

**dr Joanna Rychel**

Zawodowo zajmuje się kartografią geologiczną. Jest autorem

i współautorem map geologicznych

i geoturystycznych.

Kilkukrotnie nagradzana za swoje opracowania przez Stowarzyszenie Kartografów Polskich.

Interesuje się rekonstrukcjami paleogeograficznymi i paleośrodowiskowymi związanymi z okresem zlodowaceń plejstocénskich.

joanna.rychel@pgi.gov.pl

**mgr Łukasz Nowacki**

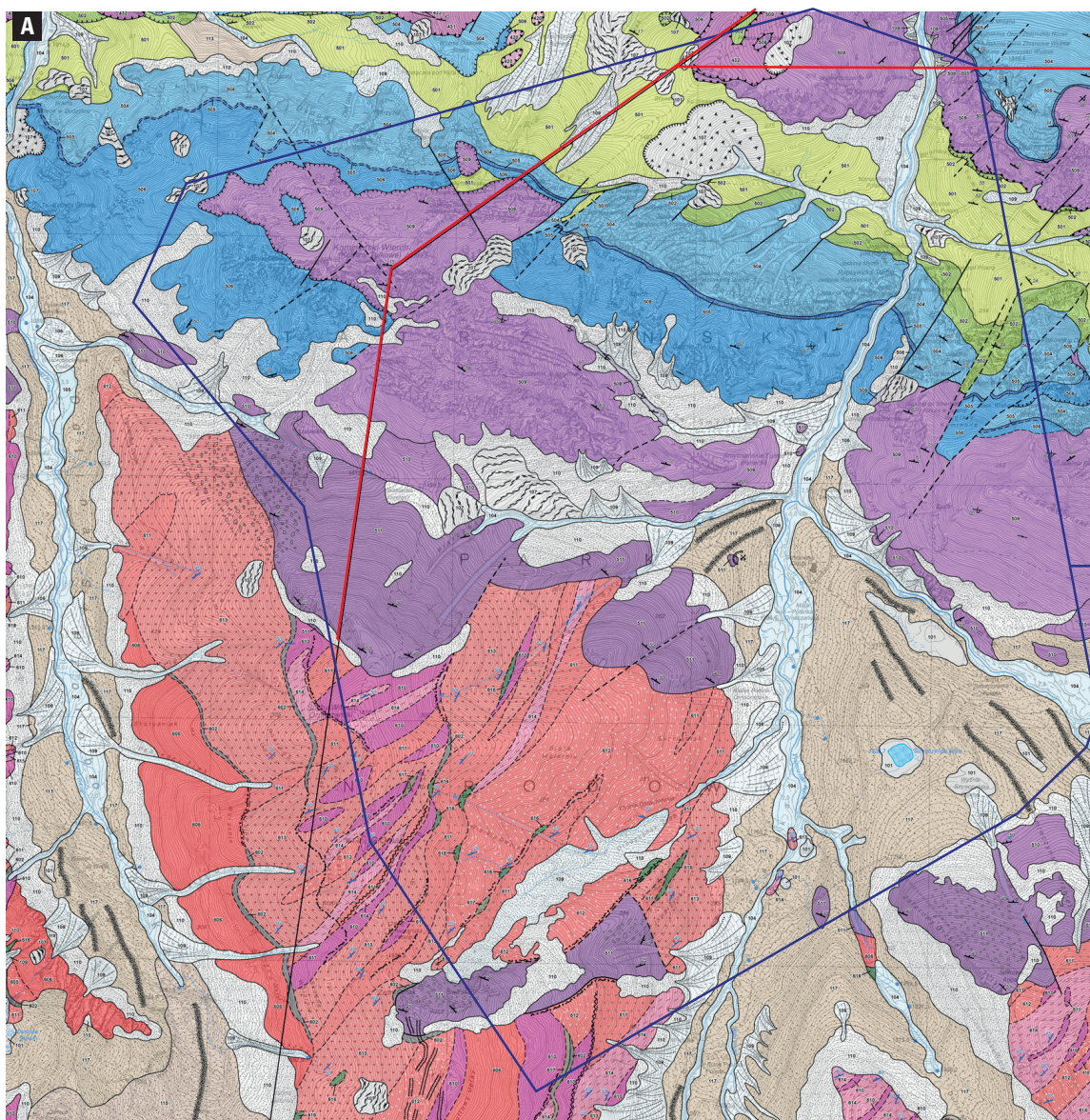
Jest autorem licznych publikacji i opracowań z dziedziny kartografii geologicznej, w tym nagradzanych przez Komisję Opracowań Geologicznych, działającą przy Ministrze Klimatu i Środowiska. Pracuje w Państwowym Instytucie Geologicznym –

