

Konrad Ziemiński, Halina Jędrzejowska-Tyczkowska

Institut Nafty i Gazu

Efekt skali w interpretacji geologicznej danych geofizycznych i analiz laboratoryjnych – wprowadzenie do tematyki oraz przykłady obliczeń na danych modelowych

Współczesna charakterystyka geologiczna obszarów złożowych opiera się na szeregu danych pochodzących z analiz przeprowadzonych w różnych skalach: od skali nanometrów, przez skalę próbek (wielkości kilku centymetrów), aż do skali całego obiektu złożowego. Tak duża rozpiętość zarówno rozmiarów badanego ośrodka, jak i zastosowanych metod badawczych (badania petrofizyczne, petrologiczne, analizy sedimentologiczne, interpretacja krzywych geofizyki otworowej oraz przekroi sejsmicznych) wymusza uwzględnienie zjawiska tzw. efektu skali we wszelkich poczynionych interpretacjach. Wynika to z faktu, że najczęściej dane uzyskane podczas np. analiz próbek o wielkości kilku centymetrów nie mogą być wprost przeniesione do interpretacji obiektów złożowych wielkości kilkudziesięciu kilometrów kwadratowych. Kluczową kwestią jest tutaj pozyskanie wiedzy o wzajemnych relacjach pomiędzy uzyskiwanymi danymi oraz ich wielokrotna kalibracja na praktycznie każdym etapie pracy nad złożem węglowodorów, zarówno konwencjonalnym, jak i niekonwencjonalnym. Efekt skali w światowej literaturze jest rozpatrywany dla bardzo konkretnych problemów. Na potrzeby przemysłu naftowego istnieje wyraźna konieczność uzyskania rozwiązań bardziej ogólnych, które tym samym będą mieć szersze zastosowanie. Eksperyment obliczeniowy przeprowadzono na danych modelowych wyprowadzonych w wyniku interpretacji rzeczywistego obiektu złożowego. Różnorodność pomierzonych i analizowanych parametrów, w których uwzględniono efekt skali, symulowano za pomocą stosunkowo prostych funkcji matematycznych. Wyniki obliczeń modelowych poddano analizom statystycznym ukierunkowanym na ujawnienie istniejących prawidłowości związanych z charakterystyką złoża.

Słowa kluczowe: efekt skali, model geologiczny, modelowanie numeryczne, model parametryczny, analiza statystyczna.

Scale effect in geological interpretation of geophysical and laboratory data – introduction to the topic with examples of calculations on model data

Modern geological characteristics of reservoir areas are based on data from a number of studies carried out at different scales – from the scale of nanometers, through the scale of samples (a few centimeters in size) to the scale of the entire reservoir. Such a large range of both sizes of an investigated area and analytical methods used (petrophysical, petrological, sedimentological analysis, well logs and seismic cross-sections interpretations) results in pressure to take so called “scale effect” into account. This is due to the fact that the data obtained during the analyses of samples (size of a few cm) often cannot be directly transferred to the interpretations of the whole reservoir area (several km² in size). The key issue here is to obtain knowledge of the relations between the different sets of data and to calibrate them at every step of reservoir investigation (both conventional and unconventional). Scale effect in literature is examined for very specific problems. For the purpose of the oil and gas industry there is a clear need for more general solutions, which will therefore have wider application. A computational experiment on the deduced model data was conducted as a result of the interpretation of the real reservoir rocks. Diversity in measured and analyzed data (where scale effect was used) was stimulated with relatively simple mathematical functions. The results of model calculations were statistically analyzed and focused on the disclosure of existing regularities connected with field characteristics.

Key words: scale effect, geological model, numerical modeling, parametric model, statistical analysis.

Wstęp

Niniejszy artykuł, opierający się na publikacjach zagranicznych oraz doświadczeniach przeprowadzonych na złożach Grotów i Międzychód, jest wstępem i zasygnalizowaniem istnienia niezwykle istotnego problemu, jakim jest tzw. efekt skali. Wpływ poruszanej kwestii dostrzegalny jest w każdej dziedzinie nauki, a w szeroko pojętym, zintegrowanym procesie badań złożów potrzeba jego rozwiązania nabiera znaczenia priorytetowego, i to zarówno ze względów ekonomicznych, jak i poznawczych.

Współczesny stan wiedzy i rozwój aparatury badawczej pozwala na gromadzenie w toku przeprowadzanych analiz złożów węglowodorów (niekonwencjonalnych, jak i konwencjonalnych) wielu danych pozyskanych różnymi metodami badawczymi i w różnych skalach. Obecnie nie dziwi nikogo fakt, że aby w pełni zrozumieć i opisać zarówno obszar złożowy, jak i szereg procesów w nim zachodzących, należy się oprzeć na wynikach prac zespołów interdyscyplinarnych, a co za tym idzie – skorzystać z niezwykle bogatego zestawu danych, w którym skala pomiaru, jak i skala samego badanego obszaru (od próbki wielkości kilku centymetrów po cały obszar złożowy) są bardzo rozległe. Istotne jest tu, że wszelkie dokonywane interpretacje nie mogą opierać się na stworzeniu bardzo atrakcyjnego wizualnie raportu, który w odrębnych rozdziałach przedstawiać będzie wyniki np. analiz petrofizycznych, geochemicznych, geofizycznych czy metrologicznych. Aby zniwelować ryzyko ewentualnych niezgodności wynikających z różnicy w wartościach liczbowych danego parametru, będących konsekwencją tego, iż w procesie integracji często sięgamy po dane (np. prędkość absolutną propagacji fali sprężystej, gęstość skały) pozyskane z różnie wykonanych pomiarów i na podstawie różnej metodyki (np. gęstość możemy mierzyć na próbkach skał w laboratorium, obliczyć przy pomocy danych profilowania gamma, jak też wyznaczyć na podstawie inwersji sejsmicznej przy użyciu danych sejsmiki powierzchniowej), kluczową

kwestią pozostającą do rozwiązania jest sprecyzowanie zasad przejścia z pracy nad danymi uzyskanymi w wyniku analiz próbek do myślenia w skali całego obiektu złożowego. Prostym przykładem ukazania omawianego problemu są np. analizy porowatości, które można wykonać zarówno na próbkach w laboratorium, jak również przy użyciu metod geofizyki otworowej oraz sejsmiki. Zastosowanie wszystkich trzech wymienionych sposobów zaowocuje uzyskaniem trzech różnych wyników. Następnym etapem musi być tu odpowiedź na szereg pytań dotyczących tego, które z uzyskanych wyników są najbliższe prawdy. Do którego wyniku przywiązać największą wagę? W jaki sposób wyniki ze skali mikro i nano [3, 11] przenieść na cały obszar złożowy? Bez uzyskania odpowiedzi na postawione wyżej pytania narażamy się na poważne błędy np. przy konstruowaniu modeli, a tym samym niepotrzebnie zwiększamy ryzyko nierentowności przyszłych działań (np. wykonanie odwiertu nietrafiającego w złożę). W dobie złożów niekonwencjonalnych, zwłaszcza typu *shale gas*, w przypadku których precyzja jest kluczem do wszelkich działań, nieświadome operowanie zbiorami danych, nieodpowiedzialna „żonglerka” danymi z różnych skał jest nie tylko zupełnie niepotrzebnym obniżaniem jakości interpretacji, ale także może mieć bardzo negatywne skutki zarówno w zakresie planowania pracy na konkretnym złożu, jak i przyszłej strategii dla całego regionu, a nawet kraju.

Zaznaczyć należy, że pomimo świadomości problemu nie opublikowano dotąd żadnych bardziej ogólnych propozycji rozwiązań. Niestety, wszelkie dostępne materiały traktują omawiany problem w perspektywie rozważań bardzo konkretnych sytuacji i zjawisk, które nie mogą mieć realnego przełożenia choćby na aktualne wyzwania związane ze złożami niekonwencjonalnymi. Przedstawiona praca również nie prezentuje pożądaných rozwiązań, jednakże nakreśla wagę problemu oraz, poprzez doświadczenia na mapach, ukazuje podjęte próby uwzględnienia efektu skali w prowadzonych badaniach.

Efekt skali a charakterystyka geologiczna obszarów złożowych, zwłaszcza niekonwencjonalnych złożów węglowodorów

Nowe wyzwanie dla gospodarki energetycznej kraju, jakim stały się tzw. złoża niekonwencjonalne, a szczególnie gaz w łupkach, każe spojrzeć na poszukiwania i na przyszłą eksploatację takich obiektów z zupełnie innej perspektywy, niż pozwalają wyłącznie własne doświadczenia krajowe.

Najsilniejszym wsparciem w tym zakresie są doświadczenia amerykańskiego przemysłu naftowego, bowiem właśnie w Stanach Zjednoczonych odkryte zostało największe jak dotąd złożę gazu w łupkach – Barnett Field, i prowadzona jest

jego nowoczesna eksploatacja. Termin „eksploatacja” należy rozumieć bardzo szeroko: w przypadku gazu z łupków to nie tylko samo wydobycie, ale również przygotowanie obiektu i umożliwienie przepływu płynów złożowych, a szczególnie gazu, do linii wydobywczej. Tu ogromną rolę spełnia szczelinowanie hydrauliczne. Zachowanie się złoża musi być szczegółowo opisane w czasie, a więc dynamicznie.

W tym aspekcie wyjaśnienie roli efektu skali w charakterystyce obszarów złożowych wymaga zrozumienia, jaki

jest jej wpływ na różnego rodzaju dane, którymi się posługujemy, oraz na różnorodne metody badań i technologie stosowane podczas pozyskiwania danych i opracowywania wyników.

Przy wyborze metod badania wybranego złoża musi być uwzględniony szereg czynników – przede wszystkim rozmiar obiektu złożowego oraz jego głębokość. W zależności od rozmiaru i heterogeniczności obiektu złożowego może on być opisany na różne sposoby. Do problemu można podejść w sposób statyczny (w skali od ziaren, poprzez laminy, warstwy, formacje, aż do skali regionu) lub dynamiczny, który definiuje typy heterogeniczności w zależności od ich dynamicznego wpływu na złożę (np. nieciągłości wertykalne i horyzontalne, bariery geologiczne, procesy wypłukiwania spoiwa oraz jego horyzontalna i wertykalna anizotropia, a także szczelinowatość).

Kwestia skali jest wyraźną słabością w przejściu od danych geofizycznych do symulacji złożowych, gdzie konieczna jest wykorzystująca geostatystykę integracja różnoskalowych badań geologicznych i petrofizycznych z danymi sejsmicznymi. Nie ulega wątpliwości, że podczas wielu etapów badania pojedynczego złoża operujemy wieloma skalami. Ma to wpływ na poprawność wyników, ich kalibrację, a także wszelkie szacowania i ostateczne interpretacje.

Nowocześnie prowadzona gospodarka zasobami źródeł energii, a szczególnie ropy naftowej i gazu ziemnego,

zagospodarowania złoża. W miarę możliwości i dostępności koniecznych informacji prowadzone są symulacje złożowe przygotowujące do rozpoczęcia planowej eksploatacji obiektu oraz jej kontynuacji. W zależności od wyników prowadzonej eksploatacji w aspekcie wcześniejszych prognoz wydobywczych wprowadzane są zabiegi określane jako wtórne, których celem jest optymalizacja planu eksploatacyjnego i najbardziej ekonomiczna gospodarka zasobami.

