

## BLOK ARTYKUŁÓW

### MODELOWANIE BUDOWY GEOLOGICZNEJ – ASPEKTY METODYCZNE I UTYLITARNE

#### Koncepcja rozwoju cyfrowego modelowania budowy geologicznej Polski

Przewodnym motywem niniejszego numeru Przeglądu Geologicznego, w jego merytorycznej części, jest konstrukcja cyfrowych modeli struktur geologicznych w różnych skalach oraz ich wykorzystanie w praktyce. Zebrane publikacje stanowią pokłosie spotkania reprezentantów służb geologicznych kilku krajów europejskich oraz ekspertów z instytucji krajowych, które odbyło się w Akademii Górniczo Hutniczej (AGH) w Krakowie pod egidą tej uczelni i Państwowego Instytutu Geologicznego – Państwowego Instytutu Badawczego (PIG-PIB) w maju 2012 r. W seminarium pt. „Digital subsurface mapping in geological surveys: the state of the art and prospect for the future” oprócz gości z Polski udział wzięli przedstawiciele służb geologicznych Wielkiej Brytanii (BGS) i Holandii (TNO) oraz geolodzy tworzący i wykorzystujący modele 3D w przemyśle naftowym z Rosji i Niemiec. BGS i TNO należą do najbardziej kompleksowo działających europejskich służb geologicznych, podobnie jak PIG-PIB, który pełni funkcję państwowej służby geologicznej (PSG). W służbach tych programy budowy seryjnych modeli cyfrowych są znacznie bardziej zaawansowane niż w Polsce. TNO wykonała model geologiczny całego kraju – części lądowej i morskiej – który udostępnia bez opłat w celu wsparcia poszukiwań i eksploatacji na szelfie i inwestycji na lądzie (np. w geotermię). Zdaniem TNO, zyski dla państwa płynące ze zintensyfikowanej działalności inwestorów są o rzędy wielkości większe od potencjalnych zysków płynących ze sprzedaży modelu czy danych geologicznych. BGS z kolei nie wytwarza już nowych map geologicznych – są one sukcesywnie zastępowane cyfrową informacją przestrzenną (Mathers, 2014).

Celem spotkania była prezentacja zaawansowania i metod konstrukcji oraz ocena efektywności (stopień wykorzystania i koszty) wytworzenia cyfrowych modeli budowy geologicznej. Przyczyniło się to do głębszego, praktycznego wglądu w tę dziedzinę działań europejskich służb geologicznych na etapie, kiedy w Polsce jesteśmy jeszcze przed zasadniczymi decyzjami dotyczącymi inwestycji w rozwój takich modeli w skali kraju. Po dwóch latach od tego spotkania zainicjowane zostały istotne działania w celu realizacji programu cyfryzacji budowy geologicznej Polski.

Rozwój cyfrowej kartografii wglębnej, sformułowany w strategii Głębokich Badań Geologicznych na lata 2008–2015, ogłoszonej przez Ministerstwo Środowiska (Jarosiński & Warias, 2008) przewiduje, że „Poziomy rozwój technologii komputerowej oraz rynek odbiorców, uzasadnia konieczność rozwinięcia tych działań [modeli cyfrowych] na dużą skalę. Zadania w tej dziedzinie powinny być zharmonizowane z europejską inicjatywą służb geologicznych, zawiązaną w celu ujednoczenia standardów kodowania i dostępu do numerycznych modeli prze-

strzennych głębokiej budowy geologicznej”. W efekcie modelowania numeryczne geometrii, stanu fizycznego, ewolucji lub dynamiki litosfery i formacji skalnych znajdują się niemalże we wszystkich kierunkach owej strategii. Analizy wykonywane z użyciem modeli cyfrowych struktur geologicznych będą coraz ważniejszym elementem planowania strategicznego oraz decyzji służb i administracji państwowej, a mianowicie:

1. Modele 3D będą podstawą zarządzania danymi przestrzennymi zgromadzonymi w archiwach geologicznych, zgodnie z wytycznymi dyrektywy Unii Europejskiej INSPIRE;

2. Pewne grupy modeli będą niezbędne dla sporządzania bilansów surowców strategicznych kraju, zwłaszcza energetycznych;

3. Nowe formy zagospodarowania przestrzeni podziemnej wymagają sporządzenia modeli cyfrowych niezbędnych do analizy konfliktu interesów pomiędzy użytkownikami tej przestrzeni;

4. Modele cyfrowe będą wspierać analizy zagrożeń środowiska naturalnego spowodowanych użytkowaniem przestrzeni podziemnej.

