NAFTA-GAZ, ROK LXXIII, Nr 12 / 2017

DOI: 10.18668/NG.2017.12.02

Andrzej Kostecki, Krzysztof Żuławiński

Instytut Nafty i Gazu – Państwowy Instytut Badawczy

Modelowanie i migracja zero-offset stref uskokowych w ośrodku o azymutalnej anizotropii HTI (*horizontal transverse isotropy*)

W artykule zaprezentowano studium modelowania sekcji czasowych zero-offset oraz odwzorowań migracyjnych dla uskoków warstw anizotropowych HTI (*Horizontal Transverse Isotropy*). Badano uskoki pionowe i nachylonych warstw w aspekcie wpływu kąta azymutalnego na charakter zero-offsetowej sekcji. Stwierdzono, że w tym przypadku pole falowe zero-offset jest niezależne od kąta azymutalnego, ponieważ kształtują je pionowe przebiegi fal. Odwzorowanie uskoków wykonywano, stosując migrację MG(F-K) w dziedzinie liczb falowych (K) i częstotliwości (F). Uzyskano rozdzielczość 5÷6 m dla częstotliwości dominującej jednostkowego sygnału 80 Hz i sygnału Rickera 30 Hz.

Słowa kluczowe: poziomo-poprzeczna anizotropia (HTI), modelowanie zero-offset sekcji czasowych, migracja zero-offset sekcji czasowych, anizotropia azymutalna.

Modeling and migration of zero-offset thrust zones in horizontal transverse isotropy (HTI) media

In this paper, we present the study of zero-offset section modeling and migration for the vertical and inclined thrust of anisotropic HTI layers. We investigated the influence of the azimuthal angle on zero-offset sections. In the case of vertical and moderate inclined thrusts, as has been tested and found, the zero-offset sections are independent of the azimuthal angle because the vertical rays of waves, shape the zero-offset wavefield. The imaging of thrusts was carried out by using MG(F-K) migration in wave number – frequency domain. For a dominant frequency of 80 Hz spike signal and 30 Hz Ricker's signal, a resolution of 5÷6 m was obtained.

Key words: horizontal transverse isotropy (HTI), modeling of zero-offset time sections, migration of zero-offset time sections, azimuthal anisotropy.

Wstęp

Niniejszy artykuł stanowi kontynuację problematyki modelowania i odwzorowania struktur uskokowych w ośrodkach anizotropowych zasygnalizowanej w referacie autorów na X Międzynarodowej Konferencji Geopetrol 2016 [6]. Zaprezentowano w nim podstawy teoretyczne modelowania pola falowego zero-offset i odwzorowania struktur uskokowych w ośrodkach o horyzontalnej poprzecznej izotropii (HTI) na przykładzie pionowych i nachylonych uskoków kształtowanych przez pole falowe o częstotliwości w zakresie 15÷80 Hz.

Modelowanie

Punktem wyjścia w rozważaniach teoretycznych odnośnie do propagacji fal jest równanie dyspersyjne wyprowadzone z pełnego systemu równań sprężystych. Rozwiązanie tego równania, tj. określenie częstości własnej ω_a jako funkcji liczb falowych, posłużyło do sformułowania związku:

$$\frac{\omega_a^2}{V_p^2} = k_a^2\left(k_x, k_y, k_z, \theta, \Psi, \varepsilon, \delta\right) \tag{1}$$

gdzie $k_a^2(k_x, k_y, k_z, \theta, \Psi, \varepsilon, \delta)$ jest funkcją liczb falowych k_x, k_y, k_z oraz parametrów anizotropii Thomsena [8] ε i δ oraz kąta upadu θ i azymutalnego Ψ, V_p jest prędkością izotropową fal podłużnych.

Następstwem uniwersalnej formuły (1), obowiązującej dla wszystkich typów poprzecznej izotropii TI (*transverse isotropy*) [3, 4, 5], jest jednostronne równanie falowe:

$$\frac{\partial P(k_x,k_z,t)}{\partial t} = \pm i\ V_p k_a P(k_x,k_z,t) \qquad (2)$$

gdzie $P(k_x, k_z, t)$ oznacza pole falowe w dwuwymiarowym przypadku (2D) we współrzędnych liczb falowych, t–czas, $i = \sqrt{-1}$.

Równanie (2) w dwuwymiarowym przypadku można przedstawić w postaci:

$$P(x,z,t) = \sum_{kx}\sum_{ky} P(k_x,k_z,t=0)\exp[i(k_x x + k_z z \pm \omega_a t)] \qquad (3)$$

Znak ± w równaniach (2) i (3) decyduje o kierunku propagacji fal. W układzie współrzędnych prostokątnych o osi Z skierowanej „w dół" znak „+" oznacza propagację w kierunku poziomu rejestracji $z = 0$.

W ośrodku niejednorodnym równanie (2) należy zastąpić pseudospektralną formą:

$$\frac{\partial P(x,z,t)}{\partial t} = iV_p(x,z)F^{-1}\{k_a F[P(x,z,t)]\} \qquad (4)$$

gdzie $F(x \to k_x, z \to k_z)$ i $F^{-1}(k_x \to x, k_z \to z)$ oznaczają dwuwymiarowe operatory Fouriera z domeny (x, z) do dziedziny (k_x, k_z) – i odwrotnie.

Relację (4) stosuje się zarówno w ośrodkach anizotropowych, jak i izotropowych. W tym ostatnim przypadku funkcja $k_a \to K = (k_x^2 + k_z^2)^{1/2}$ przekształca się w wektor falowy K.

Numeryczne rozwiązanie propagacji falowej w czasie t można uzyskać, stosując szereg Taylora ograniczony do trzech wyrazów:

$$P(x,z,t) = \sum_{l=0}^{3}\frac{\partial^l P(x,z,0)}{\partial t^l}\frac{\Delta t^l}{l!} \qquad (5)$$

co zabezpiecza stabilność procesu dla izotropowego przypadku [1].

Warunkiem początkowym jednostronnego równania (2) jest relacja (3) dla $t = 0$, tj. $P(x, z, t = 0)$. Modelowanie sekcji czasowej zero-offset wykonywano metodą jednocześnie wzbudzonych granic refleksyjnych [7].

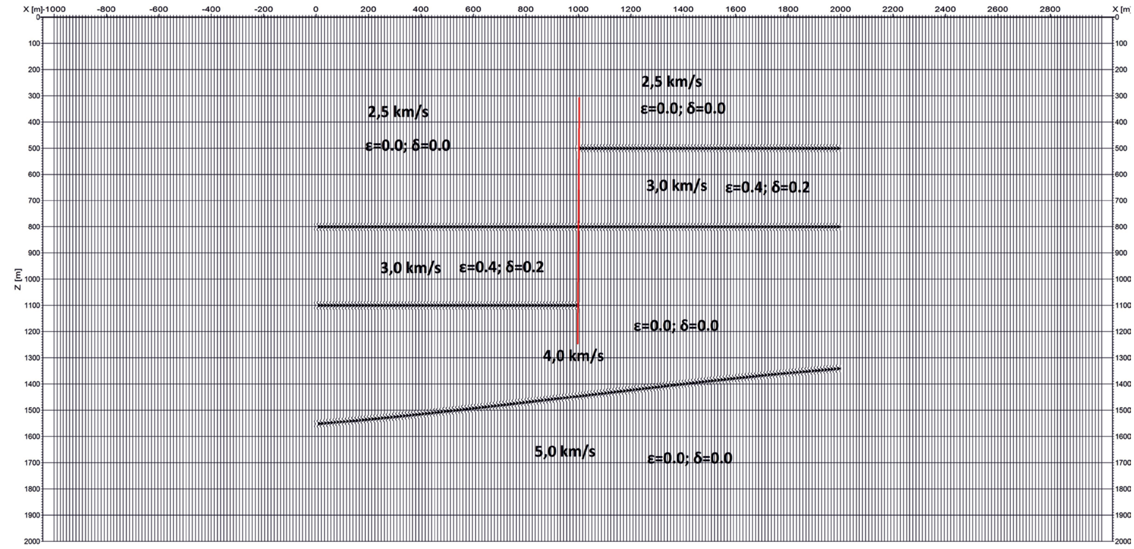
Eksperymenty numeryczne

Przedmiotem modelowania sekcji czasowych zero-offset i odwzorowań migracyjnych są modele pionowych i nachylonych uskoków HTI zanurzonych w niejednorodnym ośrodku izotropowym. Sekwencja modelowania pionowych uskoków obejmuje model geometryczno-prędkościowy (rysunek 1) o zrzucie 300 m i zmiennej miąższości warstwy.