Jak widać, proces prowadzący od lokalizacji złoża do eksploatacji jest bardzo rozległy, tak w sensie technicznym, jak i naukowym. Jednakże zbadanie i w odpowiedniej kolejności praktyczne zastosowanie wybranych procesów szczegółowych, takich jak ocena heterogeniczności czy też ocena właściwości mechanicznych ośrodka (dostarczających koniecznych informacji dla poprawnej realizacji procesu szczelinowania hydraulicznego), nie mogą być poprawnie przeprowadzone bez rozpoznania pozornie ogólnego etapu poprzedzającego.

W minionym, chociaż nie nazbyt odległym okresie końca XX wieku każdy z wymienionych etapów traktowany i realizowany był w znacznym stopniu niezależnie. Dzisiaj mówimy o zintegrowanym, ciągłym procesie zagospodarowania zasobów. Poprawna realizacja tego procesu wymaga współpracy w interdyscyplinarnym zespole geologów, geofizyków i inżynierów złożowych, co od strony formalnej, graficznie, przedstawiono poniżej (rysunek 1).

Rozpoznanie geologiczne i wstępne oszacowanie zasobów	Prospekcja i identyfikacja obiektów	Plan zagospodarowania	Produkcja i eksploatacja	Korekta wcześniejszego projektu eksploatacji
--	--	------------------------------	---------------------------------	---

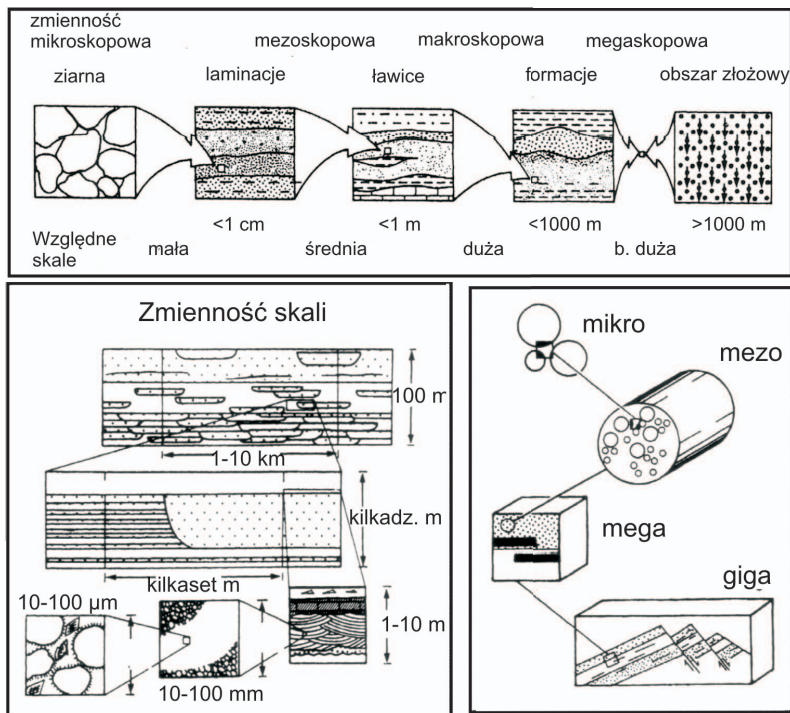
Rys. 1. Eksploatacja węglowodorów z ich złóż (zarówno konwencjonalnych, jak i niekonwencjonalnych) to sekwencja działań i przekazywania stopniowo uzyskiwanych informacji o obiekcie

rozumiana jest jako ciągły proces zapoczątkowany przez ogólne rozpoznanie geologiczne oraz prospekcję terenową prowadzoną metodami geofizycznymi, a szczególnie metodą sejsmiki refleksyjnej. Kolejnym etapem jest możliwie dokładny opis zidentyfikowanych obiektów, zarówno w sensie przestrzennym, geometryczno-strukturalnym, jak i w sensie ilościowego rozpoznania parametrów fizycznych i petrofizycznych ośrodka. Dla szczegółowego rozpoznania obszaru na podstawie wyników tego etapu prowadzona jest interpretacja, tworzony model geologiczny i określana jest lokalizacja proponowanych do odwiercenia otworów.

W przypadku pozytywnych wyników, tzn. potwierdzenia obecności węglowodorów, przystępuje się do realizacji dalszego etapu, czyli konkretnego opisu obiektu złożowego, parametrów złożowych i przedstawienia wstępnego planu

Od strony badań i praktycznej realizacji ten ciągły, zintegrowany proces możemy przedstawić według propozycji przedstawionej na rysunku 2. Każdy z wymienionych etapów wymaga odrębnego „opomiarowania”, zależnie od dosłownych rozmiarów przestrzeni badawczej oraz rodzaju analizowanych zjawisk.

Przejdzie od map geologicznych, pokrywających powierzchnię setek kilometrów kwadratowych, tworzonych w określonych systemach kartograficznych i układach współrzędnych → przez metodykę pomiarów sejsmicznych zgodnie z założonym schematem akwizycji, rozpiętym w przestrzeni dziesiątek kilometrów kwadratowych → poprzez jednowymiarowe pomiary geofizyki otworowej wzdłuż najczęściej kilkusetmetrowego, przeważnie pionowego, ale też poziomego profilu → do końcowych analiz laboratoryjnych na



Rys. 2. Przykład różnorodności skal występujących w opisie różnych elementów ośrodka geologicznego (wg [10], zmieniony)

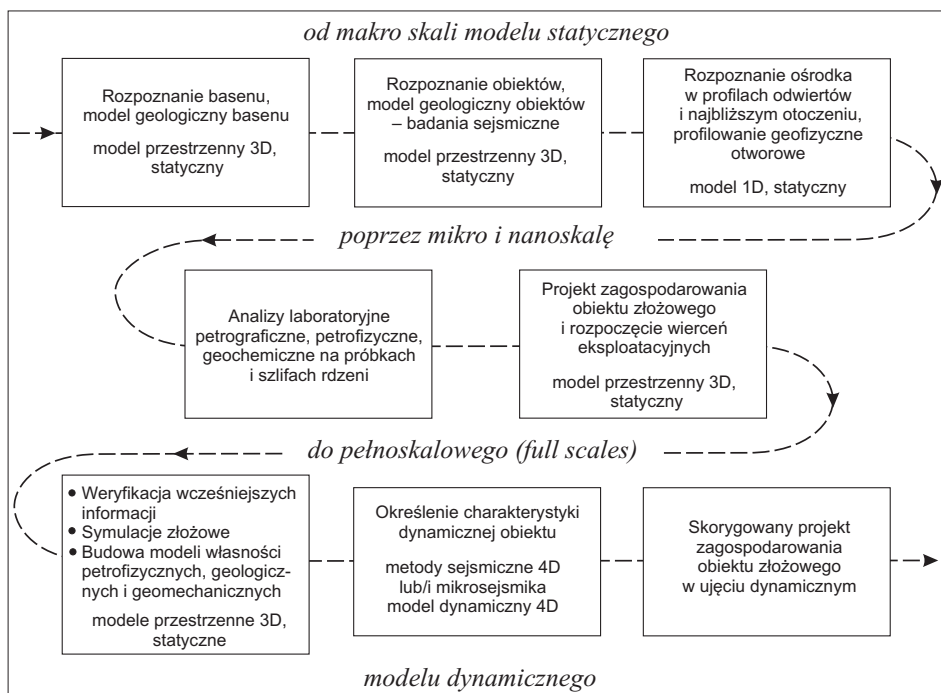
rdzeniach i cienkich płytkach, charakteryzujących procesy fizyczne (petrofizyczne) oraz chemiczne (geochemiczne), zaistniałe w historii geologicznej rejonu → to przejście od skali makro, wyrażonej w kilometrach i metrach, do skali mikro zdjęć mikroskopowych (np. analizy przestrzeni porowej lub wysortowania ziaren), na skali nano (np. badania szczelinowatości czy przepuszczalności) kończąc (rysunek 3).

Przedstawiona ogromna rozpiętość skali nie dotyczy wyłącznie rozmiarów, ale również parametrów przyrządów pomiarowych, co związane jest z rodzajem obserwowanego i mierzonego zjawiska. W zakresie tym na szczególną uwagę zasługują metody geofizyczne, których domeną obserwacji są zjawiska ruchu falowego (metoda sejsmiczna, mikro-sejsmika, metoda magnetoteluryczna, profilowanie akustyczne w otworach). Przykładowo, analiza spektralna pól falowych rejestrowanych metodami sejsmiki powierzchniowej mówi, że obserwowane zjawiska charakteryzują się najczęściej częstotliwościami rzędu od kilku do stu kilkudziesięciu herców, podczas gdy zakres sejsmiki otworowej (pionowe profilowanie sejsmiczne PPS) to setki herców, natomiast PA w otworze to dziesiątki kiloherców.

Waga wymienionych zagadnień w zintegrowanym procesie gospodarki zasobami węglodorów jest wyjątkowo duża, bowiem przechodzenie od niższych do coraz wyższych poziomów szczegółowości rozpoznania ośrodka wymaga wiarygodnego ujednoczenia zakresu mierzonych, obliczonych, estymowanych czy prognozowanych wielkości. Jako przykład wymieni można takie wielkości jak prędkość propagacji fal sprężystych, zarówno podłużnych, jak i poprzecznych, określona na drodze pomiaru czasu propagacji danej fali. Dla danego obiektu geologicznego parametr ten jest różny w zależności od metody pomiarowej (np. sejsmika

powierzchniowa czy profilowanie akustyczne). Wiemy jednak, że aby zbudować model efektywny, wartości parametrów powinny być zgodne. Prędkość propagacji fal sprężystych jest najsilniejszym parametrem diagnostycznym dla właściwości zbiornikowych ośrodka ze względu na różną reakcję wobec zróżnicowanych ciśnień, porowatości, nasycenia, szczelinowatości czy występowania anizotropii.

Kolejnym ważnym elementem wpływającym na konieczność ujednoczenia efektu skali są typowe dla interpretacji zintegrowanej procedury kalibracji i estymacji, powszechnie obecne w metodach statystycznych. Przykładowo, budowa przestrzennego modelu porowatości na podstawie danych



Rys. 3. Opis i charakterystyka złoża to ciągłe przechodzenie z i do kolejnych obszarów badań oraz rozmiarów, wymiarów, jednostek i skal

sejsmicznych wykorzystuje m.in. zbiory atrybutów sejsmicznych oraz wyniki pomiarów laboratoryjnych porowatości na próbkach. Wybór poprawnego zakresu porowatości zależy od obydwu zbiorów danych oraz liczby pomiarów na próbkach, a więc pośrednio liczby otworów w przestrzeni zdjęcia (projektu) sejsmicznego. Podobnie estymowanie ciśnień porowych na podstawie wyników inwersji sejsmicznej wykorzystuje dwa zbiory danych: sejsmiki powierzchniowej oraz inżynierii złożowej, w postaci wyników pomiarów ciśnienia w otworze podczas testów otworowych.

