

Irena Gąsior

Institut Nafty i Gazu, Kraków

## Zastosowanie modelu *Xu-White* do określania prędkości propagacji fal podłużnych i poprzecznych, na przykładzie skał czerwonego spągowca

### Wstęp

Ważnymi parametrami wykorzystywanymi w pracach geofizycznych są prędkości propagacji fal podłużnych i poprzecznych – znajomość zmian tych prędkości oraz czasów interwałowych jest niezbędna w interpretacji danych sejsmicznych i karotażowych. Prędkości fal podłużnych i poprzecznych w skałach zbiornikowych są funkcją takich zmiennych jak: współczynnika porowatości i konfiguracji przestrzeni porowej, nasycenia wodą i węglowodorami, składu mineralnego, a także obecności minerału ilastego w porach skał lub w szkielecie skały (matrycy). W literaturze spotyka się wiele prac dotyczących zagadnienia propagacji fal sprężystych, m.in.: [3, 7, 8, 13, 14].

Znanych jest także wiele modeli służących do określania prędkości propagacji fal akustycznych; jednym z nich jest model *Xu-White*.

W niniejszej pracy przedstawiono algorytm zastosowania wyżej wspomnianego modelu teoretycznego do określenia prędkości propagacji fal podłużnych i poprzecznych oraz gęstości skały w profilu otworów wiertniczych. Przedstawiono także wyniki zastosowania tego modelu w oparciu o dane karotażowe z otworu wiertniczego T-1, przy wykorzystaniu opracowanej w Instytucie Nafty i Gazu aplikacji *XU\_WHITE*. Uzyskane rezultaty pozwalają wnioskować o poprawności napisanej aplikacji.

### Podstawy teoretyczne

Model *Xu-White* jest modelem z grupy modeli deterministycznych, a więc takich, których wyniki w sposób jednoznaczny zależą od przyjętych założeń i parametrów wejściowych. Wobec tego, oprócz dokładnej znajomości zjawisk fizycznych zachodzących w procesie propagacji fal sprężystych w ośrodku porowatym, a także dostępności narzędzia obliczeniowego, o powodzeniu całego modelowania decyduje znajomość subtelnych cech modelowanego górotworu oraz przewidywalnego wpływu tych cech na wspomniane zjawiska fizyczne i wartości opisujących je parametrów.

Model *Xu-White* został zbudowany na podstawie modelu Kustera i Toksöza [8], uzupełnionego o teorię efektywnego medium oraz model Gassmanna [3]. Model Toksöza zakłada przestrzeń porową w skale w postaci

małych, obłych sferoid, w sposób losowy rozmieszczonych w medium izotropowym. Kształt porów określony jest symbolem  $\alpha$  – jako stosunek długości głównych osi sferoidy (stosunek osi krótszej do dłuższej).

Danymi wejściowymi dla modelu *Xu-White* są następujące parametry:

- $K_p$  – porowatość,
- $V_{il}$  – zawartość minerałów ilastych,
- $K_f, \mu_f$  – moduł odkształcenia objętości i postaci fazy ciekłej (medium nasycającego pory),
- $\rho_f$  – gęstość cieczy nasycającej pory,
- $\alpha$  – współczynnik kształtu porów ( $\alpha$  oznacza iloraz półosi mniejszej do większej, w porach o kształcie sferoidalnym).

W oparciu o czasy interwałowe przebiegu fali podłużnej

i poprzecznej ( $T^p$ ,  $T^s$ ) wyznacza się moduły odkształcenia objętości i postaci matrycy skalnej ( $K_{ma}$ ,  $\mu_{ma}$ ), natomiast wykorzystując szkieletowe gęstości dla frakcji ilastej i piaskowcowej wylicza się gęstość szkieletu skalnego ( $\rho_{ma}$ ). Moduły odkształcenia objętości i postaci szkieletu suchego, zbudowanego z ziaren wraz z porami ( $K_{dr}$ ,  $\mu_{dr}$ ), określane są w oparciu o model Kuster i Toksöz.

W etapie końcowym modelu *Xu-White* do wyznaczenia prędkości propagacji fali podłużnej i poprzecznej oraz gęstości objętościowej skały nasyconej wykorzystuje się równania Gassmanna.

W modelu *Xu-White* [13, 14] zakłada się, że porowatość całkowita  $Kp$  składa się z dwóch części: porowatości związanej z frakcją ilastą ( $Kp_{il}$ ) i porowatości związanej z frakcją piaskowcową ( $Kp_{psc}$ ).

$$Kp = Kp_{il} + Kp_{psc} \quad (1)$$

Składowe porowatości całkowitej  $Kp_{il}$  oraz  $Kp_{psc}$  są proporcjonalne do objętości frakcji ilastej ( $V_{il}$ ) i frakcji piaskowcowej ( $V_{psc}$ ) – można je więc zapisać w następującej postaci:

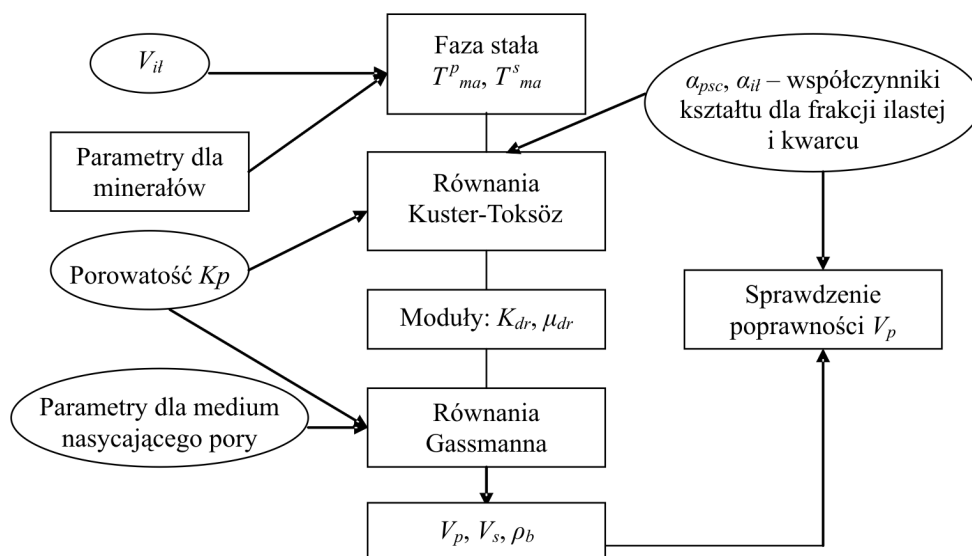
$$Kp_{il} = V_{il} \cdot Kp / (1 - Kp) \quad (2)$$

