

Halina Jędrzejowska-Tyczkowska, Małgorzata Słota-Valim
Instytut Nafty i Gazu, Kraków

Mechaniczny model Ziemi jako nowy i konieczny warunek sukcesu w poszukiwaniach i eksploatacji niekonwencjonalnych złóż węglowodorów

Obserwując historię kultury materialnej na przestrzeni minionych dwóch wieków, dostrzegamy ciągłą, ogromną i przyspieszoną ewolucję trzech podstawowych elementów kształtujących poziom cywilizacji: potrzeb, odkryć i wynalazków oraz technologii. Sięgając wstecz łańcucha przyczynowo-skutkowego, widzimy dwa ważne stimulatory powyższego stanu: przede wszystkim niebywały wzrost konsumpcji oraz, niestety, wzrost natężenia zachowań agresywnych – wewnętrznych i zewnętrznych – w ramach społeczeństw i narodów.

Napawa optymizmem, iż to właśnie niespotykany wzrost konsumpcji stał się również współcześnie powodem coraz większego zapotrzebowania na moce energetyczne. Stąd coraz bardziej rozbudowane koncepcje pozyskiwania źródeł energii. Źródła odnawialne i nieodnawialne, tradycyjne, konwencjonalne i niekonwencjonalne, na lądach i pod dnami akwenów morskich, coraz głębiej i więcej – to powszechny obiekt pożądania, bez względu na to kiedy, kto i gdzie – bez względu na poziom rozwoju i szerokość geograficzną.

W wyścigu o zaspokojenie potrzeb energetycznych zauważa się, zarówno w zakresie koncepcji, odkryć, jak i technologii, tzw. kamienie milowe (*miles stones*), czyli fakty, które silnie wpływają na zmianę sytuacji w danej gałęzi wiedzy. W dziedzinie poszukiwań złóż węglowodorów jednym z najbardziej ekscytujących odkryć minionego dziesięciolecia było stwierdzenie, początkowo na kontynencie południowoamerykańskim, występowania znacznych akumulacji węglowodorów, a szczególnie gazu ziemnego, w formacjach łupków bitumicznych, niezaliczanych dotąd w interpretacji geologicznej do skał kolektorskich.

Ogromny sukces koncepcji, a w ślad za nim sukces ekonomiczny firm poszukiwawczych i wydobywczych,

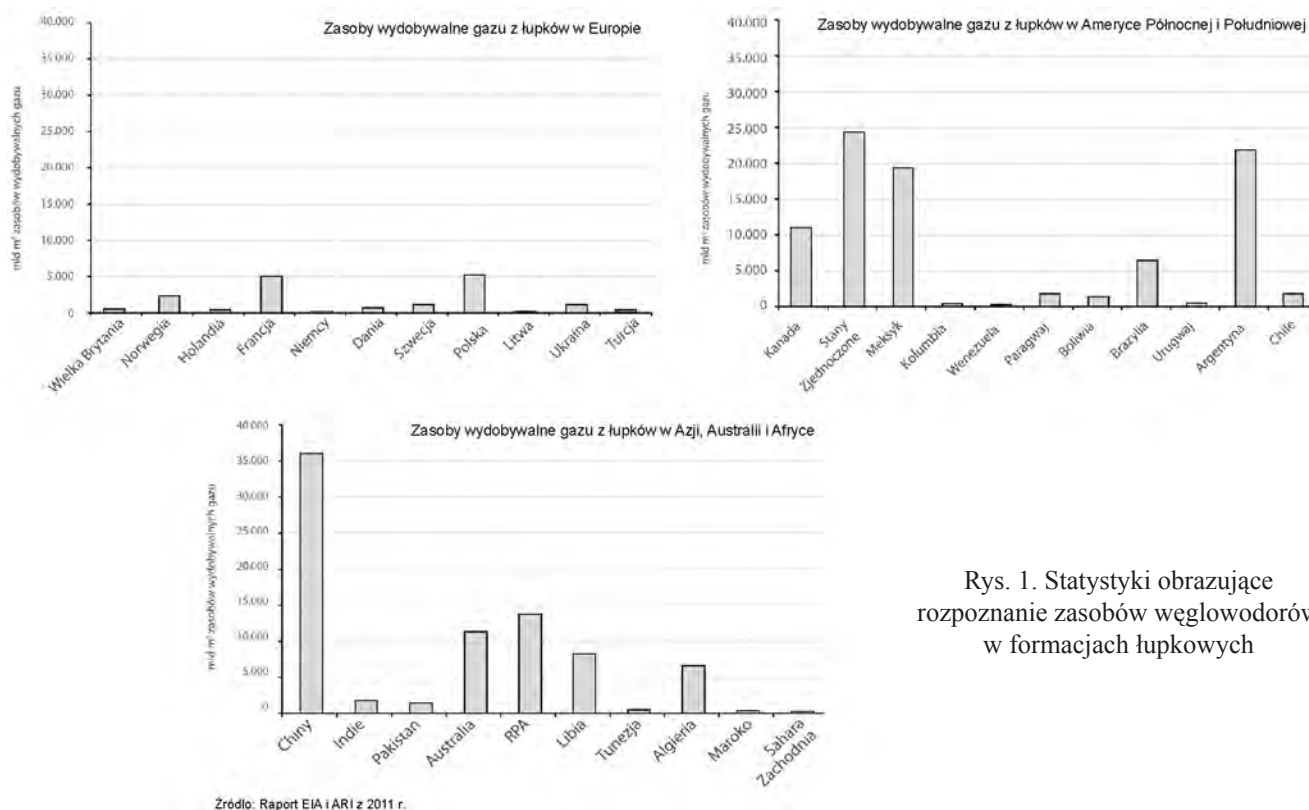
zdopingował międzynarodową społeczność naftowców do weryfikacji nowych możliwości odkryć na innych kontynentach. Na kontynencie europejskim Polska jest krajem, gdzie potencjalne możliwości występowania gazu w formacjach łupków (przede wszystkim sylurskich i dewońskich) są bardzo duże.

Przytoczone statystyki dla poszczególnych kontynentów i państw charakteryzują rozpoznanie problematyki gazu z formacji łupkowych oraz ich zasobów.

W dziedzinie przemysłu poszukiwań i wydobywania podjęto szereg inicjatyw, które według prognoz zainteresowanych już w latach 2015–2020 powinny zaowocować konkretną wiedzą na temat polskich zasobów gazu z łupków.

Zgodnie z logiką strategii podejmowania nowych wyzwań, zaangażowanie polskiej gospodarki w zagadnienia poszukiwań i eksploatacji złóż niekonwencjonalnych, a przede wszystkim gazu z łupków, powinno być prowadzone równolegle, dwutorowo, zarówno w zakresie technologicznym i technicznym, jak też w zakresie szerokiego przygotowania naukowego, teoretycznego. Wynika to z radykalnie różnej charakterystyki geologiczno-złożowej formacji łupków w porównaniu z konwencjonalnym kolektorem, jakim są piaskowce lub skały wapienne. Konsekwencją tej różnej charakterystyki kolektora „łupkowego” jest różna koncepcja lokalizacji otworów poszukiwawczych oraz eksploatacji takich obiektów.