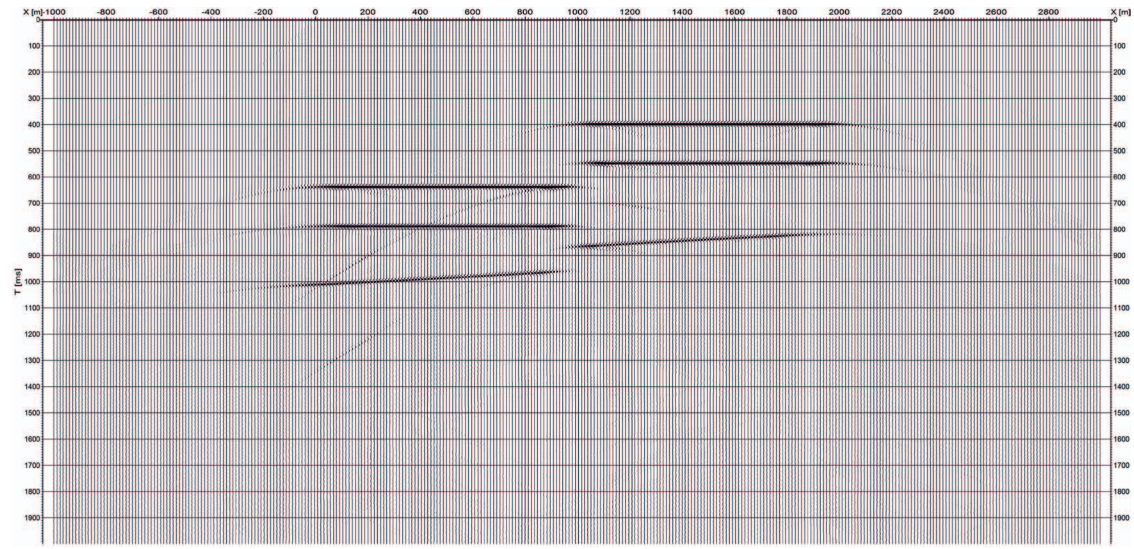
Sekcja czasowa zero-offset dla uskoku o zrzucie 300 m i miąższości warstwy równej 300 m oraz kącie azymutalnym $\Psi = 0°$ uzyskana z użyciem sygnału jednostkowego o częstotliwości dominującej 80 Hz (rysunek 2) nie odróżnia się od pola falowego otrzymanego dla kąta azymutalnego $\Psi = 90°$ (rysunek 3). Również odwzorowania głębokościowe ośrodka uzyskane z zastosowaniem migracji MG(F-K) w dziedzinie liczb falowych (K) i częstotliwości (F) [2, 3] są nierozróżnialne (rysunki 4 i 5). Obserwacja sekcji czasowych zero-offset dla stosunkowo znacznego zrzutu 300 m w ośrodku HTI wskazuje, że dla pionowego uskoku pole falowe kształtowane jest przez pionową propagację fal o prędkości $V_P(1 + 2\varepsilon)^{1/2}$, natomiast prędkość pozioma nie ma wpływu na charakter zarejestrowanego pola falowego. W dalszej sekwencji eksperymentów zrezygnowano więc ze śledzenia pola falowego w zależności od kąta azymutalnego, przyjmując wartość stałą równą $\Psi = 45°$.

Następny cykl eksperymentów dotyczył uskoku warstwy o miąższości 30 m dla różnych wartości zrzutu uskoku zanurzonego w niejednorodnym ośrodku izotropowym zaprezentowanym na rysunku 1. Z szeregu eksperymentów przedstawiono w artykule te najbardziej interesujące: na rysunkach 6 i 7 dla zrzutu równego 10 m oraz na rysunkach 8 i 9 dla zrzutu 6 m. Z porównań modeli geometrycznych uskoków o zrzucie 10 m (rysunek 10) i 6 m (rysunek 11) z migracjami na rysunku 7 i 9 wynika, że odwzorowania migracyjne są zgodne z założeniami.

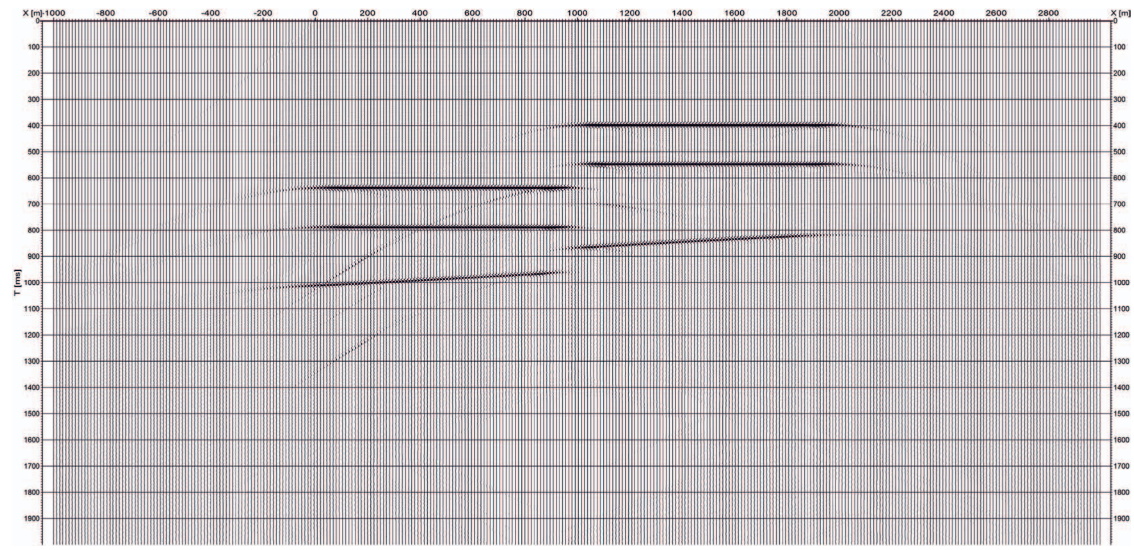
We wszystkich eksperymentach modelowań sekcje zero-offset zawierają nachyloną granicę refleksyjną w postaci fałszywego uskoku. Tego rodzaju deformacje pola falowego upodobniające się do wyżej leżącego rzeczywistego uskoku spowodowane są nieciągłościami niejednorodnego ośrodka, a więc skokowymi zmianami prędkości V_{NMO}. Ten sam eksperyment został wykonany w zakresie niewielkich zrzutów: 10 m (rysunki 12 i 13) i 6 m (rysunki 14 i 15) przy użyciu sygnału Rickera 30 Hz i wykazał możliwość uzyskania prawidłowego odwzorowania nawet dla stosunkowo małego zrzutu 6 m. Następna sekwencja eksperymentów wykonanych przy użyciu sygnału 15 Hz skutkuje stopniowym zanikiem oznak uskoku na sekcjach zero-offset. Na sekcji dla miąższości warstwy równej 30 m i zrzutu 10 m uskok nie jest widoczny (rysunek 16).