Konstrukcja wiarygodnych modeli budowy geologicznej, z wykorzystaniem kompletnej puli istniejących danych, jest czasochłonna, dlatego ich struktura musi być gotowa przed rozpoczęciem konkretnych analiz na rzecz postępowania administracyjnego lub planowania strategicznego.

Konieczność wykonywania analiz numerycznych dla przewidywania skutków działalności gospodarczej w przestrzeni podziemnej wynika także z zapisów dyrektywy Unii Europejskiej dotyczącej składowania CO<sub>2</sub> (EC Directive, 2009), w której występują liczne odniesienia do numerycznego modelu składowiska. W Aneksie 1 do tego dokumentu (Criteria for the characterisation and assessment of the potential storage complex and surrounding area) występują nawet konkretne zalecenia dotyczące metody konstrukcji modelu numerycznego 3D i jego funkcjonalności. W tym przypadku modelowanie ma służyć przede wszystkim analizie ryzyka składowania CO<sub>2</sub>, które nie jest możliwe do oszacowania innymi metodami. Analogiczne przepisy, dotyczące wpływu na środowisko zabiegów szczelinowania niekonwencjonalnych złóż węgłowodórów i kolektorów hydrotermalnych, będą najprawdopodobniej również zawierały elementy modelowania numerycznego. Można zatem stwierdzić, iż zapotrzebowanie na cyfrowe modele budowy geologicznej rośnie, a w konsekwencji program ich przygotowania powinien być wdrażany dynamicznie. Tym bardziej, że przy potencjale służb państwowych i środowisk akademickich pokrycie takimi modelami znacznej części powierzchni kraju lub kluczowych obszarów może być osiągnięte dopiero za kilkanaście lat.

### Założenia ogólne dla rozwoju seryjnych, regionalnych modeli cyfrowych w Polsce

Zakładamy, że program budowy seryjnych modeli geologicznych w skali kraju i regionów powinien być wykonywany przez konsorcja instytucji doświadczonych w tych dziedzinach, koordynowanych przez służby państwowe. Koordynacja taka powinna gwarantować utrzymanie jednolitych standardów i procedur konstrukcji modeli, jak również zapewniać utrzymanie, serwisowanie, udostępnienie i aktualizację utworzonych modeli. Działania te powinny być, w możliwie największym stopniu, skoordynowane z osiągnięciami służb geologicznych Europy w tym zakresie, gwarantując poziom merytoryczny projektów, odpowiadający światowym standardom. Istotne jest również, aby realizacja tych modeli harmonizowała poziom rozpoznania geologii Polski ze stanem rozpoznania w innych krajach, np. w ramach EuroGeoSurveys. Zorganizowane w Krakowie seminarium jest przykładem realizacji powyższego postulatu. Są nim również międzynarodowe spotkania, dotyczące modelowania 3D, organizowane okresowo przez europejskie służby geologiczne, np. w 2013/2014 r. w TNO, BRGM i BGS. Innym tego przykładem jest współpraca międzynarodowa PIG-PIB i AGH w ramach projektu OneGeology (Stępień i in., 2013) lub w celu wykonania Atlasu Basenu Permskiego (Doornbal & Stevenson, 2010).

Danych geologicznych i geofizycznych do konstrukcji modeli regionalnych jest zwykle za mało dla automatycznej inwersji modeli 3D na podstawie zawartości Narodowego Archiwum Geologicznego. A zatem dla skonstruowania wiarygodnego modelu przestrzennego konieczne jest posłużenie się spójną koncepcją ewolucji wydzielonych kompleksów, zarówno pod względem ich genezy sedimentacyjnej, jak i późniejszych deformacji tektonicznych. Koncepcje takie mogą być np. testowane poprzez konstrukcję przekrojów zbilansowanych. Zakładamy, że podstawowe modele regionalne będą zawierały wydzielenia kompleksów stratygraficznych i litofacjalnych oraz uskoku jako elementów struktury modeli. Sposób wypełniania modelu parametrami petrofizycznymi będzie zależał w najwyższym stopniu od jego przeznaczenia. Zakładamy też, że na etapie wstępnym modele regionalne będą wypełniane tylko podstawowymi parametrami petrofizycznymi. Bardziej kompletny zestaw parametrów wypełni zaś modele o ściśle określonym przeznaczeniu, np. hydrogeologicznym. Osobnym wyzwaniem będzie zestandaryzowanie metod oceny jakości modelu strukturalnego, m.in. ze względu na jakość i ilość danych geologicznych użytych do jego konstrukcji. Budowa modeli przestrzennych, a zwłaszcza ich przetwarzanie, stanowi wyzwanie dla potencjału obliczeniowego ośrodków naukowych w Polsce, a zwłaszcza PIG-PIB. Uważamy, że wraz ze wzrostem możliwości obliczeniowych zaangażowanych ośrodków będzie również wzrastała rozdzielczość modeli, co pociąga za sobą konieczność wypracowania optymalnych technik ich skalowania i aktualizacji.