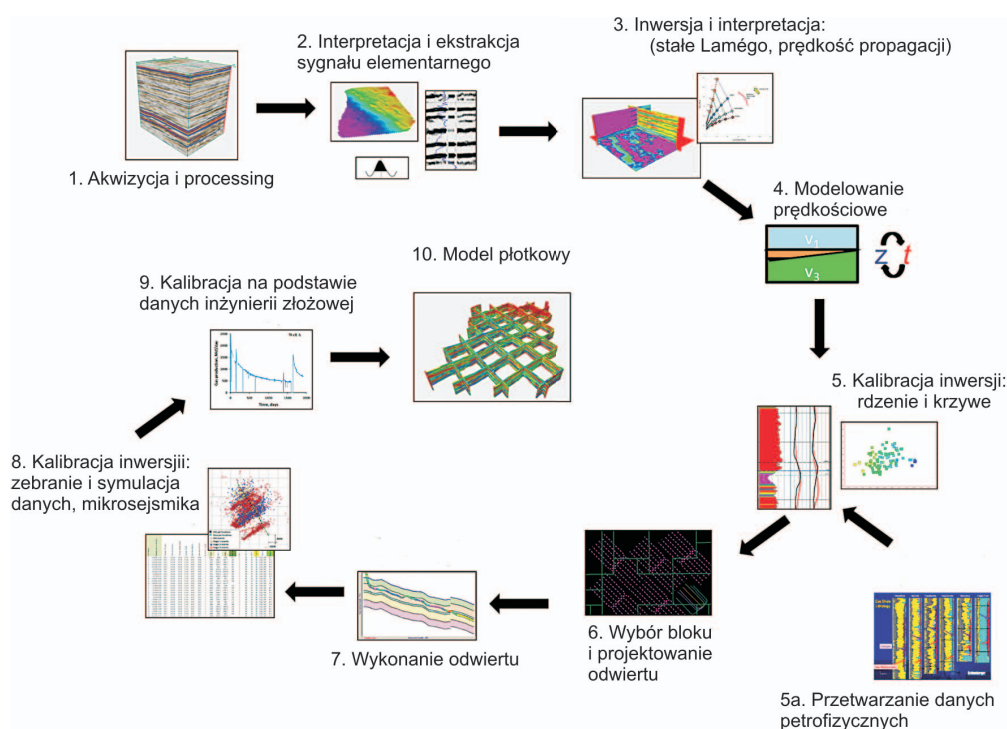
Pytanie, dlaczego i jak bardzo różnią się wybrane parametry ośrodka w zależności od metody i sposobu pomiaru, pozostaje nadal bez odpowiedzi. „Epoka złóż niekonwencjonalnych” oczekuje jednak wyjaśnienia postawionego problemu i niejako je wymusza – przede wszystkim dlatego, że obszarem penetracji są formacje geologiczne jeszcze niedawno postrzegane jako niezbiornikowe: czarne łupki bitumiczne oraz silnie skompaktowane piaskowce o bardzo małej porowatości i znikomej przepuszczalności.

Interpretacja wyników pomiarów sejsmicznych wspomagana jest rezultatami testów laboratoryjnych na rdzeniach. I tutaj ukazuje się nowy problem w odniesieniu do integracji wyników, która może być definiowana jako efekt skali. Procesy występujące w basenie sedimentacyjnym obserwowane są za pomocą wskaźników metod sejsmicznych opisujących zjawiska w skali makro i mikro (co wspierane jest przez profilowania geofizyki otworowej), podczas gdy badania laboratoryjne odnoszą się do skali mikro i nano.

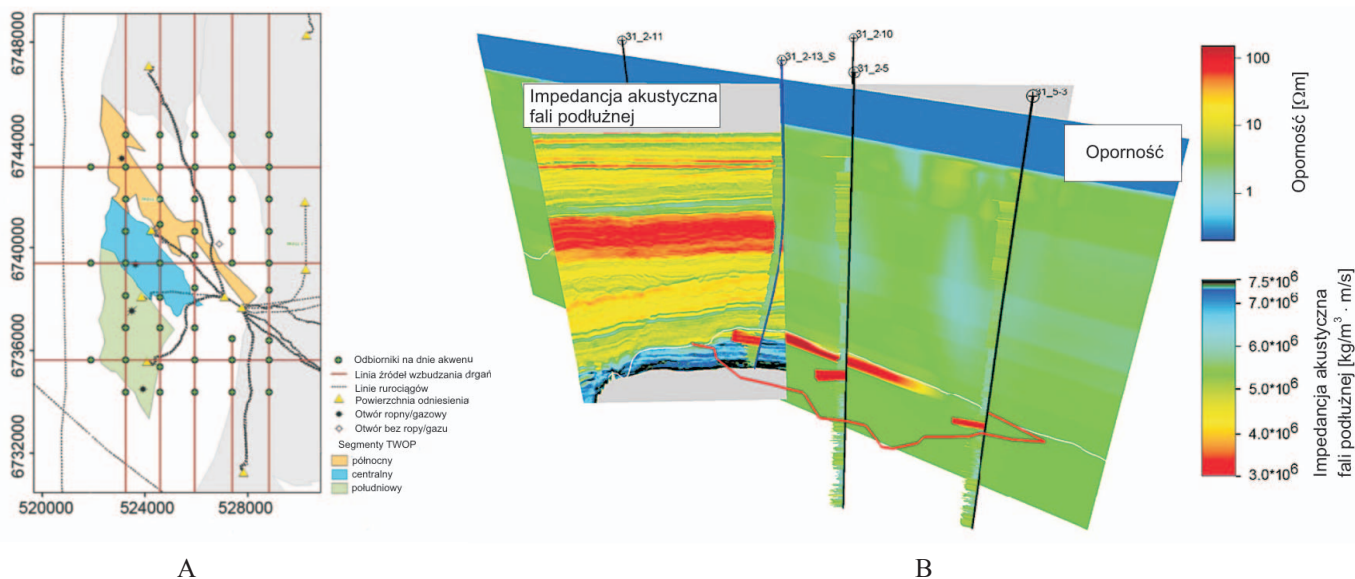
Określenie w przyszłości rodzaju procesów, w których konieczne będzie wykorzystanie danych pomierzonych zarówno w skali nano (np. średnica porów w formacji ilasto-mułowcowej), jak i mikro (np. rozkład wielkości ziaren w analizie granulometrycznej na płytkach cienkich) oraz makro (charakterystyka geologiczno-geofizyczna ośrodka), wraz z ich wspólnymi zależnościami, zmiennymi w funkcji czasu, będzie niewątpliwie przedmiotem wielu testów i opracowań. W fazie prowadzenia badań formacji łupkowych wiele z najważniejszych kwestii i problemów może zostać rozwiązanych przy użyciu atrybutów

sejsmicznych (identyfikacja potencjalnie wysokiego TOC (*total organic carbon*), poziom refleksyjności wityritu). Podczas fazy oceny zasobów typowe działania skupiają się na szacowaniu potencjału złożowego, wstępnym rozpoznaniu i ustaleniu lokalizacji. Jak widzimy, różnorodność kierunków działań implikuje bardzo bogaty zestaw parametrów [3, 11], a więc również różnorodność skali i konieczność ustalenia zasady korekty ich wielkości. Najnowsze doniesienia na temat permanentnie optymalizowanej metodyki poszukiwań gazu w formacjach łupkowych pokazują, że uwzględnienie efektu skali jest wynikiem potrzeby chwili. W artykule *Integrated workflows for shale gas and case study results for the Horn River Basin, British Columbia, Canada* autorzy, D. Close i inni [2], piszą, że rola sejsmiki w poszukiwaniu gazu z formacji łupkowych, czy bardziej ogólnie w złożach niekonwencjonalnych, wyewoluowała do roli dużo istotniejszej niż proste narzędzie do obrazowania struktur. Jako jedyne dostępne, zdalne źródło informacji sejsmiki 3D może być użyta do określenia, czy otwory są projektowane tak, by penetrowały tzw. *sweet spots*, czyli miejsca, które najczęściej posiadają dobre warunki zbiornikowe dla gazu (np. relatywnie wyższą porowatość i nasycenie gazem), a cechy formacji zbiornikowej (m.in. sztywność, kompaktacja, istnienie barier dla przepływu płynów) nie przeciwdziałają udostępnieniu obiektu złożowego.

W prezentowanym schemacie (rysunek 4) interpretacji ilościowej trzykrotnie pojawia się słowo „kalibracja”. Pamiętać należy, że nie istnieje poprawna kalibracja bez uwzględnienia



Rys. 4. Kluczowe etapy w schemacie zintegrowanej ilościowej interpretacji danych geologicznych i geofizycznych dla formacji łupkowych [2]



Rys. 5. A – mapa infrastruktury obiektu TWOP (Troll West Oil Province), unaoczniająca współzależność wielu czynników warunkujących proces produkcyjny; B – widok 3D obiektu Troll West Oil Province (według [7])

efektu skali. Kalibrować musimy świadomie, określając precyzyjnie, do jakiego poziomu rozmiarów i wielkości powinniśmy dotrzeć w danym projekcie badawczym.

Podobne zagadnienia naświetlają autorzy J. P. Morten i inni [7]. Intensywne poszukiwanie związku wielu parametrów i ustalenie platformy wspólnej interpretacji, jak też powiązanie wyników badań powierzchniowych, otworowych oraz laboratoryjnych przedstawiono na rysunkach (rysunekach 5A i B).

Jednym z wyzwań podczas wczesnej fazy poszukiwań złóż gazu z formacji łupkowych jest limitowana ilość dostępnych danych, przy czym najbardziej powszechne są tu dane dotyczące TOC (*total organic carbon*) oraz dane z pirolizy Rock-Eval. Własności zbiornikowe łupków (porowatość, przepuszczalność, nasycenie gazem/ropą/wodą) tradycyjnie nie były badane, po części jako konsekwencja napotykanymi trudności w badaniu takich skał. Chociaż metody badawcze zostały rozwinięte, by poradzić sobie z analizami bardzo drobnoziarnistych skał, jest to tylko niewielka pomoc w badaniu istniejących już otworów. Analizy powinny być wykonywane na rdzeniach, co zasadniczo nie jest do końca możliwe w przypadku łupków. Własności zbiornikowe formacji łupkowych mogą być oszacowane na podstawie wyników analiz geofizyki wiertniczej, choć i tu dostęp do najnowszych danych jest limitowany. Warto zwrócić uwagę, że dobry model petrofizyczny wymaga kalibracji wyników laboratoryjnych, a te z kolei zależne są od dostępności rdzeni, co tworzy krąg zamknięty trudnych niekiedy do spełnienia uwarunkowań.

W zależności od ilości dostępnych danych, analizy eksploatacji mogą być tworzone za pomocą klasycznej obróbki

statystycznej, za pomocą której z danych z wcześniejszych okresów można, na podstawie trendów, wyekstrapolować przyszły poziom produkcji, typowo z końcowym jej spadkiem. Tego typu szacowania są powszechne, gdy otwory nie zostały dobrze scharakteryzowane. Dostępność większej ilości informacji o formacji zbiornikowej pozwala na stworzenie numerycznych modeli, np. przepływu gazu w skałach o przepuszczalnościach rzędu nanodarcy.

Jedną z najważniejszych własności, jakie trzeba zbadać, jest zdolność do tworzenia się szczelin. Przy pracy z formacjami łupkowymi konieczne staje się, by ze skały cechującej się wysokim stopniem kompaktacji przejść do skały zeszcelinowanej (w skali nano). Właściwa charakterystyka obiektu zeszcelinowanego może przyczynić się do zwiększenia produkcji, a także dostarczy niezbędnych danych do podejmowania kluczowych decyzji w przyszłości, np. o lokalizacji kolejnych odwiertów. Jednakże ze względu na heterogeniczność i anizotropię formacji łupkowych ich dokładna charakterystyka nie jest zadaniem łatwym, dlatego konieczne staje się tu podejście interdyscyplinarne. To z kolei oznacza różne obszary, wielkości, pomiary, jednostki, jak też zróżnicowanie czasu wykonania określonych badań i pomiarów. Jest to równoznaczne z koniecznością uwzględnienia efektu skali.