Kolektor gazu w łupkach nie jest definiowany wyraźną formą geometryczną, np. typu antyklina z grawitacyjnym rozkładem nasyceń i kontaktów (gaz–ropa–woda), jak to najczęściej ma miejsce w przypadku kolektorów konwencjonalnych. Kolektor łupkowy to przeważnie silnie skompaktowana warstwa o dużej rozciągłości, lecz małej



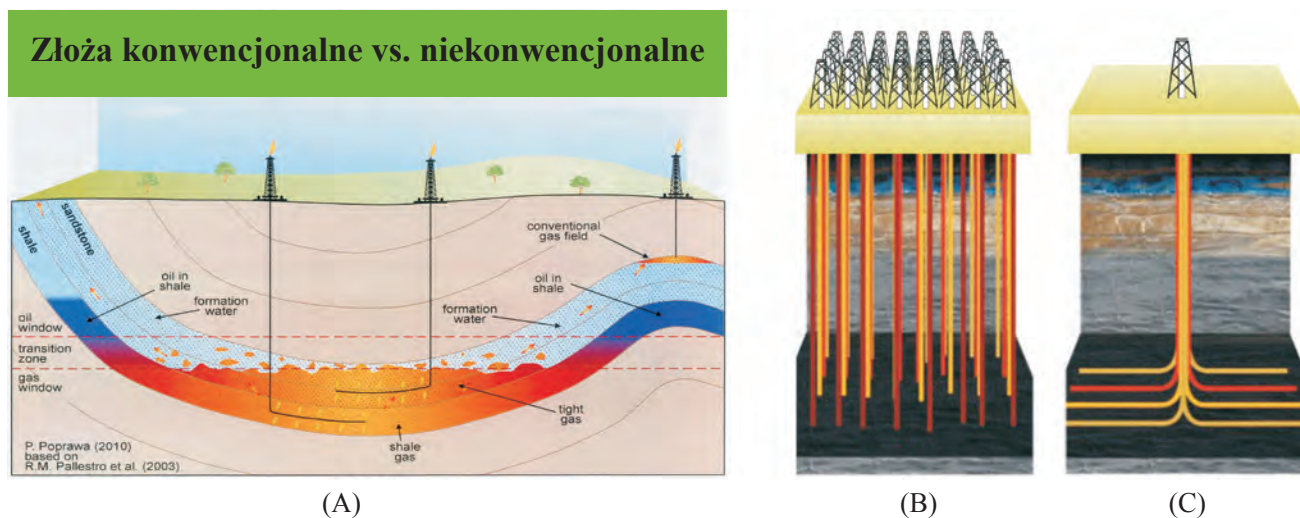
Rys. 1. Statystyki obrazujące rozpoznanie zasobów węglowodorów w formacjach łupkowych

miażdżności i niskiej przepuszczalności, która może występować zarówno w roli skały macierzystej, jak i kolektora. Porowatość formacji łupkowych jest niska lub bardzo niska. Geometria porów należy do tzw. nisko-aspektowej (określanej poprzez stosunek pionowej i poziomej osi pojedynczego pora).

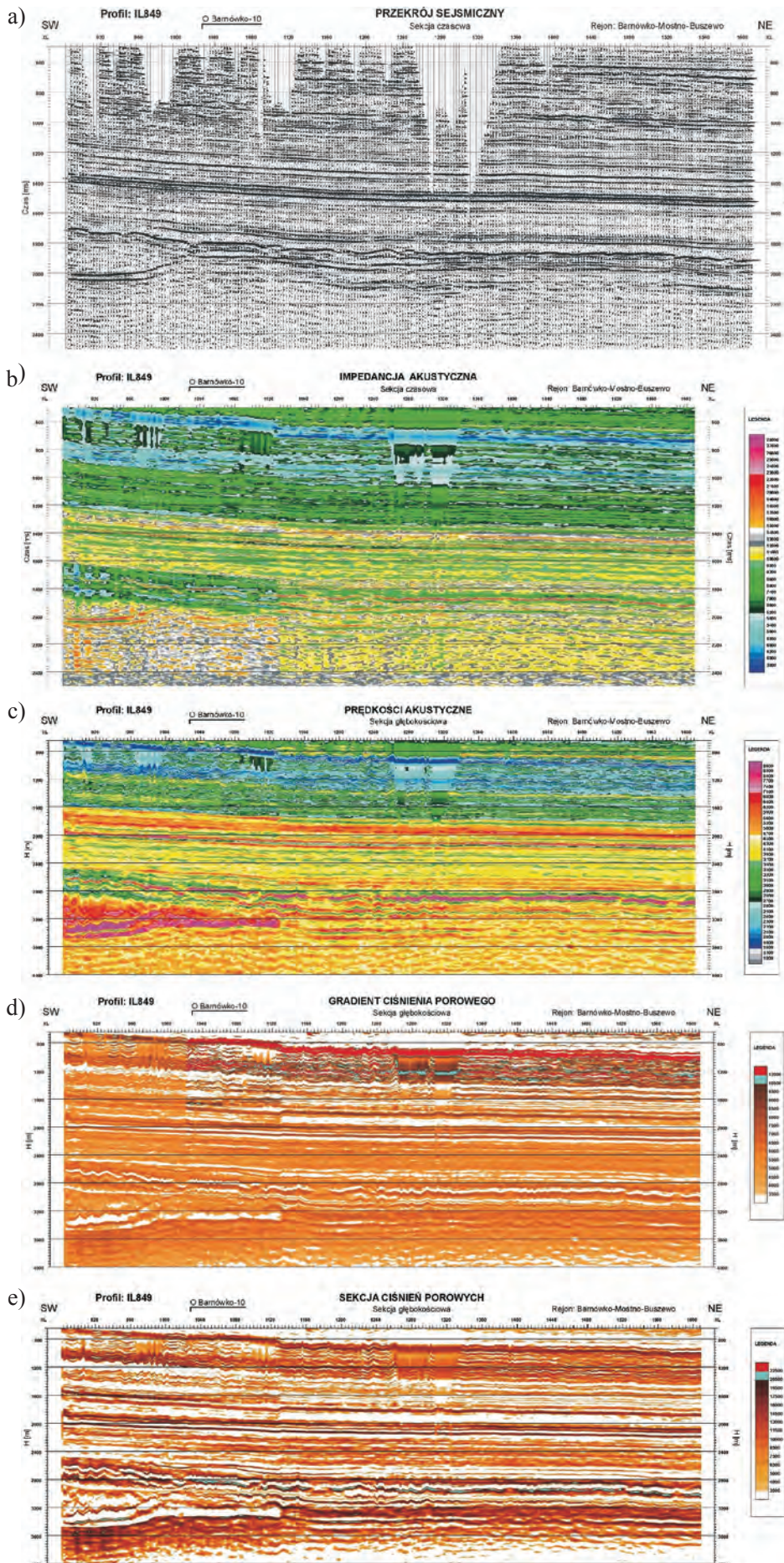
Powyższe cechy sprawiają, iż formacje łupkowe bardzo często należą do stref o anomalnie wysokim ciśnieniu, cechując się anizotropowością wielu parametrów fizycznych,

np. prędkości propagacji fal sejsmicznych. Określenie parametrów fizycznych w łupkach jest silnie warunkowane bardzo małymi wymiarami porów. Z geomechanicznego punktu widzenia łupki to bardzo drobnoziarnista skała osadowa, w której obciążenia są przenoszone właśnie przez minerały ilaste (podczas gdy np. w piaskowcach obciążenie jest przenoszone przez kontakty międzyziarnowe).

W świetle powyższego oczywistym jest, że sukces poszukiwań, a także eksploatacji złóż gazu z formacji



Rys. 2. Formacja łupków (A) penetrowana przez bardzo gęstą sieć otworów rozpoznawczych (B) może być równie skutecznie rozpoznana przez jeden otwór z rozbudowanymi rozgałęzieniami horyzontalnymi (C) [według materiałów Państwowego Instytutu Geologicznego oraz Geofizyki Toruń, 2011]