Warunkiem skutecznej realizacji cyfrowych modeli budowy geologicznej jest nowoczesnie wykształcona kadra naukowa. Programy studiów Wydziału Geologii Geofizyki i Ochrony Środowiska AGH są do tego dostosowane od wielu lat. W okresie 1995–2005 kształcenie umie-

jętności technicznych oparto głównie na programach firmy Landmark Graphics Corp. Po roku 2005, w wyniku podpisania z firmą Schlumberger umowy o wspieraniu działalności edukacyjnej i badawczej, zapewniającej szeroki dostęp do najnowocześniejszego oprogramowania (Petrel, Petromod, Eclipse, Techlog), możliwe było wprowadzenie do programów kształcenia przedmiotów umożliwiających ich praktyczne poznanie. Obecny stan kadr powinien zapewnić realizację tych zadań w sprzężeniu doświadczenia z nowoczesnością.

Według koncepcji działania PSG, cyfrowe modele struktury geologicznej kraju powinny rozwijać się wielotorowo. Ze względu na zróżnicowanie zasięgu, przedmiotu i zastosowania, wydzielić można 3 grupy modeli:

- modele płytkiej struktury geologicznej,
- modele głębokiej struktury geologicznej pokrywy osadowej,
- modele procesów geologicznych.

W tekście tym nie zajmujemy się ważną grupą modeli hydrogeologicznych, które są systematycznie konstruowane w PIG-PIB przez państwową służbę hydrogeologiczną już od wielu lat i metody ich konstrukcji są zaawansowane. Świadomie pomijamy również modele dla przemysłu, ze względu na zbyt luźne powiązanie z zadaniami służb państwowych.

#### Modele płytkiej struktury geologicznej

W przypadku modeli budowy geologicznej o płytkim zasięgu zakłada się, że będą one wykonywane w oparciu o dane archiwalne, uzupełnione płytkimi profilowaniami geofizycznymi, ewentualnie geofizyką lotniczą. Ze względu na dużą szczegółowość i wysoką rozdzielczość takich modeli oraz czasochłonność ich budowy w ciągu najbliższych kilkunastu lat będzie można pokryć nimi zaledwie kilka procent powierzchni kraju. Z tego powodu do modelowania wybrane muszą być te obszary, dla których modele (1) będą miały najszersze zastosowanie, (2) będą konstruowane na podstawie dostatecznej ilości danych geologicznych w relacji do stopnia komplikacji budowy geologicznej oraz (3) nie będą możliwe do wykonania w ograniczonym czasie, potrzebnym do podjęcia decyzji administracyjnych lub reakcji na zjawiska kryzysowe. Kryteria takie spełniają przede wszystkim obszary najbardziej zagrożone czynnikami naturalnymi lub antropogenicznymi, takie jak brzeg morski, doliny rzeczne i tereny osuwiskowe oraz obszary najintensywniej zagospodarowywane (aglomeracje miejskie i obszary eksploatacji surowców naturalnych).

Zasięg modeli płytkich w poziomie będzie z konieczności ograniczony do obszaru porównywalnego z powierzchnią gmin lub arkuszy SMGP (100–300 km<sup>2</sup>). Nominalny zakres głębokościowy modeli będzie sięgał do 30–150 m od powierzchni ziemi, modyfikowany w zależności od budowy geologicznej i rodzaju problemów do rozwiązania. Zapewnia to najpełniejsze wykorzystanie danych z otworów hydrogeologicznych i inżynierskich oraz płytkiej geofizyki.