$$Kp_{psc} = V_{psc} \cdot Kp / (1 - Kp) \quad (3)$$

Procentową zawartość frakcji piaskowcowej można przedstawić w postaci:

$$V_{psc} = 1 - Kp - V_{il} \quad (4)$$

Schemat blokowy modelu *Xu-White* przedstawiono na rysunku 1.



Rys. 1. Schemat blokowy modelu *Xu-White*

### Określenie modułów odkształcenia objętości i postaci ( $K_{ma}$ , $\mu_{ma}$ ) matrycy skalnej

W modelu *Xu-White* do określenia modułów odkształcenia objętości ( $K_{ma}$ ) i postaci ( $\mu_{ma}$ ) matrycy skalnej wykorzystuje się czasy przebiegu fali podłużnej ( $T^p_{ma}$ ) i poprzecznej ( $T^s_{ma}$ ) oraz gęstość ( $\rho_{ma}$ ) szkieletu skalnego. Przyjmując:

$$V_{il}' = V_{il} / (1 - Kp) \quad (5)$$

wartości parametrów:  $T^p_{ma}$ ,  $T^s_{ma}$ ,  $\rho_{ma}$  można wyliczyć według następujących wzorów:

$$T^p_{ma} = (1 - V_{il}') \cdot T^p_{psc} + V_{il}' \cdot T^p_{il} \quad (6)$$

$$T^s_{ma} = (1 - V_{il}') \cdot T^s_{psc} + V_{il}' \cdot T^s_{il} \quad (7)$$

gdzie:

$T^p_{ma}$ ,  $T^s_{ma}$  – czasy fali podłużnej i poprzecznej matrycy skalnej,

$T^p_{psc}$ ,  $T^p_{il}$  – czasy szkieletowe fali podłużnej dla piaskowca i ilu,

$T^s_{psc}$ ,  $T^s_{il}$  – czasy szkieletowe fali poprzecznej dla piaskowca i ilu.

Gęstość matrycy skalnej ( $\rho_{ma}$ ) można obliczyć według następującego równania:

$$\rho_{ma} = (1 - V_{il}') \cdot \rho_{psc} + V_{il}' \cdot \rho_{il} \quad (8)$$

gdzie:  $\rho_{psc}$ ,  $\rho_{il}$  – gęstość szkieletowa dla piaskowca i ilu.

Wykorzystując wzory na moduły odkształcenia objętości ( $K$ ) i postaci ( $\mu$ ) oraz wzory (6)÷(8), moduły sprężyste dla matrycy skalnej można określić z następujących równań:

$$K_{ma} = \rho_{ma} \left( \frac{1}{(T_{ma}^P)^2} - \frac{4}{3(T_{ma}^S)^2} \right) \quad (9)$$

$$\mu_{ma} = \rho_{ma} \left( \frac{1}{(T_{ma}^S)^2} \right) \quad (10)$$

### Określenie modułów odkształcenia objętości i postaci ( $K_{dr}$ , $\mu_{dr}$ )

Do określenia modułów odkształcenia objętości ( $K_{dr}$ ) i postaci ( $\mu_{dr}$ ) wykorzystuje się model Kustera-Toksöza. W modelu tym dopasowanie obliczonej prędkości fali podłużnej ( $V_p$ ) do prędkości uzyskanej z profilowania akustycznego (DT) dokonywane jest przy pomocy procedury optymalizacyjnej. W teorii Kustera i Toksöza przyjmuje się założenie, że

$$Kp/\alpha \ll 1$$

Moduły odkształcenia objętości i postaci szkieletu suchego, zbudowanego z ziaren wraz z porami ( $K_{dr}$ ,  $\mu_{dr}$ ), wyliczane są według następujących wzorów:

$$K_{dr} = (K_{ma} + 4 \cdot A \cdot \mu_{ma}) / (1 - 3 \cdot A) \quad (11)$$

$$\mu_{dr} = \mu_{ma} (1 + B(9K_{ma} + 8\mu_{ma})) / (1 - 6B(K_{ma} + 2\mu_{ma})) \quad (12)$$

dla suchych skał  $K_f = \mu_f = 0$

gdzie:

$$A = (K_f - K_{ma}) / (9K_{ma} + 12\mu_{ma}) \cdot \sum_{l=il,psc} Kp_l \cdot T_{ijj}(\alpha_l) \quad (13)$$

$$B = (\mu_f - \mu_{ma}) / [25\mu_{ma}(3K_{ma} + 4\mu_{ma})] \cdot \sum_{l=il,psc} Kp_l \cdot F(\alpha_l) \quad (14)$$

$$F(\alpha_l) = T_{ijj}(\alpha_l) - T_{ijj}(\alpha_l)/3 \quad (15)$$

gdzie:  $T_{ijj}(\alpha_l)$ ,  $T_{ijj}(\alpha_l)$  – skalary

### Określenie skalarów: $T_{ijj}(\alpha)$ , $T_{ijj}(\alpha)$

Skalary  $T_{ijj}(\alpha)$ ,  $T_{ijj}(\alpha)$  są funkcjami współczynników kształtu porów, modułów odkształcenia objętości, postaci i gęstości dla matrycy skalnej oraz medium nasycającego pory. Poniżej przedstawiony został sposób obliczania skalarów  $T_{ijj}$ ; pod pojęciem  $\alpha$  rozumie się  $\alpha_{il}$  lub  $\alpha_{psc}$ .

