

Robert Bartoń
Instytut Nafty i Gazu, Kraków

Zastosowanie pomiarów PPS 3C do szczegółowego odwzorowania i interpretacji strefy okołootworowej

Wstęp

Dokładne rozpoznanie przestrzeni geologicznej wokół otworu wiertniczego jest bardzo istotne, zwłaszcza gdy mamy do czynienia ze skomplikowaną budową geologiczną oraz specyfiką występowania basenów sedymentacyjnych, tj. niewielkich złóż o małej miąższości, często wielowarstwowych. Aktualnie najbardziej efektywną metodą pozwalającą rozpoznać stan górotworu przed wierceniem otworu są sejsmiczne prace poszukiwawcze. Jednak, z uwagi na trudności oraz ograniczenia na jakie metoda ta napotyka podczas prac poszukiwawczych oraz processing'owych na obszarach o skomplikowanej budowie tektonicznej (przedgórze Karpat) – sprawia ona, że dane wynikowe otrzymujemy nie z taką dokładnością i rozdzielczością jakby się oczekiwało.

Pomocą w tej kwestii mogą być pomiary pionowego profilowania sejsmicznego (PPS), które ze specyfiki pomiarów powinny stanowić dopełnienie w badaniach sejsmicznych – zwłaszcza wtedy, gdy wyższa rozdzielczość pomiaru jest niezbędna do dokładnego zrozumienia natury złoża. Pomiary PPS stanowią zasadniczą platformę w integracji i kalibracji profilowań otworowych z sejsmicznym polem

falowym, umożliwiając dokładną transformację z domeny głębokościowej do domeny czasowej i odwrotnie. Pomiar PPS typu *zero-offset* umożliwia precyzyjne dopasowanie oraz korelację horyzontów sejsmicznych i geologicznych. Zaimplementowanie do sejsmiki powierzchniowej dodatkowych informacji zawartych w polu falowym PPS pozwala na odtworzenie wysokich częstotliwości, niezbędnych do opisu budowy geologicznej o wysokim stopniu szczegółowości.

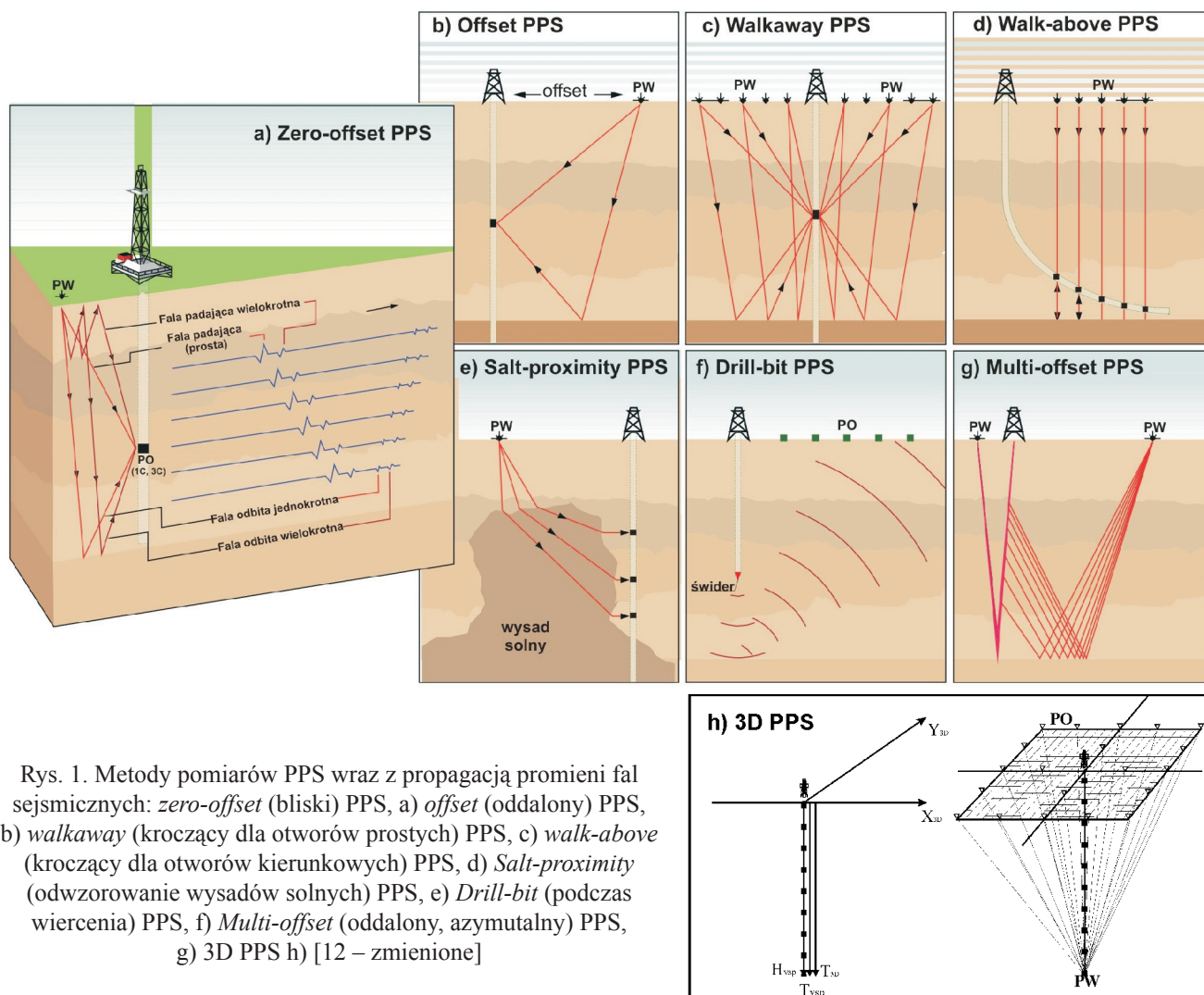
Śledząc literaturę zachodnią [4, 10, 11, 18] można odnaleźć wiele materiałów dokumentujących korzyści wynikające z przeprowadzonych badań PPS 3C w wersji *zero-offset* oraz *offset*, a mianowicie: dokładne, kierunkowe (anizotropia) rozpoznanie parametrów fizycznych i petrofizycznych w strefie okołootworowej i bliskim sąsiedztwie otworu; budowa modelu prędkościowo-warstwowego; weryfikacja interpretacji geologiczno-facjalnych oraz pozbycie się artefaktów na sekcjach geologicznych i sejsmicznych. Warto zaznaczyć, że pomiary te mogą stanowić istotny udział w rozpoznaniu złóż o niskiej przepuszczalności, tzw. *tight gas*.

Metodyka pomiarów PPS 3C

Pionowe profilowanie sejsmiczne – PPS (*Vertical Seismic Profiling – VSP*) jest otworową metodą sejsmiczną polegającą na śledzeniu sejsmicznego pola falowego (rejestracji fal sejsmicznych) wzbudzanego na powierzchni ziemi (wibrator, kafar), a rejestrowanego w otworze wiertniczym za pomocą sond jednoskładnikowych 1C lub wieloskładnikowych 3C (9C), które przemieszczają się w otworze w określonym interwale, od spodu otworu ku jego wylotowi,

o stały krok pomiarowy [5, 14, 15, 22]. W wyniku pomiaru otrzymujemy obraz falowy złożony z fal padających (*downgoing*) i odbitych (*upgoing*) od horyzontów wgłębnych, usytuowanych w niewielkiej odległości od odbiorników. W obu przypadkach rejestrowane jest zarówno pole fal jednokrotnych, jak i wielokrotnych (rysunek 1).

Zasada pomiaru PPS 3C (*three-component – 3C*, rysunek 1) polega na rejestracji fal sejsmicznych son-



Rys. 1. Metody pomiarów PPS wraz z propagacją promieni fal sejsmicznych: zero-offset (bliski PPS, a) offset (oddalony PPS, b) walkaway (kroczący dla otworów prostych) PPS, c) walk-above (kroczący dla otworów kierunkowych) PPS, d) Salt-proximity (odwzorowanie wysadów solnych) PPS, e) Drill-bit (podczas wiercenia) PPS, f) Multi-offset (oddalony, azymutalny) PPS, g) 3D PPS h) [12 – zmienione]

dą złożoną z trzech wzajemnie do siebie prostopadłych geofonów: składowej Z – geofon usytuowany pionowo i składowych X i Y – geofony położone w płaszczyźnie poziomej – tak, że każda składowa (geophone component) rejestruje tylko określony typ drgań cząstek ośrodka. Ten typ pomiaru – PPS 3C, stwarza możliwość identyfikacji i selekcji fal kompresyjnych typu P, fal poprzecznych typu S oraz fal przemiennych, będących efektem konwersji fali P na granicach litostratygraficznych. Ta właściwość rejestracji, w stosunku do pomiaru sondą jednoskładnikową, umożliwia poprawne odtworzenie kształtu sygnału oraz amplitudy pola falowego generowanego przez źródło sejsmiczne [18, 26].