Państwowym Instytucie Badawczym w Warszawie, w którym na co dzień zajmuje się analizami przestrzennymi, integracją danych geologicznych, i specjalizuje się w tworzeniu modeli geologicznych 3D.

lukasz.nowacki@pgi.gov.pl

WIZUALIZACJA PRZESTRZENI

Współczesne mapy geologiczne to modele trójwymiarowe odwzorowujące budowę Ziemi. Interpretują one również różnego rodzaju dane geologiczne i przedstawiają je graficznie.



**Joanna Rychel
Łukasz Nowacki
Mirosław Kamiński**

Państwowy Instytut Geologiczny
– Państwowy Instytut Badawczy w Warszawie

Geologia jest nauką zajmującą się badaniem struktur przestrzennych i relacjami między nimi. Pierwszym skojarzeniem geologicznej przestrzeni jest głębina budowa Ziemi i jej podział na skorupę, płaszcz i jądro ziemskie. Zazwyczaj jednak próbujemy przedstawić konkretne struktury geologiczne (tj. wysady solne, pułapki ropy i gazu ziemnego) czy baseny sedimentacyjne (np. zagłębienia węglowe czy zbiorni-

ki wód podziemnych). Obok geologicznych rekonstrukcji głębiny istotnych dla gospodarki równie ważne jest zobrazowanie form i procesów związanych z ukształtowaniem powierzchni terenu, m.in. pasm górskich, mórz, ich wybrzeży, osuwisk, jezior, dolin rzecznych oraz form powierzchniowych powstałych po powodziach. Takie opracowania są niezbędne w zagospodarowaniu terenu i planowaniu przestrzennym.

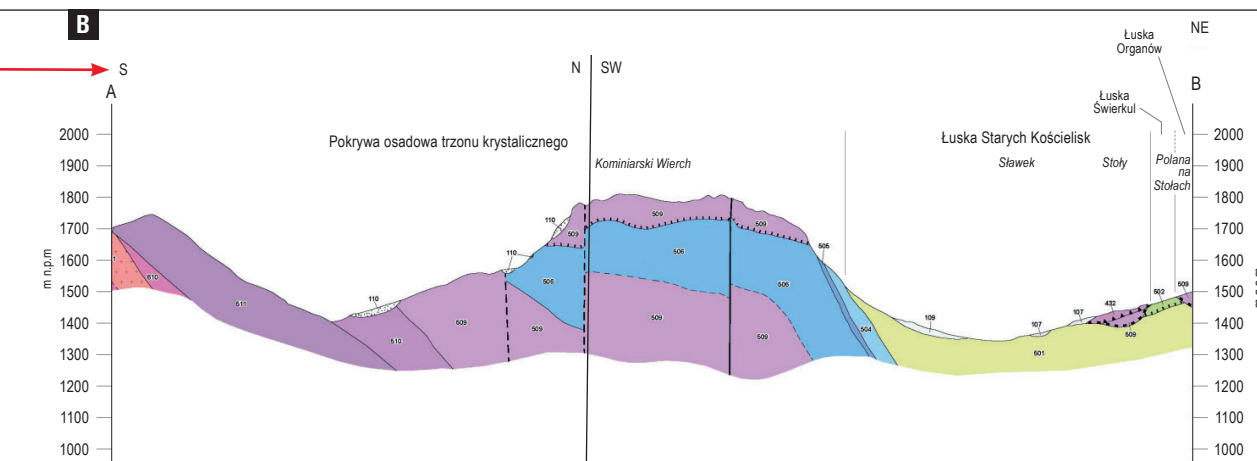
Najlepszym graficznym sposobem przedstawienia powierzchni jest mapa, która jest dwuwymiarowym obrazem ograniczonym regułami matematycznymi i jest wykonana według ściśle określonych zasad, w zadanym sposobie odwzorowania i określonej skali. Jest to najpowszechniejszy sposób przedstawiania zarówno prostej, jak i skomplikowanej budowy geologicznej skorupy ziemskiej. Jako uzupełnienia do mapy powstają przekroje i profile geologiczne. W Polsce pierwsza mapa geologiczna – mapa Gór Świętokrzyskich



dr Mirosław Kamiński

Zawodowo zajmuje się kartografią geologiczną, geozagrożeniami (szczególnie osuwiskami) oraz rozwijaniem metodyki badań geofizycznych i teledetekcyjnych. Jest autorem licznych publikacji naukowych w czasopiśmie krajowych i zagranicznych.

