponowana metodyka może w istotny sposób przyczynić się do podniesienia jakości odwzorowania stref, w których możliwy byłby rozwój geotermii, geologicznego składowania dwutlenku węgla, czy wstępnej oceny perspektyw odkrycia złóż gazu zamkniętego lub gazu z łupków.



Ryc. 3. Trójwymiarowy model strukturalny utworów mezozoiku i permu w centralnej części Nizy Polski (Sowiżdżał i in., 2013)
Fig. 3. 3D structural model of the Mesozoic and Permian deposits in the central part of the Polish Lowlands (Sowiżdżał et al., 2013)

Wykonane w skali regionalnej modelowanie parametryczne (obejmujące modele facjalne, litologiczne i parametryczne) może się przyczynić do lepszego odwzorowania wewnętrznej zmienności potencjalnych skał zbiornikowych i poziomów uszczelniających. Doświadczenia autora wskazują, że wstępne regionalne wyniki prac ułatwiają prowadzenie szczegółowego modelowania statycznego, zmniejszając problemy związane z małą ilością danych wejściowych. Podobnie złożenie regionalnych trendów prędkościowych z lokalnymi mapami prędkości powinno znacząco podnieść jakość konwersji czasowo-głębokościowej w modelach szczegółowych.

Dodatkowym wynikiem regionalnych modeli prędkościowych i opracowań regionalnych modeli prędkościowych powinno być bardziej jednoznaczne odwzorowanie i zrozumienie geologii badanego obszaru.

Przedstawione w artykule najnowsze wyniki kartowania i modelowania 3D uzyskano, wykorzystując oprogramowania Petrel™, które zostało udostępnione AGH do realizacji prac naukowo-badawczych w ramach University Donation Program. Umowa Donation Agreement CTT-tt-4_2012_PL between AGH -UST Kraków and GeoQuest Systems B.V.

Przygotowanie artykułu sfinansowano z środków na realizację prac statutowych KSE WGGiOŚ AGH nr 11.11.140.322.

Chciałbym podziękować Recenzentom oraz koleżankom i kolegom z Katedry Surowców Energetycznych, z którymi współpracowałem przy realizacji cytowanych opracowań. Szczególne podziękowania autor wyraża G. Machowskiemu, M. Szczygiel, M. Michnie oraz J. Nosal.