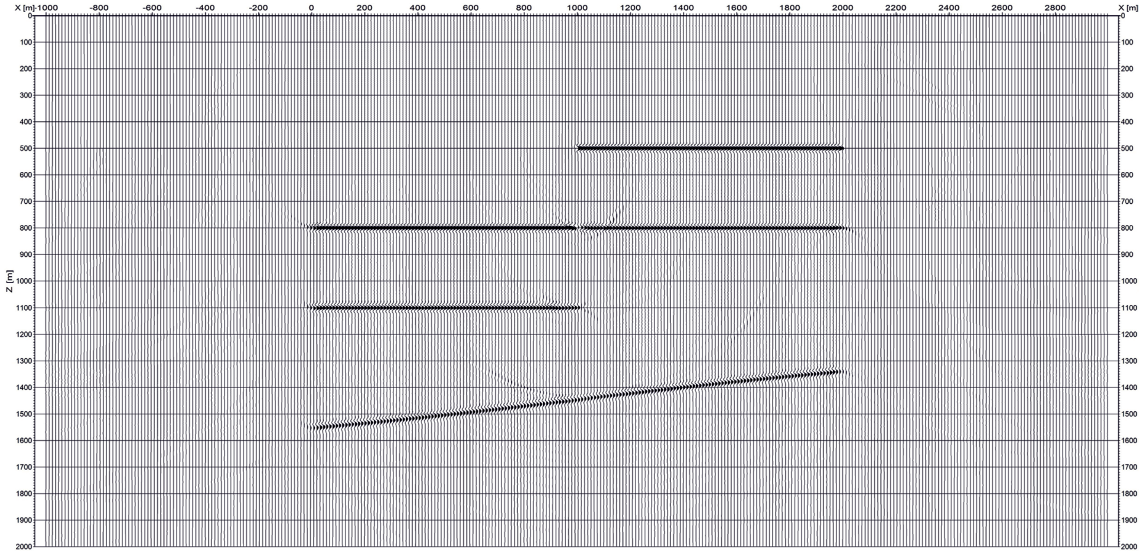
Rys. 1. Model geometryczno-prędkościowy strefy uskokowej



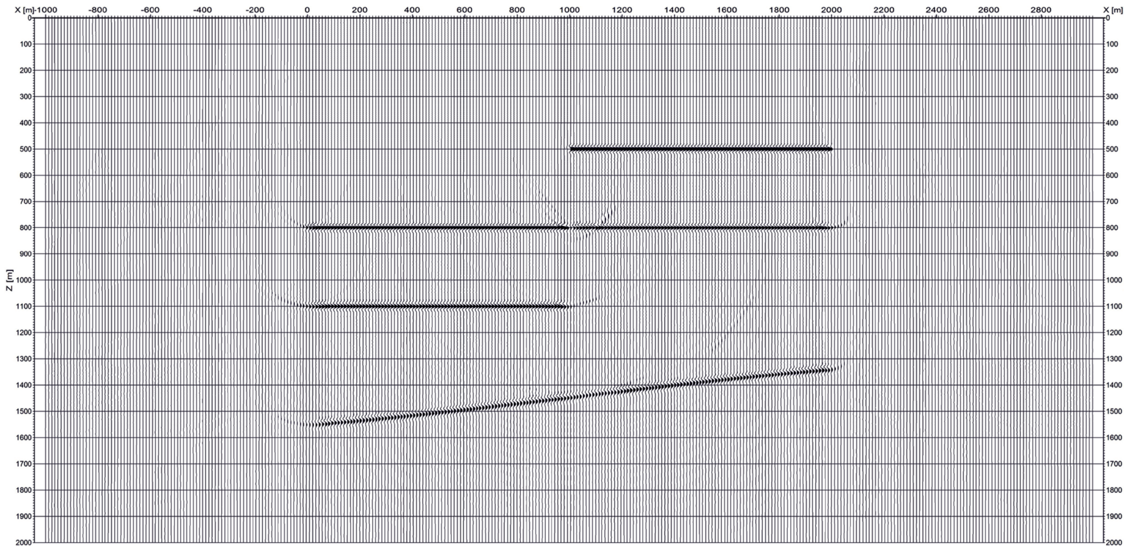
Rys. 2. Sekcja czasowa zero-offset dla uskoku o zrzucie 300 m i miąższości warstwy równej 300 m; parametry anizotropii: $\varepsilon = 0,4$; $\delta = 0,2$; kąt azymutalny $\Psi = 0°$. Sygnał jednostkowy o częstotliwości dominującej 80 Hz



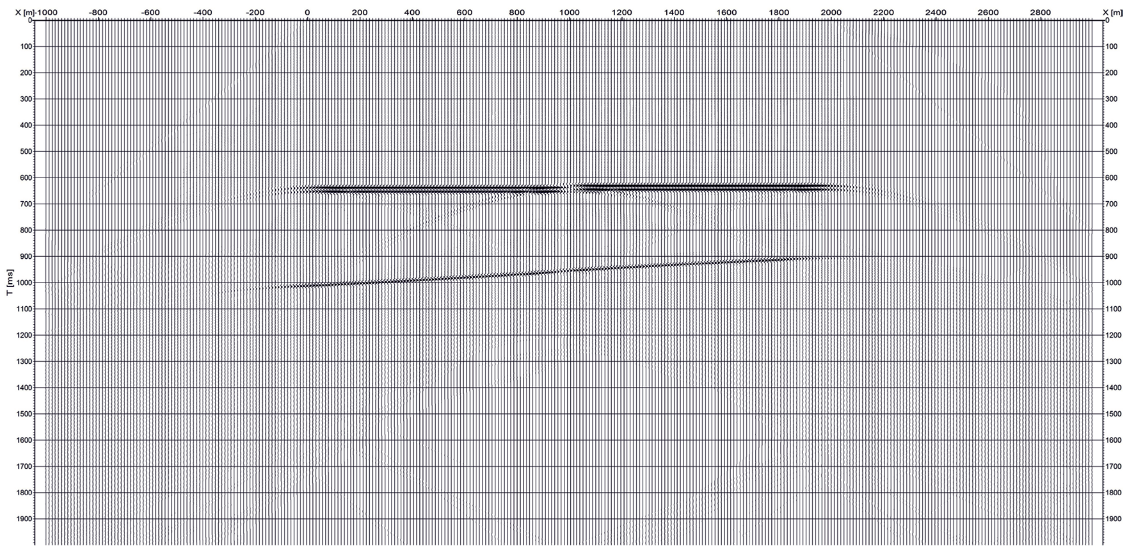
Rys. 3. Sekcja czasowa zero-offset dla uskoku o zrzucie 300 m i miąższości warstwy równej 300 m; parametry anizotropii: $\varepsilon = 0,4$; $\delta = 0,2$; kąt azymutalny $\Psi = 90°$. Sygnał jednostkowy o częstotliwości dominującej 80 Hz



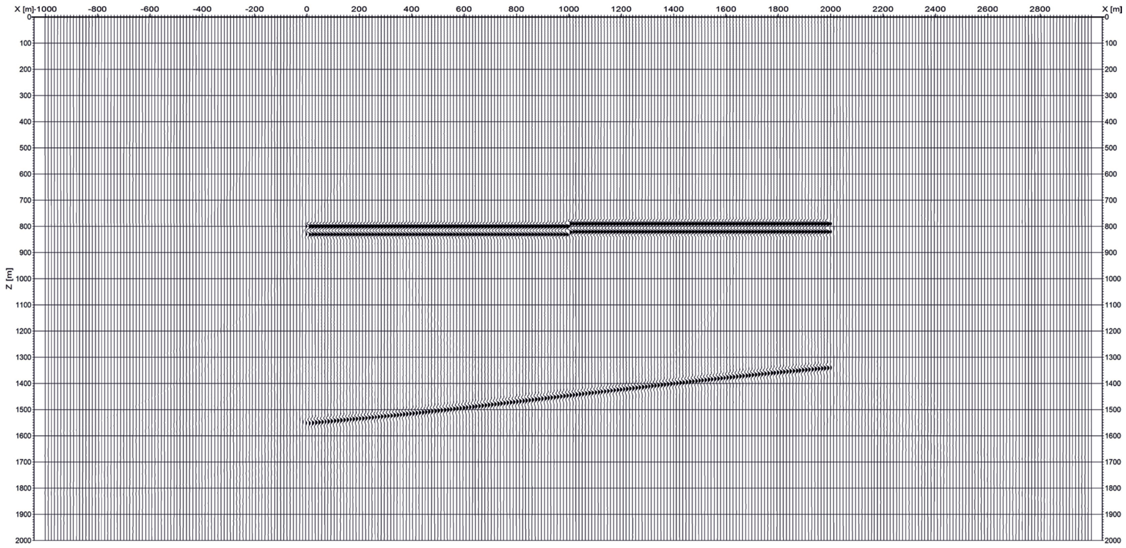
Rys. 4. Migracja zero-offset dla uskoku o zrzucie 300 m i miąższości warstwy równej 300 m; parametry anizotropii: $\varepsilon = 0{,}4$; $\delta = 0{,}2$; kąt azymutalny $\Psi = 0°$. Sygnał jednostkowy o częstotliwości dominującej 80 Hz