Przydatność tej klasy modeli wynika z konieczności uwzględnienia przez administrację różnych szczebli specyfiki budowy geologicznej przy planowaniu przestrzennym i analizie zagrożeń naturalnych i antropogenicznych,

a także dla eksploatacji płytko zalegających złóż, takich jak: piaski, żwiry, kruszywa, wapień, rudy, węgle brunatne, sole itp. Model geologiczny podłoża będzie również istotny dla planów zagospodarowania i przeciwdziałania skutkom katastrof w obszarach zagrożonych powodzią, podtopieniami i osuwiskami, a także przemieszczeniami gruntu związanymi z działalnością górniczą lub ruchami soli. Modele takie służą również planowaniu zaopatrzenia gmin w podziemne wody pitne oraz określeniu potencjału płytkiej geotermii (niskiej entalpii), mającej duże szanse rozwoju w Polsce. Będą one również wykorzystane do lokalizacji dużych obiektów infrastrukturalnych oraz do minimalizowania konfliktów interesów przy alternatywnych sposobach zagospodarowania obszarów.

Jak widać z powyższego zarysu potrzeb, PSG jest na początku drogi prowadzącej do seryjnego tworzenia modeli płytkiego podłoża. W ostatnich latach zostały wykonane modele pilotażowe, finansowane ze środków NFOŚiGW i środków na badania statutowe PIG-PIB, które posłużyły do zdobycia doświadczeń i dopracowania metody konstrukcji tego typu modeli. Są to m.in. modele kompleksu kenozoicznego m.st. Warszawy (Chełmiński i in., 2012), gminy Wołomin oraz arkusza Gnieździska SMGP. W 2011 r. w PIG-PIB wykonano, na zlecenie Ministerstwa Środowiska, ekspertyzę na temat „Założenia do wykonywania wielowymiarowej, parametrycznej kartografii geologicznej płytkich struktur w Polsce”. Prace te złożyły się na przyjętą koncepcję realizacji projektów pilotażowych ([http://www.pgi.gov.pl/pl/dokumenty-in-edycja/doc\\_view/1739-ekspertyza-plytkie-3d.html](http://www.pgi.gov.pl/pl/dokumenty-in-edycja/doc_view/1739-ekspertyza-plytkie-3d.html)). W najbliższych kilku latach mamy nadzieję wykonać kilka kolejnych modeli pilotażowych dla różnych zastosowań, w celu wypracowania metodyki, standardów i rozpoznania ich strony ekonomicznej. W zależności od wyników pilotażu podjęta zostanie decyzja o przejściu do pierwszej fazy wdrożeniowej, która powinna potrwać kilkanaście lat i przyczynić się do selektywnego pokrycia modelami kilku procent powierzchni kraju. Obecnie do modelowania płytkich struktur geologicznych w PIG-PIB wykorzystywane są programy gOcad (zwłaszcza, choć nie tylko, w przypadkach skomplikowanej glacictoniki) i GSI3D.

### Modele głębokiej struktury geologicznej

Zakłada się, że seryjne modele głębokiej budowy geologicznej Polski będą konstruowane w oparciu o istniejące dane archiwalne, uzupełnione reinterpretacją danych geofizycznych i ewentualnymi modelami genetycznymi struktur. Ich zasięg poziomy ograniczony będzie do basenów osadowych o powierzchni kilkudziesięciu tysięcy km<sup>2</sup>, występujących w poszczególnych jednostkach geologicznych. Przyjmuje się, że ich zakres głębokościowy osiągnie spąg pokrywy osadowej lub ograniczy się do zasięgu wiarygodnych danych geologicznych i geofizycznych. Spadek ilości i jakości danych z głębokością implikuje również spadek rozdzielczości modelu w głąb.

Zakładamy, że modele głębokiej struktury geologicznej będą pomocne dla administracji państwowej w podejmowaniu decyzji dotyczących bilansowania zasobów oraz zarządzania koncesjami i konfliktami interesów pomiędzy użytkownikami przestrzeni podziemnej. Jako główne grupy użytkowników wymienić tu można firmy sektora nafto-

wego eksploatujące węglowodory w złożach niekonwencjonalnych i konwencjonalnych oraz konstruktorów podziemnych magazynów paliw płynnych i składowisk płynów. Istotną grupę użytkowników mogą stanowić firmy rozwijające geotermię, która przybiera wielorakie formy od konwencjonalnej, przez stymulowaną szczelinowaniem (HDR i EGS), po geotermię wysokich temperatur (geoplutonikę). Osobną dziedziną zastosowań takich modeli jest składowanie i magazynowanie płynów w przestrzeni porowej naturalnych kolektorów. Poza ewentualnym składowaniem CO<sub>2</sub> w stanie nadkrytycznym warto wymienić składowanie wszelkich płynów poprodukcyjnych, które są trudne lub kosztowne do zutylizowania na powierzchni. Powyższe rodzaje wykorzystania przestrzeni podziemnej rozwijają się znacznie szybciej i na większą skalę w USA niż w Europie, ale zakładać można, że postęp cywilizacyjny, związany z polityką energetyczno-klimatyczną UE, wymusi wzrost intensywności takich działań również w Polsce.