LITERATURA

- BARBACKI A.P., BUJAKOWSKI W. & PAJĄK L. 2006 – Atlas zbiorników wód geotermalnych Małopolski. Wyd. IGSMiE PAN, Kraków.
- BOTOR D., PAPIERNIK B., MAĆKOWSKI T., REICHER B., KOSAKOWSKI P., MACHOWSKI G. & GÓRECKI W. 2013 – Gas generation in Carboniferous source rocks of the Variscan foreland basin: implications for a charge history of Rotliegend deposits with natural gases. *Ann. Soc. Geol. Pol.*, 83: 353–383.
- BUŁA Ż. & HABRYN R. (red.) i in. 2008 – Mapa geologiczno-strukturalna stropu paleozoiku (bez permu) i prekambriu. [W:] Atlas geologiczno-strukturalny paleozoicznego podłoża Karpat zewnętrznych i zapadliska przedkarpackiego w skali 1 : 300 000. Min. Środowiska, Państw. Inst. Geol., Warszawa, s. 75.
- CHAMBERS R.L., YARUS J.M. & HIRD K.B. 2002a – Petroleum geostatistics for nongeostatisticians. Part 1. *Leading Edge*, May 2002: 474–479.
- CHAMBERS R.L., YARUS J.M. & HIRD K.B. 2002b – Petroleum geostatistics for nongeostatisticians. Part 2. *Leading Edge*, June 2002: 592–599.
- CHEŁMIŃSKI J., NOWACKI Ł., PAPIERNIK B. & TOMASZ-CZYK M. 2010 – Baza danych oraz szczegółowy model geologiczny 3D dla podziemnego składowania CO₂ w rejonie Bełchatowa na przykładzie struktury Budziszewic. *Biul. Państw. Inst. Geol.*, 439 (1): 53–58.
- COBURN T.C., YARUS J.M. & CHAMBERS R.L. (red.) 2007 – Stochastic modeling and geostatistics: Principles, methods, and case studies, volume II. *AAPG Com. App. Geol.*, s. 409.
- COSENTINO L. 2001 – Integrated reservoir studies. *Editions Technip*, s. 310.
- DADLEZ R. (red.) 1980 – Mapa tektoniczna cechsztyńsko-mezozoicznego kompleksu strukturalnego na Niżu Polskim 1 : 500 000. *Inst. Geol.*, Warszawa.
- DADLEZ R. (red.) 1998 – Mapa tektoniczna kompleksu cechsztyńsko-mezozoicznego na Niżu Polskim 1 : 500 000. *Wyd. Kart. Pol. Agencji Ekol. S.A.*, Warszawa.
- DAVIS J. C. 1986 – Statistics and data analysis in geology. *John Wiley & Sons*, New York, Second Edition.
- DEUTSCH C. & JOURNAL A.G. 1992 – *GSLIB: Geostatistical Software Library and Users Guide*, New York, Oxford University press, s. 340.
- DOORNENBAL H., ABBINK O., DUIN E., DUSAR M., HOTH P., JASIONOWSKI M., LOTT G., MATHIESEN A., PAPIERNIK B., PERYT T., VELDKAMP H., WIRTH H., HAJTO M., KUDREWICZ R., MACHOWSKI G. & SOWIŹDŻAŁ A. 2010 – Introduction, stratigraphic framework and mapping. [W:] *Doornenbal H. & Stevenson A. (red.) Petroleum geological atlas of the Southern Permian Basin area*. EAGE Publications, Houten: 1–9.
- DUBRULE O. 1998 – Geostatistics in petroleum geology. *AAPG Cont. Educ. Course Note Ser.*, 38., s. 45.
- DUBRULE O. 2003 – Geostatistics for seismic data integration in Earth models: 2003 distinguished Instructor Short Course. *Disting. Instr. Ser.*, 6, s. 279.
- GÓRECKI W. (red.) 1990 – Atlas wód geotermalnych Niżu Polskiego. *Inst. Sur. Energ. Akad. Górn.-Hut., Kraków, Okręgowe Przeds. Geodez.-Kartogr.*
- GÓRECKI W. (red.) 1995 – Atlas zasobów energii geotermalnej na Niżu Polskim. *Zakł. Sur. Energ. Akad. Górn.-Hut., Tow. Geosynoptyków „Geos”, Kraków.*
- GÓRECKI W. (red.) 2006a – Atlas zasobów geotermalnych formacji mezozoicznej na Niżu Polskim. *Zakł. Sur. Energ. Akad. Górn.-Hut., Kraków*, s. 484.
- GÓRECKI W. (red.) 2006b – Atlas zasobów geotermalnych formacji paleozoicznej na Niżu Polskim. *Zakł. Sur. Energ. Akad. Górn.-Hut., Kraków*, s. 240.