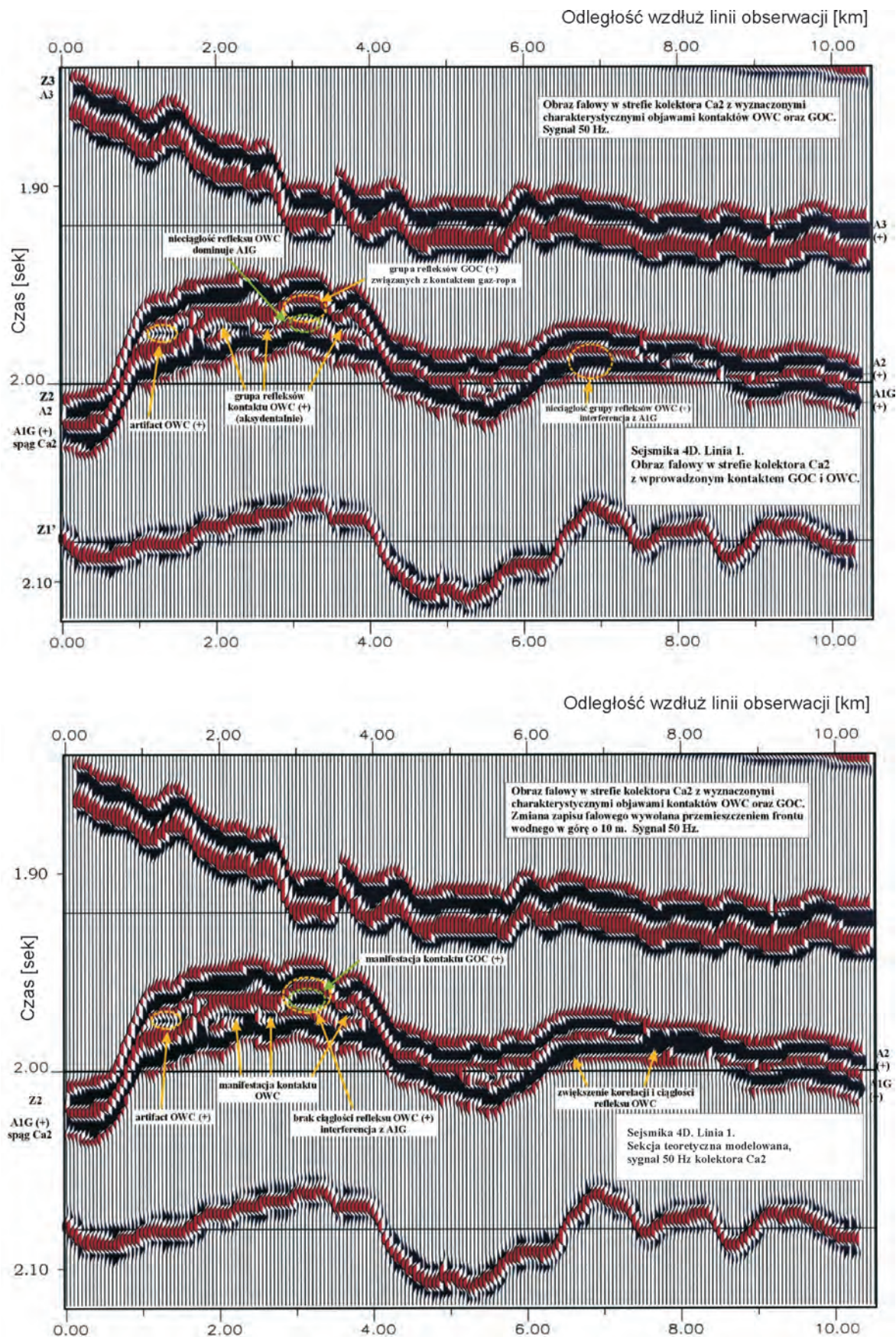


łupkowych wymaga bardzo dokładnego rozpoznania geologicznego, geofizycznego i złożowego. Pożądane są dane na temat właściwości petrofizycznych, geochemicznych, jak również mechanicznych penetrowanego obszaru, ponieważ procesy lokalizacji złoża gazu w łupkach i jego eksploatacji przebiegają w sposób różny od konwencjonalnego. Jak wspomniano, w tym przypadku geometria obiektu przesuwa się na dalszy plan w rozpoznaniu.

Ze względu na silną horyzontalną niejednorodność złóż gazu z łupków swoje podstawowe znaczenie w prospekcji potwierdza metoda sejsmiczna, umożliwi bowiem wgląd w głąb ośrodka bardzo mało inwazyjnymi pomiarami propagacji fal sejsmicznych. Właściwie przetwarzane (*before and post stack processing*) zapisy drgań sprężystych poddane bywają różnym (deterministycznym lub stochastycznym) procedurom inwersji sejsmicznych [14, 17], umożliwiającym odtworzenie

Rys. 3. Sekwencja procedur obliczania ciśnień porowych z danych sejsmicznych [8].

Sekcja sejsmiczna tzw. sumowana (AFTER STACK) w domenie czasu (a) stanowi podstawową informację wejściową, na podstawie której poprzez inwersję sejsmiczną obliczana jest impedancja akustyczna (b), prędkości akustyczne (c) oraz – po przejściu do domeny głębokościowej – ciśnienie porowe (d, e)



Rys. 4. Określenie poziomu kontaktów płynów w obiektach złożowych stanowi ważny element rozpoznania właściwości hydromechanicznych. Modelowanie obrazu falowego z wprowadzonymi poprzez parametry petrofizyczne efektami procesu eksploatacji złoża [według 11]

poła prędkości propagacji podłużnych i poprzecznych fal sprężystych, i na jego podstawie obliczenie lub prognozowanie parametrów złożowych – takich jak porowatość, przepuszczalność lub nawet nasycenie. Przestrzenna analiza obrazu falowego pozwala na odtworzenie występowania kontaktów płynów złożowych. Ze względu na szeroki wachlarz zastosowań wyników badań sejsmicznych zakresy wykorzystania metod geofizycznych są przedmiotem kolejnych części niniejszej publikacji.

Mechaniczny model Ziemi (MEM)

Trójwymiarowe modele geomechaniczne, znane również pod nazwą mechanicznych modeli Ziemi 3D (ang. *Mechanical Earth Model*, w skrócie MEM), według definicji Herwanger i Koutsabeloulisa [5] to numeryczne przedstawienie stanu naprężeń oraz właściwości mechanicznych skały ośrodka dla danego poziomu zbiornikowego i skał nadkładu. Mechaniczny model Ziemi skupia przede wszystkim pozyskane dane oraz wiedzę na temat relacji między:

- przestrzennym rozkładem mechanicznych właściwości ośrodka geologicznego (właściwości sprężystych i wytrzymałościowych skał), a także lokalizacją i stanem naprężeń w otoczeniu nieciągłych deformacji tektonicznych, a przede wszystkim:
 - ciśnieniem porowym,
 - naprężeniami tektonicznymi i naprężeniami nadkładu oraz ich wpływem na rozkład naprężeń *in situ*
- geometrią poziomów zbiornikowych i nadkładu skał.

Jeżeli oprócz wymienionych powyżej czynników weźmiemy również pod uwagę czynnik czasu, wraz z którego upływem zmienia się stan naprężeń w górotworze wskutek obniżania ciśnienia porowego wywołanego podczas eksploatacji, będziemy mieć wówczas do czynienia z tzw. dynamicznym mechanicznym modelem Ziemi lub tzw. 4D MEM [5].

Elementy mechanicznego modelu Ziemi

Rozkład naprężeń

Pierwszym krokiem przy budowie MEM jest zgromadzenie i jakościowa ocena wszystkich dostępnych danych, istotnych z punktu widzenia geomechaniki górotworu, które po zjednoczeniu w spójny schemat logiczny koncepcji (tzw. *framework*) modelu pozwolą na przewidywanie właściwości geomechanicznych modelowanego ośrodka geologicznego.

Prowadzone w Instytucie Nafty i Gazu prace badawcze w zakresie sejsmiki od kilkunastu lat konsekwentnie [6, 8, 9, 11] zwracają uwagę m.in. na możliwości wykorzystania badań sejsmicznych do obliczenia ciśnienia złożowego [7, 12], do tworzenia dynamicznych modeli parametrów złożowych oraz estymacji nasycień.

Zgłębianie problematyki złóż gazu w formacjach łupków implikuje rozpoznanie kolejnych właściwości ośrodka skalnego, a mianowicie właściwości mechanicznych.

W ośrodku skalnym na stan naprężeń składają się: naprężenie pionowe oraz naprężenia poziome – minimalne i maksymalne.