Przy zatłaczaniu pod ziemię dużej ilości płynów występują zmiany ciśnienia płynów porowych w odległości do 100 km od miejsc zatłaczania, a niekiedy również wstrząsy sejsmiczne. Modelowanie tych zjawisk jest ważne dla ochrony zbiorników wód pitnych oraz generalnie przydatne do analizy ryzyka inwestycji dla środowiska naturalnego. Model geologiczny dużej skali może być również użyteczny do przewidywania zagrożeń geodynamicznych, związanych z deformacjami tektonicznymi, jak również z ruchliwością soli w wysadach. Z punktu widzenia zarządzania zasobami krajowych danych geologicznych, modele takie pozwalają na pełniejsze wykorzystanie istniejących danych przy projektowaniu prac i robót geologicznych. Dają też możliwość tworzenia lepszej jakości prognoz i wizualizacji budowy geologicznej. Należy podkreślić, że wykonanie koniecznych modeli nie leży w możliwościach indywidualnych inwestorów, głównie ze względu na skalę modelu przewyższającą obszar inwestycji, jak również ze względu na czas potrzebny do zebrania i zinterpretowania dużej ilości danych, jak i niezbędnej do tego fachowej wiedzy.

Ośrodkiem, który od początku lat 90. XX w. rozwija cyfrową kartografię przestrzenną, jest zespół Katedry Surowców Energetycznych (KSE) AGH. Naukowcy wchodzący w jego skład na przestrzeni ostatnich dwudziestu lat wykonali kilkadziesiąt projektów naukowo-badawczych wykorzystujących i rozwijających techniki kartografii cyfrowej od modelowań 2D po 4D, dla potrzeb prospekcji naftowej, geotermii czy składowania dwutlenku węgla. Ogromny zakres tej aktywności mogą uzmysłowić takie wydawnictwa jak Atlasy geotermalne Niżu Polski (Górecki i in., 2006a, b), Karpat Zachodnich (Górecki i in., 2011), zapadliska przedkarpackiego (Górecki i in., 2012), Karpat Wschodnich (Górecki i in., 2013) czy opracowanie cyfrowych wersji map strukturalnych i miąższości wydzieleni stratygraficznych dla polskiej części południowego basenu permskiego (Doornenbal & Stevenson, 2010). Odzwierciedlają one tylko nieznaczną część zagadnień rozwiązywanych przez zespół KSE AGH.

W ostatnich latach znaczną część modeli PIG-PIB wykonywał wspólnie z AGH, w ramach programu „Badania formacji i struktur do bezpiecznej, geologicznej sekwestracji CO<sub>2</sub>”. Wykonane we wcześniejszych latach dwa, niewielkiej rozdzielczości, modele 3D budowy geologicz-

nej dla całej Polski od 6000 m p.p.m. do 500 m p.p.m. (Małolepszy i in., 2005) oraz od 500 m p.p.m. do powierzchni terenu stworzone zostały na podstawie istniejących interpretacji (map ścięcia poziomego, mapy spągu kenozoiku i in.) oraz danych otworowych i powinny zostać scalone, uzupełnione i uszczegółowione wynikami analiz geofizycznych. Obecnie PSG, wspólnie z KSE AGH, realizuje (lata 2013–2016) projekt obejmujący modelowanie basenu lubelskiego, zdefiniowanego zasięgiem basenu w młodszym paleozoiku. Jest to rodzaj projektu pilotażowego, zamawianego przez MŚ i finansowanego przez NFOŚiGW. Basen ten jest doskonałym obszarem pilotażowym do testowania metodyki budowy modeli w skali regionalnej ze względu na dużą ilość danych geologicznych i geofizycznych oraz z powodu budowy tektonicznej o średnim stopniu komplikacji. W kolejnych krokach na przestrzeni kilkunastu lat mają być wykonane modele basenów monokliny przedsudeckiej, bruzdy śródpolskiej, platformy wschodnioeuropejskiej, Górnego Śląska i zapadliska przedkarpackiego. Kolejność realizacji ustalona będzie po otrzymaniu pierwszych wyników w projekcie pilotażowym i będzie uwarunkowana dostępnością danych geologicznych z obszarów koncesyjnych. Do konstrukcji modeli głębokiej budowy geologicznej w PIG-PIB wykorzystywane są programy gOcad i Petrel.