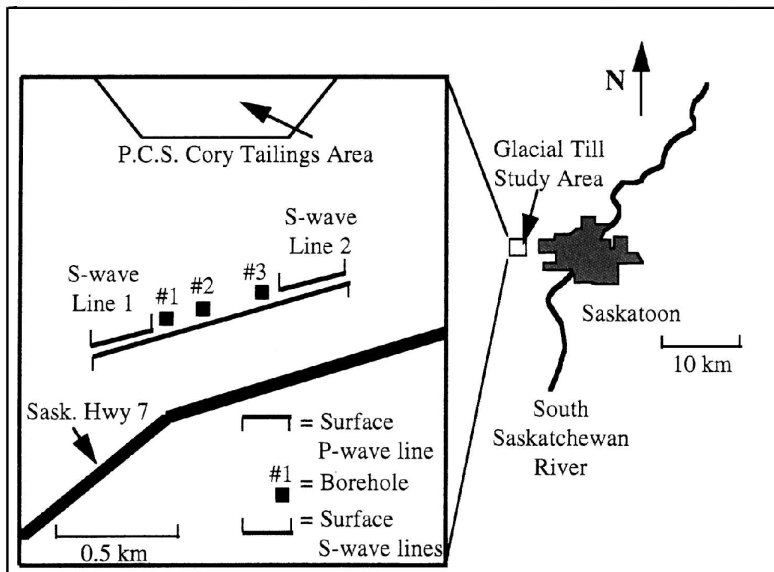
Tak przyjęta w profilowaniu PPS metoda rejestracji pola falowego umożliwia znaczne zmniejszenie odległości

między horyzontem odbijającym a odbiornikiem, w stosunku do tradycyjnej sejsmiki powierzchniowej, co rzutuje na dużo wyższy stosunek sygnału użytecznego do szumu – S/N. Konsekwencje tego faktu skutkują niejednokrotnie lepszą oceną i eliminacją niektórych zjawisk obecnych na sekcjach sejsmicznych, takich jak: wieloznaczność obrazu falowego w strefie Fresnela, efekt absorpcji i rozwarcia sferycznego – ważnych w procesie odtworzenia rzeczywistych amplitud, czego skutkiem jest śledzenie zmian budowy geologicznej ze znacznie większą dokładnością pionową oraz poziomą, która odzwierciedla się na zapisie sejsmicznym szerszym spektrum amplitudowym, w stosunku do tradycyjnej sejsmiki powierzchniowej. Ponadto można śledzić i selekcjonować odbicia jedno- i wielokrotne fal padających, jak i odbitych [9, 11].

Przykład zastosowania wyników przetwarzania PPS 3C w badaniach sejsmicznych

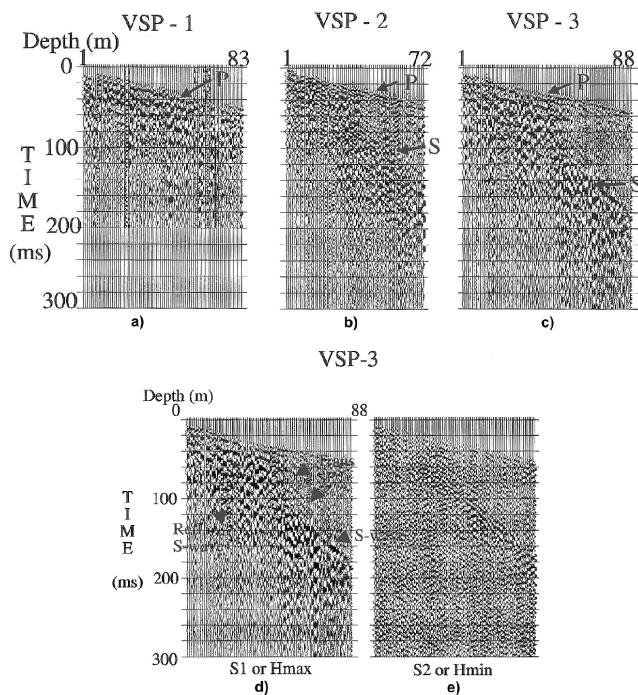
Jednym z wartych zaprezentowania przykładów wykorzystania pomiarów PPS 3C w badaniach sejsmicznych

były pomiary pionowego profilowania sejsmicznego wykonane w wersji zero-offset 3C (bliski punkt wzbudzenia)



Rys. 2. Lokalizacja obszaru badań sejsmicznych – odwiertów #1, #2, #3 oraz linii sejsmicznych umiejscowionych na zachód od Saskatoon [4]

w Kanadzie, na zachód od Saskatoon [4]. Pomiary te miały na celu rozpoznanie ciągłości i miąższości litofacjalnej deponowanych utworów polodowcowych (*glacial deposits*), zalegających tuż pod powierzchnią ziemi. W tym celu wykonano trzy otwory (#1, #2, #3 – rysunek 2), których głębokość końcowa wynosiła kolejno: 83, 72 i 88 m. Po



Rys. 3. Dane pomiarowe PPS (VSP) dla składowej pionowej Z, zarejestrowane w otworach: #1 – a), #2 – b), #2 – c) oraz dla składowych poziomych S1 (H1) – d) i S2 (H2) – e), zarejestrowane w otworze #3. P – fala padająca podłużna, S – fala padająca poprzeczna, SP – fala konwertowana [4]

okonturowaniu poszczególnych otworów uzyskano różną miąższość stratygraficzną utworów polodowcowych (*glacial deposits*): 37, 41 i 48 m. Pomiary wielokładnikowe PPS 3C *zero-offset* miały dostarczyć szczegółowego rozpoznania prędkości fal typu P i S (V_p/V_s) oraz określić sejsmiczną identyfikację warstw sedimentacyjnych (zawierających kompozycje gliny, piasku i łupku ilastego) do spodu odwiertów, a w połączeniu z danymi geofizyki wiertniczej umożliwić także weryfikację litofacjalną utworów polodowcowych.

Źródłem wzbudzenia dla pomiarów był ładunek wybuchowy (*single cap and 20 g booster combination*), umieszczony w otworze strzałowym 1,5 metra pod powierzchnią ziemi – dla każdego PW miał on odrębną lokalizację. Sonda 3C przemieszczała się z krokiem 1 metra, dla

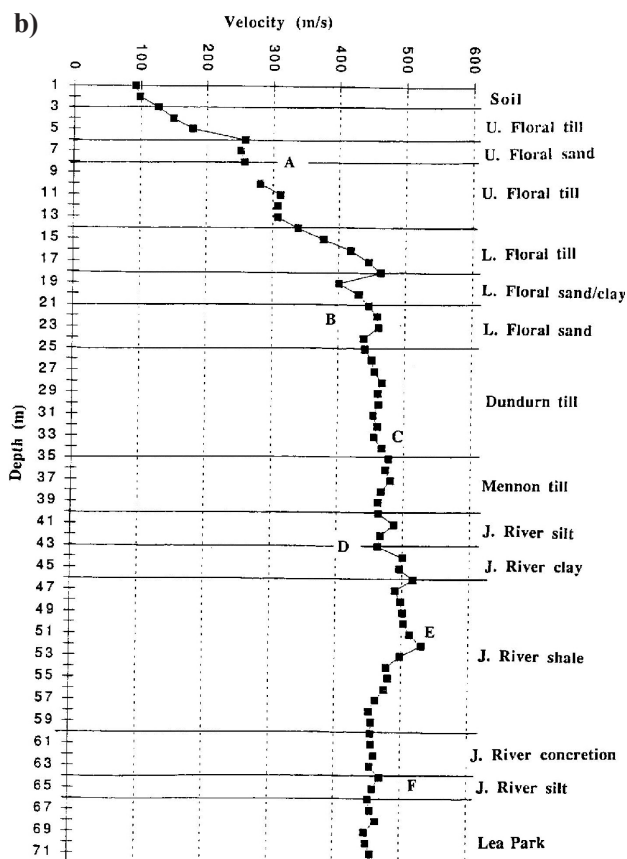
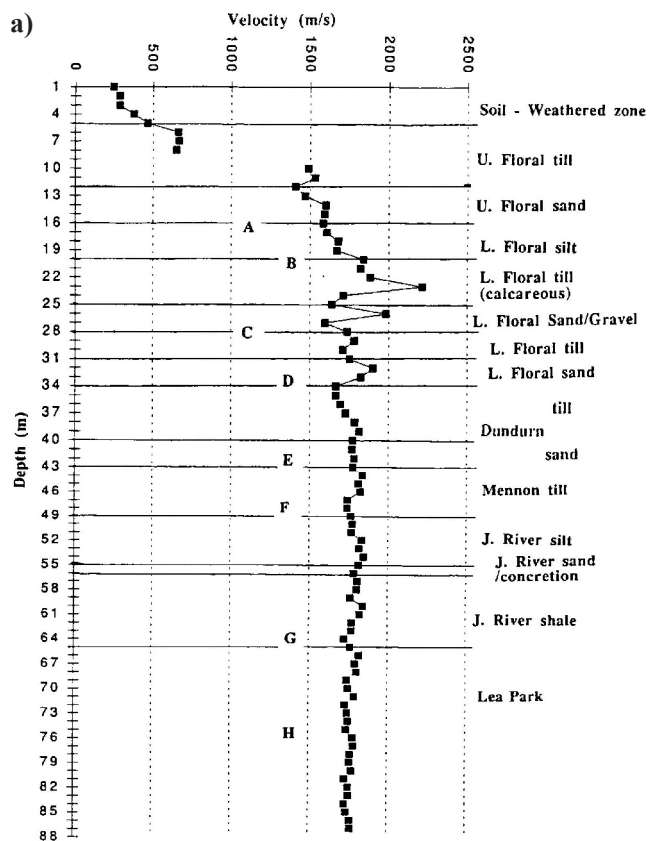
wszystkich punktów wzbudzenia. Przykładowe wyniki danych pomiarowych zamieszczono na rysunku 3.