Naprężenie pionowe (ang. *vertical stress* – σ_v) spowodowane jest naciskiem wywieranym przez nadkład skał wraz z ciężarem płynów znajdujących się w przestrzeniach porowych ośrodka skalnego. W basenach sedimentacyjnych niezaburzonych tektonicznie oraz pozbawionych wyraźnego wertykalnego zróżnicowania ściśliwości osadów wartość naprężenia pionowego obliczana jest według wzoru (1):

$$\sigma_v = \rho_b \cdot gh \quad (1)$$

gdzie:

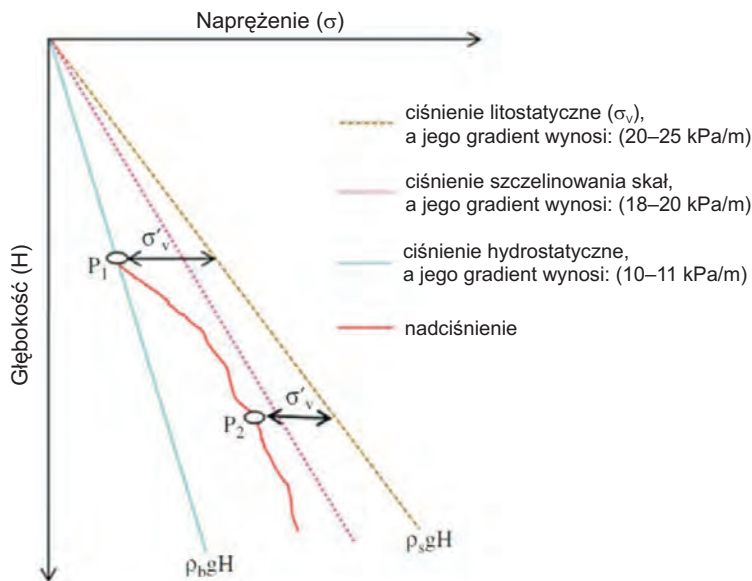
- σ_v – naprężenie pionowe,
- ρ_b – gęstość właściwa skał,
- g – przyspieszenie ziemskie,
- h – głębokość.

W warunkach ciśnienia hydrostatycznego (P_1) wartość naprężenia efektywnego na głębokości H wynosi $\sigma'_v = H \cdot g \cdot (\rho_b - \rho_w)$, natomiast w strefie podwyższonego ciśnienia (P_2) naprężenie efektywne wynosi $\sigma'_v = H \cdot g \cdot (\rho_b - P_2)$, gdzie ρ_b to średnia właściwa gęstość nadkładu o miąższości h i wartości przyspieszenia ziemskiego g . Wartość gęstości otrzymuje się z pomiaru gęstości objętościowej (ang. *density log*) (rysunek 6) lub na podstawie relacji gęstości i głębokości [3]. W efekcie otrzymujemy wartość całkowitego naprężenia pionowego lub tzw. ciśnienia litostatycznego. Wartość ta pomniejszona o wartość niezależnego od orientacji ciśnienia porowego u nazywana jest naprężeniem pionowym efektywnym (2) (ang. *effective vertical stress* – σ_v^1).

$$\sigma_v^1 = \sigma_v - u \quad (2)$$

gdzie:

- σ_v^1 – naprężenie pionowe efektywne,
- u – ciśnienie porowe.



Rys. 5. Uproszczony diagram przedstawiający wzrost ciśnienia litostatycznego i ciśnienia hydrostatycznego wraz z głębokością. W rzeczywistości linie obrazujące oba ciśnienia nie są prostymi, gdyż ciśnienie litostatyczne zmienia się z wartością gęstości właściwej osadów (ρ_b), która ma tendencję do wzrostu wraz z przyrostem głębokości. Krzywa ciśnienia hydrostatycznego jest z kolei funkcją gęstości wód formacyjnych (ρ_w), zależną od temperatury i zasolenia [2]

W sposób analogiczny definiuje się wartość naprężenia efektywnego w kierunku poziomym (σ_H^1), równą wartości całkowitego naprężenia w tym kierunku (σ_H) pomniejszonej o wartość ciśnienia porowego u (3), które przyjmuje tę samą wartość dla kierunku pionowego i poziomego [2].

$$\sigma_H^1 = \sigma_H - u \quad (3)$$

gdzie:

- σ_H^1 – naprężenie pionowe efektywne,
- σ_H – naprężenie pionowe,
- u – ciśnienie porowe.

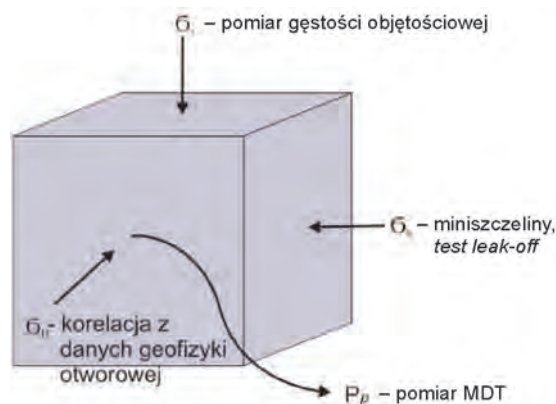
Wartość ciśnienia porowego można odczytać wprost z testów MDT (ang. *Modular Formation Dynamics Tester*), DST (ang. *Drill Stem Testing*), RFT (ang. *Repeat Formation Tester*) i z tzw. testów przyływu (ang. *flow tests*). Znane i stosowane są również sformalizowane procedury statystycznego prognozowania ciśnień porowych wykorzystujące między innymi skalibrowany sejsmiczny model prędkościowy, profilowanie akustyczne czy też profilowanie opornościowe [3, 6, 7, 9, 16].

W przeciwieństwie do naprężenia pionowego, wartości naprężenia poziomego minimalnego (σ_h – ang. *minimum horizontal stress*) i maksymalnego (σ_H – ang. *maximum horizontal stress*) nie można określić wprost na podstawie znanych relacji, opisanych w postaci wzorów.

Właściwie jedyną, najbardziej wiarygodną wartością minimalnego naprężenia poziomego jest wynik pomiaru prowadzonego podczas serii testów *mini-frac* oraz ciśnieniowych testów chłonności (ang. *leak-off tests*) realizowanych podczas wiercenia [2].

Znacznie trudniejsze jest oszacowanie wartości i kierunku maksymalnego naprężenia poziomego. Przesłank na ten temat dostarczają, niestety *post factum*, awarie wiertnicze, a zwłaszcza geometria zaciśnięcia (przechwycenia przewodu) w otworze wiertniczym, pomiary właściwości wytrzymałościowych skał oraz analiza rozmieszczenia uskoków i szczelin w skali lokalnej i regionalnej.

Ponadto dane sejsmiczne dostarczają informacji o kierunku maksymalnego naprężenia poziomego, poprzez wskazanie uskoków odwróconych i przesuwczych. Uzupelnienie informacji w skali lokalnej odbywa się na drodze interpretacji danych uzyskanych z obrazowania ultradźwiękowego (UBI – ang. *Ultrasonic Bore-*



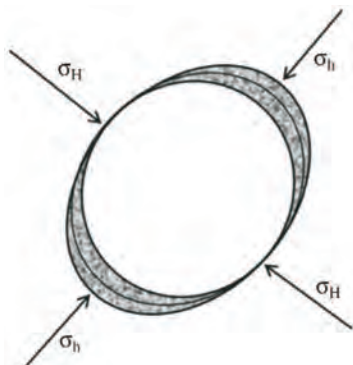
testy "mini-frac" – szczelinowanie do efektu wstępnego (powstanie mikroszczelin)

test "leak-off" – test szczelności

Rys. 6. Stan naprężeń w górotworze. Naprężenie pionowe (*vertical stress* – σ_v) szacowane jest na podstawie zgromadzonych pomiarów gęstości objętościowej skał. Minimalne naprężenie poziome (*minimum horizontal stress* – σ_h) jest otrzymywane na podstawie testów: *mini-frac* i *leak-off* oraz wartości ciśnienia porowego uzyskiwanego z pomiaru MDT. Maksymalne naprężenie poziome (*maximum horizontal stress* – σ_H) obliczane jest na podstawie danych geofizyki otworowej [1]

hole Imager) oraz przy użyciu sondowań fali poprzecznej (DSI – ang. *Dipole Shear Sonic Imager*), co pozwala na ustalenie kierunku σ_H , gdyż przenikająca przez ośrodek

geologiczny fala poprzeczna (fala S), ulegając polaryzacji, dzieli się na falę poruszającą się szybciej wzdłuż kierunku maksymalnego naprężenia poziomego (σ_H) oraz na falę poruszającą się wolniej wzdłuż kierunku minimalnego naprężenia poziomego (σ_h) [1].