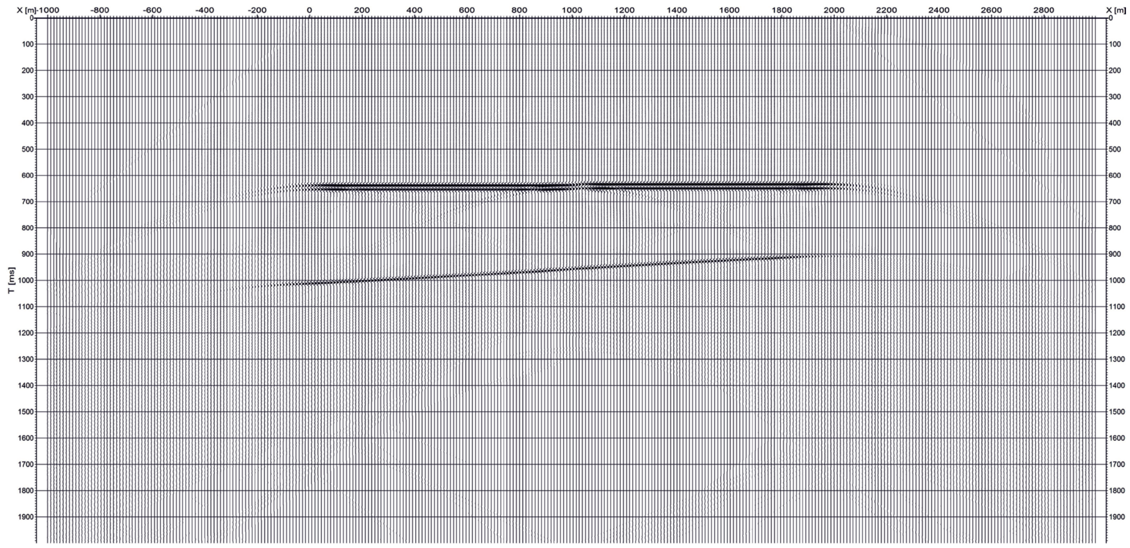
Rys. 5. Migracja zero-offset dla uskoku o zrzucie 300 m i miąższości warstwy równej 300 m; parametry anizotropii: $\varepsilon = 0{,}4$; $\delta = 0{,}2$; kąt azymutalny $\Psi = 90°$. Sygnał jednostkowy o częstotliwości dominującej 80 Hz



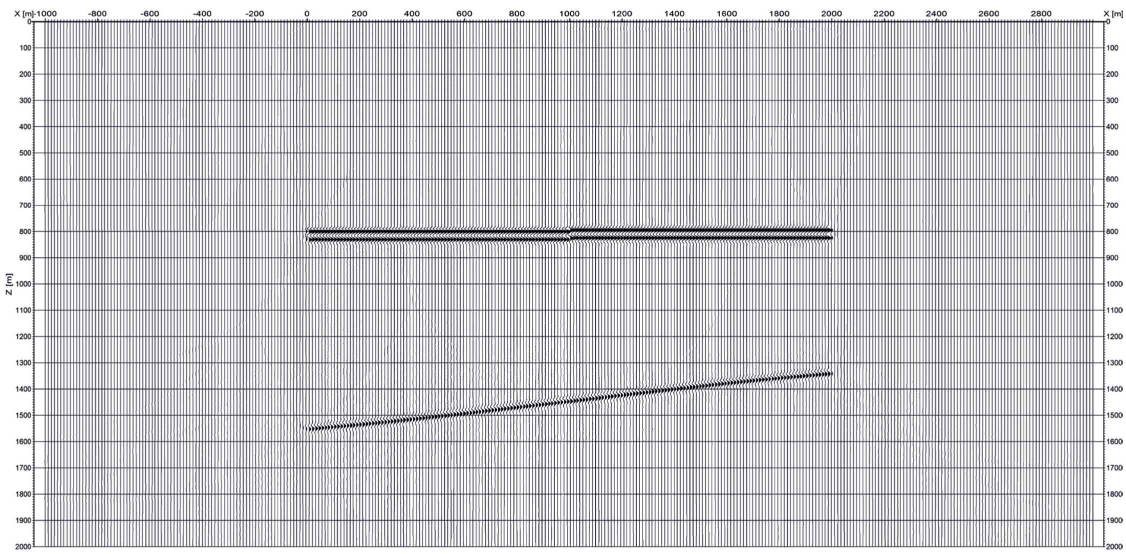
Rys. 6. Sekcja czasowa zero-offset dla uskoku o zrzucie 10 m i miąższości warstwy równej 30 m; parametry anizotropii: $\varepsilon = 0{,}4$; $\delta = 0{,}2$; kąt azymutalny $\Psi = 45°$. Sygnał jednostkowy o częstotliwości dominującej 80 Hz



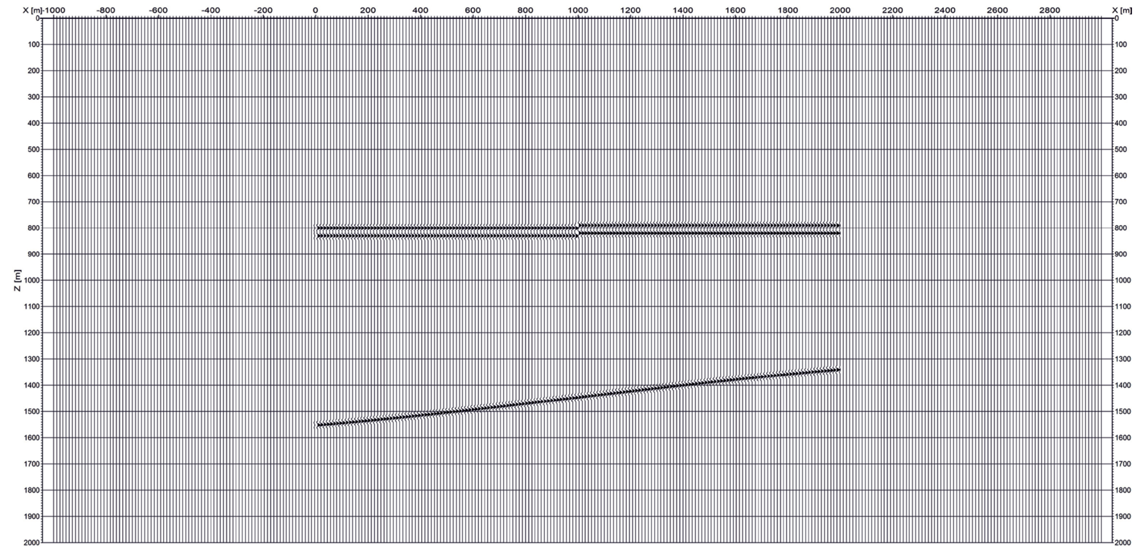
Rys. 7. Migracja zero-offset dla uskoku o zrzucie 10 m i miąższości warstwy równej 30 m; parametry anizotropii: $\varepsilon = 0{,}4$; $\delta = 0{,}2$; kąt azymutalny $\Psi = 45°$. Sygnał jednostkowy o częstotliwości dominującej 80 Hz



