

Karolina Pirowska  
Instytut Nafty i Gazu, Kraków

# Porównanie efektywności metody symulowanego wyżarzania oraz algorytmu genetycznego w szacowaniu parametrów ośrodka geologicznego

## Wstęp

Rozwój technologii pomiarowych, dostępność coraz lepszych narzędzi i wzrost mocy obliczeniowej komputerów skutkuje potrzebą ciągłego ulepszania metod przetwarzania danych. W geofizyce nieustannej weryfikacji i doskonaleniu podlegają metody szacowania parametrów ośrodka geologicznego. W szczególności przedmiotem gorących badań jest problem wyznaczania pola prędkości propagacji fal – parametru, na którym opierają się dalsze procedury przetwarzania danych, interpretacja geofizyczna i geologiczna – prowadzące do rozpoznania potencjalnego złoża węglowodorów.

Nowe możliwości w zadaniu szacowania parametrów ośrodka geologicznego, zwłaszcza w sytuacjach, gdy geometria i charakterystyka badanego obszaru jest bardzo złożona, niesie wykorzystanie probabilistycznych metod opty-

malizacji globalnej. Mnogość zastosowań algorytmu genetycznego oraz metody symulowanego wyżarzania w różnych dziedzinach nauki potwierdza szczególną łatwość adaptacji tych metod do rozmaitych warunków i problemów, co może motywować do prób ich aplikacji. Ponieważ w przypadku wymienionych probabilistycznych metod optymalizacji globalnej nigdy nie ma pewności, która z nich przyniesie lepsze wyniki, zasadne wydaje się podjęcie wysiłku zastosowania i porównania wyników obu algorytmów. Sens sprawdzenia działania obu metod potwierdza sformułowane w 1997 r. twierdzenie „No Free Lunch Theorem”. Zwraca ono uwagę na fakt, że żaden algorytm optymalizacyjny nie może być uznany za najlepszy i uniwersalny dla wszystkich zadań [8]. Decyzję odnośnie wyboru właściwej metody można podjąć jedynie na drodze prób i błędów.

## Przedmiot badań

Obiektem zainteresowania było wykorzystanie metody symulowanego wyżarzania (SA – z ang. *simulated annealing*) oraz niezależnie – algorytmu genetycznego (GA – z ang. *genetic algorithm*) w problemie estymacji pola prędkości propagacji fal, wraz z wyznaczeniem geometrii ośrodka izotropowego na podstawie danych sejsmiki refleksyjnej. W przypadku postawionego zadania zbiorem poszukiwanych parametrów były parametry charakteryzujące prędkość propagacji fali podłużnej oraz głębokości granic refleksyjnych. Danymi były odpowiadające poszukiwanym granicom hodografy, czyli czasy przyścia fali z określonego punktu wzbudzenia do kolej-

nych odbiorników. Metoda symulowanego wyżarzania i algorytm genetyczny zostały wykorzystane jako metoda optymalizacyjna w zadaniu wyznaczenia takich wartości poszczególnych parametrów definiujących przestrzenny rozkład prędkości, dla których wymodelowane hodografy syntetyczne najlepiej przybliżają hodografy wyznaczone z danych.

Metody wydają się być adekwatne do rozwiązania przedstawionego problemu, ponieważ zarejestrowane pole falowe nie podlega jedynie prawom fizycznym i nie daje się uchwycić za pomocą ścisłych formuł matematycznych, ale zawiera również element losowości. W procesie propagacji

fali mogą się pojawić pewne przypadkowe zjawiska, które można uwzględnić wykorzystując bardziej elastyczne, probabilistyczne metody optymalizacji globalnej. Probabilistyczne metody optymalizacji globalnej umożliwiają integrację różnego rodzaju danych. Z powodzeniem stosuje się je, gdy rozważany model posiada wiele zmiennych niezależnych. Metody te nie wykorzystują znajomości gradientu funkcji celu, zmienne są generowane losowo. Podczas pierwszych iteracji przeszukiwana może być cała przestrzeń rozwiązań, podczas kolejnych przeszukiwane są coraz mniejsze podprzestrzenie. W trakcie optymalizacji mogą być zaakceptowane gorsze rozwiązania jako bieżące, co pozwala uniknąć utknięcia w lokalnym minimum.