Rys. 7. Schemat przekroju poprzecznego przez zaciśnięty otwór wiertniczy oraz orientacja działających na ścianę otworu naprężeń. σ_H to maksymalne naprężenie poziome, σ_h – minimalne naprężenie poziome [2]

Przykład efektów nierównomiernego działania naprężenia poziomego i pionowego pokazano na rysunku 7. Maksymalne naprężenie poziome jest zgodne z kierunkiem maksymalnej siły ściskającej ścianę otworu wiertniczego, prostopadłej z kolei do – wydłużonej na skutek awarii wiertniczej – średnicy zaciśniętego otworu [2]. Dokładne zlokalizowanie i określenie geometrii zaciśnięcia otworu wiertniczego możliwe jest przy użyciu specyficznych procedur oraz analizy danych mikroopornościowych, a także danych pochodzących z obrazowania ultradźwiękowego [3]. W praktyce w tym celu stosuje się również kaliper, jako urządzenie lokalizujące położenie odchylenia stabilności ściany otworu wiertniczego na zasadzie pomiaru jego owalu [2].

Mechaniczne właściwości skał

Na rozkład naprężeń oraz zakres i stopień odkształceń w ośrodku geologicznym mają wpływ jego właściwości sprężyste i wytrzymałościowe, które decydują o podatności ośrodka na zniszczenie i odkształcenie pod wpływem działających naprężeń. Dlatego też określenie i oszacowanie wartości parametrów sprężystych i wytrzymałościowych oraz ich przestrzenny rozkład jest kluczowym etapem przy budowie geomechanicznego modelu Ziemi.

Właściwości sprężyste określają wielkość odkształcenia po przyłożeniu naprężenia (ang. *stress & strain*) o zadanej wielkości. Najpowszechniej stosowanymi parametrami sprężystości w geomechanice są moduł Younga (E) i współ-

czynnik Poissona (ν). Moduł Younga wyraża zależność względnego odkształcenia liniowego (ε) materiału od przyłożonego liniowego naprężenia (σ) (4). Jego wartość określa się na podstawie testów ściskania, a także w oparciu o prędkości fali poprzecznej (S) i podłużnej (P) rejestrowane podczas profilowania akustycznego [1].

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (4)$$

gdzie:

E – moduł Younga,

σ – naprężenie,

ε – względne odkształcenie liniowe.

Współczynnik Poissona (ν) jest to stosunek odkształcenia poprzecznego (ε_x) do odkształcenia podłużnego (ε_z) przy osiowym stanie naprężenia (5):

$$\nu = -\varepsilon_x/\varepsilon_z \quad (5)$$

gdzie:

ν – współczynnik Poissona,

ε_x – względne odkształcenie poprzeczne,

ε_z – względne odkształcenie podłużne.

Pozostałe parametry charakteryzujące właściwości sprężyste ośrodka geologicznego, takie jak stała Lamégo (λ), współczynnik ścinania (μ) oraz moduł sprężystości objętościowej (K), mają węższe zastosowanie przy modelowaniu geomechanicznym i ograniczają się do specyficznych przypadków. Relacja parametrów sprężystych E , ν i stałych λ , μ oraz prędkości fali podłużnej (V_p) i poprzecznej (V_s) wyrażają się poprzez poniższe zależności (6), (7) i (8):

$$v_p = [\lambda + 2\mu/\rho]^{1/2} = [E(1 - \nu/\rho(1 - 2\nu)(1 + \nu))]^{1/2} \quad (6)$$

$$v_s = (\mu/\rho)^{1/2} = [E/2\rho(1 + \nu)]^{1/2} \quad (7)$$

$$v_p/v_s = [(0,5 - \nu)/(1 - \nu)]^{1/2} \quad (8)$$

gdzie:

v_p – prędkość fali podłużnej,

v_s – prędkość fali poprzecznej,

λ – stała Lamégo,

μ – współczynnik ścinania,

ρ – gęstość właściwa,

E – moduł Younga,

ν – współczynnik Poissona.

W przypadku właściwości sprężystych skały obserwuje się różnicę między wartością pomiaru uzyskane-

go w warunkach statycznych (pomiar w laboratorium z zastosowaniem prasy do badań wytrzymałościowych i odkształcalności skał) a wartością uzyskaną w warunkach dynamicznych (pomiar prędkości fal sprężystych na podstawie danych geofizyki otworowej lub konwersja danych sejsmicznych do parametrów sprężystych poprzez obliczenie pożądanego parametru sprężystości na podstawie prędkości fali podłużnej (V_p) i fali poprzecznej (V_s) oraz gęstości). W praktyce w celu określenia wartości parametrów sprężystych stosuje się zależności korelacyjne, wykorzystując wartości parametrów uzyskanych w warunkach dynamicznych [5, 10].

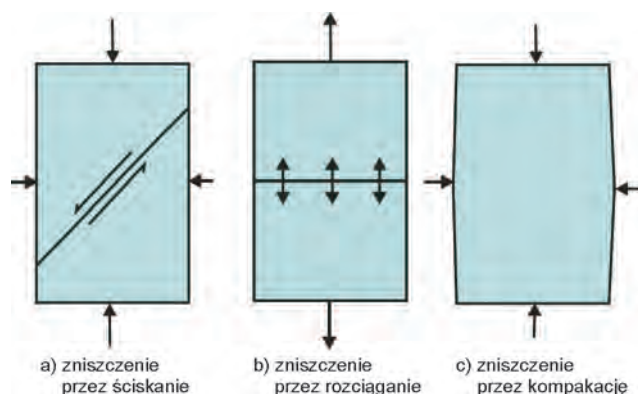
Przy dużych odkształceniach, kiedy skały ośrodka tracą swoje właściwości elastyczne, do lepszego przewidywania zachowania się ośrodka potrzebne jest określenie parametrów wytrzymałościowych skały.

Najczęściej wymienianymi i stosowanymi parametrami mechanicznymi są: wytrzymałość na ściskanie (C_o – ang. *Unconfined Compressive Strength*) oraz kąt tarcia. Parametry te charakteryzują siłę powodującą zniszczenie skały poprzez przyłożenie naprężenia ścinającego o wartości większej niż naprężenie krytyczne. Na poziomie badań laboratoryjnych (rysunek 8) jest to naprężenie, które poddana badaniom próbka jest w stanie wytrzymać bez jej zniszczenia (rysunek 8a). Pomiar wartości wytrzymałości na ściskanie odbywa się w warunkach laboratoryjnych, analogicznie do pomiaru modułu Younga czy współczynnika Poissona. Na podstawie wartości wytrzymałości na ściskanie uzyskanych w teście trójosiowego stanu naprężeń określa się wartość kąta tarcia ϕ , posługując się modelem Coulomba-Mohra [1]. Dzięki znajomości wytrzymałości na ściskanie i wartości kąta tarcia możliwe jest przewidywanie zachowania się górotworu na danej głębokości pod wpływem działania określonego stanu naprężeń ściskających.

Wytrzymałość na rozciąganie jest również istotnym parametrem, zwłaszcza gdy mamy do czynienia ze wzrostem ciśnienia porowego w ośrodku geologicznym, np. spowodowanym zabiegami iniekcji lub zatłaczania medium do górotworu, przykładowo przy zatłaczaniu CO_2 w ramach geologicznej sekwestracji (CCS – ang. *Carbon Dioxide Capture and Storage*) [22]. Jeżeli wzrost ciśnienia porowego będzie na tyle znaczny, że doprowadzi do obniżenia wartości naprężenia efektywnego (zwanego litostatycznym) do minimum, może dojść wówczas do przerwania ciągłości skały (rysunek 8b). Naprężenie, przy którym dochodzi do tego typu zniszczenia, nazywane jest naprężeniem rozciągającym (T_o), a jego wartość mierzona jest na podstawie testów rozciągania przeprowadzanych w laboratorium. W praktyce często wykorzystuje się

relację wytrzymałości na ściskanie do naprężenia rozciągającego (C_o/T_o), których stosunek mieści się w przedziale $10 \div 20$ [5].

Dla ośrodka geologicznego zbudowanego w przewodzie z wysoce porowatych piaskowców z dużym udziałem osadów o małej spoistości wytrzymałość na zniszczenie struktury skały pod wpływem kompaktacji (ang. *compaction failure*) szacuje się zarówno w odniesieniu do ziaren, jak i do spoiwa (matriks) (rysunek 8c). Bezpośrednią przyczyną zniszczenia skały jest podwyższone ciśnienie graniczne lub hydrostatyczne.