Łączenie wyników pomiarów różnych metod opartych na obserwacji bardzo różnorodnych procesów fizycznych, mechanicznych, a nawet chemicznych zachodzących w głębi ośrodka geologicznego to wielkie wyzwanie, będące jednocześnie koniecznością współczesnych nauk o Ziemi. Wyzwanie, któremu nie sprostamy bez zdefiniowania warunków uwzględnienia efektu skali.

Eksperyment obliczeniowy jako próba ilościowej oceny efektu skali na modelowym przykładzie obiektu złożowego

Dla celów eksperymentów obliczeniowych zbudowano obiekt modelowy, w którego parametryzacji wykorzystano wyniki interpretacji złożowej obiektu LMG i gdzie warstwą kolektorską jest dolomit główny Ca2 o stosunkowo dobrze rozpoznanej miąższości. Te właśnie wartości potraktowano jako parametr startowy. Jest to parametr o tyle wiarygodny, że ze względu na dostępność rdzeni wiertniczych może być z dużą dokładnością zmierzony bezpośrednio na rdzeniu i dodatkowo w prosty sposób skorelowany z wynikami badań geofizyki otworowej i powierzchniowej, szczególnie sejsmiki.

Zastosowana metodyka i oprogramowanie wprowadzenia efektu skali zostały opracowane w ramach prac statutowych [4, 13] jako rozwinięcie makroprocedur systemu Surfer firmy Golden Software.

Ze względu na to, że celem artykułu jest uświadomienie czytelnikowi istnienia problemu, a nie rozwiązywanie konkretnych przypadków, stosunkowo proste podejście zastosowane przez autorów wydaje się w przypadku niniejszej pracy rozsądne, co nie oznacza, że autorzy nie podejmą próby przejścia w przyszłych publikacjach od wyników badań modelowych do badań rzeczywistych parametrów obszaru złożowego (uwzględniającego efekt skali).

Sama procedura wprowadzająca uwzględnienie efektu skali jest w przypadku przeprowadzonych eksperymentów niczym innym jak zastosowaniem jednego z działań algebraicznych imitujących rozwiązanie funkcyjnie znanej zależności parametru startowego z wieloma innymi parametrami złożowymi na dostępnych danych i zbadaniem rezultatów takiego działania. Jako że zależności pomiędzy danymi uzyskanymi z pomiarów w różnych skalach są zazwyczaj skomplikowane, zastosowane w eksperymencie obliczeniowym zależności funkcyjne odzwierciedlają konkretną sytuację złożową w odniesieniu do położenia obiektów Grotów (G) i Międzychód (M), bowiem tylko w ich otoczeniu parametr startowy (h) był modyfikowany.

Zgodnie z zaproponowaną procedurą efekt parametryzacji ośrodka i wprowadzenia efektu skali realizowany jest pod kątem uwzględnienia trzech podstawowych miar:

- 1) lokalizacji obiektu w przestrzeni (na mapie),
- 2) wielkości siatki, w jakiej kreślona jest mapa (wprowadzane parametry i skala),
- 3) ilościowych efektów zastosowania wybranych funkcji przeliczających (w odniesieniu do modelu w wersji bazowej i przetworzonej).

Jak wspomniano uprzednio, teoretyczny model bazowy wykorzystywany do praktycznego przedstawienia efektu skali opracowany został na podstawie rzeczywistego modelu geologicznego obiektu LMG, a szczególnie na bazie opisu

strukturalnego (kontakt powierzchni, miąższość) złóż Grotów i Międzychód. Takie rozwiązanie ułatwia ocenę uzyskanych wyników, lokalizując je w konkretnych realiach przestrzeni geologicznej.

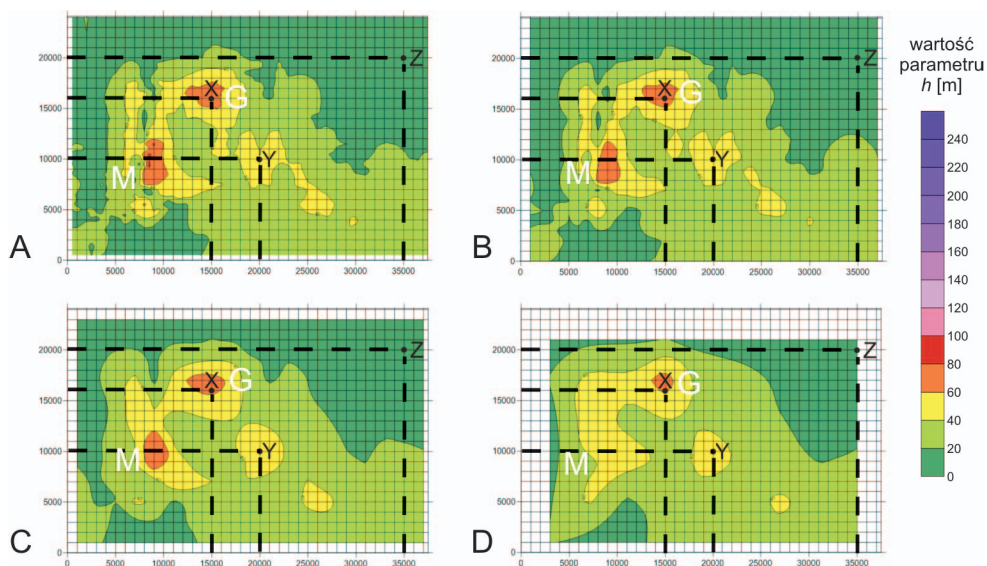
Przy tworzeniu zbiorów parametrów pochodnych (przetworzonych) posłużono się zależnościami empirycznymi, co imitowało wykorzystanie wyników pomiarów różnorodnych metod geofizycznych. Takie podejście stanowi znaczne uproszczenie sytuacji rzeczywistej, pozwala jednakże na wstępne rozpoznanie zjawiska efektu skali.

Jako przykład i przybliżenie sytuacji występowania efektu skali w praktyce wyobraźmy sobie, że dysponujemy różnie pozyskanymi wartościami pomiaru takiego parametru ośrodka jak prędkość propagacji sprężystej fali akustycznej. Pole prędkości dla wybranej formacji geologicznej uzyskane z danych sejsmicznych opisane jest wartościami z przedziału np. 5300÷6200 m/s. Ten sam parametr uzyskany dla tej samej formacji i przestrzeni, ale na podstawie wyników pionowego profilowania sejsmicznego opisany jest wartościami z przedziału 4900÷6700 m/s. Wyniki pomiarów laboratoryjnych na próbkach skał przesuwają przedział wartości ku zdecydowanie wyższym wartościom, tzn. od 5700 m/s do 7200 m/s. Nasuwa się więc pytanie: jak wybrać poprawne wartości prędkości do tzw. transformacji głębokościowej informacji sejsmicznych zapisanych w domenie czasu, aby jej wynik był możliwie najbliższy informacjom o głębokości zalegania badanej formacji pozyskanym na podstawie wierceń? Rozwiązanie zadania przedstawionego jako jedno z wielu występujących w praktyce leży w klasie zagadnienia efektu skali i w każdym konkretnym przypadku wymaga uwzględnienia informacji o analizowanym obszarze geologicznym tak, aby zrozumieć i uzasadnić różne relacje własności mierzonych różnymi metodami. Równocześnie rozpoznanie powyższych współzależności można też zrealizować, odtwarzając istniejące związki na drodze obliczeń modelowych, co jest właśnie przedmiotem eksperymentu obliczeniowego.

Warto zauważyć, że przyjęcie zbyt dużego oczka siatki prawie uniemożliwia identyfikację obiektu Międzychód (M).

Modyfikacje bazowej wersji modelu startowego odnoszą się do dwóch bloków danych wybranych z obszaru mapy, a mianowicie do nazwanych umownie bloków Grotów i Międzychód, czyli obszarów położonych w obrębie obiektów eksploatowanych, gdzie z reguły (ze względu na eksploatację) dysponuje się największą ilością danych (w omawianym przypadku „wersje przetworzone”).

Koncepcję budowy modeli „przetworzonych” oparto na oczywistym, potwierdzonym w praktyce założeniu, że



Rys. 6. Prezentacja map dla teoretycznego modelu obiektu złożowego (model bazowy), którego parametrem jest miąższość warstwy zbiornikowej dolomitu głównego pomierzona w otworach i wyinterpretowana sejsmicznie

Tablica 1. Wyniki analizy wpływu zróżnicowania wielkości skali obranej do konstrukcji mapy (wielkość gridu) oraz bezwzględnych wartości wykorzystanych parametrów na poprawność odtworzenia właściwości ośrodka

Rozmiar oczka siatki mapy (grid)	Wartości parametru odczytane w wybranych punktach (X, Y, Z) mapy			Rozproszenie wartości parametru					
	X (15 000; 16 000)	Y (20 000; 10 000)	Z (35 000; 20 000)	wartości			procenty [%]		
				X	Y	Z	X	Y	Z
500	74	40	16	13	4	4	17,57	9,09	25,00
1000	71	42	16						
2000	62	44	13						
4000	61	41	12						

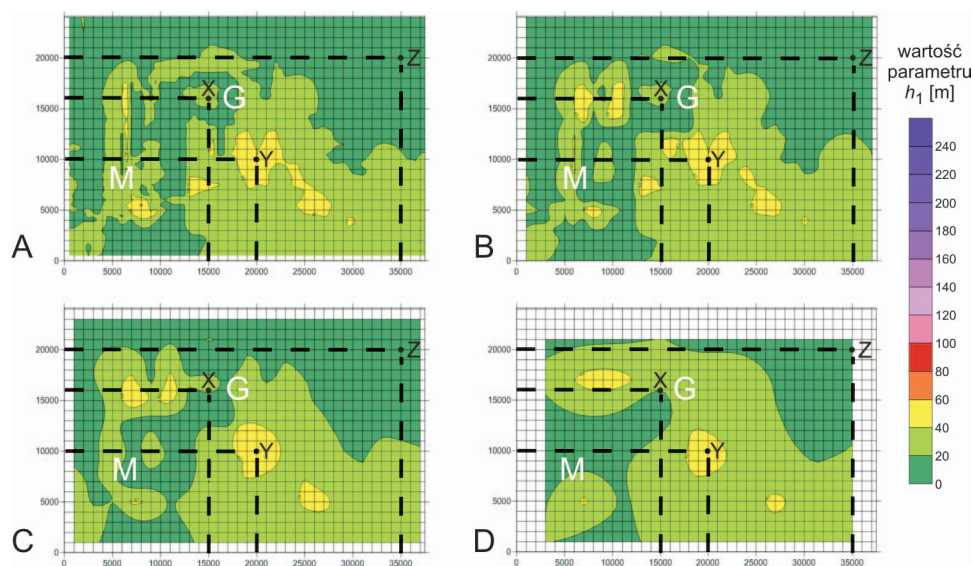
procedury związane z eksploatacją złoża oraz sam proces eksploatacji zmieniają właściwości m.in. petrofizyczne, zbiornikowe ośrodka (jak też często są proporcjonalne do miąższości formacji zbiornikowej). Są to parametry umowne, nie nazywamy ich konsekwentnie (np. nasycenie, porowatość itd.), co nie ma zresztą żadnego wpływu na uzyskiwane wyniki. Na rysunkach 7–11 przedstawiono kolejne realizacje tego pomysłu. Model w opcji przetworzonej 1 (rysunek 7) uzyskano, obniżając w otoczeniu obiektów Grotów (G) i Międzychód (M) wartość parametru startowego h o współczynnik $R = 0,33$. Model w opcji przetworzonej 2 powstał poprzez podwyższenie wartości parametru startowego o współczynnik $R = 3$ (rysunek 8). Model przetworzony w opcji 3 uzyskano niejednakowo, różnicując parametr bazowy w otoczeniu obiektów G i M $\{R(G) = 0,33; R(M) = 3\}$. Podobnie utworzono model przetworzony w opcji 4, odnosząc jedynie współczynniki $\{R(G) = 3; R(M) = 0,33\}$ do różnych obiektów.