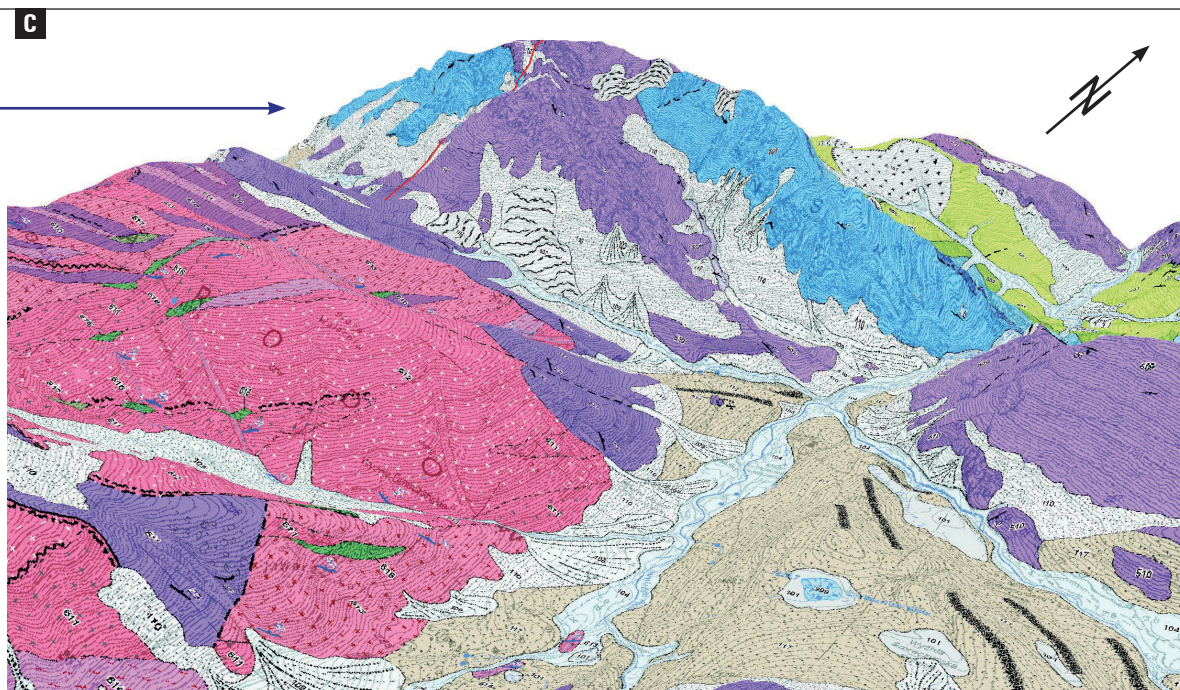
miroslaw.kaminski@pgi.gov.pl



A. Mapa geologiczna Tatr w skali 1:10 000, schronisko Ornak (Piotrowska i in. 2011),

B. Przekrój geologiczny (za Piotrowska, Cymerman, 2011),

C. Wykorzystanie numerycznego modelu jako tła do mapy geologicznej; beżowy – czwartorzęd, zielony – kreda, niebieski – jura, fioletowy – trias, czerwony – dewon