- GÓRECKI W. (red.) 2011 – Atlas zasobów wód i energii geotermalnej Karpat Zachodnich. *Zakł. Sur. Energ. Akad. Górn.-Hut., Kraków*, s. 772.
- GÓRECKI W. (red.) 2012 – Atlas geotermalny zapadliska przedkarpackiego: monografia. *Katedra Sur. Energ. Akad. Górn.-Hut., Kraków*, s. 418.
- GÓRECKI W. (red.) 2013 – Atlas zasobów wód i energii geotermalnej Karpat Wschodnich. *Katedra Sur. Energ., Akad. Górn.-Hut., Kraków*, s. 791.
- GÓRECKI W. (kier.), REICHER B., MAĆKOWSKI T., ŁAPINKIEWICZ A., PAPIERNIK B., POPRAWA P. i in. 1998 – Ocena potencjału naftowego i możliwości odkrycia złóż węglowodorów w utworach mezozoicznych w wybranych strefach Niżu Polskiego w relacji do basenu Morza Północnego – analiza i interpretacja w systemie Landmark (na zlecenie Ministerstwa Środowiska). *Arch. Zakł. Sur. Energ., Akad. Górn.-Hut., Kraków.*
- GÓRECKI W. (kier.) i in. 2008 – Zasoby prognostyczne, nieodkryty potencjał gazu ziemnego w utworach czerwonego spagowca i wapienia cechsztyńskiego w Polsce. Temat na zlecenie Ministerstwa Środowiska, Finansowanie NFOŚiGW. (nr AGH 25.9.140.356), Realizacja 2005–2008. Projekt badawczy 562/2005/Wn-06.FG – sm- tx/D. *Nar. Arch. Geol. PIG-PIB*, Warszawa.
- GÓRECKI W. (kier.), REICHER B., MAĆKOWSKI T., PAPIERNIK B., ŁAPINKIEWICZ A.P., GANCARZ M., KOSAKOWSKI P. & GROTEK I. 2013 – Ocena perspektyw poszukiwawczych i wytypowanie stref z potencjalnymi pałapkami złożowymi dla ropy naftowej i gazu ziemnego formacji kambriu na Niżu Polskim. Finansowanie: Narodowe Centrum Badań i Rozwoju (NCBiR), projekt rozwojowy nr N R09 0004 06, umowa nr N R09 0004 06/2009 (umowa AGH nr 17.17.140.814).
- HARBAUGH J.W., DOVETON J.H. & DAVIS J.C. 1977 – *Probability Methods in Oil Exploration*. *John Wiley & Sons*, New York.
- JONES T.A. & HAMILTON D.E. 1992 – A philosophy of the Contour Mapping with the Computer. [W:] *Hamilton D.E., Jones, T. A. (red.)*, Computer modeling of geologic surfaces and volumes. *AAPG Com. App. Geol.*, 1: 1–8.
- JONES T.A., HAMILTON D.E. & JOHNSON C.R. 1986 – Contouring geologic surfaces with the Computer. *Van Nostrand Reinhold*, New York.
- JUCHA S. 1995 – Analiza wybranych formacji geologicznych na Niżu Polski, w zapadlisku przedkarpackim i w Karpatach fliszowych. [W:] *Geologia naftowa Polski. Wystawa polskiej cyfrowej kartografii naftowej*. Międzynarodowa konferencja: Modern exploration and improved oil and gas recovery methods. *Kraków, Warszawa.*
- JURECZKA J., DOPITA M., GAŁKA J., KRIEGER W., KWARCIAŃSKI J. & MARTINEC P. 2005 – Atlas geologiczno-złożowy polskiej i czeskiej części Górnośląskiego Zagłębia Węglowego, 1 : 200 000. *Państw. Inst. Geol., Min. Środ.*: 1–31.
- KIERSNOWSKI H. 2007a – Mapa miąższości utworów górnego czerwonego spagowca (saksonu). *Państw. Inst. Geol.-PIB*, Warszawa. Mapa w formacie grafiki komputerowej opracowana [W:] Peryt i in., 2008, *Nar. Arch. Geol. PIG-PIB*.
- KIERSNOWSKI H. 2007b – Mapa miąższości utworów osadowych dolnego czerwonego spagowca. *Państw. Inst. Geol. – PIB*, Warszawa. Mapa w formacie grafiki komputerowej opracowana [W:] Peryt i in., 2008, *Nar. Arch. Geol. PIG-PIB*.
- KIERSNOWSKI H. 2007c – Mapa miąższości wulkanitów dolnego czerwonego spagowca. *Państw. Inst. Geol. – PIB*, Warszawa. Mapa w formacie grafiki komputerowej opracowana [W:] Peryt i in., 2008, *Nar. Arch. Geol. PIG-PIB*.
- KRAMARSKA R. (red.), KRZYWIEC P., DADLEZ R., JEGLIŃSKI W., PAPIERNIK B., PRZEŹDZIECKI P. & ZIENTARA P. 1999 – Mapa