Kolejne opcje przetworzenia modelu bazowego mają na celu nie tylko ukazanie wpływu gridu na jednoznaczność mapy. Podstawowa reguła: mniejsze oczko siatki – dokładniejsze odtworzenie faktów jest znana i w praktyce najczęściej poprawnie stosowana i dobierana w zależności od rozmiarów obiektów. Nie jest natomiast powszechnie uwzględniany,

szczególnie w interpretacji interdyscyplinarnej, fakt często bardzo znaczących błędów powstających przy „nakładaniu” map wyników uzyskanych z wielu różnych pomiarów, których wcale nie eliminuje numeryczna realizacja komputerowa takich map. Dlatego, aby nie prowadzić obliczeń w przestrzeni nierzeczywistej, do tworzenia modeli nie wykorzystano generatora liczb losowych, natomiast modyfikowano model bazowy (startowy) zgodnie z ilościowo określonymi relacjami.

Już wyniki stosunkowo prostych eksperymentów obliczeniowych, przedstawione na rysunkach 6–10, wskazują na konieczność wcześniejszego przygotowania map różnorodnych parametrów, aplikowanych do interpretacji zintegrowanej, przede wszystkim poprzez modyfikację gridu, z jakim tworzone są mapy. Przykładowo, porównując mapę modelu w wersji bazowej (rysunek 6, tablica 1 – grid 500) z mapą modelu w wersji przetworzonej (rysunek 7, tablica 2 – grid 4000), trudno rozpoznać, że prezentowane parametry dotyczą tych samych obiektów. W strefie poza zasięgiem umownie określanego „wpływu eksploatacji” (otoczenia punktu Z) zróżnicowanie wartości jest bardziej nieuchwytnie, gdy rozproszenie danego parametru jest mniejsze – 25% i 12,5%.

Możliwość niewłaściwej identyfikacji obszaru o anomalnych wartościach parametru, a więc jednocześnie możliwość



Rys. 7. Prezentacja map dla teoretycznego modelu obiektu złożowego (model przetworzony, opcja 1)

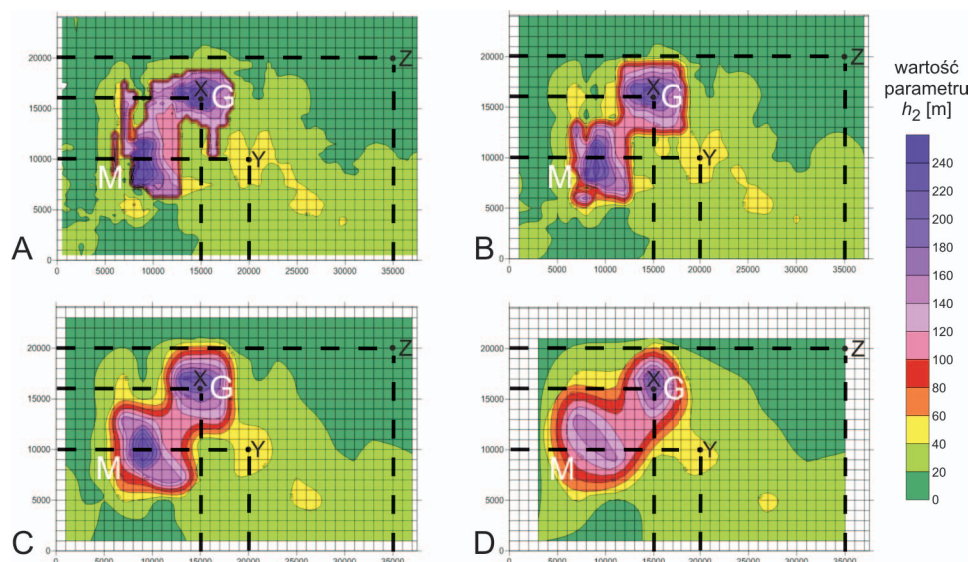
Tablica 2. Analiza wpływu zróżnicowania wielkości gridu oraz bezwzględnych wartości wykorzystanych parametrów na poprawność odtworzenia właściwości osrodka (liniowa proporcjonalność R analizowanych parametrów startowych i przetworzonych stała na obszarze bloków G i M, $R = 0,33$)

Rozmiar oczka siatki mapy (grid)	Wartości parametru odczytane w wybranych punktach (X, Y, Z) mapy			Rozproszenie wartości parametru					
	X (15 000; 16 000)	Y (20 000; 10 000)	Z (35 000; 20 000)	wartości			procenty [%]		
				X	Y	Z	X	Y	Z
500	24	40	16	4	4	2	16,67	9,09	12,50
1000	24	40	16						
2000	21	44	14						
4000	20	41	15						

błędnej lokalizacji odwiertu do eksploatacji ze względu na zróżnicowanie siatki, jest mniejsza (rysunki 6, 8, tablice 1, 3), gdy rozproszenie analizowanego parametru jest większe (25% i 87,5%) – co można utożsamiać z większą rozdzielczością pomiarów.

Ciekawe spostrzeżenie dotyczy możliwości identyfikacji

pozycji punktów X, Y i Z zlokalizowanych na modelu w wersji bazowej kolejno w obszarze silnej dodatniej anomalii parametru (X), w obszarze wyróżnionym (Y) oraz w obszarze tła (Z). W przypadku liniowej zależności parametru na całym obszarze mapy możliwość identyfikacji tych punktów pozostaje podobna, chociaż raz słabsza (opcja 1), a raz silniejsza (opcja 2).



Rys. 8. Prezentacja map dla teoretycznego modelu obiektu złożowego (model przetworzony, opcja 2)

Tablica 3. Analiza wpływu zróżnicowania wielkości gridu oraz bezwzględnych wartości wykorzystanych parametrów na poprawność odtworzenia właściwości ośrodka (liniowa proporcjonalność R analizowanych parametrów startowych i przetworzonych stała dla obiektów G i M, $R = 3$)

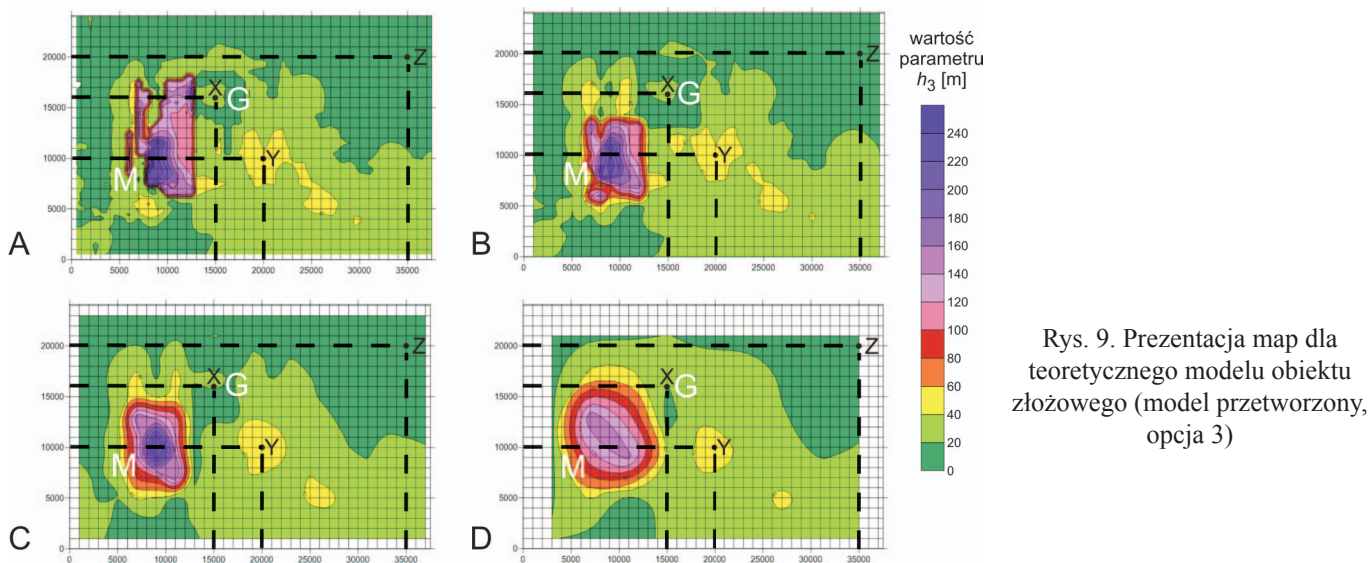
Rozmiar oczka siatki mapy (grid)	Wartości parametru odczytane w wybranych punktach (X, Y, Z) mapy			Rozproszenie wartości parametru					
	X (15 000; 16 000)	Y (20 000; 10 000)	Z (35 000; 20 000)	wartości			procenty [%]		
				X	Y	Z	X	Y	Z
500	222	40	16	40	4	14	18,02	9,09	87,50
1000	222	40	16						
2000	187	44	9						
4000	182	41	2						

W przypadku nieliniowej zależności analizowanych parametrów (rysunek 9, tablica 4) możliwość identyfikacji (czyli wyróżnienia z tła) pozycji punktu X praktycznie znika, silna dodatnia anomalia parametru ulega przesunięciu, zaś punkty Y i Z pozostają we wcześniejszych zależnościach. Procentowa wartość rozproszenia względnego jest na poziomie 18,75%.

Prezentowany na rysunku 10 układ parametrów (wersja przetworzona 4) wskazuje na podobną jak w wersji bazowej możliwość identyfikacji obiektów X, Y, Z, czyli zgodnie

z przyjętymi warunkami początkowymi konstrukcji modelu bazowego obecność obiektów o dobrej możliwości wyróżnienia z tła jest wysoka. Względne rozproszenie procentowe parametru wynosi 81,25%.

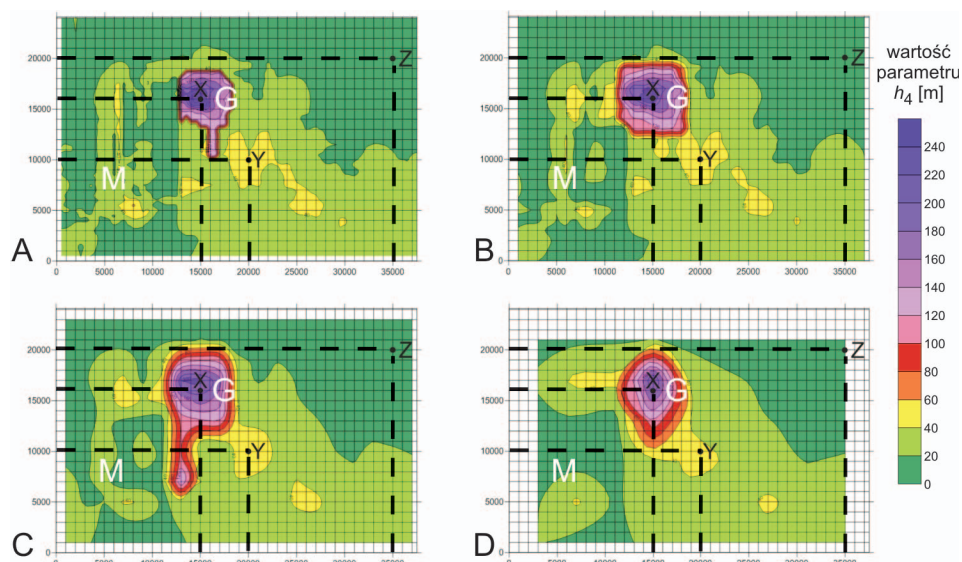
Kolejny przykład (rysunek 11, tablica 6) prezentuje analizę wpływu rozproszenia parametru na badanym obszarze, przy założeniu stałego gridu konstrukcji mapy (1000). Możliwość wyróżnienia punktów X, Y, i Z jest tym większa, im większe rozproszenie wartości parametrów.