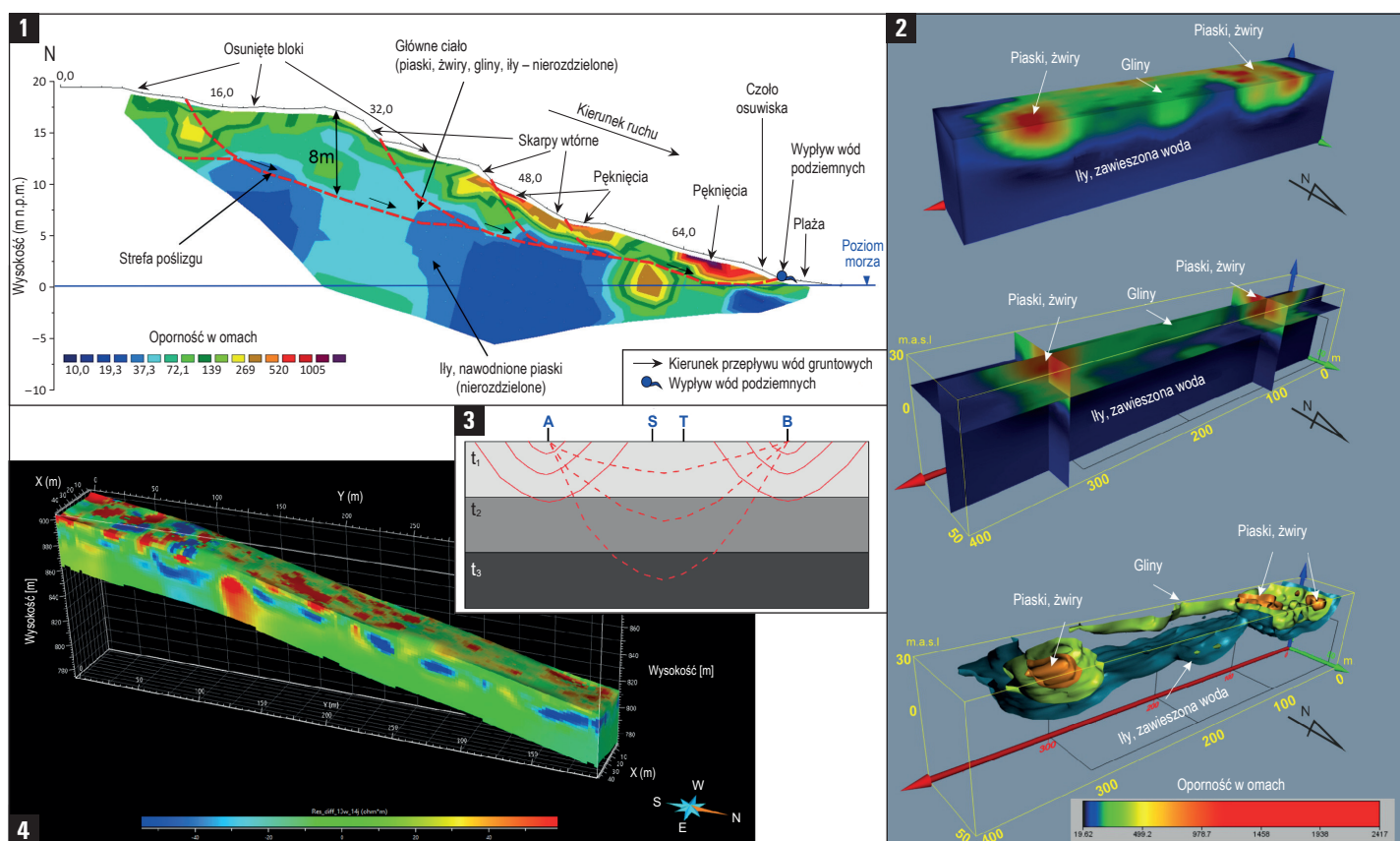
– została opracowana przez Stefana Czarnockiego w 1919 roku, czyli ponad 100 lat temu. Dzięki zastosowaniu numerycznego modelu terenu (NMT) na przełomie XX i XXI wieku oblicze map geologicznych stało się bardziej plastyczne, a rozwój skaningu laserowego (systemów Lidar) nadał im przestrzenny charakter. Z kolei rozwój turystyki kwalifikowanej wraz z rozpowszechnieniem systemów nawigacyjnych spowodował wzrost zainteresowania mapami geologiczno-turystycznymi. Mapy te są świetnym narzędziem do popularyzacji geologii.

Modelowanie trójwymiarowe

Dzięki zastosowaniu w geologii systemów informacji geograficznej (GIS) oraz wprowadzeniu zaawansowanych narzędzi informatycznych (IT) pojawiła się możliwość łatwiejszego odtworzenia i wizualizacji budowy geologicznej wybranego obszaru na dowolnej głębokości w postaci wirtualnych modeli trójwymiarowych (3D). Jest to przestrzenna interpretacja

informacji geologicznej, archiwizowanej dotychczas w postaci baz danych czy materiałów kartograficznych (w tym analogowych). Zaletą modelu jest możliwość jego ciągłej modyfikacji, podnoszenia rozdzielczości i dodawania nowych informacji wraz z dopływem danych.