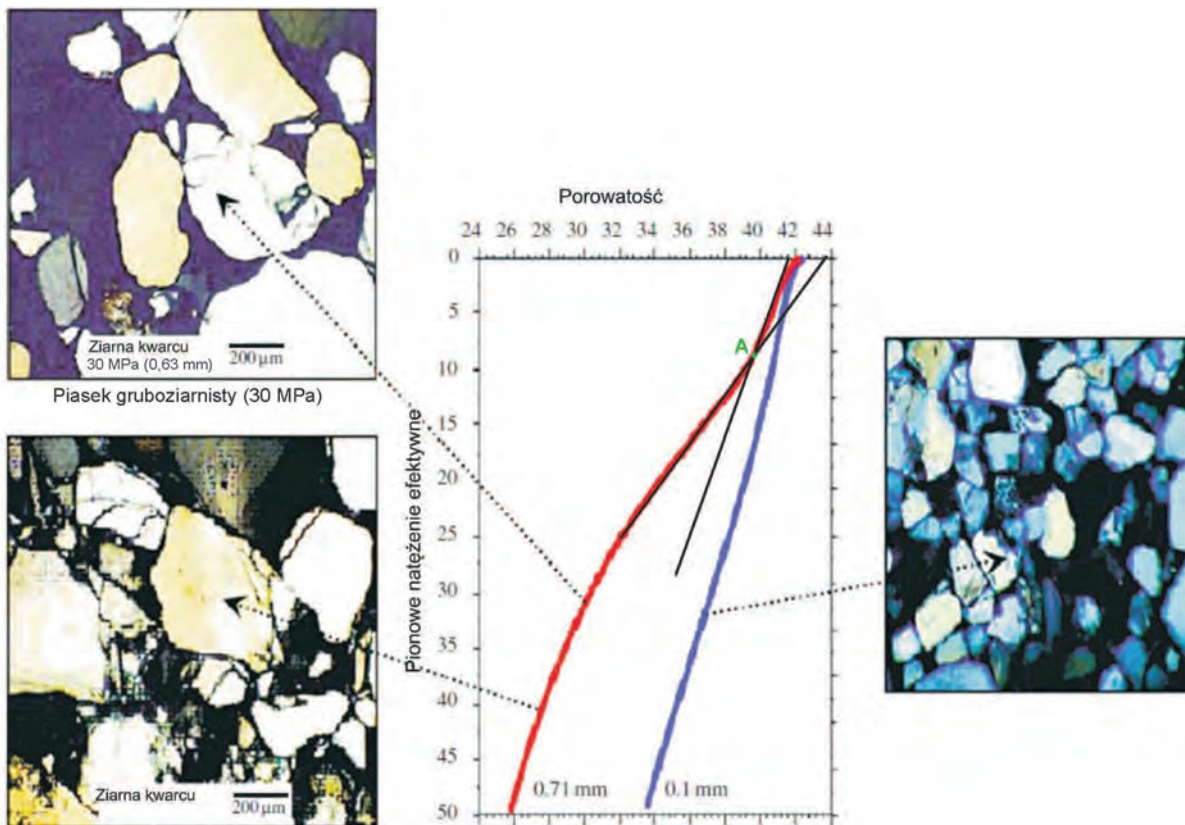
Rys 8. Mechanizmy zniszczenia skały przez ściskanie (a), rozciąganie (b) i kompaktację (c) [5]

W celu wyznaczenia ciśnienia granicznego dokonuje się serii pomiarów naprężeń w układzie trójosiowym dla skał o szerokim zakresie porowatości. Na podstawie uzyskanych wyników wyznacza się krzywą porowatości vs średnie efektywne naprężenie. Wartość ciśnienia granicznego wyznaczana przez punkt nagłego spadku porowatości sygnalizuje załamanie się struktury piaskowca i zniszczenie przestrzeni porowych. Ustalenie tego punktu jest możliwe poprzez analizę stycznych (rysunek 9).

W przypadku oddziaływania ciśnienia hydrostatycznego na skałę na podstawie testów hydrostatycznych wyznacza się wartość krytycznego ciśnienia (P_{cr}). Z doświadczenia wynika, że do zniszczenia skał pod wpływem kompaktacji dochodzi w przypadku skał o wysokich wartościach porowatości ($< 20\%$) i niskim stopniu scementowania. Dla skał o porowatości od niskiej do średniej ($15 \div 20\%$) ciśnienie krytyczne nie jest zwykle osiągalne [5].

Obliczanie parametrów mechanicznych ośrodka na drodze badań i pomiarów laboratoryjnych to wstępny i podstawowy etap w tworzeniu geomechanicznego modelu ośrodka geologicznego.

Pamiętać jednak trzeba, że wyniki odnoszą się do konkretnych punktów w ośrodku ziemskim, i nawet jeżeli takich punktów jest dużo, najczęściej nie pozwalają na



Rys. 9. Krzywa przedstawiająca zależność między porowatością a przyłożonym pionowym naprężeniem efektywnym, sporządzona na podstawie pomiarów wykonanych dla piasku gruboziarnistego (kolor czerwony) i piasku drobnoziarnistego (kolor niebieski). Piasek gruboziarnisty jest bardziej ściśliwy i prędzej ulega kompaktacji. Wynika to z faktu, iż w piaskach gruboziarnistych mamy do czynienia z mniejszą liczbą punktów kontaktu między sąsiadującymi ziarnami i większym naprężeniem przypadającym na pojedyncze ziarno piasku, czego efektem jest jego zniszczenie. Analiza stycznych pokazuje, że punkt zerwania (punkt A) w piaskach gruboziarnistych (czerwona krzywa) nastąpi po przyłożeniu naprężenia ok. 8,75 MPa przy porowatości 39,6% [2, zmienione]

przedstawienie poprawnego modelu właściwości geomechanicznych skał dla wybranego obszaru.

W Zakładzie Geomechaniki Uniwersytetu Warszawskiego stworzono dla obszaru Polski ogólnodostępną Bazę Danych Geomechanicznych, w której zgromadzono ponad 200 000 informacji opisujących zarówno ilościowo, jak i jakościowo najważniejsze właściwości mechaniczne [4].

Dzięki regionalizacji danych oraz zunifikowaniu procedury badawczej dostęp do opisanych parametrów skał (wytrzymałościowo-odkształceniowych) jest łatwy i wygodny.

Konieczność tworzenia przestrzennych modeli właściwości mechanicznych skał, implikowana współcześnie potrzebami oraz wyzwaniem prospekcji i eksploatacji złóż niekonwencjonalnych, a szczególnie gazu z formacji łupkowych, każe sięgnąć do rozwiązań metod statystycznych, które pozwalają na trójwymiarowe rozprzestrzenienie danych właściwości fizycznych ośrodka w sposób konsystryntny w stosunku do budowy geologicznej, co możliwe

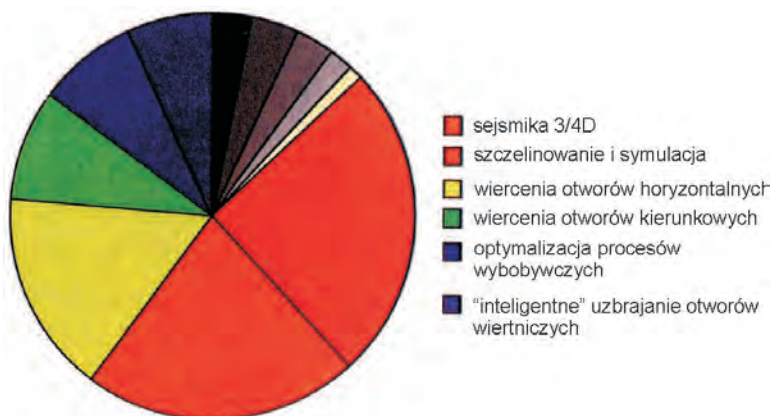
jest dzięki wykorzystaniu wyników metody sejsmicznej [16, 19, 21].