Rys. 9. Prezentacja map dla teoretycznego modelu obiektu złożowego (model przetworzony, opcja 3)

Tablica 4. Wynik analizy wpływu zróżnicowania wielkości gridu oraz bezwzględnych wartości wykorzystanych parametrów na poprawność odtworzenia właściwości ośrodka (stała proporcjonalność R analizowanych parametrów startowych i przetworzonych, nieliniowo zróżnicowana w zależności od położenia obiektów złożowych, bloki $R(G) = 0,33$, $R(M) = 3$)

Rozmiar oczka siatki mapy (grid)	Wartości parametru odczytane w wybranych punktach (X, Y, Z) mapy			Rozproszenie wartości parametru					
	X (15 000; 16 000)	Y (20 000; 10 000)	Z (35 000; 20 000)	wartości			procenty [%]		
				X	Y	Z	X	Y	Z
500	24	40	16	4	4	3	16,67	9,09	18,8
1000	24	40	16						
2000	21	44	13						
4000	20	41	14						



Rys. 10. Prezentacja map dla teoretycznego modelu obiektu złożowego (model przetworzony, opcja 4)

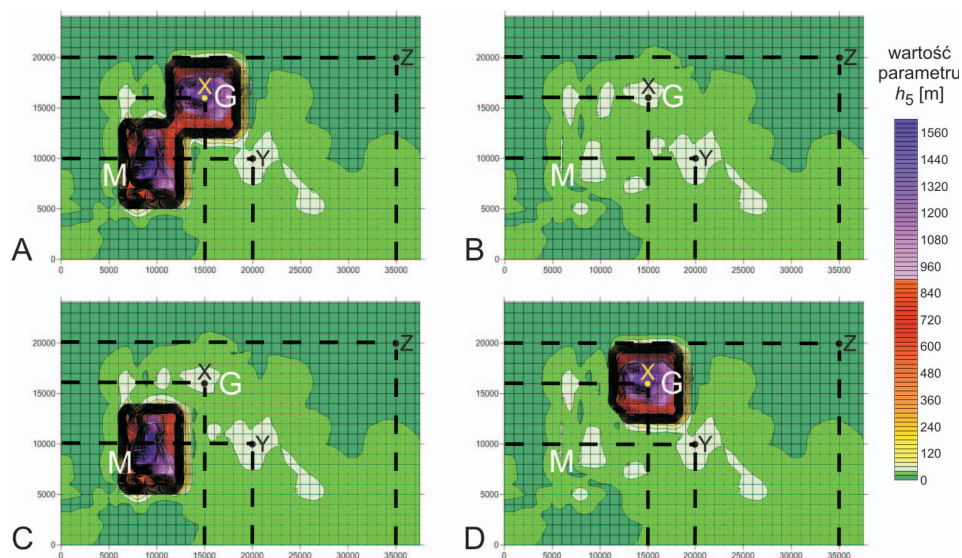
Tablica 5. Wynik analizy wpływu zróżnicowania wielkości gridu oraz bezwzględnych wartości wykorzystanych parametrów na poprawność odtworzenia właściwości osrodka (proporcjonalność R analizowanych parametrów startowych i przetworzonych nieliniowo zróżnicowana w zależności od położenia obiektów złożowych, $R(G) = 3$, $R(M) = 0,33$)

Rozmiar oczka siatki mapy (grid)	Wartości parametru odczytane w wybranych punktach (X, Y, Z) mapy			Rozproszenie wartości parametru					
	X (15 000; 16 000)	Y (20 000; 10 000)	Z (35 000; 20 000)	wartości			procenty [%]		
				X	Y	Z	X	Y	Z
500	222	40	16	40	4	13	18,02	9,09	81,3
1000	222	40	16						
2000	187	44	10						
4000	182	41	3						

Przedstawione wyniki potwierdzają logicznie nasuwające się wnioski o charakterze jakościowym, zdarzające się szczególnie w zespołach badawczych z bogatym doświadczeniem w zakresie interpretacji zintegrowanej.

Jednak na współczesnym etapie wyzwań stawianych naukom geologicznym i geofizycznym oceny jakościowe stano-

wią jedynie wstępną informację. Do lokalizowania złóż i ich opisu niezbędne są informacje o charakterze ilościowym. W prezentowanej pracy odniesiono się do wybranych ocen statystycznych (rozkłady, histogramy), stanowią one bowiem łatwo i szybko dostępną wskazówkę o sposobie włączenia wybranego parametru do zestawu danych poddanych łącznej,



Rys. 11. Prezentacja map dla teoretycznego modelu obiektu złożowego (model przetworzony, opcja 5)

Tablica 6. Analiza wpływu zróżnicowania zakresu wartości analizowanych parametrów dla różnych opcji przetworzenia modelu bazowego przy założonym stałym gridzie 1000 (proporcjonalność R analizowanych parametrów startowych i przetworzonych nieliniowo zróżnicowana w zależności od położenia obiektów złożowych, A: $R(G) = 20; R(M) = 20$; B: $R(G) = 0,7; R(M) = 0,7$; C: $R(G) = 0,7; R(M) = 20$; D: $R(G) = 20; R(M) = 0,7$)

Rozmiar oczka siatki mapy (grid)	Wartości parametru odczytane w wybranych punktach (X, Y, Z) mapy			Rozproszenie wartości parametru
	X (15 000; 16 000)	Y (20 000; 10 000)	Z (35 000; 20 000)	
1000	1413	42	16	1397
	49	42	16	33
	49	42	16	33
	1413	42	16	1397

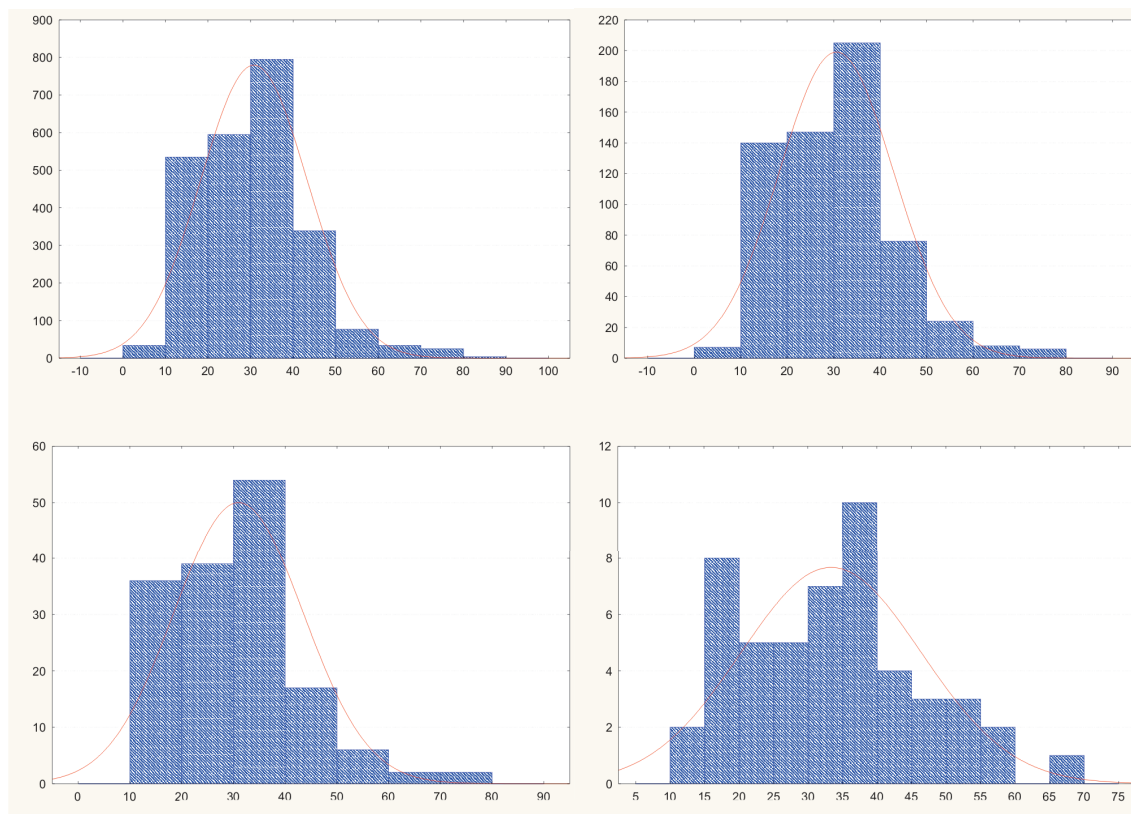
zintegrowanej interpretacji. Co szczególnie ważne, zawierają informacje pozwalające na przedstawienie sugestii dotyczących opcji przetworzenia różnych mierzonych parametrów w taki sposób, aby nie utraciły własnej specyfiki, a jednocześnie poprawnie i spójnie z pozostałymi odzwierciedlały ośrodek.

W gronie interpretatorów często pojawia się konieczność wyjaśnienia znacznych rozbieżności w wynikach pomiarów tego samego parametru w identycznej lokalizacji w przestrzeni geologicznej, ale wykonanych różnymi metodami (np. pomiary laboratoryjne na próbkach rdzeni oraz pomiary profilowań geofizycznych w otworach).

W przypadku pojedynczych pomiarów lub statystycznie mało licznych zestawów danych można usiłować wyjaśnić

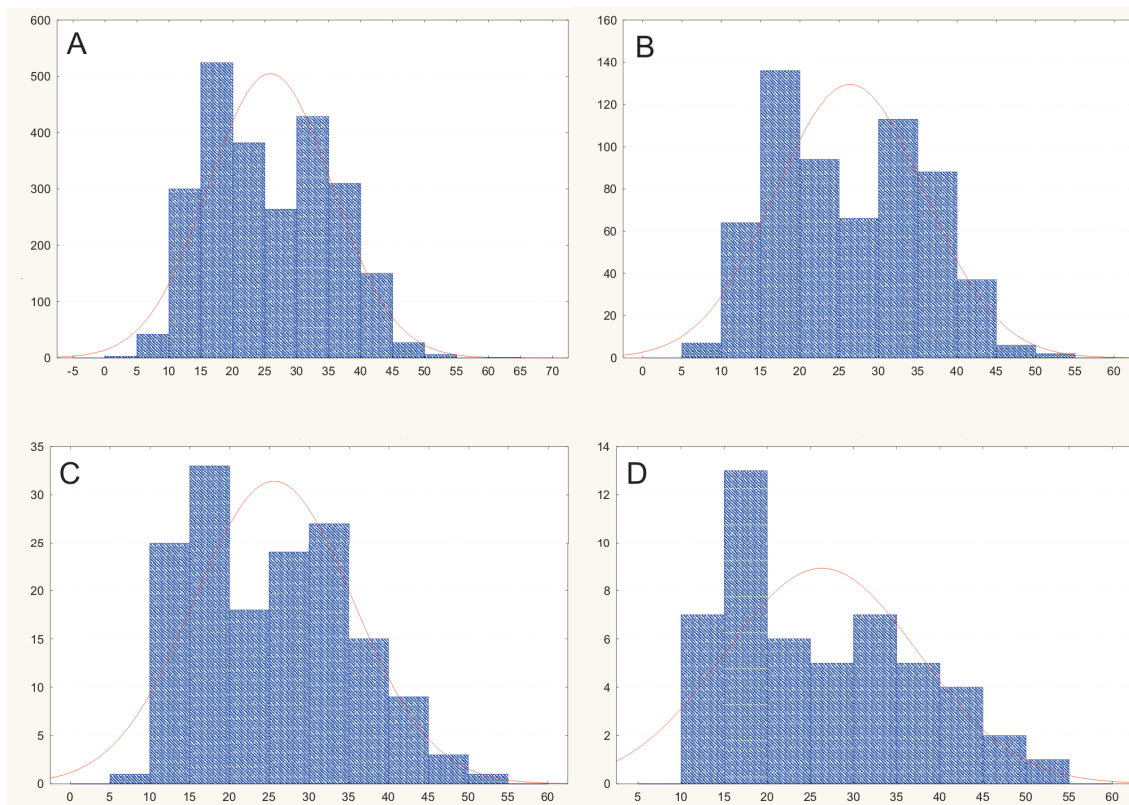
problem czysto fizycznie (np. nieoczekiwane anomalne na-prężenie określone na próbkach często znajduje wyjaśnienie poprzez wartości ciśnień porowych występujących w warunkach geologicznych *in situ*). W takiej sytuacji (opierając się wyłącznie na skromnych doświadczeniach autorów) proponować należy analizy statystyczne zbiorów danych poddanych łącznej interpretacji.