Podstawową formą geologicznego modelu przestrzennego jest model strukturalny, czyli bryła ograniczona zadanymi powierzchniami. Mogą nimi być np. powierzchnie spągów i stropów wydzielen geologicznych oraz płaszczyzny nieciągłości takie jak uskoki. Struktura modelu jest zapisana numerycznie w postaci siatki o regularnych oczkach (GRID). To znaczy, że obszar przestrzenny jest podzielony na cegiełki (oczka) o określonych współrzędnych. Jeśli poza współrzędnymi każda z cegiełek będzie zawierała także informację o innych parametrach, takich jak przepuszczalność, porowatość czy oporność, powstanie model parametryczny. Taki model może być podstawą różnorodnych symulacji geofizycznych, hydrogeologicznych czy złożowych. Utylitarny cha-



Modelowanie geofizyczne:

1. Model elektrooporowy 2D ERT – przekrój przez osuwisko w Jastrzębiej Górze,
2. Model 3D ERT – trójwymiarowy rozkład oporności wraz z interpretacją budowy geologicznej klifu w Jastrzębiej Górze,
3. Ogólna zasada pomiaru w metodach elektrooporowych. Model 1D – sondowanie elektrooporowe,
4. Model różnicowy 4D ERT – zmiany rozkładu oporności, które nastąpiły między 2014 i 2017 rokiem we fragmencie osuwiska Bachledzki Wierch (Podhale).

Model 3D przedstawia trójwymiarowy rozkład oporności wraz z interpretacją geologiczną klifu położonego w Jastrzębiej Górze. Z kolei model 4D przedstawia fragment osuwiska Bachledzki Wierch, dla którego wygenerowano model zmiany rozkładu oporności, który nastąpił między 2014 a 2017 rokiem

rakter modelu wynika z możliwości wykorzystania go zarówno do celów naukowych, jak i przy prowadzeniu działalności popularyzacyjnej.

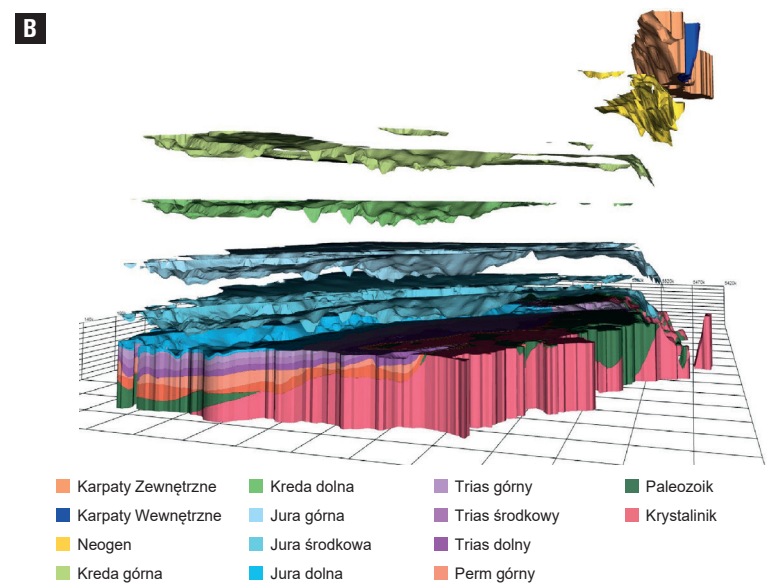
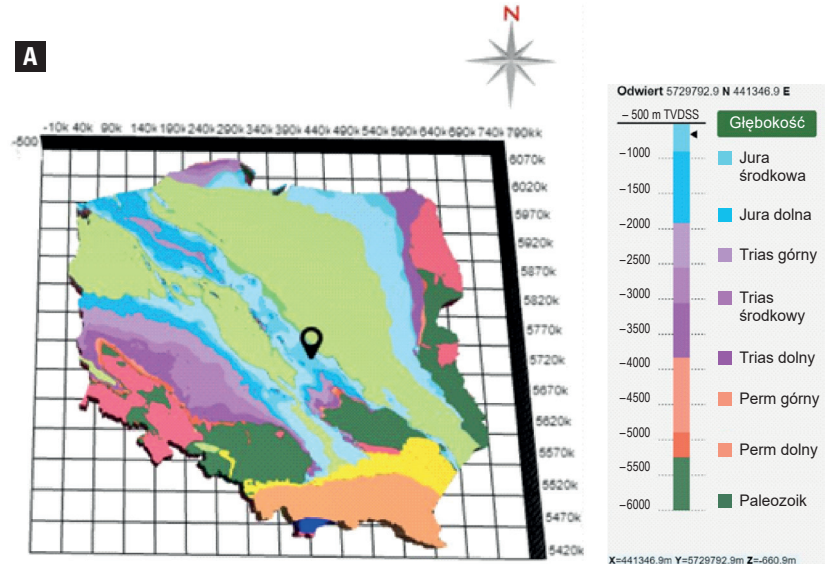
Przykładem modelu strukturalnego jest przestrzen-ny model wgłębnej budowy Polski (3DGP), który przedstawia budowę geologiczną Polski od głęboko-ści 500 m do głębokości 6 km. Wykorzystując prze-glądarkę Geo3D, mamy możliwość „odwiercenia” otworu w dowolnej części mapy (rzutu modelu z gó-ry) i uzyskania profilu modelu wraz z informacjami takimi, jak: współrzędne geograficzne, rzędna na po-wierzchni terenu, głębokość otworu, głębokość spągu oraz miąższość każdego wydzielenia w modelu. Żeby zobaczyć bryły kolejnych wydzielen stratygraficznych, od najmłodszych po coraz starsze, można wykorzystać funkcję podnoszenia warstw.