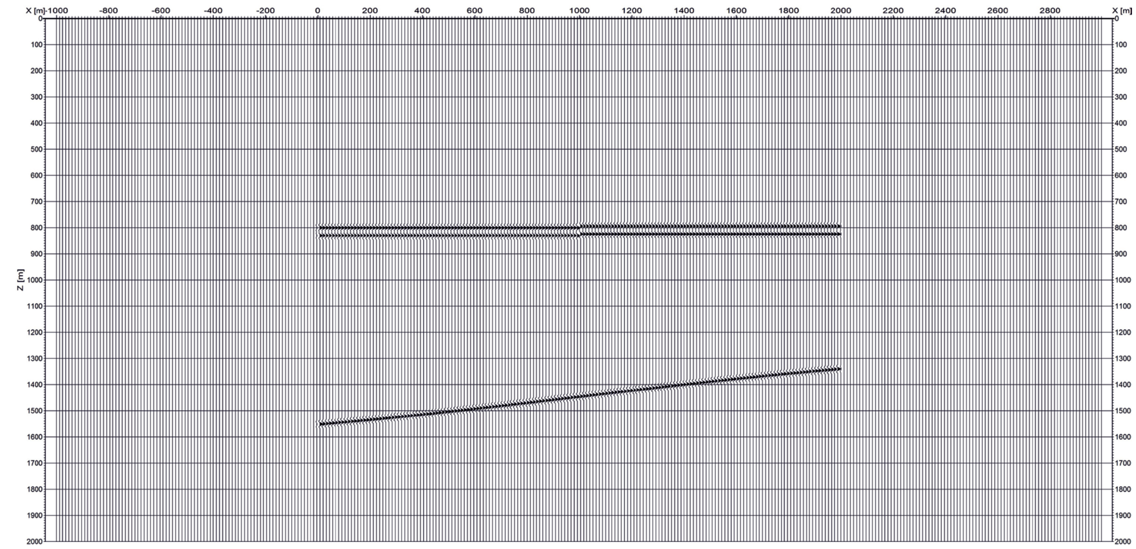
Rys. 8. Sekcja czasowa zero-offset dla uskoku o zrzucie 6 m i miąższości warstwy równej 30 m; parametry anizotropii: $\varepsilon = 0{,}4$; $\delta = 0{,}2$; kąt azymutalny $\Psi = 45°$. Sygnał jednostkowy o częstotliwości dominującej 80 Hz



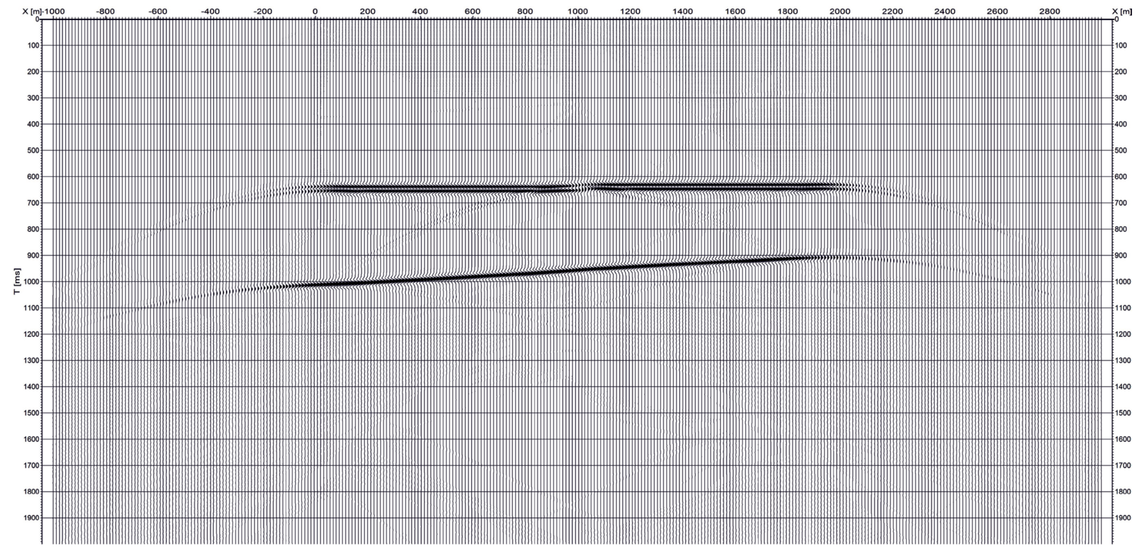
Rys. 9. Migracja zero-offset dla uskoku o zrzucie 6 m i miąższości warstwy równej 30 m; parametry anizotropii: $\varepsilon = 0{,}4$; $\delta = 0{,}2$; kąt azymutalny $\Psi = 45°$. Sygnał jednostkowy o częstotliwości dominującej 80 Hz



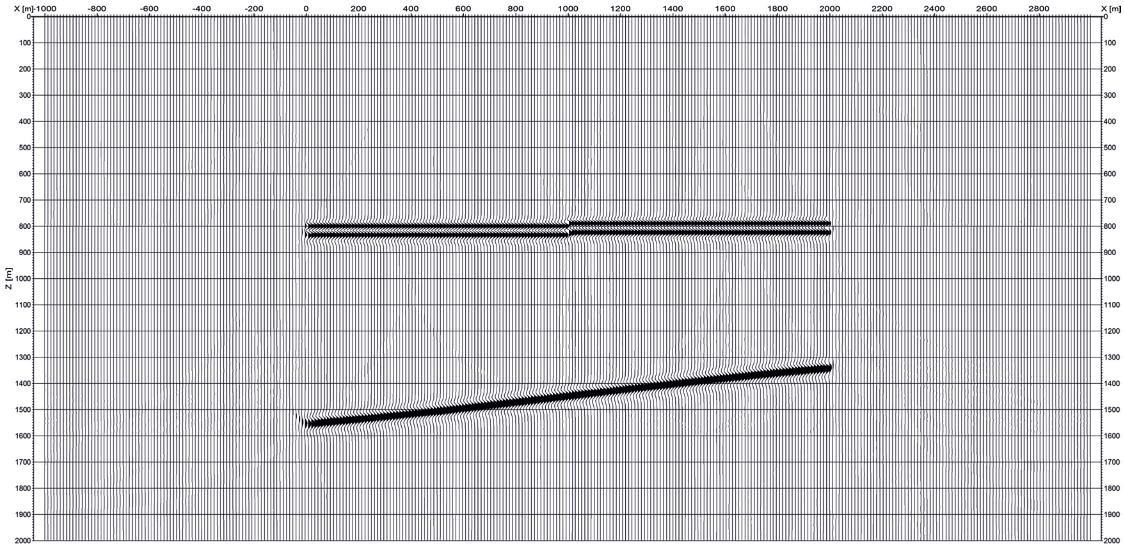
Rys. 10. Geometryczny model uskoku o zrzucie 10 m i miąższości warstwy równej 30 m



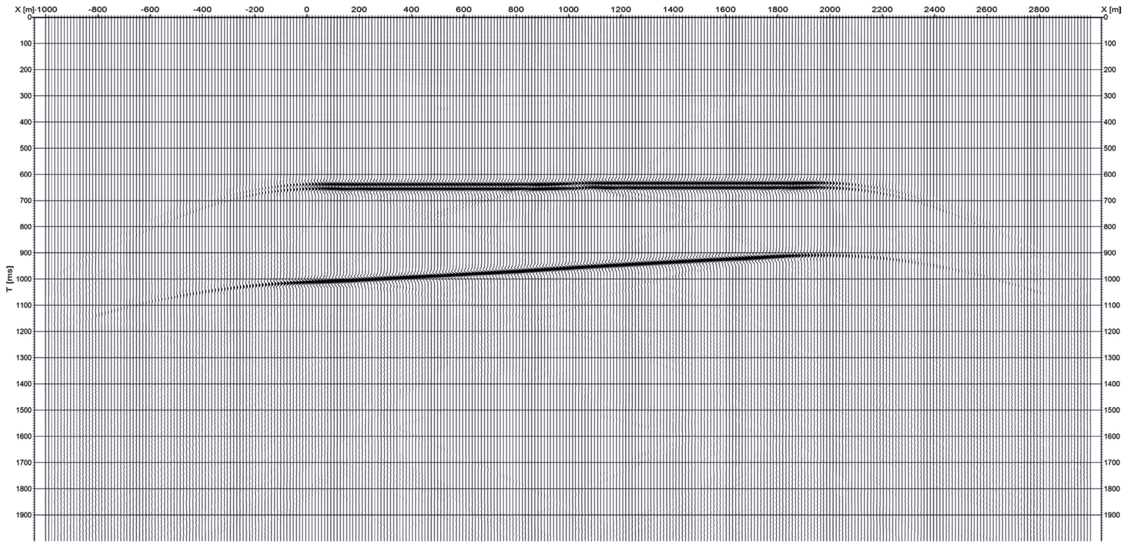
Rys. 11. Geometryczny model uskoku o zrzucie 6 m i miąższości warstwy równej 30 m