$$T_{ijj}(\alpha) = 3F1/F2 \quad (16)$$

$$F(\alpha) = T_{ijj} - 1/3 T_{ijj} = 2/F3 + 1/F4 + (F4 \cdot F5 + F6 \cdot F7 - F8 \cdot F9) / (F2 \cdot F4) \quad (17)$$

gdzie:

$$F1 = 1 + AA \cdot [1,5(g+v) - R(1,5g + 2,5v - 4/3)] \quad (18)$$

$$F2 = 1 + AA \cdot [1 + 1,5(g+v) - R/2(3g + 5v)] + BB(3 - 4R) + AA/2 \cdot (AA + 3BB) \cdot (3 - 4R) \cdot [g + v - R(g - v + 2v^2)] \quad (19)$$

$$F3 = 1 + AA/2 \cdot [R(2 - v) + ((1 + \alpha^2)/\alpha^2) \cdot g(R - 1)] \quad (20)$$

$$F4 = 1 + AA/4 \cdot [3v + g - R(g - v)] \quad (21)$$

$$F5 = AA \cdot [R(g + v - 4/3) - g] + BB \cdot v(3 - 4R) \quad (22)$$

$$F6 = 1 + AA \cdot [1 + g - R(g + v)] + BB(1 - v) \cdot (3 - 4R) \quad (23)$$

$$F7 = 2 + AA/4 \cdot (9v + 3g - R(5v + 3g)) + BB \cdot v(3 - 4R) \quad (24)$$

$$F8 = AA \cdot [1 - 2R + g/2 \cdot (R - 1) + v/2 \cdot (5R - 3)] + BB \cdot (1 - v) \cdot (3 - 4R) \quad (25)$$

$$F9 = AA \cdot [g(R - 1) - Rv] + BB \cdot v(3 - 4R) \quad (26)$$

$$AA = \mu_f/\mu_{ma} - 1 \quad (27)$$

$$BB = 1/3 \cdot (K_f/K_{ma} - \mu_f/\mu_{ma}) \quad (28)$$

$$R = 3\mu_{ma}/(3K_{ma} + 4\mu_{ma}) \quad (29)$$

$$g = \alpha^2 \cdot (3v - 2)/(1 - \alpha^2) \quad (30)$$

$$v = \alpha \cdot [\cos^{-1}(\alpha) - \alpha(1 - \alpha^2)^{1/2}]/(1 - \alpha^2)^{3/2} \quad (31)$$

### Współczynnik kształtu porów – $\alpha$

Jak już wspomniano, współczynnik kształtu porów  $\alpha$  oznacza iloraz półosi mniejszej do większej w porach o kształcie elipsoidalnym. Laboratoryjne wyznaczenie tego parametru jest bardzo trudne. W literaturze spotyka się wiele opracowań poświęconych wpływowi współczynnika  $\alpha$  na propagację fal sprężystych [2, 5, 8, 9, 10, 12, 13, 14].

Xu and White w swoich pracach podają, że średnia wartość współczynnika  $\alpha_{il}$  mieści się w zakresie  $0,02 \div 0,05$ , zaś średnia wartość  $\alpha_{psc}$  zawiera się w przedziale  $\{0,10; 0,15\}$ . W opracowaniu Yan J., Lubbe R., Pillar N. [15] autorzy – powołując się na pracę Sams M.S., Andrea M. [11] – przedstawiają nieliniową zależność współczynnika

kształtu porów  $\alpha$  od porowatości oraz liniową zależność od porowatości i zailenia (wzory 32 i 33).

$$\alpha = 0,1762 \cdot e^{-2,22 K_p} \quad (32)$$

$$\alpha = 0,17114 - 0,24477 K_p + 0,004314 V_{ii} \quad (33)$$

### Obliczanie modułów odkształcenia objętości ( $K_f$ ) i postaci ( $\mu_f$ ) oraz gęstości ( $\rho_f$ ) fazy ciekłej

Niezbędnymi parametrami związanymi z prędkościami propagacji fali akustycznej występującymi w równaniach Gassmanna są: moduły odkształcenia objętości ( $K_f$ ) i postaci ( $\mu_f$ ) oraz gęstość cieczy nasycającej pory ( $\rho_f$ ). Moduł odkształcenia objętości i postaci w ośrodku porowatym nasyconym cieczą można wyrazić jako sumę modułów „suchego” szkieletu skalnego i cieczy (rysunek 2):

$$K_{sat} = K_{dr} + K_f \quad (34)$$

$$\mu_{sat} = \mu_{dr} + \mu_f = \mu_{dr}; \text{ ponieważ } \mu_f = 0 \quad (35)$$

Do estymacji modułu objętości fazy ciekłej  $K_f$  (medium wypełniającego przestrzeń porową) stosuje się następujący wzór:

$$K_f = \left( \sum_1^n S_i / K_i \right)^{-1} \quad (36)$$

gdzie:

$n$  – ilość faz (woda, gaz, ropa),

$K_i$  – moduły odkształcenia objętości poszczególnych faz,

$S_i$  – nasycenie poszczególnych faz, w ułamku jedności.