Najciekawsza pod kątem poznawczym jest wizua-lizacja basenów sedymentacyjnych i struktur geolo-gicznych. Daje ona możliwość szczegółowego rozpo-znania budowy geologicznej i przestrzennych relacji jednostek geologicznych, tak by je jak najefektywniej wykorzystać. Model basenu lubelskiego (Lubelskiego Zagłębia Węglowego) daje możliwość zarówno roz-poznania ewolucji basenu do celów poszukiwawczych (zwiększenia efektywności poszukiwań i bilansowania zasobów), jak i planowania i efektywnego zarządzania różnymi formami działalności gospodarczej w prze-strzeni podziemnej poeksploatacyjnej oraz przewidy-wania skutków tej działalności dla środowiska. Model ten może być wykorzystywany w dziedzinie poszu-kiwania surowców energetycznych, podziemnych zbiorników i składowisk w strukturach geologicznych (np. do sekwestracji CO₂, jako magazyny paliw płyn-nych) oraz geotermii.

Modelowanie struktur geologicznych najlepiej obrazują wizualizacje wysadów solnych. W obrębie pasa wału środkowopolskiego jest rozpoznanych kil-kanaście struktur solnych. Są one zbudowane z ewa-poratów, czyli utworów chlorkowych i siarczanowych powstałych na skutek odparowywania wody z base-nów, zajmujących znaczne obszary Niżu Polskiego utworzonych m.in. w cechszynie. Dzięki plastycznym właściwościom soli przekształciły się one w wysady i poduszki solne. Ich wewnętrzna budowa jest wyjąt-kowo skomplikowana. Niektóre z wysadów całkowicie przebijają się przez młodsze skały mezozoiczne. Że-by określić ruchliwość soli w pasie wysadów solnych Polski, zostały utworzone modele strukturalne osa-dów czwartorzędowych, zalegających nad wybranymi wysadami solnymi i w ich bezpośrednim otoczeniu.

Wykorzystanie danych

Modele 3D silnie oddziałują na wyobraźnię odbior-cy, prezentując skomplikowaną budowę w przy-stępny i zrozumiały sposób. Powstają one w oparciu o informacje punktowe (z otworów wiertniczych), po-