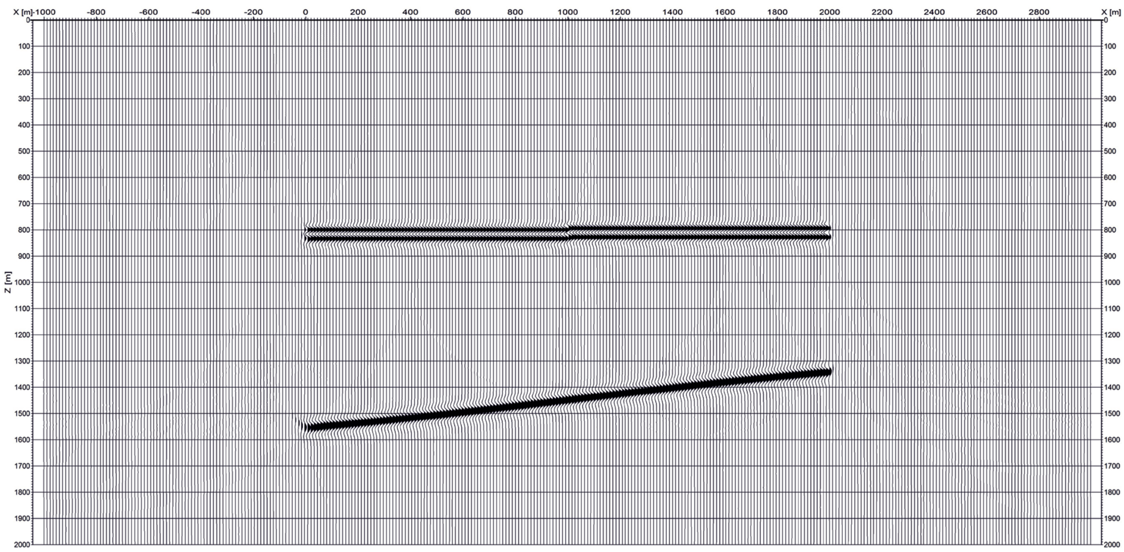
Rys. 12. Sekcja czasowa zero-offset dla uskoku o zrzucie 10 m i miąższości warstwy równej 30 m; parametry anizotropii: $\varepsilon = 0,4$; $\delta = 0,2$; kąt azymutalny $\Psi = 45°$. Sygnał Rickera o częstotliwości dominującej 30 Hz



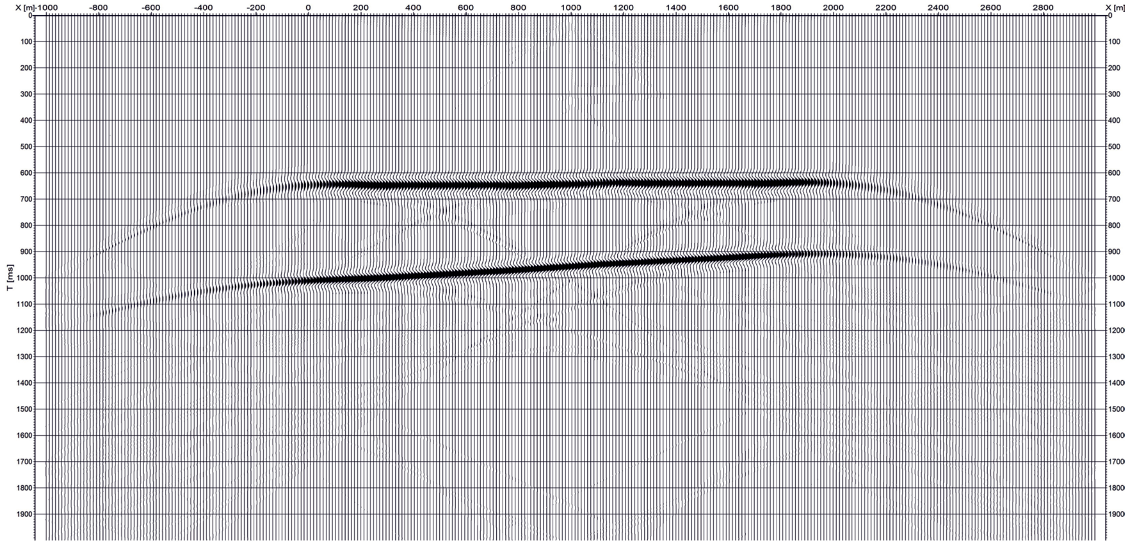
Rys. 13. Migracja zero-offset dla uskoku o zrzucie 10 m i miąższości warstwy równej 30 m; parametry anizotropii: $\varepsilon = 0{,}4$; $\delta = 0{,}2$; kąt azymutalny $\Psi = 45°$. Sygnał Rickera o częstotliwości dominującej 30 Hz



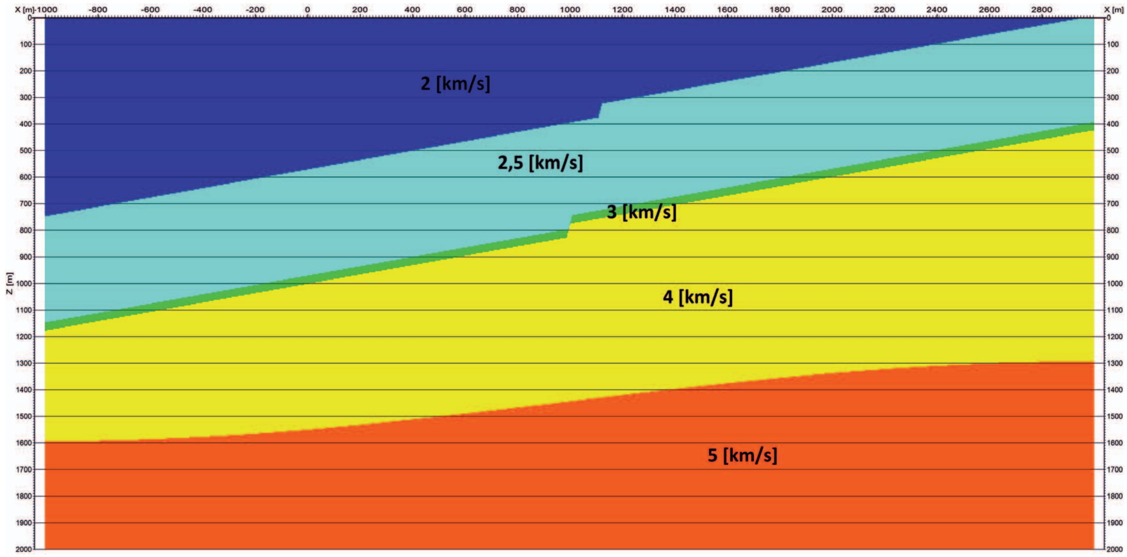
Rys. 14. Sekcja czasowa zero-offset dla uskoku o zrzucie 6 m i miąższości warstwy równej 30 m; parametry anizotropii: $\varepsilon = 0{,}4$; $\delta = 0{,}2$; kąt azymutalny $\Psi = 45°$. Sygnał Rickera o częstotliwości dominującej 30 Hz