Dla dwuskładnikowego systemu gazowo-wodnego równanie na  $K_f$  przyjmuje postać:

$$K_f = [S_w/K_w + (1 - S_w)/K_g]^{-1} \quad (37)$$

gdzie:

$K_w, K_g$  – moduły odkształcenia objętości dla wody i gazu,

$S_w$  – nasycenie wodą, w ułamku jedności.

Do obliczenia gęstości cieczy nasycającej pory ( $\rho_f$ ) stosowana jest prosta mieszanina objętościowa elementów składowych:

$$\rho_f = \sum_1^n S_i \cdot \rho_i \quad (38)$$

gdzie:

$n$  – ilość składników,

$S_i$  – nasycenie  $i$ -tego składnika,

$\rho_i$  – gęstość  $i$ -tego składnika.

W przypadku dwuskładnikowego układu gaz-woda gęstość  $\rho_f$  oblicza się według wzoru:

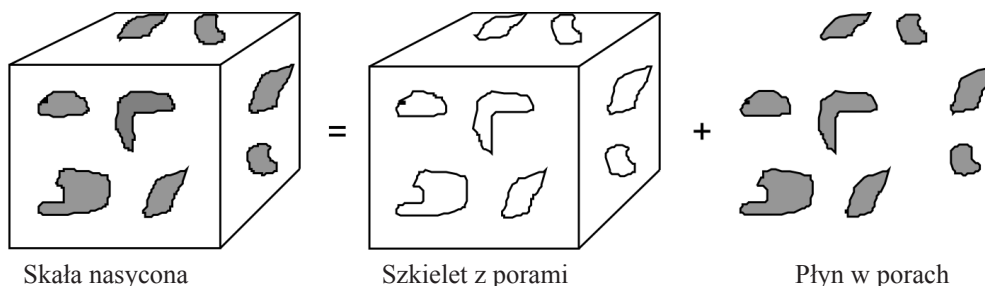
$$\rho_f = S_w \cdot \rho_w + (1 - S_w) \rho_g \quad (39)$$

gdzie:

$S_w$  – nasycenie wodą,

$\rho_w$  – gęstość wody,

$\rho_g$  – gęstość gazu.



Rys. 2. Model skały nasyconej płynem

### Określenie prędkości fal podłużnych i poprzecznych oraz gęstości skały nasyconej

Do wyznaczenia prędkości propagacji fali podłużnej i poprzecznej oraz gęstości objętościowej skały nasyconej wykorzystuje się równania Gassmanna:

$$V_p = \{1/\rho_b \cdot [K_{dr} + 4/3 \cdot \mu_{dr} + (1 - C_{ma}/C_{dr})^2] / (C_{ma}(1 - K_p) + C_f \cdot K_p - C_{ma}^2/C_{dr})\}^{1/2} \quad (40)$$

$$\rho_b = \rho_{ma}(1 - K_p) + \rho_f \cdot K_p \quad (41)$$

$$V_s = (\mu_{dr}/\rho_b)^{1/2} \quad (42)$$

gdzie:

$V_p, V_s$  – prędkości propagacji fali podłużnej i poprzecznej,

$\rho_b$  – gęstość skały nasyconej,



$C_{ma}$ ,  $C_{dr}$ ,  $C_f$  – ściśliwość; odpowiednio dla: matrycy skalnej, szkieletu suchego zbudowanego z ziaren wraz z porami oraz cieczy nasycającej pory.

Ściśliwości  $C_{ma}$ ,  $C_{dr}$ ,  $C_f$  można przedstawić jako odwrotności modułów odkształcenia objętości:

$$C_{ma} = 1/K_{ma} \quad (43)$$

$$C_{dr} = 1/K_{dr} \quad (44)$$

$$C_f = 1/K_f \quad (45)$$

### Opis aplikacji do określania prędkości propagacji fal podłużnych i poprzecznych w oparciu o model Xu-White

Aplikacja *XU\_WHITE* na wejściu korzysta z profilowania akustycznego DT oraz profilowań wynikowych, takich jak: nasycenie wodą ( $S_w$ ), nasycenie gazem ( $S_g$ ), nasycenie ropą ( $S_r$ ), porowatość ( $K_p$ ), czy zailenie ( $V_{it}$ ). Wymienione profilowania wynikowe są wynikiem kompleksowej interpretacji danych otworowych; wykonanej przy użyciu programów *Analit* (w systemie GEO) lub *InterLog* (w systemie GeoWin). Dla aplikacji *XU\_WHITE* niezbędne są także parametry szkieletowe, takie jak: czasy fali podłużnej i poprzecznej, gęstości oraz (opcjonalnie) moduły odkształcenia objętości i postaci. W trakcie realizacji tego

programu porównywane są wyniki  $V_{p\_Xu-White}$  obliczone w oparciu o model *Xu-White*, z prędkością podłużną fali akustycznej  $V_p$  z profilowania akustycznego DT.

Wynikiem końcowym działania programu są prędkości fal podłużnych i poprzecznych oraz gęstość skały nasyczonej w profilu otworu wiertniczego. Wyniki te zapisane są w postaci profilowań oraz w zbiorze roboczym, z którego można uzyskać plik typu ASCII. Tak wygenerowane profilowania wynikowe mogą być zastosowane zarówno w interpretacji profilowań otworowych, jak i w rozwiązywaniu innych zagadnień geofizycznych.

### Zastosowanie aplikacji XU\_WHITE do określenia parametrów sprężystych skał na danych otworowych

Do testowania aplikacji *XU\_WHITE* wykorzystano profilowania geofizyczne i wynikowe z otworu wiertniczego T-1. Modelowanie wykonywano dla różnych wartości parametrów wejściowych. W niniejszym artykule przedstawiono uzyskane rezultaty dla następujących parametrów szkieletowych:

- dla piaskowca:  $\rho = 2,65 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$ ;  $T_p = 161 \text{ } \mu\text{s/m}$ ;  $T_s = 260 \text{ } \mu\text{s/m}$ ;  $\alpha_{psc} = 0,12$ ,
- dla łu:  $\rho = 2,6 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$ ;  $T_p = 230 \text{ } \mu\text{s/m}$ ;  $T_s = 394 \text{ } \mu\text{s/m}$ ;  $\alpha_{it} = 0,05$ ,
- dla wody nasycającej (solanki):  $\rho = 1,1 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$ ;  $K = 2,64 \text{ GPa}$ ,
- dla gazu:  $\rho = 0,15 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$ ;  $K = 0,05 \text{ GPa}$ .