Świadomość powyższego staje się powszechna również i w Polsce, jednakże warto przytoczyć opinie najbardziej w tym przedmiocie miarodajnych środowisk (Distinguished Instructor Short Course, SEG & EAGE) (tablica 1, rysunki 10 i 11).

Jak wynika z powyższego, waga badań i informacji z projektów sejsmicznych jest nie do przecenienia, bowiem jako jedyne (pomimo postępu w technologii i interpretacji profilowań w odwiertach) pozwalają one odtwarzać geometrię i właściwości ośrodka na znacznych odległościach od odwiertów – tam gdzie nie można ich ani zobaczyć, ani dotknąć.

Zastosowanie MEM

Większość prowadzonych projektów dotyczących rozpoznania obszarów o skomplikowanej budowie geologicznej ma jako cel wyznaczenie miejsca oraz zaprojektowanie



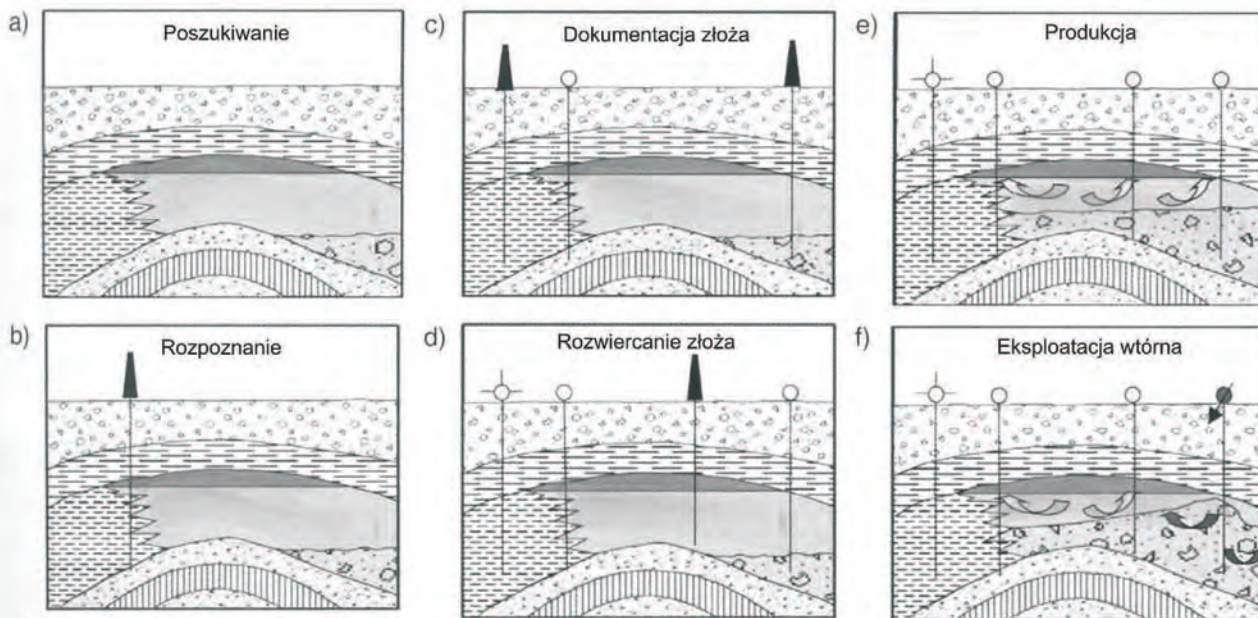
Rys. 10. Interpretacja danych sejsmicznych stanowi bardzo istotny element w realizacji prac rozpoznawczo-eksploatacyjnych i zajmuje czołowe miejsce wśród technologii wykorzystywanych w przemyśle naftowym [18, 20]

Tablica 1. Etapy realizacji prac rozpoznawczo-eksploatacyjnych oraz informacje niezbędne do przeprowadzenia inwestycji [20]

Etap projektu	Zasadnicza informacja
Dokumentacja złoża	Całkowita objętość węglowodorów, zasięg złoża, zasobność złoża
Rozwiercanie	Podział na strefy, ustalenie lokalizacji otworów wiertniczych
Produkcja	Nasycenie węglowodorami i zmiany ciśnień, ograniczenie przepływu

rozpoznawczych otworów wiertniczych. W wielu przypadkach jest to zadanie bardzo trudne i stanowi poważne wyzwanie dla geologów i geofizyków. Powyższa uwaga odnosi się szczególnie do wspomnianych wcześniej złóż niekonwencjonalnych (m.in. niekonwencjonalnych złóż gazu typu *shale gas*) oraz do niekonwencjonalnych zadań geologii, np. CCS czy też magazynowania odpadów promieniotwórczych [18].

Zważywszy na ogromne koszty wiercenia, niezmiernie istotne jest jak najlepsze rozpoznanie obszaru zainteresowania. W opisanych wyżej przypadkach szczególnego znaczenia nabiera znajomość parametrów mechanicznych ośrodka (napężenia, ciśnienie porowe, parametry sprężyste i wytrzymałościowe). Określeniu tych właśnie parametrów, tzw. geomechanicznych, służy modelowanie w ramach tzw. mechanicznego modelu Ziemi, które umożliwi przewidywanie zachowania się ośrodka geologicznego, co z kolei pozwala na optymalne umiejscowienie, a także poprawne zaprojektowanie trajektorii otworu wiertniczego (np. w skałach charakteryzujących się wyraźnym warstwowaniem). Szczegółowa charakterystyka właściwości geomechanicznych



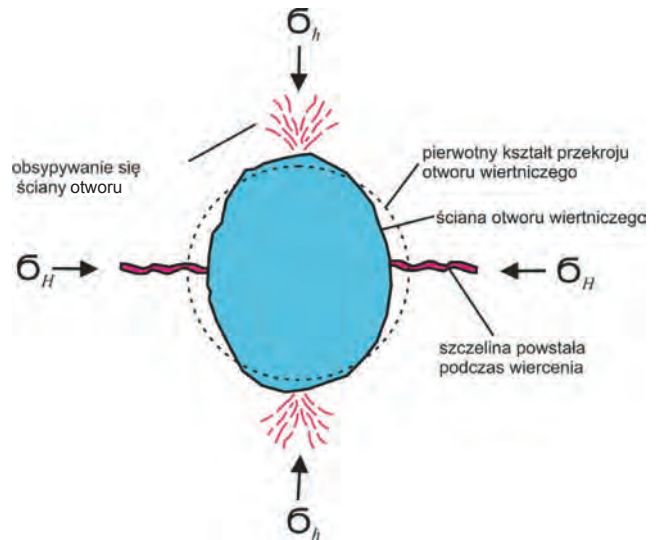
Rys. 11. Zarządzanie polami naftowymi i gazowymi; (a) w pierwszym etapie dokonuje się rozpoznania geologicznego na podstawie interpretacji danych sejsmicznych; (b) etap rozpoznawczy zakończony jest pomyślnie, jeżeli podczas przeprowadzonych testów uzyska się ciągły przyływ węglowodorów; (c) dokumentacja złoża ma za cel poznanie granic złoża; (d) etap rozwiercania realizowany jest poprzez nawiercenie złoża optymalnie zagęszczonymi odwiertami; (e) etap produkcji powoduje spadek ciśnienia złożowego i zmianę poziomu płynów złożowych; (f) wtórną eksploatację prowadzi się stosując zabiegi nawadniania lub nagazowania złoża, w celu odbudowania ciśnienia złożowego [20]

ośrodka geologicznego pozwala ponadto na zapobieganie problemom podczas wiercenia, związanym głównie z:

- niestabilnością i obsypywaniem się ściany otworu wiertniczego,
- występowaniem stref o anomalnie wysokim lub niskim ciśnieniu, powodującym niepożądaną kompaktację skały zbiornikowej,
- zamierzonym (zabieg szczelinowania w ramach intensyfikacji wydobywania gazu ze złóż niekonwencjonalnych typu *shale*) lub niezamierzonym powstawaniem szczelin i reaktywacją istniejących spękań lub uskoków oraz w konsekwencji związaną z nimi niekontrolowaną ucieczką płuczki wiertniczej (rysunek 12).