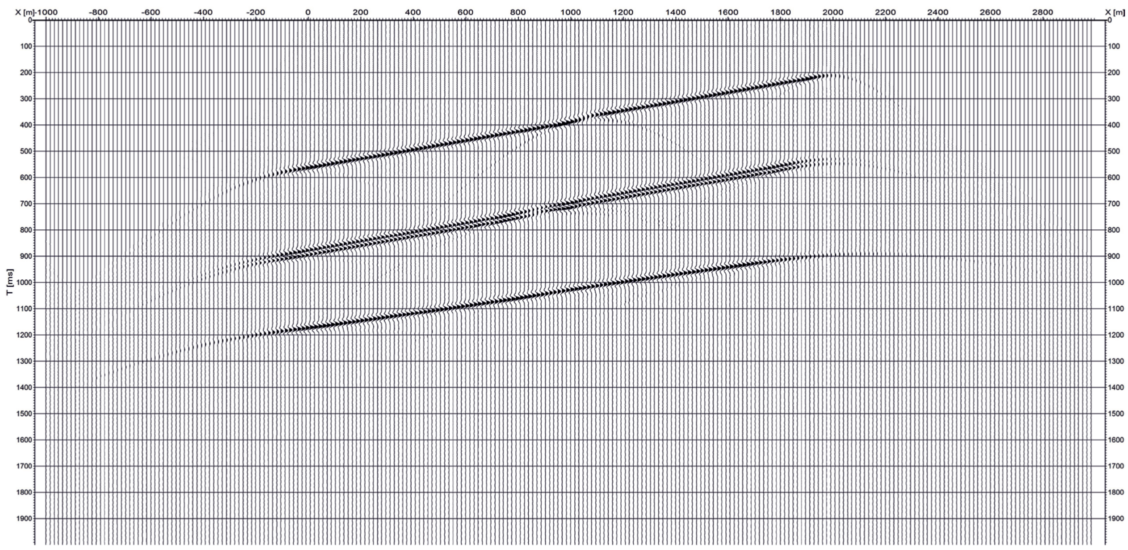
Rys. 15. Migracja zero-offset dla uskoku o zrzucie 6 m i miąższości warstwy równej 30 m; parametry anizotropii: $\varepsilon = 0{,}4$; $\delta = 0{,}2$; kąt azymutalny $\Psi = 45°$. Sygnał Rickera o częstotliwości dominującej 30 Hz



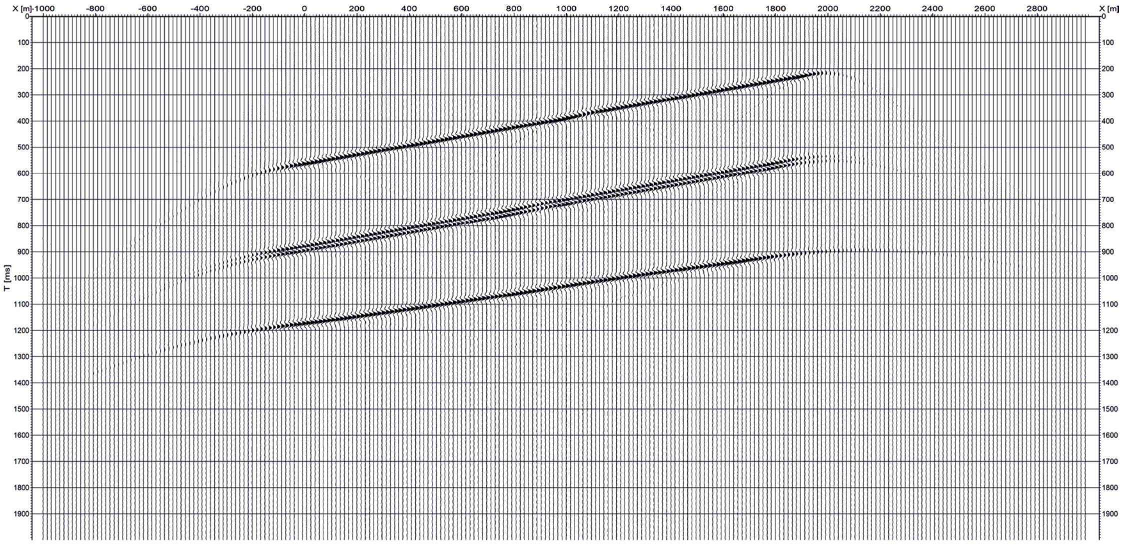
Rys. 16. Sekcja czasowa zero-offset dla uskoku o zrzucie 10 m i miąższości warstwy równej 30 m; parametry anizotropii: $\varepsilon = 0{,}4$; $\delta = 0{,}2$; kąt azymutalny $\Psi = 45°$. Sygnał Rickera o częstotliwości dominującej 15 Hz



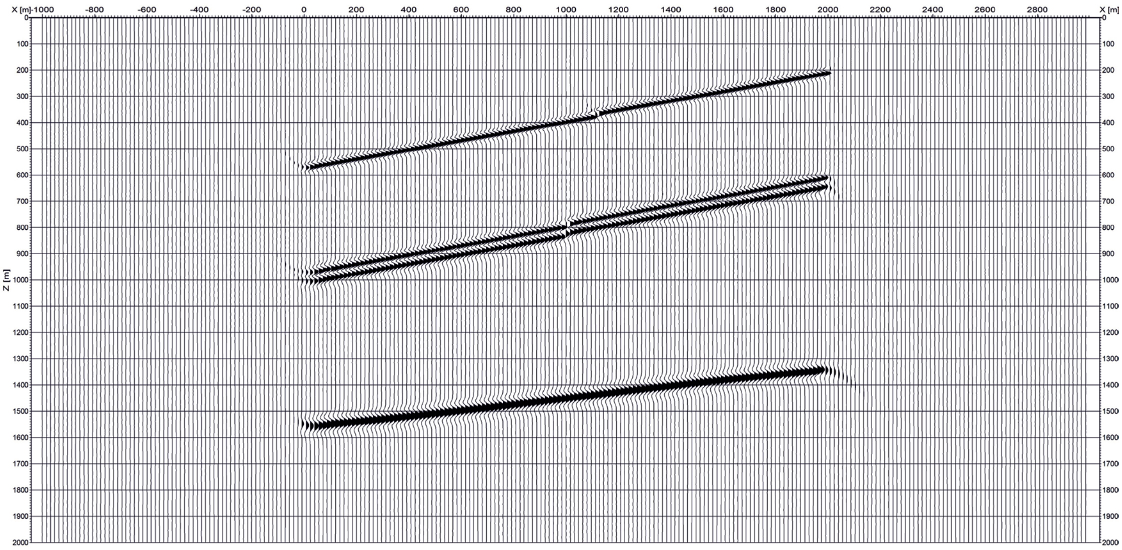
Rys. 17. Model uskoku. Miąższość anizotropowej warstwy HTI o parametrach: $\varepsilon = 0{,}4$; $\delta = 0{,}2$; $\Psi = 45°$ równa 30 m. Warstwa anizotropowa HTI oznaczona kolorem zielonym



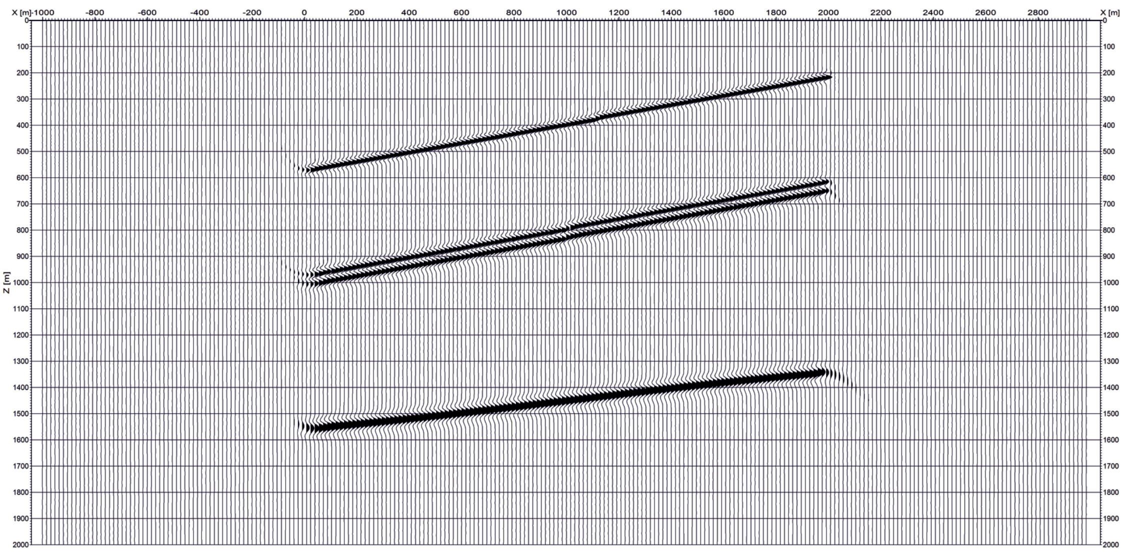
Rys. 18. Sekcja czasowa zero-offset dla uskoku o zrzucie 10 m i miąższości warstwy równej 30 m; parametry anizotropii: $\varepsilon = 0{,}4$; $\delta = 0{,}2$; kąt azymutalny $\Psi = 45°$. Sygnał Rickera o częstotliwości dominującej 30 Hz