Wyniki uzyskane przy wykorzystaniu modelu *Xu-White* przedstawiono na rysunku 3. Kolumna 1 zawiera skład litologiczny oraz nasycenie wodą (SW); kolumna 3 – profilowanie gamma; kolumna 4 – prędkości fal podłużnych określonych z profilowania akustycznego oraz z modelu *Xu-White*; kolumna 5 – prędkości fal poprzecznych wyliczonych z modelu; zaś kolumna 6 – gęstość objętościową (RHOB) oraz gęstość wyliczoną z modelu.

W tabelicy 1 zestawiono analizę statystyczną następujących parametrów:

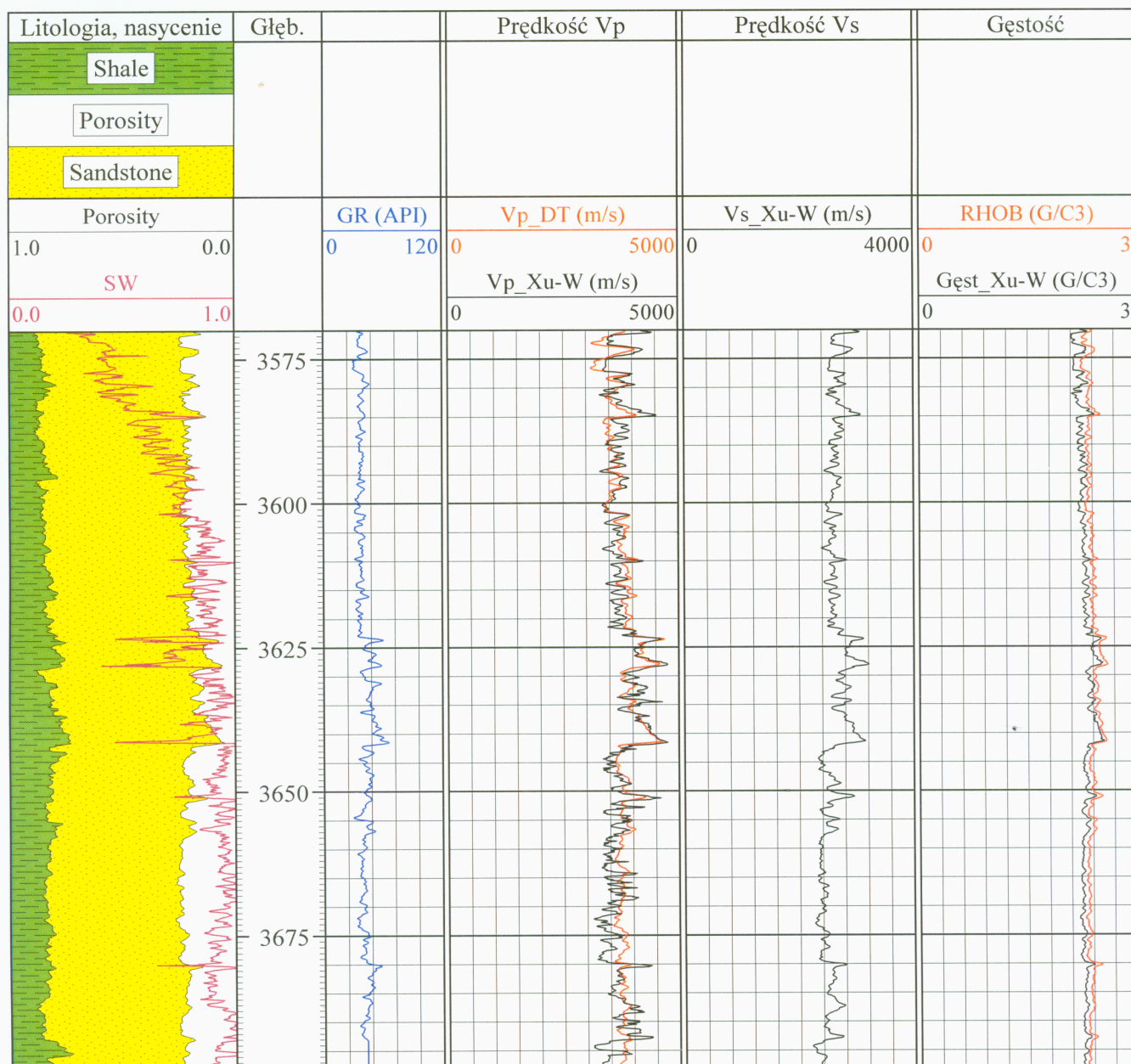
- prędkości fal podłużnych z profilowania akustycznego,

- prędkości fal podłużnych i poprzecznych uzyskanych przy wykorzystaniu modelu *Xu-White*,
- gęstości objętościowej skały z profilowania (RHOB),
- gęstości objętościowej skały uzyskanej z modelu *Xu-White*,
- ilorazu prędkości fal podłużnych do poprzecznych określonych z modelu *Xu-White*.