Na aktualnym etapie wprowadzenia w zagadnienie skali w niniejszej publikacji przedstawiono wyniki analizy funkcji histogramu dla różnych opcji modeli (bazowego i przetworzonych). Rozkłady przedstawiono w analogicznym układzie jak mapy. Opis A, B, C, D odniesiono do zmieniających się wartości gridu (500, 1000, 2000, 4000).



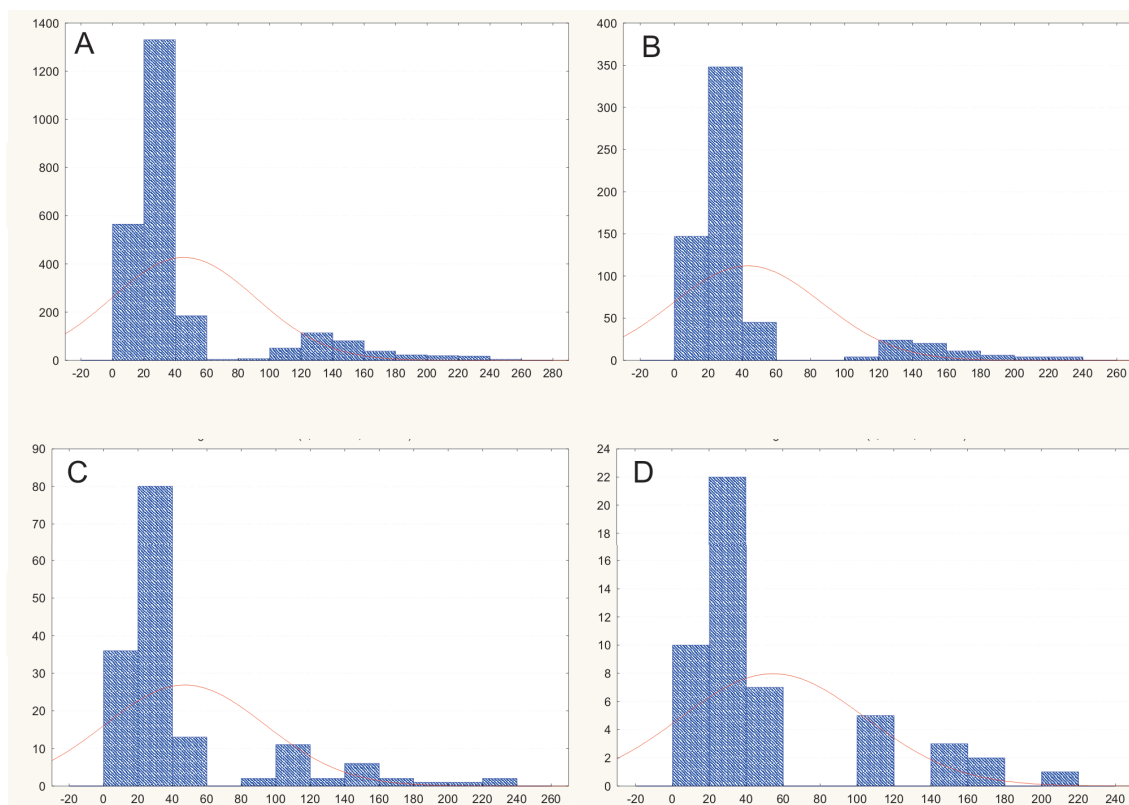
Rys. 12. Wyniki analizy statystycznej (histogramów) zbioru parametrów opisujących obiekt złożowy, w którym symulowano występowanie efektu skali (model bazowy); oś x – wartość parametru h , oś y – liczba prób z danego przedziału

Liniowa proporcjonalność R analizowanych parametrów startowych i przetworzonych stała na obszarze mapy, $R = 0,33$



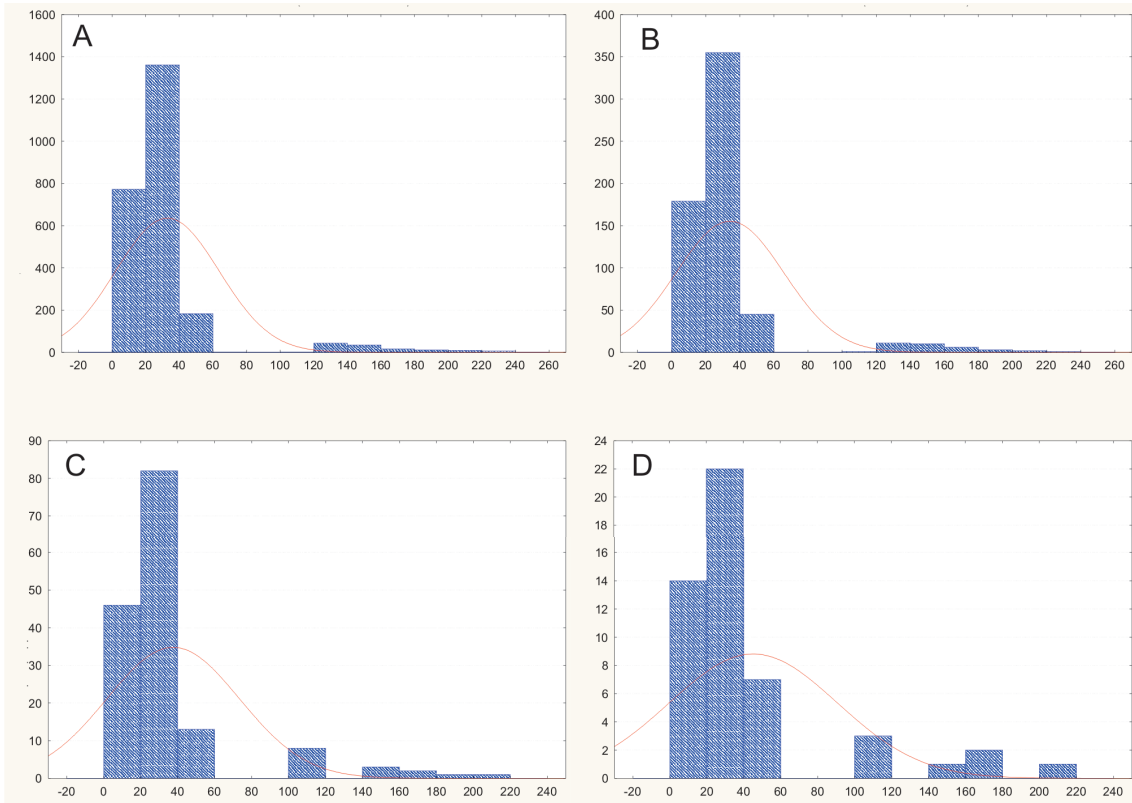
Rys. 13. Wyniki analizy statystycznej (histogramów) zbioru parametrów opisujących obiekt złożowy, w którym symulowano występowanie efektu skali (opcja 1); oś x – wartość parametru h_1 , oś y – liczba prób z danego przedziału

Liniowa proporcjonalność R analizowanych parametrów startowych i przetworzonych stała na obszarze mapy, $R = 3$



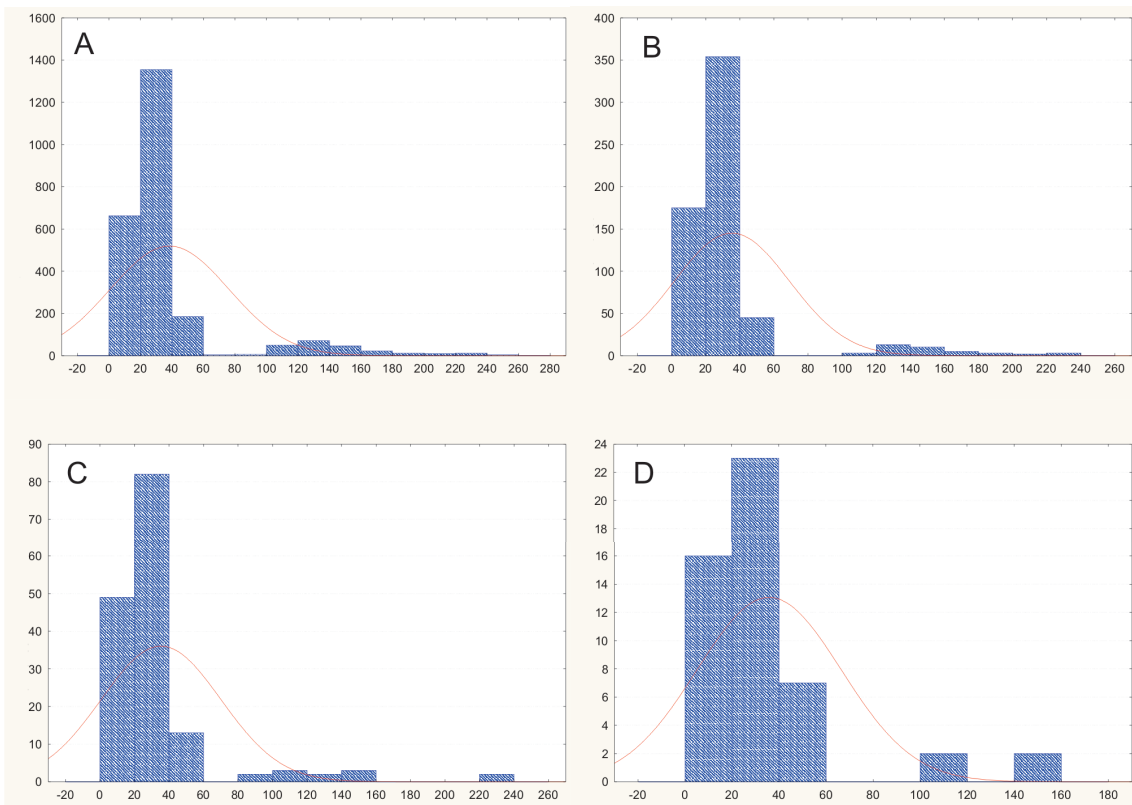
Rys. 14. Wyniki analizy statystycznej (histogramów) zbioru parametrów opisujących obiekt złożowy, w którym symulowano występowanie efektu skali (opcja 2); oś x – wartość parametru h_2 , oś y – liczba prób z danego przedziału

Proporcjonalność R analizowanych parametrów startowych i przetworzonych nieliniowo zróżnicowana w zależności od położenia obiektów złożowych, $R(G) = 0,33$; $R(M) = 3$



Rys. 15. Wyniki analizy statystycznej (histogramów) zbioru parametrów opisujących obiekt złożowy, w którym symulowano występowanie efektu skali (opcja 3); oś x – wartość parametru h_3 , oś y – liczba prób z danego przedziału

Proporcjonalność R analizowanych parametrów startowych i pochodnych nieliniowo zróżnicowana w zależności od położenia obiektów złożowych, $R(G) = 3$; $R(M) = 0,33$



Rys. 16. Wyniki analizy statystycznej (histogramów) zbioru parametrów opisujących obiekt złożowy, w którym symulowano występowanie efektu skali (opcja 4); oś x – wartość parametru h_4 , oś y – liczba prób z danego przedziału

Analiza założonych, aproksymowanych za pomocą krzywej Gaussa (rozkład normalny) rozkładów wskazuje na pewne prawidłowości. Zauważa się, że rozwartość tej krzywej (gradient) uwidacznia dokładność odwzorowania próby z danego przedziału wartości.