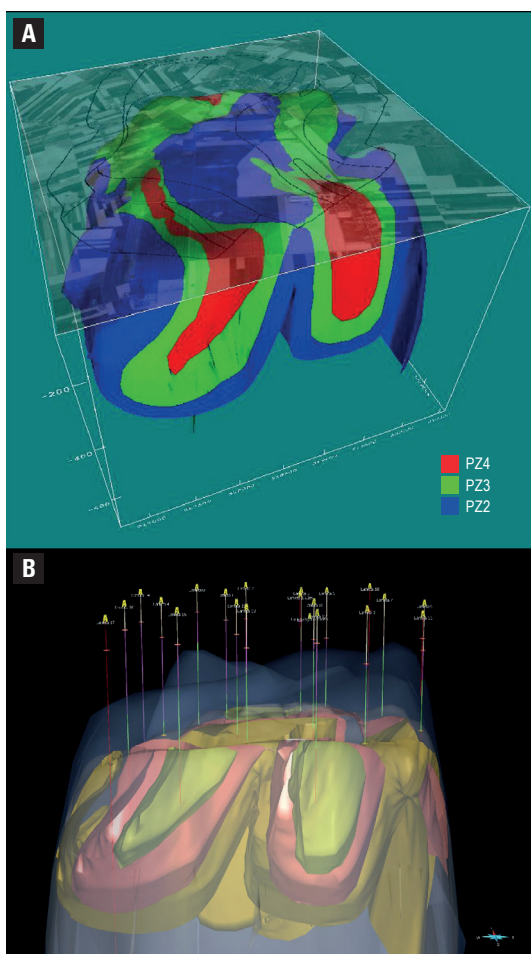


wierzchniowe i liniowe (takie jak mapy geologiczne w różnych skalach, przekroje geologiczne oraz dane geofizyczne (m.in. interpretacje sejsmiczne, profilo-wania sejsmiczne, geofizyka otworowa). Oprogramo-wanie wykorzystywane do tworzenia modeli przede wszystkim kontroluje prawidłowość i kolejność wpro-wadzonych informacji. Granice powierzchni mode-lowanych struktur przebiegają w konkretnych miej-scach. Są one wyznaczone z wierceń, linii intersekc-yjnych map, przekrojów czy profilowań geofizycznych. W dalszej kolejności są interpretowane powierzchnie w miejscach nieobjętych informacją oraz te, które łą-czą dane (różne informacje geologiczne) w zadanym zakresie (domenie), w tym przypadku głębokości. Prawidłowo skonstruowany model jest pozbawiony błędów związanych z intersekcją i jest w nim porządek stratygraficzny (zachowana kolejność występowania poszczególnych wydzielen geologicznych). Dlatego też można wykonać analizę wszelkich dostępnych in-formacji o budowie geologicznej interpretowanego

Przestrzenny model wgłębnej budowy Polski (3DGP):

- Tworzenie wirtualnych otworów,
- Wykorzystanie funkcji podnoszenia warstw na przykładzie modelu 3D budowy geologicznej Polski (https://geo3d.pgi.gov.pl/pl/model_Polski_2005)

- A. Model wysadu solnego Łanięta w przeglądarce desktopowej Geo3D.
- B. Widok modelu strukturalnego wysadu solnego Łanięta w programie SKUA/GOCAD. Diapir Łanięta jest wysadem średniej wielkości. Przedstawiony wysad solny składa się ze zdeformowanych skał poszczególnych cyklotemów (PZ2, PZ3 i PZ4), nad którymi znajduje się czapa anhydrytowo-ilasto-gipsowa. Zewnętrzne granice wysadu są niemal pionowe



SŁOWNICZEK

Powierzchnia stropu

– górna powierzchnia ograniczająca warstwę osadów, skał.

Powierzchnia spągu

– dolna powierzchnia ograniczająca warstwę osadów, skał.

Intersekcja

– obraz powstały dzięki przecięciu powierzchni geologicznych z powierzchnią terenu.

Wydzielenie geologiczne

– jednostka wyodrębniona na podstawie wspólnych cech, np. kilka warstw osadów, które powstały w tym samym czasie czy miejscu.

Facja

– zespół cech osadu w odniesieniu np. do genezy, środowiska powstania czy składu petrograficznego.

Chcesz wiedzieć więcej?

Rychel J., *Kartografia geoturystyczna dla parków krajobrazowych*, „Przegląd Geologiczny” 2015.

Małolepszy Z., Pawłowski R., Wróbel K., Chelmiński J., Nowacki Ł., Stępień U., Szynkaruk E., *Geo3D – wersja beta przeglądarki przestrzennych modeli geologicznych na stronie Państwowego Instytutu Geologicznego – Państwowego Instytutu Badawczego*, „Przegląd Solny” 2019.

obszaru. Przeglądanie struktur pod dowolnym kątem i w dowolnej pozycji daje ogromne możliwości poznawcze i interpretacyjne. Model strukturalny jest podstawą do stworzenia modelu parametrycznego – czyli przestrzeni wypełnionej informacją o takich parametrach, jak np. rodzaje skał, ich porowatość czy oporność.