Trendy zmienności wyliczonych parametrów są ze sobą na ogół zgodne, a średnie wartości fal podłużnych obliczonych ww. sposobami nie odbiegają statystycznie od siebie (śr.  $V_{p\_DT} = 3787 \text{ m/s}$ ; śr.  $V_{p\_Xu-White} = 3754 \text{ m/s}$ ). Nieco niższymi wielkościami charakteryzuje się gęstość skały nasyczonej wyliczona z modelu *Xu-White* (śr.  $\text{RHOB} = 2,382 \text{ g/cm}^3$ , śr.  $\text{gęst}_{Xu-White} = 2,292 \text{ g/cm}^3$ ). Stosunek

Tabela 1. Analiza porównawcza parametrów sprężystych uzyskanych różnymi metodami w otworze T-1

Parametr	Zakres zmian parametru		Średnia parametru
	od	do	
$V_{p\_DT}$ [m/s]	3185	4667	3787
$V_{p\_Xu-W}$ [m/s]	3124	4750	3754
$V_{s\_Xu-W}$ [m/s]	1768	3034	2248
$V_{p\_Xu-W}/V_{s\_Xu-W}$ [m/s]	1,56	1,98	1,67
RHOB [g/cm <sup>3</sup> ]	2,242	2,597	2,382
Gęstość $\text{gęst}_{Xu-W}$ [g/cm <sup>3</sup> ]	2,107	2,546	2,292



Rys. 3. Zastosowanie modelu Xu-White w utworach czerwonego spągowca w otworze wiertniczym T-1

prędkości fal podłużnych do poprzecznych obliczonych z modelu Xu-White przyjmuje wartości od 1,56 do 1,98, przy średniej równej 1,67.

W celu sprawdzenia poprawności wyników uzyskanych przy zastosowaniu wspomnianego modelu, w oparciu o prędkości fal podłużnych i poprzecznych obliczono także współczynnik Poissona (rysunek 5). W analizowanym interwale przyjmuje on wielkości od 0,15 do 0,33, przy średniej równej 0,22.

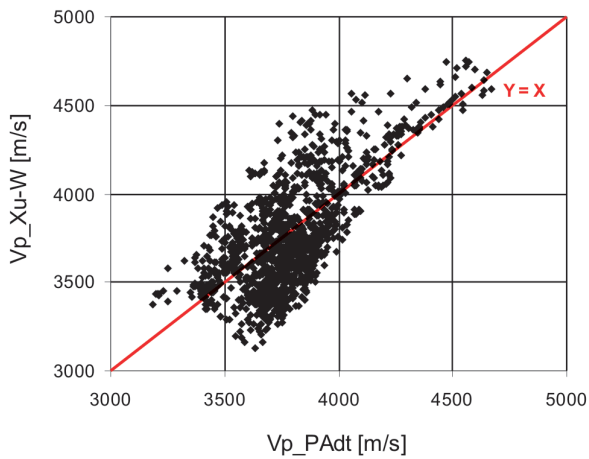
Przedstawiona w tabeli 1 analiza statystyczna wyliczonych parametrów oraz ich zmiana wraz z głębokością w profilu otworu T-1, a także wielkości wyliczonego współczynnika Poissona (rysunki 3 i 5) pozwalają wnioskować

o poprawności uzyskanych rezultatów przy zastosowaniu modelu Xu-White.

W myśl sugestii wspomnianych wcześniej prac [13, 17], dla modelu Xu-White za  $\alpha$  przyjęto wielkości wyliczone według wzoru (32):  $\alpha = 0,1762 \cdot e^{-2,22 K_p}$ .

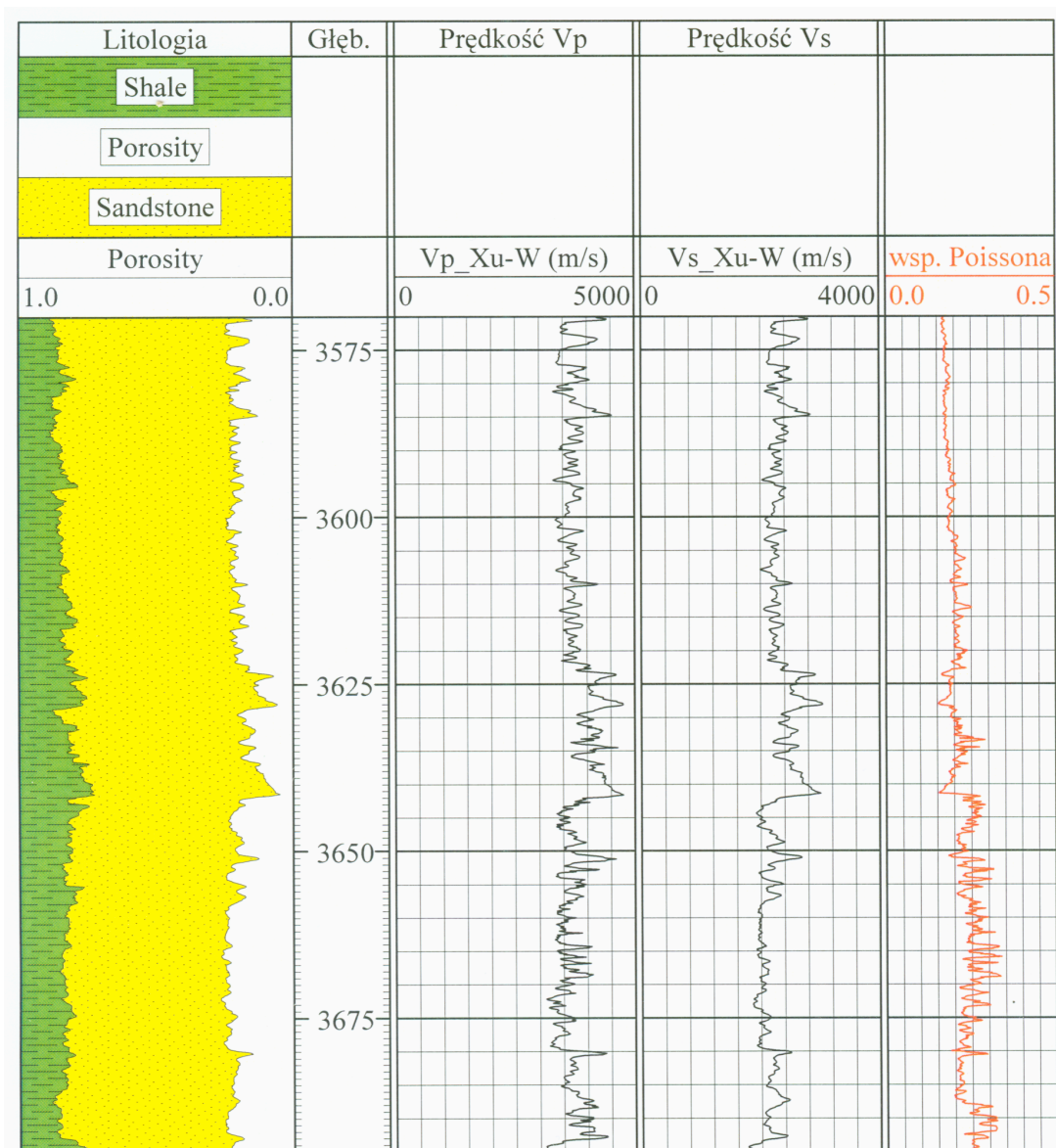
Zestawienie prędkości fal podłużnych i poprzecznych oraz gęstości – wyznaczonych dla różnych opcji współczynnika kształtu porów  $\alpha$  – przedstawiono na rysunku 6.