- geologiczna dna Bałtyku (bez utworów czwartorzędowych) w skali 1 : 500 000.
- KUSHNIR G., YARUS J. M. 1992 – Modelling anisotropy in computer mapping of geologic Data. [W:] Hamilton D.E. & Jones T., A., Computer Modelling of Geologic Surfaces and Volumes ed. AAPG Com. App. Geol., 1: 75–92.
- KUŚMIEREK J. i in. 1991–1994 – Bilans zasobów węglowodorów basenu centralnokarpackiego. Proj. bad. nr 9 0427 91 01 wykonany dla KBN, Warszawa.
- MAĆKOWSKI T., REICHER B., ŁAPINKIEWICZ P. & GÓRECKI W., i in. 2000 – Potencjał i bilans węglowodorowy utworów dolomitu głównego basenu permjskiego Polski (red. Kotarba M.) – Blok VII pn: Charakterystyka paleostrukтурalna oraz modelowanie procesów migracji, napełniania pułapek złożowych i akumulacji węglowodorów. Temat realizowany na zlecenie PGNiG SA.
- MALLET J.L. 2002 – Geomodelling. Oxford Univer. Press Monograph.
- MALLET J.-L. 2008 – Numerical Earth Models. EAGE Publications.
- MODLIŃSKI Z., RAKOWSKA J. & ŻELICHOWSKI A. 1990 – Mapa strukturalna stropu kambru, uzupełniona. Narod. Arch. Geol. Państw. Inst. Geol.-PIB, Warszawa.
- NOWICKI M., WRÓBEL J. & GABRYSEWSKA G. 1990 – Mapa strukturalna stropu jury dolnej. Arch. PGNiG SA., Warszawa.
- PAPIERNIK B. 1998 – Processing of analog contour maps into grid based computer maps. PB-2, [W:] Extended Abstract Book. Conference and Exhibition: „Modern Exploration and Improved Oil and Gas Recovery Methods”. 1–4 wrzesień 1998, Kraków.
- PAPIERNIK B. 2002 – Zalety i ograniczenia wykorzystania programu ZMAP-PLUS do konstruowania sejsmicznych map czasowych i głębokościowych na podstawie sejsmiki 2D. [W:] Materiały konferencyjne: „Release 2003 – Nowoczesność i konieczność”. Szkolenie użytkowników stacji Landmark. 6–8 listopad 2002, Kraków.
- PAPIERNIK B. 2010 – Wpływ metodologii przetwarzania na wyniki statycznego modelowania 3D. Pr. Nauk. Inst. Nafty i Gazu, 170: 213–217.
- PAPIERNIK B., JÓŹWIĄK P., PELCZARSKI A., GROTEK I. & BRUSZEWSKA B. 2000 – Konstrukcja cyfrowej mapy strukturalnej spągu cechsztynu w oparciu o analogową mapę sejsmiczną spągu cechsztynu. Państw. Inst. Geol., Warszawa.
- PAPIERNIK B., GŁADZIK J. & KRZYWIEC P. 2001a – Zastosowanie procedury Mistie Reduction do oceny i poprawy jakości danych używanych do konstruowania map sejsmicznych. Prz. Geol., 49 (5): 456.
- PAPIERNIK B., GŁADZIK J. & KRZYWIEC P. 2001b – Zastosowanie procedur programu ZMAP-Plus do oceny i poprawy jakości danych sejsmicznych i modeli numerycznych. (Na przykładzie sejsmicznych map czasowych z rejonu Biszczka–Książpola w zapadlisku przedkarpackim). [W:] Materiały konferencyjne: Nauki o Ziemi w badaniach podstawowych, złożowych i ochronie środowiska na progu XXI wieku. Jubileusz 50-lecia Wydziału Geologii, Geofizyki i Ochrony Środowiska, Akad. Gór.-Hut., Kraków.
- PAPIERNIK B., RYZNER-SIUPIK B., KRZYWIEC P. & MASTALERZ K. 2004a – Przestrzenna interpretacja danych sejsmicznych w utworach o wysokiej pionowej i poziomej zmienności geologicznej. Wykorzystanie programów SeisWorks3D i ZMAP-Plus. [W:] Materiały konferencyjne. Krajowe Spotkanie potkanie użytkowników stacji interpretacyjnych Landmarka. Jadwisin 5–6.10.2004: 33–39.
- PAPIERNIK B., ZAJĄC A. & MARECIK T., 2004b – Wykorzystanie kartografii cyfrowej w geologii regionalnej i naftowej. [W:] Górecki W. (red.) Aktualne problemy poszukiwań, wydobywania i sprzedaży węglowodorów w Polsce w świetle nowych perspektyw złożowych. Materiały z konferencji Geosynoptics Society GEOS. Pol. J. Min. Resour., 8: 157–160.