Własności fizyczne skał (w szczególności opór elektryczny) są wykorzystywane przy prowadzeniu niektórych rodzajów badań geofizycznych, np. pomiarów metodą elektrooporową. Metodykę tych badań opracowali bracia Schlumberger na początku XX wieku. Dziś dzięki niej możemy tworzyć modele elektrooporowe skał w przestrzeni 1D, 2D, 3D i 4D. Rozwój technologiczny sprawił, że doszło do ewolucji od prostych, jednowymiarowych, warstwowych modeli geofizycznych 1D SE (*electric sounding*) do modeli geofizycznych dwuwymiarowych 2D ERT (*electrical resistivity tomography*). Od początku XXI wieku nastąpił szybki rozwój trójwymiarowego modelowania elektrooporowego 3D ERT, a w efekcie w ostatnich latach również modelowania 4D ERT. Modele 4D ERT pokazują zmiany oporności skał w czasie i przestrzeni. Jednym z powodów popularności metody geoelektrycznej jest szybkie uzyskiwanie danych oraz niski

koszt prac terenowych. Pomiar oporności w tej metodzie wymaga stałego źródła prądu elektrycznego. Prąd jest wprowadzany do gruntu przez dwie metalowe elektrody A i B, a następnie jest mierzona różnica potencjałów na kolejnych dwóch elektrodach S i T.

W badaniach tomografii elektrooporowej ERT elektrody są rozmieszczone wzdłuż linii prostej i połączone kablami wielożyłowymi z selektorem, czyli jednostką przełączającą, służącą do automatycznego wybierania odpowiednich czterech elektrod. Spośród wielu układów elektrod najczęściej stosuje się układ pomiarowy Wennera, Wennera-Schlumbergera i ostatnio nowy układ tzw. wielokrotnego gradientu opracowany dla mierników wielokanałowych. Wielokanałowy system pozwala na wykonanie jednocześnie kilku pomiarów między elektrodami potencjałowymi, rozmieszczonymi w różnych miejscach przy ustalonym położeniu elektrod prądowych. Pozwala to na znaczne przyspieszenie badań bez zmniejszenia gęstości punktów pomiarowych. Po kontroli prawidłowości połączeń program komputerowy automatycznie wybiera odpowiednie elektrody do pomiaru, a po wykonaniu pomiaru zapisuje wynik. Następnie powtarza tę procedurę aż do wypełnienia wszystkich punktów na przekroju. W efekcie otrzymujemy wynik pomiaru tzw. oporności pozornej skał. Żeby otrzymać wartość prawdziwej oporności skał, wartość oporności pozornej poddaje się procesowi inwersji 2D lub 3D.

Metoda elektrooporowa z powodzeniem jest stosowana przy monitorowaniu terenów zagrożonych ruchami masowymi zarówno w terenach nadmorskich, jak i górskich. Rozwój metody jest widoczny na przykładzie badań aktywnych osuwisk w Jastrzębiej Górze i w Zakopanem na Bachledzkim Wierchu.

Narzędzia do wizualizacji

W Centralnej Bazie Danych Geologicznych (CBDG) znajdziemy różne rodzaje map geologicznych oraz podstawowe informacje o wykonanych w kraju dokumentacjach, w tym profilowaniach geofizycznych i otworach wiertniczych.

Modele strukturalne powstają na bazie narzędzi do integracji danych takich jak Petrel (Schlumberger) czy GOCAD (Aspen Technology, Inc.), wykorzystywanych z powodzeniem w geologii. Są to skomplikowane, specjalistyczne oprogramowania licencjonowane. Żeby przybliżyć możliwie największej liczbie odbiorców wyniki modelowania 3D wykonane tymi narzędziami, wykorzystuje się do tego specjalne przeglądarki takie jak Geo3D, umożliwiające np. wykonywanie map ścienia oraz przekrojów po dowolnej linii cięcia. Do modelowania i przetwarzania danych elektrooporowych jest używane oprogramowanie Res2DINV i Res3DINV. Z kolei do wizualizacji modeli elektrooporowych są wykorzystywane oprogramowania GOCAD i Voxeler. ■