Prędkości fal podłużnych i poprzecznych wyliczone z modelu Xu-White dla współczynnika  $\alpha$  jako funkcji porowatości  $K_p$  są na ogół nieco mniejsze od prędkości określonych dla stałej wartości  $\alpha$ , natomiast trendy zmienności tych parametrów dla różnych opcji współczynnika  $\alpha$



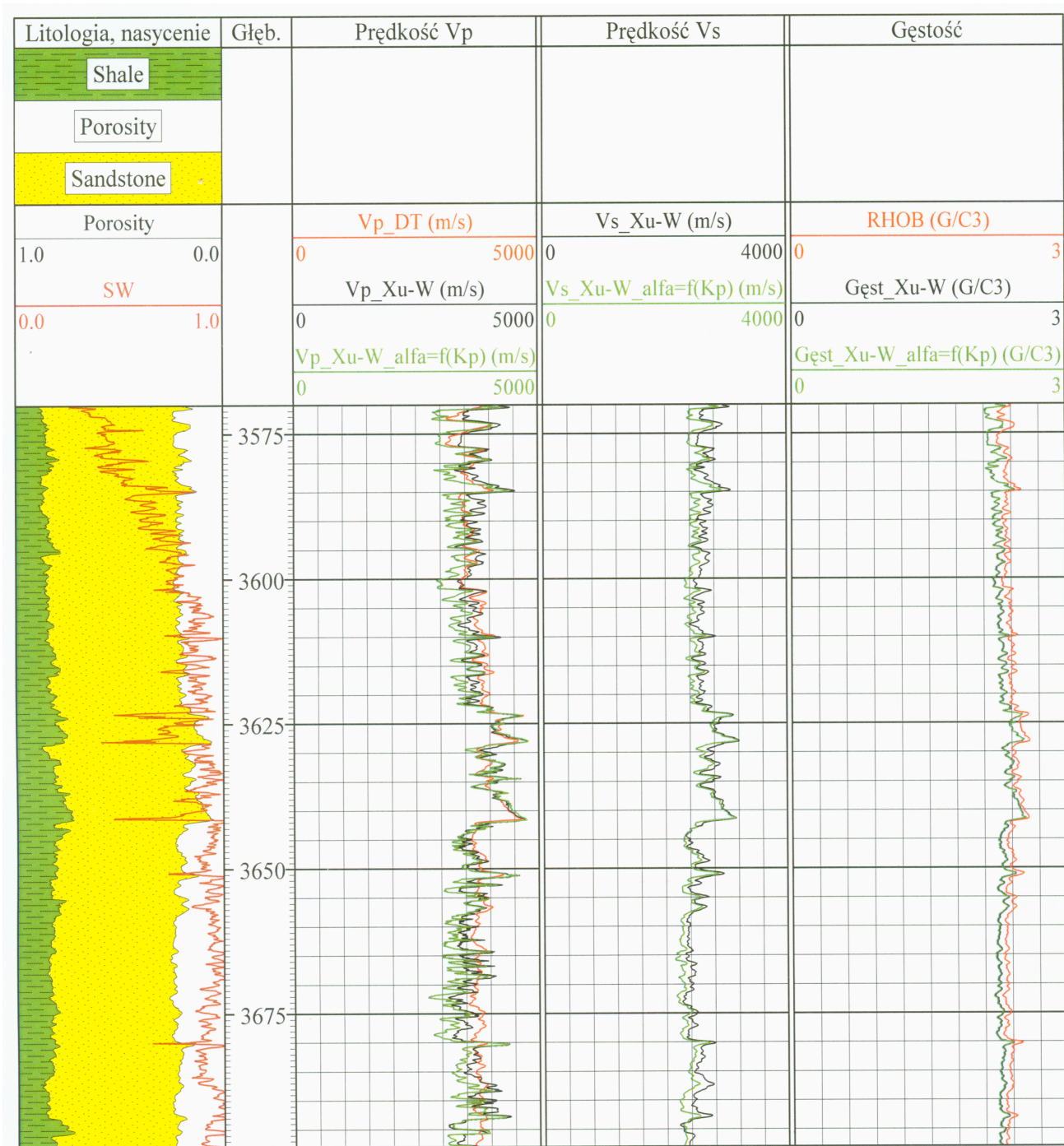
są ze sobą zgodne. W interwale 3623÷3652 m, w którym współczynnik porowatości  $K_p$  przyjmuje wartości od 0,05 do 0,22 – przy średniej równej 0,15, parametry te są do siebie bardzo zbliżone.