Tego typu awariom oraz wielu innym komplikacjom podczas wiercenia można zapobiec poprzez lepsze rozpoznanie ośrodka geologicznego, tym samym minimalizując czas wiercenia, a w efekcie końcowym – koszty wiercenia.

Biorąc pod uwagę przytoczone informacje i wyniki prac badawczych, podjęcie tematyki związanej z budową mechanicznego modelu Ziemi wydaje się w tej chwili potrzebą o wysokim priorytecie.



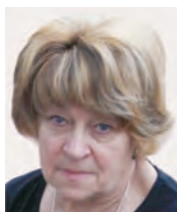
Rys. 12. Kierunki naprężeń w górotworze i utrata stabilności ścian otworu wiertniczego jako skutek złego doboru gęstości płuczki wiertniczej. Przy płuczce o zbyt dużej gęstości szczeliny powstałe podczas wiercenia pojawiają się wzdłuż kierunku maksymalnego naprężenia poziomego, a przy wyborze płuczki o zbyt niskiej gęstości obsypywanie ściany otworu ma miejsce w kierunku zgodnym z kierunkiem minimalnego naprężenia poziomego [1, zmienione]

Literatura

- [1] Akbar Ali, Brown A. H., Delgado T., Lee R., Plumb D., Smirnov D., Marsden N., Prado-Velarde R., Ramsey E., Spooner L., Stone D., Stouffer T.: *Watching Rocks Change – Mechanical Earth Modeling*. „Oilfield Review” 2008, s. 22–39.
- [2] Bjørlykke K., Høeg K., Haque Mondol M.: *Introduction to Geomechanics: Stress and Strain in Sedimentary Basins* [w:] *Petroleum Geoscience: From sedimentary Environments to Rock Physics*. 2010, s. 281–298.
- [3] Castillo D. A., Moss D.: *Reservoir Geomechanics Applied to Drilling and Completion Programs in Challenging Formations: North West Shelf, Timor Sea, North Sea and Colombia*. „Australian Petroleum Production and Exploration Association Journal” 2000, s. 509–520.
- [4] Domonik A., Dziedzic A., Łukaszewski P., Pinińska J.: *Potrzeba integracji właściwości wytrzymałościowych skal – baza danych geomechanicznych*. „Biuletyn Państwowego Instytutu Geologicznego” 2008, nr 429, s. 139–1447.
- [5] Herwanger J., Koutsabeloulis N.: *Seismic Geomechanics: How to Build and Calibrate Geomechanical Models using 3D and 4D Seismic Data*. EAGE Publications, 2011.
- [6] Jędrzejowska-Tyczkowska H. i zespół: *Prognozowanie rozkładu ciśnień w profilu otworu Hermanowa-1 na podstawie badań sejsmicznych i istniejącej dokumentacji archiwalnej*. Okres realizacji 2000–2001. Archiwum INiG, 2000.
- [7] Jędrzejowska-Tyczkowska H., Bartoń R., Żukowska K.: *Wykorzystanie pomiarów CAST i SED do weryfikacji obliczania ciśnień złożowych z danych sejsmicznych*. Materiały Międzynarodowej Konferencji Naukowo-Technicznej Geopetrol 2008, Sekcja I, s. 339–345 (poster).
- [8] Jędrzejowska-Tyczkowska H., Herman Z., Bartoń R.: *Estimation of Abnormal Pressure Zones on the Basis of Seismic. Case study of carbonate reservoirs*. EAGO/SEG/EAEG/PAEH Conference & Exhibition – Moscow, Russia, 1–4 September 2003. Electronical issue CD-R, session PS5, poster No 3.
- [9] Jędrzejowska-Tyczkowska H. i zespół: *Prognozowanie anomalnie wysokich ciśnień złożowych w utworach cechsztyńskich na bazie rozpoznania sejsmicznego oraz danych archiwalnych z wiercenia i pomiarów geofizyki wiertniczej na przykładzie rozkładu ciśnień w strukturze Sławoborza i struktur przyległych*. Okres realizacji 2002. Archiwum INiG, 2002.
- [10] Jędrzejowska-Tyczkowska H., Malaga M., Żukowska K.: *Dynamic seismic velocity modelling*. European Association of Geoscientists and Engineers. „First Break” 2011, vol. 29, s. 73–76.
- [11] Jędrzejowska-Tyczkowska H., Misiarz P., Bartoń R., Żuławiński K.: *Sejsmika 4D z perspektywy polskich potrzeb i możliwości*. Materiały Konferencji Naukowo-Technicznej Geopetrol 2004. Prace INiG nr 130, Sekcja II, s. 167.
- [12] Jędrzejowska-Tyczkowska H., Żukowska K., Malaga M., Regucki K.: *The potentials of 4D „time-lapse” seismics in computing the rock mass pressure and porous pressures*. Actual Problems of Geosciences, Moscow, October 14–17, 2008, Schmidt Institute of Physics of the Earth RAS (IPE RAS).
- [13] Jędrzejowska-Tyczkowska H.: *Dynamiczny model sejsmicznych prędkości akustycznych określony na podstawie statycznego modelu sejsmogeologicznego oraz wybranych*

wyników testów otworowych. Prace Naukowe INiG 2011, vol. 176, s. 1–68.

- [14] Jędrzejowska-Tyczkowska H.: *Inwersja sejsmiczna akustyczna i elastyczna fal podłużnych, konwertowanych i poprzecznych, w zagadnieniach interpretacji złożowej*. Prace INiG 2009, nr 160, s. 1–85.
- [15] Jędrzejowska-Tyczkowska H.: *Polish Shale Gas*. „Nafta-Gaz” 2011, nr 5, s. 307–310.
- [16] Jędrzejowska-Tyczkowska H.: *Sejsmiczne konsyistentne estymatory złoża węglowodorów*. Prace IGNiG 2003, nr 123, s. 1–139.
- [17] Jędrzejowska-Zwinczak H.: *Statystyczne modele interpretacji danych sejsmicznych*. „Nafta-Gaz” 1981, nr 3, s. 84–90.
- [18] Langer M., Heusermann S.: *Geomechanical stability and integrity of waste disposal mines in salt structures*. „Engineering Geology” 2001, vol. 61, s. 155–161.
- [19] Misiarz P., Jędrzejowska-Tyczkowska H.: *Geological and seismic-consistent analysis – the important tool for Jurassic reservoirs properties estimation*. Extended Abstracts, Vol. I, 60 EAGE Conference & Technical Exhibition, 8–12 June 1998, Leipzig, PO20.
- [20] Sayers C.: *Geophysics under stress: geomechanical applications of seismic and borehole acoustic waves: Distinguished Instructor Short Course*. SEG & EAGE, 2010.
- [21] Sowizdzał K., Stadtmüller M.: *Statyczny model złoża węglowodorów jako przestrzeń integracji danych geologiczno-geofizycznych. Nowe metody i technologie zagospodarowania złóż i wydobywania węglowodorów w warunkach lądowych i morskich*. Materiały konferencyjne, Geopetrol 2010, s. 201–208.
- [22] Verdon J. P., Kendall J. M., White D. J., Angus D. A.: *Linking microseismic event observation with geomechanical models to minimise the risks of storing CO₂ in geological formations*. „Earth and Planetary Science Letters” 2011, vol. 305, s. 143–152.



Prof. dr hab. inż. Halina JĘDRZEJOWSKA-TYCZKOWSKA – stypendysta UNESCO (Francja, Włochy; okres 1971–1973, 1976) oraz British Council (Wielka Brytania, Uniwersytet Cambridge; 1976). Od 2009 roku profesor w Zakładzie Geologii INiG. Odznaczona przez EAGE medalem im. N. Anstey’a (2008) za wybitne osiągnięcia w dziedzinie fal poprzecznych w sejsmice.



Mgr inż. Małgorzata SŁOTA-VALIM – absolwentka Wydziału Biologii i Nauk o Ziemi na Uniwersytecie Jagiellońskim oraz Wydziału Wiertnictwa Nafty i Gazu Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie. Od 2009 roku jest pracownikiem INiG w Zakładzie Geologii i Geochemii. Zajmuje się badaniem własności petrofizycznych skał oraz konstrukcją statycznych modeli geologicznych.