Rys. 19. Sekcja czasowa zero-offset dla uskoku o zrzucie 5 m i miąższości warstwy równej 30 m; parametry anizotropii: $\varepsilon = 0,4$; $\delta = 0,2$; kąt azymutalny Ψ=45°. Sygnał Rickera o częstotliwości dominującej 30 Hz



Rys. 20. Migracja zero-offset dla modelu z warstwą anizotropową HTI o miąższości 30 m i zrzucie 10 m; parametry anizotropii: $\varepsilon = 0,4$; $\delta = 0,2$; kąt azymutalny $\Psi = 45°$. Pole falowe – rys. 18



Rys. 21. Migracja zero-offset dla modelu z warstwą anizotropową HTI o miąższości 30 m i zrzucie 5 m; parametry anizotropii: $\varepsilon = 0,4$; $\delta = 0,2$; kąt azymutalny $\Psi = 45°$. Pole falowe – rys. 19

Kolejny cykl eksperymentów w strefie uskokowej obejmował modelowanie i migrację na modelu nachylonej warstwy izotropowej o prędkości 2500 m/s, w której spągu występuje warstwa anizotropowa HTI o prędkości bazowej $V_P = 3000$ m/s, parametrach Thomsena: $\varepsilon = 0{,}4$; $\delta = 0{,}2$ i kącie azymutalnym $\Psi = 45°$ (rysunek 17). Na rysunkach 18 i 19 zaprezentowano sekcję czasową o zrzutach 10 m i 5 m warstwy o miąższości 30 m z użyciem sygnału Rickera 30 Hz. W przypadku zrzutu 10 m obserwuje się zmniejszanie amplitud zasadniczego uskoku warstwy HTI i wyżej leżącego uskoku warstwy izotropowej, natomiast w przypadku uskoku o zrzucie 5 m (rysunek 19) zauważa się nieznaczne osłabienie dla uskoku HTI. Odwzorowania migracyjne (rysunki 20 i 21) ujawniają wyraźnie istnienie uskoku dla zrzutu 10 m i oznaki nieciągłości dla uskoku o zrzucie 5 m.

Konkluzje

Rezultaty eksperymentów modelowań i migracji pozwalają sformułować następujące wnioski:

1. Pole falowe zero-offset pionowych uskoków w ośrodku anizotropowym HTI jest niezależne od kąta azymutalnego Ψ. Zjawisko to stanowi wynik kształtowania pola falowego głównie przez pionową i zbliżoną do pionowej propagację fal. Fale o horyzontalnym kierunku propagacji zależne od kąta azymutalnego Ψ praktycznie nie biorą udziału w konstrukcji sumarycznego pola zero-offset dla pionowego uskoku. Również w przypadku umiarkowanych kątów upadu warstw tworzących uskok dominujący wpływ na ukształtowanie pola falowego ma pionowy przebieg fal. We wspomnianych przypadkach warstwy o anizotropii HTI zachowują się jak izotropowe o prędkości równej $V_P(1 + 2\varepsilon)^{1/2}$, gdzie V_p jest prędkością bazową fal podłużnych, a ε parametrem Thomsena.
2. Uzyskana rozdzielczość 5÷6 m w odwzorowaniu głębokościowym przy użyciu sygnału o częstotliwości dominującej 80 Hz i sygnału Rickera 30 Hz pozycjonuje ten rezultat w zakresie kryterium rozdzielczości określonym przez Widessa [9].
3. Posługiwanie się sygnałem Rickera o dominującej częstotliwości 15 Hz skutkuje wyraźnym zmniejszeniem rozdzielczości, dla zrzutu 10 m uskok jest niezauważalny.
4. Odwzorowanie stref uskokowych w ośrodku anizotropowym HTI metodą migracji MG(F-K) zero-offset jest zbieżne z założonymi modelami geometrycznymi.

Prosimy cytować jako: Nafta-Gaz 2017, nr 12, s. 918–927, DOI: 10.18668/NG.2017.12.02

Artykuł nadesłano do Redakcji 29.06.2016 r. Zatwierdzono do druku 6.09.2017 r.

Artykuł powstał na podstawie badań zrealizowanych w ramach projektu pt.: *Badania sejsmiczne i ich zastosowanie dla detekcji stref występowania gazu z łupków. Dobór optymalnych parametrów akwizycji i przetwarzania w celu odwzorowania budowy strukturalnej oraz rozkładu parametrów petrofizycznych i geomechanicznych skał perspektywicznych*, dofinansowanego przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju w ramach programu BLUE GAS – POLSKI GAZ ŁUPKOWY. Nr umowy: BG1/GASLUPSEJSM/13.

Literatura

[1] Gazdag I.: *Modeling of the acoustic wave equation with transform methods*. Geophysics 1981, vol. 46, nr 6, s. 854–859.

[2] Kostecki A., Półchłopek A.: *Stable depth extrapolation of seismic wavefields by a Neumann series*. Geophysics 1998, vol. 63, nr 6, s. 2063–2071.

[3] Kostecki A., Żuławiński K.: *Forward and back-propagation of compressional waves in horizontal transverse isotropy (HTI) media*. Prace Naukowe Instytutu Nafty i Gazu – Państwowego Instytutu Badawczego 2016, nr 212, DOI: 10.18668/PN2016.212.

[4] Kostecki A., Żuławiński K.: *Modeling and seismic migration in anisotropic media as a function of azimuthal angle HTI (Ψ)*. Nafta-Gaz 2016, nr 9, s. 679–690, DOI: 10.18668/NG.2016.09.01.

[5] Kostecki A., Żuławiński K.: *Modelowanie i migracja sekcji czasowych zero-offsetowych w ośrodkach TTI metodą pseudospektralną*. Nafta-Gaz 2014, nr 12, s. 855–860.

[6] Kostecki A., Żuławiński K.: *Propagacja fal podłużnych w ośrodkach anizotropowych na przykładzie struktury uskokowej horstu*. X Międzynarodowa Konferencja Naukowo-Techniczna Geopetrol 2016, Prace Naukowe Instytutu Nafty i Gazu – Państwowego Instytutu Badawczego 2016, nr 209, s. 211–221.

[7] Loewenthal D., Lu L., Robertson R., Sherwod I.: *The wave equation applied to migration*. Geophysical Prospecting 1976, vol. 24, nr 2, s. 380–399.

[8] Thomsen L.: *Weak elastic anisotropy*. Geophysics 1986, vol. 51, no. 10, s. 1954–1966.

[9] Widess M.: *How thin is a thin bed?* Geophysics 1973, vol. 38, nr 6, s. 1176–1180.

Prof. dr hab. inż. Andrzej KOSTECKI
Profesor zwyczajny
Instytut Nafty i Gazu – Państwowy Instytut Badawczy
ul. Lubicz 25 A
31-503 Kraków
E-mail: *andrzej.kostecki@inig.pl*

Mgr inż. Krzysztof ŻUŁAWIŃSKI
Starszy specjalista badawczo-techniczny; p.o. kierownika Zakładu Sejsmiki.
Instytut Nafty i Gazu – Państwowy Instytut Badawczy
ul. Lubicz 25 A
31-503 Kraków
E-mail: *krzysztof.zulawinski@inig.pl*