Rys. 4. Korelacja prędkości fal podłużnych; określonych z profilowania akustycznego oraz z modelu *Xu-White*, w otworze wiertniczym T-1



Rys. 5. Zestawienie wyników zastosowania modelu *Xu-White* oraz współczynnika Poissona w utworach czerwonego spągowca w otworze wiertniczym T-1





Rys. 6. Zastosowanie modelu Xu-White w utworach czerwonego spągowca dla różnych  $\alpha$ , w otworze wiertniczym T-1

**Podsumowanie i wnioski**

W artykule przedstawiono podstawy teoretyczne modelu Xu-White, służącego do określania prędkości fal podłużnych i poprzecznych w utworach piaskowcowo-ilastych.

Zaprezentowany został algorytm oraz aplikacja XU\_WHITE, realizująca wspomniany model.

Aplikacja XU\_WHITE została zastosowana do określania prędkości fal podłużnych i poprzecznych w otworze wiertniczym T-1 w utworach czerwonego spągowca – przy

różnych wartościach współczynnika kształtu porów  $\alpha$ , który prawdopodobnie ma największy wpływ na uzyskane wyniki.

Trendy zmienności prędkości fal podłużnych i gęstości objętościowej skały, określonych przy wykorzystaniu programu XU\_WHITE, są zgodne z parametrami otrzymanymi z profilowania akustycznego i z profilowaniem gęstościowym. Analiza porównawcza badanych parametrów, jak

również wyliczony współczynnik Poissona, pozwalają wnioskować o poprawności otrzymanych wyników.

Przyjęte w przedstawionym modelu założenie – że pory mają charakter sferoidalny – w rzeczywistości nie zawsze jest prawdziwe, jednak w przypadku gdy znane są laboratoryjne wartości parametrów sprężystych skał lub

otrzymane wyniki są zgodne z wyliczonymi w inny sposób, wówczas zastosowanie modelu *Xu-White* będzie zasadne.

Przedstawiona praca jest ważnym, aczkolwiek pierwszym krokiem na drodze do pełnego wykorzystania przedstawionego modelu; czy to w pracach naukowych, czy też w praktyce przemysłowej.

Artykuł nadesłano do Redakcji 16.11.2010 r. Przyjęto do druku 22.12.2010 r.

Recenzent: prof. dr hab. inż. Andrzej Kostecki

## Literatura

- [1] Bała M. i in.: *Modelowanie wpływu zmiennego nasycenia gazem przestrzeni porowej skał na wyniki pomiarów akustycznych i innych profilowań w otworach oraz sejsmicznych pól falowych*. Projekt badawczy KBN Nr 4 T12B 05629, 2008.
- [2] Eshelby J.D.: *The determination of the elastic field of an ellipsoidal inclusion and related problems*. Proceedings of the Royal Society A241, 376–396, 1957.
- [3] Gassmann F.: *Elasticity of porous rock*. Vierteljahrsschrift der Naturforschenden Gesellschaft in Zürich 96, 1–21, 1951.
- [4] Greenberg M.L., Castagna J.P.: *Shear-wave velocity estimation in porous rock: theoretical formulation, preliminary, verification and application*. Geophysical Prospecting 40, 195–209, 1992.
- [5] Hudson J.A.: *Wave speed and attenuation of elastic waves in material containing cracks*. Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society 64, 133–150, 1981.
- [6] Jun Y., Li X.Y., Liu E.: *Effects of pore aspect ratios on velocity prediction from well-log data*. Geophysical Prospecting, 50, 289–300, 2002.
- [7] Keys R.G., Xu S.: *An approximation for Xu-White velocity mode*. Geophysics, vol. 67, nr 5, 1406–1414, 2002.
- [8] Kuster G.T., Toksöz M.N.: *Velocity and attenuation of seismic waves in two-phase media*. Part I. Theoretical formulations: Geophysics, 39, 587–606, 1974.
- [9] Nur A., Simmons G.: *The effect of saturation on velocity in low porosity rock*. Earth planetary Science Letters, 7, 181–193, 1969.
- [10] O’Connell R.J., Budiansky B.: *Progressive inversion for hypocenters and P wave and S wave velocity structure*. Application to The Geysers, California, geothermal field. J. Geophys. Res. 96, 6223–6236, 1991.
- [11] Sams M.S., Andrea M.: *The effect of clay distribution on the elastic properties of sandstones*. Geophysical Prospecting, 49, 128–150, 2001.
- [12] Wu T.T.: *The effect of inclusion shape on the elastic moduli of a two-phase material*. International. J. Solids and Structures, 2, 1–8, 1966.
- [13] Xu S., White R.: *A new velocity model for clay-sand mixtures*. Geophysical Prospecting, 43, 91–118, 1995.
- [14] Xu S., White R.: *A physical model for shear-wave velocity prediction*. Geophysical Prospecting, 44, 687–717, 1996.
- [15] Yan J., Lubbe R., Pillar N.: *Variable Aspect Ratio Method in Xu-White Model for AVO*. EAGE 69<sup>th</sup> Conference & Exhibition, London 2007.



Mgr Irena GAŠIOR – absolwentka Wydziału Matematyki UJ. Zajmuje się opracowywaniem nowych metodyk pomiarowo-interpretacyjnych profilowań geofizyki wiertniczej. Jest autorką m.in. programów komputerowych do interpretacji profilowań geofizyki wiertniczej oraz oprogramowania dla geofizycznego systemu GEOBAZA i GEOBANK. Współautorka systemu GeoWin.