Zakres częstotliwościowy pomiarów PPS (VSP-1, VSP-2, VSP-3) dla fal podłużnych P wynosił 200 Hz, natomiast dla fal poprzecznych S – 150 Hz. Dla powyższych zakresów częstotliwości autorzy przyjęli prędkość średnią dla fal podłużnych (*P-waves*) wynoszącą 1850 m/s, a dla fal poprzecznych (*S-waves*) – 450 m/s, uzyskując odpowiednio rozdzielczość pionową dla fal podłużnych 2,3 m, a dla fal poprzecznych – 0,75 m, przy $\frac{1}{4}$ długości propagacji fali sejsmicznej. Powyższe wyniki potwierdzają, że fale poprzeczne S umożliwiają uzyskanie obrazu falowego, który dostarcza znacznie więcej szczegółów w zmianach fizycznych ośrodka geologicznego niż dla fal podłużnych, ze względu na wolniejszy przebieg fali sprężystej.

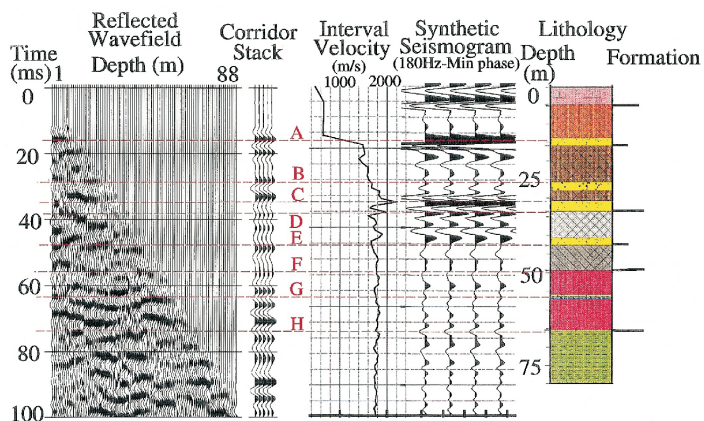
Na podstawie czasów pierwszych wstąpień fali P oraz S autorzy [4] wyznaczyli modele prędkości interwałowych, z przyporządkowanymi polodowcowymi formacjami litologicznymi (rysunek 4).

Wyniki przetwarzania pionowego profilowania sejsmicznego dla VSP-3 (składowa pionowa) oraz VSP-2 (składowa pozioma) autorzy skorelowali z granicami litologicznymi, a wyniki zamieścili na rysunkach 5 i 6. Ponadto wykonali oni korelację tras sumarycznych dla fal podłużnych (VSP-3) i poprzecznych (VSP-2) z krzywą V_p/V_s , w celu szczegółowej identyfikacji zmian litofacjalnych oraz porowatości w utworach polodowcowych (rysunek 7).

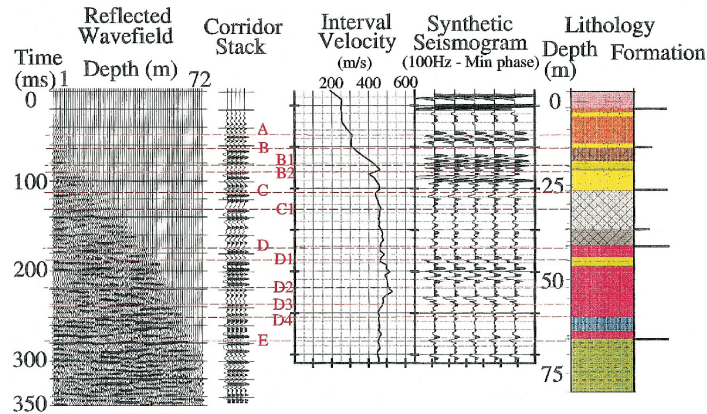
Uzyskane rezultaty z powyższych badań potwierdziły skuteczność zastosowania zintegrowanych technik geofizycznych w złożonych środowiskach geologicznych,



Rys. 4. Zestawienie prędkości interwałowych fal podłużnych P dla pomiaru VSP-3 – a) oraz fal poprzecznych S dla pomiaru VSP-2 – b). Linie poziome (A–F) odpowiadają granicom litologicznym [4]



Rys. 5. Korelacyjne zestawienie pola fal odbitych podłużnych P i trasy sumarycznej (*corridor stack*) pionowego profilowania sejsmicznego (VSP-3), z obliczonymi prędkościami interwałowymi (VSP-3), trasami syntetycznymi oraz profilem litologiczno-sedymentacyjnym. Czerwone linie (A–H) odnoszą się do granic refleksyjnych pochodzących od fal podłużnych P [4]

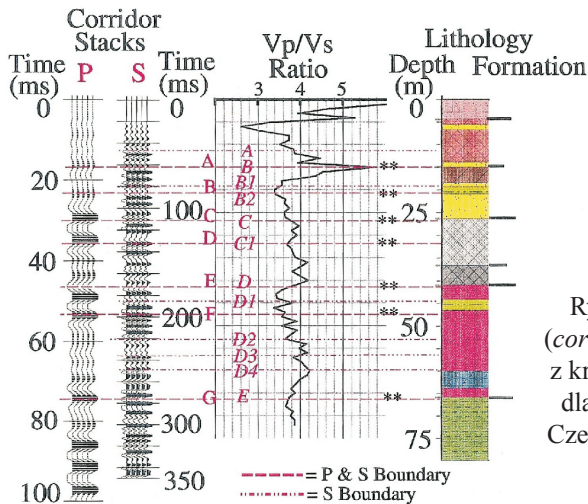


Rys. 6. Korelacyjne zestawienie pola fal odbitych poprzecznych S i trasy sumarycznej (*corridor stack*) pionowego profilowania sejsmicznego (VSP-2), z obliczonymi prędkościami interwałowymi (VSP-2), trasami syntetycznymi oraz profilem litologiczno-sedymentacyjnym. Czerwone linie (A–E) odnoszą się do granic refleksyjnych pochodzących od fal poprzecznych S [4]

umożliwiając skuteczne i precyzyjne rozpoznawanie zmian fizycznych i petrofizycznych w przestrzeni geologicznej znajdującej się tuż pod powierzchnią ziemi.

Autorzy J. Bradley, C. i Z. Hajnal potwierdzili, że współczynnik odbicia fali P jest bardzo dobrym wskaźni-

kiem dużych zmian porowatości w szkieletcie skały zbiornikowej, natomiast współczynnik odbicia fali S ujawnia więcej subtelnych szczegółów w zmianach litologii oraz porowatości dla tych samych interwałów pomiarowych. Dodatkowo badania te potwierdziły, że zdeponowane



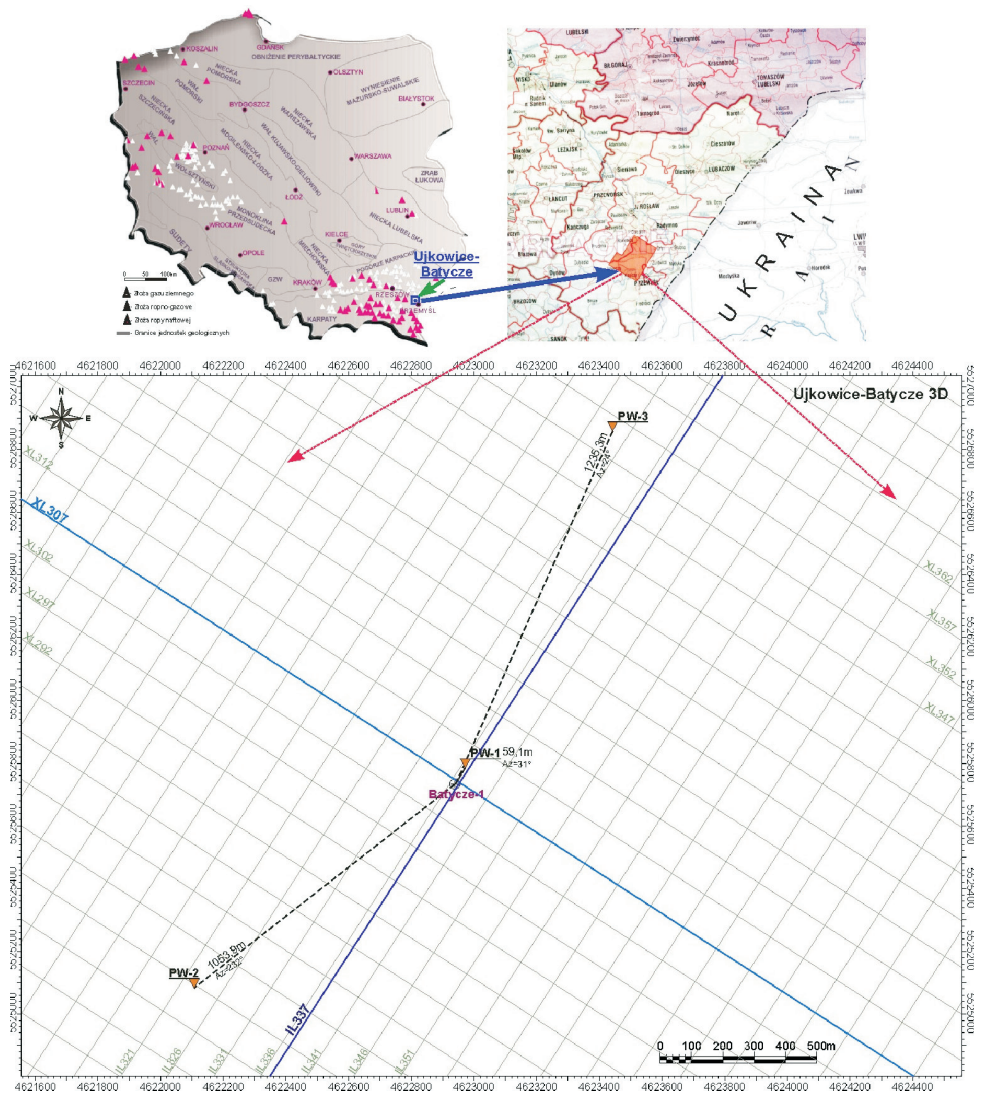
utwory czwartorzędowe, zalegające blisko powierzchni ziemi, charakteryzujące się znacznymi zmianami ciągłości facjalnej oraz dużą zmiennością geologiczną na bliskich odległościach, mogą być zidentyfikowane przy użyciu metod refleksyjnych – zwłaszcza pomiarów wieloskładnikowych PPS 3C.