### Modelowanie procesów geologicznych

Modelowanie procesów geologicznych powinny się rozwijać równoległe do wcześniej wspomnianych klas modeli i być dla nich cennym uzupełnieniem i poligonem doświadczalnym. W tym przypadku modele budowy geologicznej muszą być dedykowane rozwiązaniu konkretnych problemów badawczych i być wykorzystywane do symulacji procesów naturalnych lub technologicznych. Z udziałem PSG rozwijane powinny być m.in. modele strukturalno-petrofizyczne dużej skali, takie jak modele pokrywy osadowej i litosfery, służące analizom ewolucji basenów sedymentacyjnych i generacji węglowodorów. Modele takie mogą być również wykorzystywane do symulacji rozkładu temperatur i przepływu ciepła w skali litosfery, jak również przepływów solanek w obrębie pokrywy osadowej. Osobna grupa modeli służyć powinna do analiz spójności interpretacji zdjęć geofizycznych, grawimetrycznych lub magnetycznych. Z kolei modele geomechaniczne powinny służyć predykcji propagowania się naprężeń i deformacji w różnych warstwach litosfery, co z kolei powinno m.in. ułatwić interpretację wyników pomiarów geodezyjnych geodynamiki powierzchni Ziemi lub analizę sejsmiczności. Można je również wykorzystać do modelowania propagowania się fal sejsmicznych w podłożu różnego typu.

Pionierem ilościowych modelowań procesów geologicznych 2.5D i 3D – w skalach od regionalnej do lokalnej – jest w Polsce od wielu lat zespół KSE AGH. Zespół ten rozwijał taką metodologię w ramach wielu projektów naukowo-badawczych z zakresu regionalnego modelowania procesów generowania, migracji i akumulacji węglowodorów (Botor i in., 2013), rekonstrukcji wykształcenia facjalnego i zmienności parametrów zbiornikowych (Papiernik i in., 2007, 2010) oraz szeroko rozumianej głębokiej geotermii, obejmującej również zagadnienia HDR

oraz EGS (Sowizdział i in., 2013), czy też geologicznego składowania dwutlenku węgla (Michna & Papiernik 2010, Papiernik i in., 2015).

Ogromny krok metodologiczny w zakresie ilościowego wykorzystania modeli 3D do celów szacowania prognostycznych, deterministycznych zasobów geotermalnych stanowiły wzmiankowane wcześniej atlasy geotermalne (Górecki i in., 2011, 2012, 2013). Obecnie w ramach strategicznego programu badawczego NCBIR – Blue Gas, zespół KSE AGH pracuje m.in. nad wykorzystaniem map cyfrowych oraz modeli strukturalno-parametrycznych do dokumentowania złóż węglowodorów niekonwencjonalnych (*shale gas*, *shale oil* oraz *tight gas*), z wykorzystaniem metod deterministycznych oraz probabilistycznych. Celem prac będzie m.in. wykorzystanie modeli 3D do szczegółowego określania przestrzennego zasięgu produktywnych stref złożowych (*sweet spots*) oraz przetestowanie i zarekomendowanie do szerszego wykorzystania metod dokumentowania złóż węglowodorów, opartych na międzynarodowym systemie PRMS (2011). Dzięki temu ocenić można stopień niepewności szacowania zasobów w kategoriach dostosowanych do stopnia rozpoznania geologii obszaru. W praktyce oznacza to konieczność opracowania zachowujących spójność modeli o rozdzielczości od regionalnej po bardzo szczegółową (bezpośrednie otoczenie odwiertu) oraz wykorzystanie zintegrowanego modelowania od strukturalnego, przez facjalne i parametryczne po modelowanie geomechaniczne.