- PAPIERNIK B., HAJTO M. & GÓRECKI W. 2005 – Computer-aided quantitative subsurface mapping - examples of utilization. Prz. Geol., 53 (10/2): 956–960.
- PAPIERNIK B., ŁAPINKIEWICZ P. & GÓRECKI W. 2007 – Petrofizyczne uwarunkowania ropo-gazonośności utworów dewonu i karbonu w południowej części niecki miechowskiej w świetle wyników modelowań komputerowych. Geologia: kwartalnik Akademii Górniczo-Hutniczej im. Stanisława Staszica w Krakowie, 33 (4): 341–374.
- PAPIERNIK B., GÓRECKI W. & PASTERNAK A. 2010 – Wstępne wyniki modelowań przestrzennych (3D) parametrów petrofizycznych skał podczas poszukiwań stref występowania gazu zamkniętego w polskim basenie czerwonego spągowca; Prz. Geol., 58 (4): 352–364.
- POŻARYSKI W. & DEMBOWSKI Z. 1983 – Mapa geologiczna odkryta Polski bez utworów permjskich, mezozoicznych i kenozoicznych. Wyd. Geol., Warszawa.
- ROBINSON A., GRIFFITHS P., PRICE S., HEGRE J. & MUGGERIDGE A. (red.) 2008 – The future of geological modelling in hydrocarbon development. Sp. Publ. Geol. Soc., 309, London.
- SOKOŁOWSKI J. (red.) 1969–1971 – Atlas geosynoptyczny i naftowy; 1 : 200 000. Inst. Geol.
- SOKOŁOWSKI J. 1987 – Atlas geosynoptyki naftowej Polski. Wyd. Geol., Warszawa.
- SOLIK-HELIAŁZ E. (red. nauk.), KARWASIECKA M., KUROWSKA E., KRIEGER W., BUŁA Z., CHYBIORZ R. & WARZECHA R. 2009 – Atlas zasobów energii geotermalnej w regionie górnośląskim utworu neogenu, karbonu i dewonu. Główny Inst. Górn., Katowice.
- SOWIŹDZAŁ A., PAPIERNIK B., MACHOWSKI G. & HAJTO M. 2013 – Characterization of petrophysical parameters of the Lower Triassic deposits in a prospective location for Enhanced Geothermal System (central Poland). Geol. Quart., 57 (4): 729–744.
- SWAN A. R. H., SANDILANDS M. 1996 – Introduction to Geological Data Analysis. Blackwell Science.
- WAGNER R. (red.), PROTAS A., DYJACZYŃSKI K., PERYT T.M., WICHROWSKA M., SYLWESTRZAK J., PIĄTKOWSKA L. & PAPIERNIK B. 2000 – Charakterystyka fałdalna i paleogeograficzna utworów dolomitu głównego. Blok II [W:] Budowa i bilans węglowodorowy dolomitu głównego basenu permjskiego Polski. Nar. Arch. Geol. Państw. Inst. Geol., Warszawa. Arch. Zakł. Sur. Energ., Akad. Gór.-Hut., Kraków.
- WOŹNIAK B., GABRYSEWSKA G. & NOWICKI M. (kier.) 1987 – Mapa miąższości triasu górnego i środkowego (wraz z retem) mapa w skali 1 : 500 000. BG Geonafta, Oddział Warszawa.
- WÓJCICKI A. (red.) i in. 2012 – Rozpoznanie formacji i struktur do bezpiecznego składowania CO₂ wraz z ich programem monitorowania. Konsorcjum z PIG Warszawa, INiG, GIG, PAN, (UMOWA Nr 2/SEK/2009) Realizacja: 2008–2012 Finansowanie: Narodowy Fundusz Ochrony Środ. i Gospodarki Wodnej.
- WRÓBEL J. 1984 – Mapa strukturalna stropu doggeru w Polsce, skala 1 : 500 000. Materiały archiwalne PGNiG i Państw. Inst. Geol.. Dział Geologii Polski Centralnej. Warszawa, Arch. PGNiG.
- WRÓBEL J. 1988 – Mapa strukturalna spągu kredy górnej dla subbasenu grudziądzko-warszawskiego – część wschodnia. Arch. BG Geonafta, Warszawa.
- WYGRALA B. 2011 – Unconventional oil and gas resources – efficient early-stage exploration workflows. Aachen Technology Center, Germany: 1–12.
- ZAKREWSKY K.E. 2011 – Geological 3D modeling. EAGE Publ., Houten, Netherlands, s. 261.
- ŻELICHOWSKI M. & KOZŁOWSKI S. (red.) 1983 – Atlas geologiczno-surowcowy obszaru lubelskiego 1 : 500 000. Wyd. Geol., Warszawa.