Rys. 7. Korelacyjne zestawienie tras sumarycznych dla fal typu P i S (corridor stacks) pionowego profilowania sejsmicznego (VSP-3, VSP-2), z krzywą V_p/V_s – obliczoną na podstawie prędkości interwałowych PPS dla fal P i S oraz obliczonym profilem litologiczno-sedymentacyjnym. Czerwone linie odnoszą się do granic refleksyjnych pochodzących od fal podłużnych P i poprzecznych S [4]

Badaniami sejsmicznymi objęto rejon zapadliska przedkarpackiego – brzeżnej strefy nasunięcia karpacko-stebnickiego na terenie województwa podkarpackiego, usytuowanego na zachód od Przemysła. Prezentowany na rysunku 8 obszar badań, pod względem budowy morfologicznej charakteryzuje się dużym urozmaiceniem – wysokości wahają się w granicach od 200 m do 430 m n.p.m.

W budowie geologicznej obszaru badań Ujkowice-Batycze 3D wyróżniono: podłoże utworów mioceńskich, osady miocenu autochtonicznego, jednostkę stebnicką, Karpaty fliszowe oraz pokrywę osadów czwartorzędowych. Podłoże osadów miocenu autochtonicznego stanowią utwory prekambriu. Są one wykształcone głównie jako łupki pstry, z cienkimi wkładkami twardych piaskowców kwarcytowych w kolorze szarym i jasnoszarym. Kompleks utworów miocenu autochtonicznego reprezentowany jest przez warstwy baranowskie badenu dolnego, warstwy ewaporatowe (badenu środkowego), warstwy nadewaporatowe badenu górnego oraz osady sarmatu. Utwory jednostki stebnickiej – reprezentowa-

Rejon badań



Rys. 8. Lokalizacja badań sejsmicznych Ujkowice-Batycze 3D na tle: mapy występowania złóż ropy naftowej i gazu ziemnego w Polsce [16 – zmodyfikowane], mapy administracyjnej Polski (1:750 000) oraz wykonanych pomiarów pionowego profilowania sejsmicznego PPS 3C, zarejestrowanych w otworze Batycze-1, na tle zdjęcia Ujkowice-Batycze 3D

ne głównie przez niższe ogniwa badenu – wykształcone są przede wszystkim jako łupki i mułowce szare oraz szaropopielate, margliste, przewarstwione zlepieńcami. Utwory Karpat fliszowych, reprezentowane przez jednostkę skolską, wykształcone są jako łupki i piaskowce oraz margle, rzadziej mułowce czy wapienie. Cały obszar pokrywają utwory czwartorzędowe, wykształcone jako gliny, piaski

i żwiry, o miąższości w granicach 10–50 m [8]. Wywiercony w grudniu 2006 roku otwór Batycze-1 miał na celu rozpoznanie występowania akumulacji węglowodorów oraz potwierdzenie występowania pułapek strukturalno-tektonicznych w utworach miocenu autochtonicznego [24]. Wyinterpretowany profil stratygraficzno-litologiczny w otworze Batycze-1 zamieszczono w tablicy 1.

Tablica 1. Opis stratygraficzny (faktyczny) w otworze Batycze-1, według G. Staryszak i H. Węgrzyn

Głębokość		Stratygrafia/litologia
0	11 m	Czwartorzęd: gliny, piaski, żwiry
	2319 m	Utwory miocenu autochtonicznego – sarmat: <ul style="list-style-type: none"> • ilowce szare, kruche, • mułowce szare, miękkie, kruche
	2650 m	Utwory miocenu autochtonicznego – baden górny: <ul style="list-style-type: none"> • ilowce szare, kruche, częściowo plastyczne, • mułowce szare, średnio twarde, zapiaszczone, • piaskowce drobnoziarniste, szare, zailone, mikowe
	2661 m	Prekambr: <ul style="list-style-type: none"> • mułowce ciemnoszare, słabo zapiaszczone, z węglistym detrytusem, • łupki twarde, kruche, o jedwabistym połysku

Badania sejsmiczne

Połowe prace sejsmiczne tematu Ujkwice-Batycze 3D zostały przeprowadzone metodą dynamitową oraz wibratorową, w okresie od sierpnia 2004 r. do grudnia 2004 r., na zlecenie PGNiG S.A. W okresie od lutego do sierpnia 2008 roku poddano je reprocessingowi i reinterpretacji przez ośrodek Geofizyki Kraków. Podstawowym celem prac sejsmicznych 3D wykonanych w ramach tematu: „Ujkwice-Batycze” było uszczegółowienie morfologii podłoża miocenu oraz dokładne rozpoznanie budowy strukturalnej i litofacjalnej osadów miocenu autochtonicznego, a następnie wydzielenie obszarów potencjalnego występowania węglowodorów. Procedury reprocessingu i reinterpretacji miały za cel dokładne zweryfikowanie modelu budowy strukturalnej, szczegółowe rozpoznanie przebiegu stref tektonicznych (mających zasadnicze znaczenie dla określenia dróg migracji węglowodorów), wykantowanie nowych pułapek strukturalnych w utworach miocenu atochtonicznego oraz wskazanie nowych obiektów o charakterze potencjalnych pułapek złożowych, w celu wyznaczenia optymalnych miejsc pod kolejne wiercenia rozpoznawcze [8].

Sejsmikę otworową i pionowe profilowanie sejsmiczne (PPS) wykonano w otworze Batycze-1 przez Grupę Sejsmometrii Wiertniczej 1D/Kw – Geofizyki Kraków

w styczniu 2007 r., przy zastosowaniu aparatury pomiarowej Geometrics Strata ViewX, metodą bezdynamitową, przy użyciu wibratora Mark IV (rysunek 8) [7].

Wykonano jeden pomiar *zero-offset* (PW-1) oraz dwa pomiary typu *offset* (PW-2, PW-3) sondą jednoelementową trójskładnikową 3C, z zastosowaniem *sweep'u* o parametrach dla PW-1 i PW-3: 10–110 Hz (12 s, liniowy) oraz PW-2: 10–80 Hz (14 s, rosnący +3 dB/oct). Średnio na każdy punkt wzbudzania przypadały 3 rejestracje po 1 *sweep'ie*, a każdy *sweep* był zapisywany jako osobny rekord. Sumowanie odbywało się na etapie wstępnego przetwarzania. Szczegółowe parametry pomiaru PPS zostały zawarte w tablicach 2 i 3.

Otrzymane pola falowe, jako dane wejściowe PPS, zaprezentowano dla dwóch punktów wzbudzania: PW-1 i PW-2, wraz z identyfikacją propagacji fal sejsmicznych (rysunek 9).