W PIG-PIB zostały wykonane dotychczas głównie symulacje w wymiarach 1D i 2D. Obejmują one analizę basenów sedymentacyjnych z generowaniem węglowodorów (przykłady są zamieszczone w większości tomów Profili Głębokich Otworów Wiertniczych, wydawanych przez PIG), a w skalach litosferycznych modelowanie rozkładu temperatur i rozwarstwienia reologicznego litosfery, jak również symulacje przenoszenia się naprężeń w przekroju litosfery (Jarosiński, 2012) lub w planie – z uwzględnieniem efektów 2,5D (Jarosiński i in., 2006). Modelowanie procesów w przestrzeni 3D nie było jeszcze wykonywane w Polsce w skali regionalnej ze względu na brak odpowiednich modeli strukturalnych i często niedostateczną wiedzę na temat dystrybucji przestrzennej parametrów petrofizycznych, a także z powodu dużych mocy obliczeniowych koniecznych do ich rozwiązania. Obecnie w PIG-PIB we Wrocławiu budowany jest zespół modelowania numerycznego procesów geologicznych. Wykonywane są tam modele ewolucji wysadów solnych 2D, modele przepływów i mechaniki odkształceń oraz propagowania się naprężeń w 3D, jednak o mniejszej skali niż regionalna. W najbliższych latach zespół będzie wykonywał modelowania przepływów i geomechaniki w łupkowych złożach gazu.

### PODSUMOWANIE

Cyfrowe modele budowy geologicznej są najwyższą formą syntezy wiedzy geologicznej o regionie, jak również formą przygotowania danych do przeprowadzenia na nich szerokiej gamy analiz, dotyczących procesów geologicznych i technologicznych do celów poznawczych oraz dla potrzeb administracji państwowej. Przy optymalizowaniu decyzji koncesyjnych, uwzględniających konflikty interesów między użytkownikami przestrzeni podziemnej oraz

prognozowaniu wpływu takiej działalności na środowisko, niezbędne jest wykonanie analiz matematycznych z zastosowaniem modeli cyfrowych. Przewidujemy, że modele takie będą w coraz szerszym stopniu wykorzystywane w bilansowaniu zasobów i planowaniu strategicznym i przestrzennym, wykonywanym na zamówienie administracji różnych szczebli.

Immanentnym problemem przy konstrukcji przestrzennych modeli budowy geologicznej jest niedostatek danych geologicznych służących kontroli zarówno struktury, jak i parametrów modeli. Z tego powodu konieczne jest założenie spójności genetycznej takich modeli, tak pod względem procesów sedymentacyjnych, jak i tektonicznych. W Polsce znajdujemy się we wstępnej fazie opracowywania regionalnych geologicznych modeli pilotażowych, tworzenia standardów konstrukcji, administrowania, udostępniania i uaktualniania takich modeli. Jesteśmy zdania, że działania te powinny być koordynowane przez PSG w ścisłej współpracy z najbardziej doświadczonymi w tej dziedzinie zespołami, takimi jak KSE AGH i przy jak najszerzej współpracy i konsultacji międzynarodowej, czego przykładem jest niniejszy zeszyt PG. Zakładamy, że modelowanie głębokiej struktury geologicznej będzie finansowane przez NFOŚiGW w ramach stałych zadań PSG. Modele płytsze, o wymiarze lokalnym, mogą być wykonywane w oparciu o fundusze mieszane z uwzględnieniem finansowania z funduszy samorządów. Modele o charakterze *stricte* poznawczym powinny być finansowane ze źródeł na badania naukowe. Ze względu na dłuższy czas, potrzebny dla skonstruowania seryjnych, cyfrowych modeli budowy geologicznej kraju, program ten powinien być rozwijany z wyprzedzeniem względem problemów, które ma rozwiązywać. Wdrożeniu tego programu sprzyja zarówno aktualny stopień rozwoju zaplecza informatycznego, jak i aktualna struktura kadry naukowej w Polsce.

Przygotowanie numeru sfinansowano częściowo ze środków na realizację prac statutowych KSE WGGiOŚ AGH nr 11.11.140.322. Redaktorzy niniejszego zeszytu specjalnego PG dziękują recenzentom publikacji naukowych za wnikliwe i konstruktywne uwagi.

*Marek Jarosiński, Bartosz Papiernik & Ewa Szykaruk*

### Literatura komentowana

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.

CHEŁMIŃSKI J., CZURYŁOWICZ K., MORAWSKI W., NOWACKI Ł., STĘPIEŃ U., SZYNKARUK E., TOMASZCZYK M., ŻARSKI M. 2012 – Szczegółowy numeryczny model głębokiej budowy geologicznej obszaru aglomeracji miejskiej na przykładzie fragmentu Warszawy - metodyka i implikacje. [W:] II Polski Kongres Geologiczny „Geologia jedna?!”, Warszawa, 17–19 września 2012: abstrakty / red. nauk. i techn. W. Mizerski & B. Żbikowska. Warszawa, Państw. Inst. Geol.