Gęstość siatki, z jaką tworzone są mapy, nie wpływa decydująco na kształt histogramu, co można interpretować jako poprawne odtworzenie globalnych cech zbioru. Wysoka liczebność niektórych przedziałów wartości danego parametru pozwala na selekcję wartości anomalnych, jak również na wybór przedziału, w którym należałoby zageścić krok obliczania histogramu dla analizy anomalii (np. typu *sweet spot*).

Natomiast dla identycznego gridu zauważa się duże różnice kształtu histogramów parametrów przetworzonych h_i (h_1, h_2, \dots, h_5), gdzie $h_i = f_i(h)$:

h – parametr modelu bazowego odtwarzający rzeczywistą właściwość obiektu geologicznego (w danym przypadku miąższość),

f_i – dowolna funkcja zmieniająca wartość parametru h (w pewnym przybliżeniu można to „przetworzenie” traktować jako ekstrakcję atrybutów danych sejsmicznych czy wykorzystanie wyników dowolnej metody geofizycznej).

Model bazowy (rysunek 12), stosunkowo dobrze aproksymowany rozkładem normalnym, dla opcji 1 przybiera wyraźny charakter bimodalny (rysunek 13) oraz niesymetryczny dla kolejnych opcji (rysunki 14–16).

Zaproponowane analizy mają na celu selekcję i przygotowanie zbiorów danych do szeroko już stosowanych procedur

interpretacji geostatystycznej, których efektywność zależy silnie od właściwego przygotowania danych wejściowych i wyeliminowania sytuacji, w której na przykład przypadkowo nadano wysoką rangę zbiorowi o małej wadze statystycznej.

Na podstawie przedstawionego przykładu obliczeniowego i analizy zbiorów „parametrów przetworzonych” w postaci histogramów dla badanego obiektu modelowego, bazującego na rzeczywistej sytuacji geologicznej, można proponować przyjęcie następujących danych do konstrukcji map w ujęciu interdyscyplinarnym:

- wielkość oczka siatki gridu – 2000, co pozwala na wyróżnienie obiektów G i M z pomocą „parametrów przetworzonych” (h_1, h_2, \dots, h_5), porównywalnych z parametrem bazowym (h) – najczęściej najsilniejszą informacją, jaką dysponuje geofizyk czy geolog,
- opcji przetworzenia 3 nadać dużą wagę w stosunku do pozostałych, pozwala bowiem na identyfikację obiektów G i M (rysunek 9). Magnituda tego parametru (h_3 – nieokreślonego fizycznie jednoznacznie, co w niczym nie umniejsza prawdziwości powyższej obserwacji) jest zróżnicowana i dostatecznie rozdzielcza. Powyższe potwierdza również kształt histogramu – dwie dominujące, ale różne wartości (rysunek 15). Dla przeciwstawienia można zwrócić uwagę na opcję przetworzenia 2 (parametr h_2), w przypadku której obiekty G i M reprezentowane są identycznym przedziałem wartości, pomimo że w rzeczywistości geologicznej są to dwa różne obiekty (rysunki 8 i 14).

Podsumowanie

Przedstawione studium literaturowe i wykonane badania zaprezentowane w niniejszej publikacji pozwalają na przedstawienie poniższych wniosków:

Zjawisko występowania efektu skali obecne jest w bardzo szerokim spektrum dziedzin życia i różnorodnych badań naukowych. Bez jego uwzględnienia nie sposób dokonywać prawidłowych interpretacji wielu zjawisk, zwłaszcza jeżeli dane, nad którymi pracujemy, pochodzą z analiz różnych metod, ponadto wykonanych w różnych skalach.

Opisany efekt skali może dotyczyć zarówno przestrzeni badawczej (od analizy nanoporów na próbkach rzędu kilku centymetrów, poprzez analizy facji oraz interpretacje geofizyki otworowej wykonywane na rdzeniach i w otworach wiertniczych, aż do analiz obrazów sejsmicznych dla całego obiektu złożowego o rozciągłości rzędu kilku do kilkudziesięciu kilometrów), jak i skali samego pomiaru (np. różne metody geofizyczne wykorzystujące częstotliwości od kilku do kilkuset herców).

Aby uniknąć ryzyka niepotrzebnych błędów, w trakcie

pracy nad dowolnym złożem należy opracować i przyjąć schemat procedury, który uwzględni ten efekt przed przystąpieniem do interpretacji. W najbardziej ogólnym ujęciu schemat taki jest pochodną kilku wyzwań obecnych w trakcie fazy poszukiwań, jak i eksploatacji, z nich bowiem wynikają działania, jakie należy podjąć. Pierwszym jest zbadanie, jakie ograniczenia ma każda z metod, której pomiarów będziemy chcieli użyć – jaki posiada zakres błędu, gdzie stosowanie jej sprawdza się lepiej, a gdzie gorzej i z czego wynikają ewentualne trudności, jak również jakiej informacji oczekujemy po przeprowadzeniu danego badania, a jaką faktycznie otrzymujemy.

Kolejnym i niezwykle istotnym problemem jest zagadnienie kalibracji danych. Idealny schemat pracy zakłada, że znając niewątpliwie skomplikowane zależności, jakie występują pomiędzy uzyskiwanymi, pomierzonymi danymi, jesteśmy w stanie każdy nowo uzyskany wynik prawidłowo skorelować z wynikami, które już posiadamy. Takie działania pozwalałoby na płynne przemieszczanie się od skali

nano/mikro do skali całego obiektu złożowego. W idealnym rozwiązaniu tego zagadnienia oznaczałoby to, że mając wyniki analiz danego parametru uzyskane dwiema różnymi metodami w dwóch różnych skalach, jesteśmy w stanie w sposób prawidłowy interpolować/oszacować, jakie wyniki uzyskalibyśmy metodą trzecią, używaną do badań w kolejnej, innej niż dwie poprzednie skali. Próbą znalezienia takiego „dobrego” parametru jest koncepcja metaatributów sejsmicznych [5], która pozwala rozwiązać, przynajmniej po części, problem niedoboru danych, często występujący podczas pracy

ze „starymi” obiektami złożowymi. Rozpoznanie efektu skali powinno przynieść także korzyści polegające na możliwości dokonywania korekt założeń i oczekiwań w stosunku do przyjętego planu bezpośrednio po każdym kolejnym etapie pracy. Zapewniałoby to pełną kontrolę jakości uzyskiwanych wyników.

Ze względu na brak ogólnych rozwiązań problemu skali w pracy nad złożami węglowodorów (ale nie tylko), autorzy widzą potrzebę kontynuacji badania tego zagadnienia, co będzie przedmiotem przyszłych opracowań i publikacji.

Prosimy cytować jako: Nafta-Gaz 2013, nr 10, s. 719–734

Artykuł powstał na podstawie dokumentacji INiG DK-4100-47/12 (0047/SG/12) pt.: *Opracowanie schematu procedury umożliwiającej uwzględnienie efektu skali w interpretacji geologicznej danych geofizycznych i analiz laboratoryjnych*, zrealizowanej w ramach działalności statutowej.

Literatura

- [1] Brouillette M.: *Shock waves at microscales*. Shock Waves 2003, vol. 13, pp. 3–12.
- [2] Close D., Perez M., Goodway B., Purdue G.: *Integrated workflows for shale gas and case study results for the Horn Basin, British Columbia, Canada*. The Leading Edge 2012, vol. 31, pp. 556–569.
- [3] Darlak B., Kowalska-Włodarczyk M., Such P.: *Nowe możliwości analityczne i interpretacyjne w badaniach właściwości petrofizycznych skal*. Nafta-Gaz 2012, nr 11, s. 783–787.
- [4] Jędrzejowska-Tyczkowska H.: *Budowa modelu statycznego i jego parametryzacja ukierunkowana na uwzględnienie wkładki lupkow o podwyższonym ciśnieniu (overpressure zone)*. Dokumentacja INiG 2012, nr 91/SG (praca niepublikowana).
- [5] Jędrzejowska-Tyczkowska H.: *Sejsmicznie konsyistentne estymatory złoża węglowodorów*. Prace INiG 2003, nr 123.
- [6] Meheust Y., Schmittbuhl J.: *Scale Effects Related to Flow in Rough Fractures*. Pure Appl. Geophys. 2003, vol. 160, pp. 1023–1050.
- [7] Morten J. P., Roth F., Karlsen S. A., Timko D., Pacurar C., Olsen P. A., Nguyen A. K., Gjengedal J.: *Field appraisal and accurate resource estimation from 3D quantitative interpretation of seismic and CSEM data*. The Leading Edge 2012, vol. 31, pp. 447–456.
- [8] Murdoch T. J. T., Aronson R. B.: *Scale-dependent spatial variability of coral assemblages along the Florida Reef Tract*. Coral Reefs 1999, vol. 18, pp. 341–351.
- [9] Musson R. M. W., Grunthal G., Stucchi M.: *The comparison of macroseismic intensity scales*. Journal of Seismology 2010, vol. 14, pp. 413–428.
- [10] Pettijohn F. J., Potter P. E., Siever R.: *Sand and Sandstone*. Berlin, New York, Springer-Verlag, 1972.
- [11] Such P.: *Przestrzeń porowa skal lupkowych*. Nafta-Gaz 2012, nr 9, s. 561–565.
- [12] Wilbanks T. J., Kates R. W.: *Global change in local places: how scale matters*. Climatic Change 1999, vol. 43, pp. 601–628.
- [13] Ziemiński K., Jędrzejowska-Tyczkowska H.: *Opracowanie schematu procedury umożliwiającej uwzględnienie efektu skali w interpretacji geologicznej danych geofizycznych i analiz laboratoryjnych*. Dokumentacja INiG 2012, nr 47/SG (praca niepublikowana).



Mgr Konrad ZIEMIŃSKIN
Asystent w Zakładzie Geologii i Geochemii.
Instytut Nafty i Gazu
ul. Lubicz 25A
31-503 Kraków
E-mail: ziemianski@inig.pl



Prof. nzw. dr hab. inż. Halina JĘDRZEJOWSKA-TYCZKOWSKA
Instytut Nafty i Gazu
ul. Lubicz 25A
31-503 Kraków
E-mail: tyczkowska@inig.pl