Zakres uśrednionych widm amplitudowych, obliczonych w systemie Univers (Firmy Geovers – Moskwa) dla składowych Z, X, Y punktu wzbudzania PW-1, zarejestrowanego w interwale 0–2655 m, jest zawarty w przedziale od 10–110 Hz, co może wskazywać na dobrą rozdzielczość otrzymanych pomiarów. W celu oceny jakości powyższych danych, obliczono stosunek sygnału użytecznego do

Tablica 2. Wybrane parametry pomiaru PPS w otworze Batycze-1

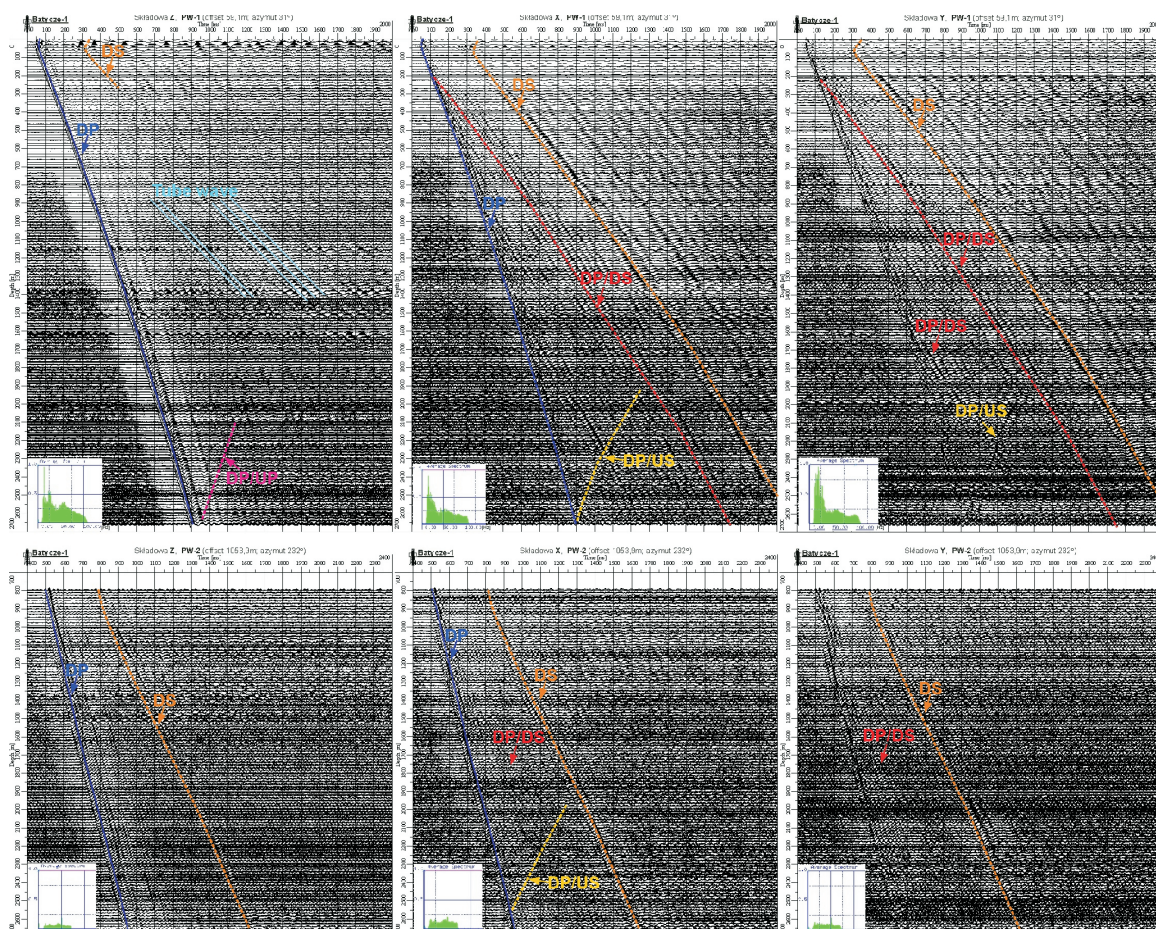
Data pomiaru	2–5 styczeń 2007 r.
Wykonawca	Grupa Sejsmometrii Wiertniczej 1D/Kw Geofizyka Kraków
Aparatura pomiarowa	StrataViewX
Źródło wzbudzenia	Wibrator MARK IV
Typ sweep'u	Liniowy – PW-1, PW-3; rosnący – PW-2
Zakres częst. sweep'u	10–110 Hz – PW-1, PW-3; 10–80 Hz – PW-2
Sonda/geofon	3C/SM4
Krok sondy	15 m
Długość zapisu	4000 ms
Krok próbkowania	1 ms

Tablica 3. Geometria i parametry schematu pomiarowego PPS w otworze Batycze-1

PW	Offset PW	Azymut PW	Zakres pomiaru/sonda	Niwelacja
Nr 1	59,1 m	31°	0–2655; 3C	–2,5 m
Nr 2	1053,9 m	232°	795–2655; 3C	66,4 m
Nr 3	1235,3 m	24°	390–2655; 3C	–21,9 m

szumów (S/N), uzyskując korzystną relację jedynie dla składowej pionowej. Składowe poprzeczne X i Y wyraźnie odznaczają się wysokimi zakłóceniami, uniemożliwiając uzyskanie pożądanych wyników w dalszym etapie przetwarzania.

W przypadku punktu wzbudzenia PW-2, zakres uśrednionych widm amplitudowych dla składowych Z , X , Y w interwale pomiaru 795–2655 m jest zawarty w przedziale od 10 do ok. 75 Hz. Niska wartość amplitudy w obliczonych widmach wskazuje na występowanie wysokich częstotliwości rezonansowych, obniżającą relację S/N – co uwidocznione jest na analizach jakościowych powyższych składowych.



Rys. 9. Dane pomiarowe pionowego profilowania sejsmicznego PPS 3C zarejestrowane dla punktu wzbudzenia PW-1 i PW-2, wraz z identyfikacją propagacji fal sprężystych. DP – fala padająca prosta (*downgoing compressional wave*), DS – fala padająca poprzeczna (*downgoing shear wave*), DP/UP – fala odbita (*reflected compressional wave*), DP/US – fala odbita poprzeczna (*reflected shear wave*), DP/DS – fala padająca konwertowana (*refracted converted shear wave*), Tube wave – fala zakłócająca

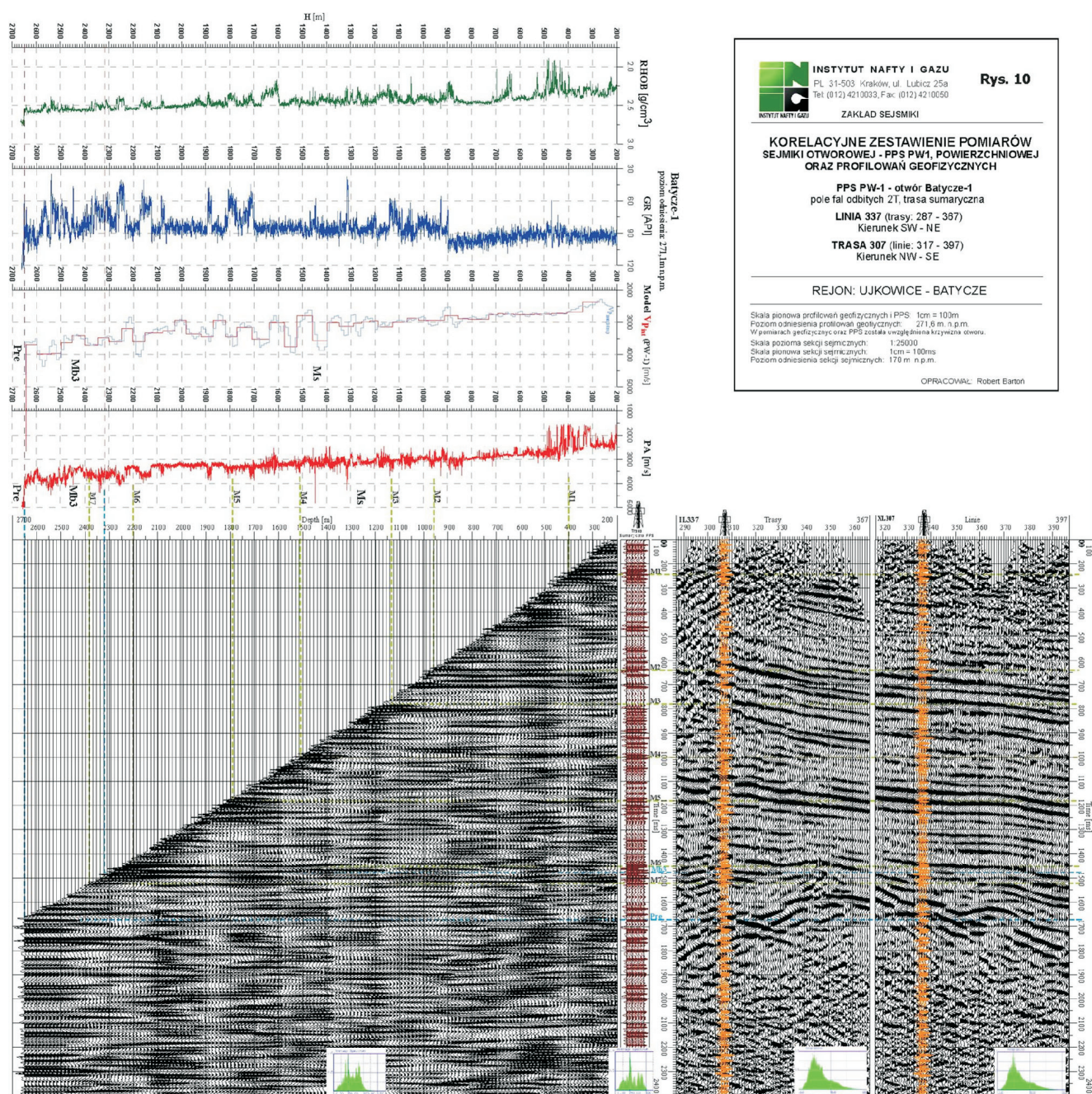
Rezultaty przetwarzania pionowego profilowania sejsmicznego 3C

Przetwarzanie wieloskładnikowego pionowego profilowania sejsmicznego 3C, zarejestrowanego w otworze Batycze-1 dla trzech punktów wzbudzenia: bliskiego (*zero-offset*) – PW-1 oraz dwóch oddalonych (*offset'owych*) PW-2 i PW-3, zostało wykonane w systemie Unvers firmy Geovers – Moskwa, według standardowych procedur przetwarzania PPS.