DOORNENBAL H. & STEVENSON A. (red.) 2010 – Petroleum geological atlas of the Southern Permian Basin area. Houten, the Netherlands, EAGE.

EC Directive, 2009 – On the geological storage of carbon dioxide. Directive 2009/31/Ec Of The European Parliament and of The Council, 23 April 2009.

GÓRECKI W. (red.) 2006a – Atlas zasobów geotermalnych formacji mezozoicznej na Niżu Polskim. Wydawnictwa AGH, Kraków, s. 484.

GÓRECKI W. (red.) 2006b – Atlas zasobów geotermalnych formacji paleozoicznej na Niżu Polskim. Wydawnictwa AGH, Kraków, s. 484.

GÓRECKI W. (red.) 2011 – Atlas zasobów wód i energii geotermalnej Karpat Zachodnich. Wydawnictwa AGH, Kraków, s.772.

GÓRECKI W. (red.) 2012 – Atlas geotermalny zapadliska przedkarpackiego: monografia – Geothermal atlas of the Carpathian Foredeep: Wydawnictwa AGH, Kraków, s. 418.

GÓRECKI W. (red.) 2013 – Atlas zasobów wód i energii geotermalnej Karpat Wschodnich. Wydawnictwa AGH, Kraków, s. 791.

JAROSIŃSKI M. 2012 – Compressive deformations and stress propagation in intracontinental lithosphere: finite element modeling along the Dinarides-East European Craton profile. *Tectonophysics*, 526–529: 24–41.

JAROSIŃSKI M., BEEKMAN F., BADA G. & CLOETINGH S. 2006 – Redistribution of recent collision push and ridge push in Central Europe: insights from FEM modelling. *Geophys. J. Int.*, 167: 860–880.

JAROSIŃSKI M. & WARJAS M. 2008 – Kierunki głębokich badań geologicznych (na lata 2008–2015). *Prz. Geol.*, 56 (9): 798–801.

MAŁOLEPSZY Z., OSTAFICZUK S., PIOTROWSKA K., ROSSA M. 2005 – The numerical spatial model (3D) of geological structure of Poland – from 6000 m to 500 m b.s.l.. *Prz. Geol.*, 53: 961–966.

MATHERS 2014 – Budowa cyfrowego modelu geologicznego dla Wielkiej Brytanii. *Prz. Geol.*, 62: 807–811.

MICHNA M. & PAPIERNIK B. 2012 – Analiza elementów ryzyka geologicznego rejonu Suliszewo-Radęcin w kontekście składowania CO<sub>2</sub>. *Biuletyn PIG*, 448: 81–86.

PAPIERNIK B., ŁAPINKIEWICZ A.P. & GÓRECKI W. 2007 – Petrofizyczne uwarunkowania ropo-gazonośności utworów dewonu i karbonu w południowej części niecki miechowskiej w świetle wyników modelowań komputerowych. *Geologia*, 33: 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.

PRMS 2011 – Guidelines for Application of the Petroleum Resources Management System. World Petroleum Council. [http://www.spe.org/industry/docs/PRMS\\_Guidelines\\_Nov2011.pdf](http://www.spe.org/industry/docs/PRMS_Guidelines_Nov2011.pdf).

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: 729–744.

STĘPIEŃ U., GAŁĄZKA D., PIELACH M., PIOTROWSKA E., PRZASNYSKA J., SŁODKOWSKI M. & TEKIELSKA A. 2013 – OneGeology – geologia jedna! *Prz. Geol.*, 61 (1): 40–44.

WÓJCICKI A. (red.) 2013 – Rozpoznanie formacji i struktur do bezpiecznego geologicznego składowania CO<sub>2</sub> wraz z ich programem monitorowania. Raport końcowy oraz raport podsumowujący. Dostępne na stronie projektu: <http://skladowanie.pgi.gov.pl>.

Autrzy tego tekstu i zarazem redaktorzy zeszytu poświęconego konstrukcji modeli cyfrowych struktur geologicznych pragną serdecznie podziękować zespołowi redakcyjnemu Przeglądu Geologicznego, którego udział w przygotowaniu tego dzieła, o wyjątkowo niejednorodnej strukturze tekstów, był decydujący dla powodzenia całego przedsięwzięcia.