Przetwarzanie bliskiego punktu wzbudzenia PW-1 (odległość od otworu 59,1 m, azymut 31°) dla składowej pionowej Z polegało na wyznaczeniu trasy sumarycznej

(*corridor stack*) z pola fal odbitych (DP/UP – *reflected compressional wave*) po dekonwolucji predyktywnej, w wyniku sumowania fal odbitych jednokrotnych w wąskim korytarzu, wynoszącym 105 m. Prezentuje ona refleksy, odzwierciedlające właściwości fizyczne ośrodka, pochodzące z bliskiej strefy przyotworowej.

Na rysunku 10 zaprezentowano korelacyjne zestawienie danych otworowych: RHOB (profilowanie gęstości), GR (profilowanie promieniotwórczości naturalnej), PA (profilowanie akustyczne), modelu prędkości fali po-



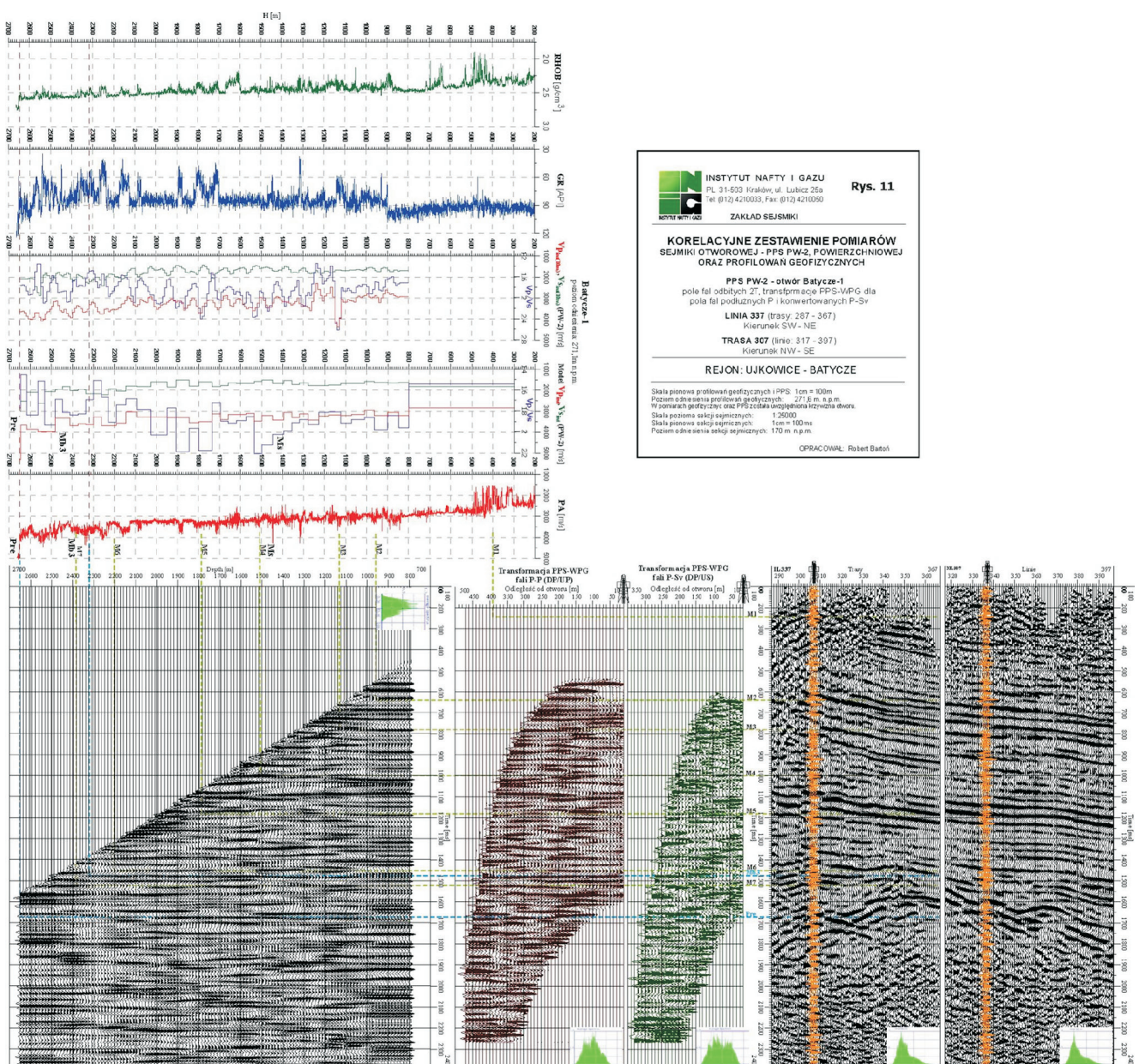
Rys. 10
INSTITUT NAFTY I GAZU
 PL 31-503, Kraków, ul. Lubczak 25a
 Tel (012) 4210033, Fax (012) 4210050
ZAKŁAD SEJSMIKI
KORELACYJNE ZESTAWIENIE POMIARÓW SEJSMIKI OTWOROWEJ - PPS PW1, POWIERZCHNIOWEJ ORAZ PROFILÓW GEOFIZYCZNYCH
PPS PW-1 - otwór Batycze-1
 pole fal odbitych ZT, trasa sumaryczna
LINIA 337 (trasy: 287 - 397)
 Kierunek SW - NE
TRASA 307 (linie: 317 - 397)
 Kierunek NW - SE
REJON: UJKOWICE - BATYCZE
 Skala pionowa profilowań geofizycznych i PPS: 1cm = 100m
 Poziom oś czasu profilowań geofizycznych: 21,6 m. i. p. m.
 W pomiarach geofizycznych oraz PPS została uwzględniona krytyczna osłona.
 Skala pozioma sekcji sejsmicznych: 1:25000
 Skala pionowa sekcji sejsmicznych: 1cm = 100ms
 Poziom oś czasu sekcji sejsmicznych: 170 m. i. p. m.
 OPRACOWAŁ: Robert Barton

Rys. 10. Korelacyjne zestawienie pomiarów sejsmiki otworowej – PPS PW-1, powierzchniowej oraz profilowań geofizycznych

dłuższej – obliczonej z czasów pierwszych wstąpień fali P, pola fal odbitych PPS (DP/UP) po dekonwolucji predyktywnej, sprowadzonego do czasu 2T, trasy sumarycznej oraz fragmentów sekcji sejsmicznych IL337 i XL307, pochodzących z badań sejsmicznych Ujkowice-Batycze 3D. Na podstawie powyższego wykresu typu *L-plot* w prosty sposób możemy „poruszać się” pomiędzy dwiema domenami skali pionowej: głębokościowej i czasowej. Analizując powyższe korelacyjne zestawienie trasy sumarycznej z czasowymi sekcjami sejsmicznymi (IL337, XL307), można dostrzec korelacyjną zgodność w obrębie granic M2, M5, M7 oraz Pre, jak również znaczne różnice w oknach czasowych 800–1000 ms, 1170–1270 ms oraz poniżej 1950 ms. Te znaczne różnice na zapisach refleksyjnych PPS

i sejsmiki powierzchniowej, zawarte w oknie czasowym 800–1000 ms na sekcji sejsmicznej, co odpowiada skali głębokościowej 1130–1470 m, mogą wynikać z występowania w tym interwale utworów, które w dominującej części zawierają mułowce i iłowce szare – nie dając tak znacznego kontrastu na sekcjach sejsmicznych. Podobną relację można prześledzić w oknie czasowym 1170–1270 ms, co odpowiada na skali głębokościowej 1790–1905 m. Tu również występują utwory, które w dominującej części zawierają mułowce i iłowce szare, wraz z nieznacznym udziałem formacji piaskowcowej drobnoziarnistej (analiza wyników próbek okruchowych).

Trasa sumaryczna zawiera znacznie więcej informacji (refleksów sejsmicznych) niż sekcje sejsmiczne w pozycji



Rys. 11. Korelacyjne zestawienie pomiarów sejsmiki otworowej – PPS PW-2, powierzchniowej oraz profilowań geofizycznych

otworu Batycze-1. Można zauważyć, że zakres górnej częstotliwości trasy sumarycznej w stosunku do sekcji sejsmicznych jest znacznie wyższy. Jeżeli weźmiemy obliczoną średnią prędkość fali podłużnej z PPS, wynoszącą 3280 m/s, oraz górne zakresy częstotliwości dla trasy sumarycznej (100 Hz) i sekcji sejsmicznych (65 Hz), to uzyskamy odpowiednio następujące rozdzielczości pionowe: 8,2 m dla PPS i 12,6 m dla sejsmiki powierzchniowej – odnosząc obliczenia dla ¼ długości fali sprężystej. Powyższe obliczenia potwierdzają większą dokładność pionowego profilowania sejsmicznego w rozpoznawaniu zmian własności fizycznych w strefie wokół otworu, w stosunku do przytoczonych badań sejsmiki powierzchniowej.

Przetwarzanie pomiaru PPS PW-2 *offsetowego*, oddalonego od otworu 1053,9 m na azymucie 232°, polegało na wydzieleniu fal odbitych podłużnych (DP/UP) na składowej pionowej Z i fal poprzecznych (DP/US – *reflected converted shear wave*) na składowej H1, z których wykonano transformacje PPS-WPG. Dodatkowo, na podstawie hodografów pierwszych wstąpień fali P i S obliczono modele prędkości dla fal podłużnych i poprzecznych (rysunek 11).

Podobnie jak dla danych wejściowych pochodzących z PW-1, tak i na rozpatrywanych, pochodzących z PW-2, można było dostrzec wysoki udział zakłóceń, które znacznie obniżały uśrednioną wartość amplitudy, widoczną na widmach amplitudowych (rysunek 9). Zarówno na falach padających podłużnych, odbitych oraz poprzecznych, dostrzega się dobrą dynamikę obrazu falowego, potwierdzoną obliczonymi spektrami amplitudowymi (rysunek 11).

Obliczone transformacje PPS-WPG dla fali podłużnej (DP/UP) i poprzecznej (DP/US) skorelowano z danymi otworowymi i fragmentami sekcji sejsmicznych na wykresie tzw. *L-plot* (rysunek 11). Rozdzielczość pionowa dla PW-2 (przy analogicznych obliczeniach jak dla PW-1) dla uśrednionej prędkości fali podłużnej (3280 m/s) i fali poprzecznej (1790 m/s), przy górnych granicach częstotliwości 75 Hz dla fal P i 80 Hz dla fal S, wynosi kolejno: 10,9 m i 5,6 m.

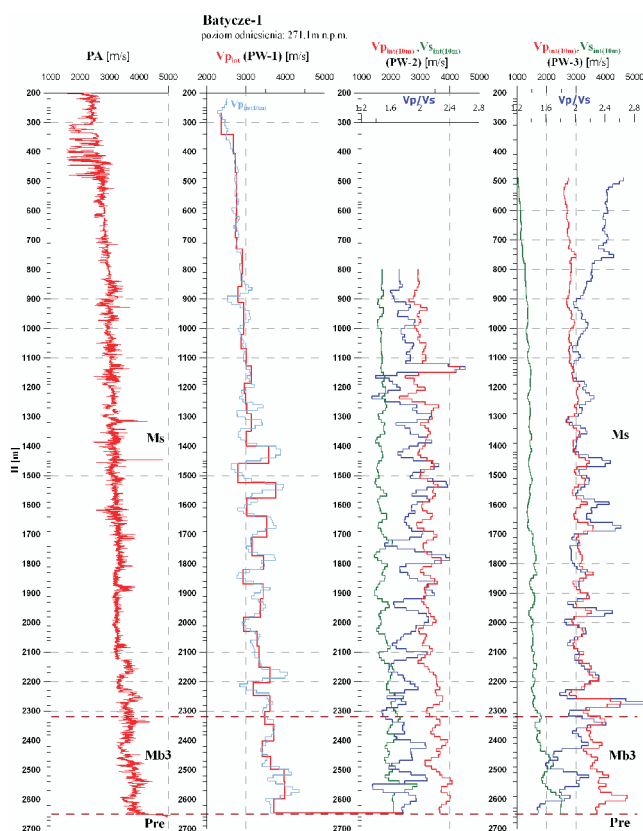
Granica odwzorowania przestrzeni geologicznej na kierunku NE-SW od otworu Batycze-1, przy wykorzystaniu transformacji PPS-WPG, dla fal podłużnych dochodziła do 470 m, a fal poprzecznych do 320 m, co umożliwiło znacznie dokładniejsze rozpoznanie przebiegu granic sejsmicznych, w stosunku do załączonego fragmentu sekcji sejsmicznej IL337 – zakres odwzorowania PPS-WPG na sekcji: trasy 287-307. Na transformacji PPS-WPG fal podłużnych oraz poprzecznych, wokół granic sejsmicznych wewnątrzmiocenijskich M6 i M7 dostrzega się w miarę równoległe linie refleksyjne, natomiast na sekcji IL337

ich przebieg jest nachylony od otworu w kierunku SW. Analogiczną relację można dostrzec wokół zalegającego spągu miocenu.

Podobną procedurę przetwarzania pionowego profilowania sejsmicznego (jak na danych PW-2) przeprowadzono na pomiarach pochodzących z punktu wzbudzenia PW-3, oddalonego od otworu 1235,3 m i leżącego na azymucie 24°.

Dla zobrazowania zmienności prędkości fal podłużnych oraz poprzecznych pochodzących z pomiarów PPS, zarejestrowanych na różnych azymutach, wykonano zbiorcze zestawienie krzywej profilowania akustycznego (PA), z obliczonymi modelami prędkości interwałowych fali podłużnej P na danych PPS (obliczonych z hodografów pierwszych wstąpień na składowych Z dla PW-1, PW-2 i PW-3) oraz fali poprzecznej P-Sv (obliczonych z hodografów pierwszych wstąpień fali S na składowych H1 dla PW-2 i PW-3 – co pokazano na rysunku 12).

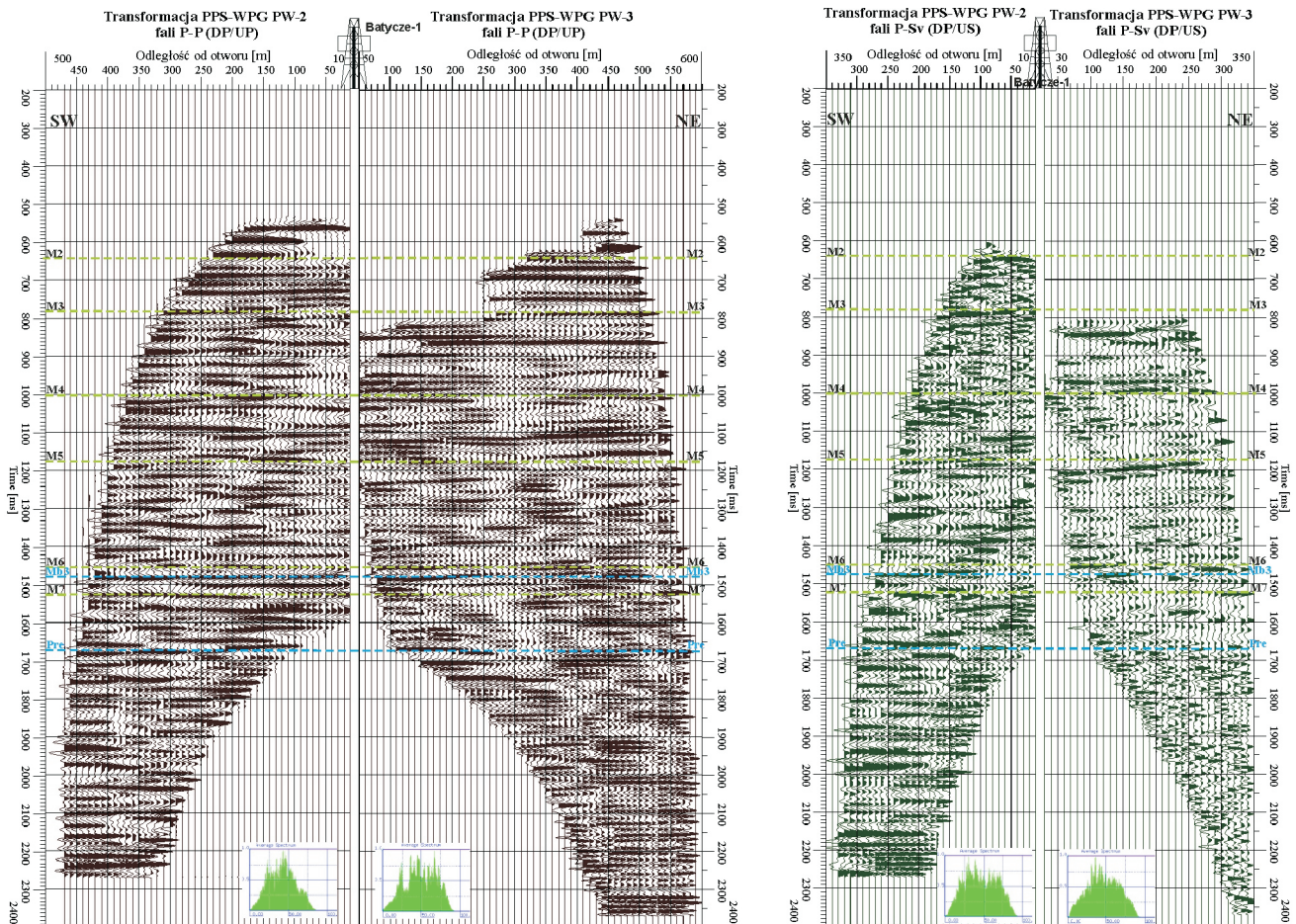
Fale poprzeczne z PW-3 posiadają do głębokości ok. 2400 m nieznacznie zróżnicowaną prędkość S. Wyraźnie inaczej manifestuje się prędkość fali S z PW-2, gdzie od głębokości 1200 m przebieg jest cykliczny, o wysokiej dynamice zmian prędkości.



Rys. 12. Korelacja profilowania akustycznego PA z modelami prędkości interwałowych PPS fali podłużnej P (DP) – PW1, PW-2, PW-3, oraz fali poprzecznej DS – PW-2, PW-3

Na rysunku 13 wykonano korelacyjne zestawienie obrazów transformacji PPS-WPG wokół otworu Batycze-1 dla fal podłużnych i poprzecznych pochodzących z PW-2 i PW-3, leżących na kierunku SW-NE. Powyższe

odzworowania pozwalają znacznie dokładniej niż sejsmika powierzchniowa zidentyfikować szczegóły na zapisie sejsmicznym oraz śledzić fizyczne zmiany ośrodka geologicznego wokół otworu.



Rys. 13. Zestawienie transformacji PPS-WPG dla fal podłużnych P-P (DP/UP) – a) oraz poprzecznych P-Sv (DP/US) – b), obliczonych z danych PPS PW-2 i PW-3. Kierunek odzworowania sejsmicznego przebiega z SW (PW-2) w kierunku NE (PW-3)

Podsumowanie i wnioski

W niniejszym artykule zaprezentowano metodę odzworowania strefy okołotworowej przy wykorzystaniu pomiarów pionowego profilowania sejsmicznego 3C.

Sporządzone wykresy korelacyjne, tzw. *L-plot*, dla dwóch punktów wzbudzenia – jednego bliskiego (*zero-offset*) PW-1 oraz drugiego oddalonego (*offset*) od otworu Batycze-1 PW-2 – umożliwiły zintegrowanie danych pomiarowych dla trzech różnych metod geofizycznych: profilowań otworowych, pionowego profilowania sejsmicznego oraz sejsmiki powierzchniowej, zarejestrowanych w dwóch różnych domenach: głębokościowej i czasowej. Tak wykonana korelacja na podstawie PPS pozwala z większą dokładnością interpretować zmiany parametrów fizycznych i petrofizycznych na krzywych otworowych, i odnosić je

do sejsmicznego obrazu falowego, który (zwłaszcza na wynikach PPS) uwidacznia się lepszą dokładnością.

Obliczone transformacje PPS-WPG dla fal podłużnych P i poprzecznych P-Sv umożliwiły prześledzenie zmian odzworowań sejsmicznych w strefie przyotworowej oraz w bliskiej odległości od otworu Batycze-1, dochodzącej do 650 m na kierunku SW-NE. W porównaniu z zapisem fragmentu linii sejsmicznej IL337, w obrębie otworu Batycze-1, dostrzega się zmianę kierunków zapadania horyzontów sejsmicznych w określonych oknach czasowych. Ponadto obliczone modele prędkości z PW-2 i PW-3 wykazały znaczną różnicę pomiędzy uśrednionymi prędkościami fal podłużnych – wynoszącą 150 m/s, a pomiędzy uśrednionymi prędkościami fal poprzecznych (220 m/s), co mogłoby

wskazywać na zawodnienie utworów mioceńskich leżących na północny-wschód od otworu Batycze-1.

Aktualnie pomiary PPS są wykonywane i przetwarzane standardowo, warto więc zastanowić się i skierować większą uwagę na optymalne projektowanie badań oraz jakość rejestrowanego pola falowego, a także zwiększyć zakres

wykorzystania tych danych w interpretacji geologicznej, sejsmicznej i złożowej.

Otrzymane rezultaty potwierdzają zasadność wykonywania pomiarów PPS, które stanowią istotny element w kompleksowej interpretacji danych geofizycznych i sejsmicznych.

Artykuł nadesłano do Redakcji 20.01.2010 r. Przyjęto do druku 27.04.2010 r.

Recenzent: prof. dr hab. inż. Andrzej Kostecki

Literatura

- [1] Bartoń R., Jędrzejowska H., Żukowska K.: *Application of Vertical Seismic Profiling for improvement of seismic surface data resolution. Case study from Carpathian Foreland in Poland*. Galperin Readings, Moscow, October 2007.
- [2] Bartoń R., Jędrzejowska H., Żukowska K.: *Zastosowanie pomiarów pionowego profilowania sejsmicznego – PPS (sejsmiki otworowej) do poprawy rozdzielczości sejsmiki powierzchniowej*. I Kongres Geologiczny, AGH, Kraków, 26–28 czerwiec 2008.
- [3] Borowska L., Haber A., i in.: *Opracowanie wyników badań sejsmicznych dla tematu: Reprocessing i interpretacja prac sejsmicznych 3D Ujkowice-Batycze*. Geofizyka Kraków Sp. z o.o., Kraków, listopad 2008.
- [4] Bradley J., Carr and Zoltan Hajnal: *P and S-wave characterization of near-surface reflectivity from glacial tills using vertical seismic profiles*. Geophysics, vol. 64, no. 3, 1999.
- [5] Brewer R.J.: *VSP Data in Comparison to the Check Shot Velocity Survey*. Search and Discovery Article No 40059, Halliburton Energy Services, Houston, 2002.
- [6] Ferenc-Thuszcz E., Czchowska A.: *Opracowanie wyników badań sejsmiki otworowej Batycze-1*. Geofizyka Kraków Sp. z o.o., Kraków, czerwiec 2007.
- [7] Filo M., Czerwińska B. i in.: *Opracowanie wyników badań sejsmicznych dla tematu: Reprocessing i interpretacja prac sejsmicznych 3D Ujkowice-Batycze*. Geofizyka Kraków Sp. z o.o., Kraków, listopad 2008.
- [8] Galperin E.I.: *Vertical Seismic Profiling: Experience and Results*. Nauka, ISBN 5-02-002411-2, 1994.
- [9] Hardage B.A., DeAngelo M., Murray P.: *Defining P-wave and S-wave stratal surfaces with nine-component VSPs*. The Leading Edge, August 2003.
- [10] Hardage B.A.: *Vertical Seismic Profiling: Principles. Handbook of Geophysical Exploration – Seismic Exploration*. Elsevier Science, vol. 14, 2000.
- [11] Hope R., Ireson D., et al.: *Seismic Integration to Reduce Risk*. Oilfield Review, Autumn, 1998.
- [12] Hornby B.E., Yu J., et al.: *VSP: Beyond time-to-depth*. The Leading Edge, April 2006.
- [13] Jarvis K.D., Knight R.: *Near-surface VSP surveys using the seismic cone penetrometer*. Geophysics, vol. 65, no. 4, July-August 2000.
- [14] Jean-Luc M.: *Well – seismic surveying*. University of Lausanna JFP, France 2002.
- [15] Karnkowski P.: *Przegląd historyczny odkryć złóż ropy naftowej i gazu ziemnego w Polsce*. Przegląd Geologiczny, vol. 52, nr 2, 2004.
- [16] Macbeth C.: *Multi-Component VSP Analysis for Applied Seismic Anisotropy. Handbook of Geophysical Exploration – Seismic Exploration*. Elsevier Science, vol. 26, 2002.
- [17] O'Brien J., Harris R.: *Annual Meeting Selections, Multi-component VSP imaging of tight-gas sands*. Geophysics, vol. 71, no. 6, November-December 2006.
- [18] Payne M.A., Eriksen E.A., Rape T.D.: *Considerations for high-resolution VSP imaging*. The Leading Edge, March 1994.
- [19] Stewart R., Disiena J.: *The values of VSP in interpretation*. Geophysics: The Leading EDGE of Exploration, December 1989.
- [20] Stewart R.: *VSP: An in-depth seismic understanding*. CSEG Recorder, September 2001.
- [21] Trela J.: *3-komponentowe pionowe profilowanie sejsmiczne. Rozdział fal typu P i S metodą polaryzacyjną*. Nafta-Gaz, nr 3, 1999.
- [22] Walia R., Brandt K., et al.: *New concepts for borehole and VSP data integration in seismic data processing*. First Break, vol. 23, June 2005.
- [23] Węgrzyn H., Maksym A.: *Dokumentacja wyników odwiertu poszukiwawczego Batycze-1*. PGNiG w Warszawie Odział Sanok, maj 2007.
- [24] Wyatt R.D., Wyatt S.B.: *Determination of subsurface structural information using the vertical seismic profile*. Geophysics, vol. 47, no. 7, pp. 1123–1128, 1982.
- [25] Xiao-Gui Miao et al.: *A multioffset, three-component VSP study in the Sudbury Basin*. Geophysics, vol. 60, no. 21, 1995.
- [26] Zhanq Q., Sun Z., et al.: *VSP interpretation from Joffre, Alberta*. CREWES Research Report, vol. 6, 1994.



Dr inż. Robert BARTOŃ – absolwent Wydziału Inżynierii Mechanicznej i Robotyki na kierunku Górnictwo i Geologia, AGH. Pracownik Zakładu Sejsmiki Instytutu Nafty i Gazu w Krakowie. Specjalizuje się w zagadnieniach związanych z geostatystyką złóż węglowodorów, wyznaczaniem stref anomalnych ciśnień porowych z danych sejsmicznych oraz przetwarzaniem i interpretacją PPS.