### Metodyka

Algorytm szacowania parametrów ośrodka opracowano opierając się m.in. na metodach opisanych w publikacjach [3, 7]. Inwersja symultaniczna, do której zalicza się rozwiązywany problem, może przebiegać na dwa sposoby [6]. Pierwszym sposobem jest jednoczesna parametryzacja prędkości i głębokości reflektora (stosowana przez: Bishop et al., 1985, Stork and Clayton, 1986, Farra and Madariaga 1988, Williamson 1990 [6]). Drugim rozwiązaniem, wykorzystanym przez autorów przytoczonych publikacji [7], jest podział parametrów na te, które charakteryzują prędkość, i takie, które dotyczą geometrii modelu i przeprowadzenia procesu inwersji w dwóch etapach (rozwiązanie stosowane przez: Bording et al., 1987, Stork and Clayton, 1987 [6]). S. K. Pullammanappallil i J. N. Louie [7] proponują użycie techniki migracji, aby wyznaczyć głębokość reflektora przy początkowo przyjętym polu prędkości, a następnie, za pomocą metody symulowanego wyżarzania, dokonać uaktualnienia prędkości. Modyfikacja geometrii i prędkości jest powtarzana iteracyjnie, aż do momentu osiągnięcia satysfakcjonującego rozwiązania. W latach 90. ub. wieku powstało wiele schematów inwersji danych sejsmiki refleksyjnej, w których poszukiwane były prędkość i głębokość reflektora. Jednak wszystkie wcześniejsze metody inwersji wymagały lokalnej linearyzacji oraz dobrego modelu początkowego. Autorzy jako pierwsi zastosowali metody optymalizacji nieliniowej, aby dokonać inwersji czasów przyjscia w tomografii sejsmicznej w celu uzyskania prędkości, głębokości oraz długości reflektorów.

Podobne podejście przyjęto w opracowanej metodzie. W pierwszej fazie działania programu następuje wczytanie danych wypunktowanych na rekordach polowych sejsmiki powierzchniowej hodografów. Dla zaprezentowanych dalej przykładowych modeli syntetycznych użyto hodografów

Innym ważnym atutem metod jest niezależność od modelu początkowego, dzięki czemu istnieje możliwość oszacowania wartości parametrów, nawet gdy na starcie programu wartości tych parametrów były błędnie zdefiniowane.

Duży wpływ na skuteczność tych technik dla konkretnego zadania ma sposób zaprojektowania i wykorzystanie poszczególnych elementów algorytmów. Każda z metod posiada zbiór parametrów sterujących algorytmem. Ustalenie tych parametrów może być kłopotliwe i jest możliwe jedynie na podstawie przeprowadzonych testów.

Dokładne charakterystyki poszczególnych metod zostały przedstawione we wcześniej publikowanych artykułach [2, 4].

wymodelowanych za pomocą programu obliczającego sejsmogramy syntetyczne. Danymi wejściowymi są również parametry początkowe modelu: pole prędkości, a także głębokości poszczególnych granic. Kolejne etapy działania programu są zależne od zastosowanej metody.

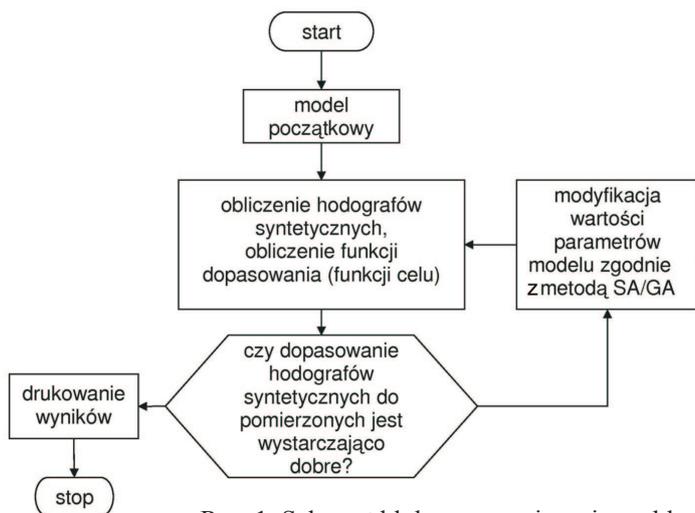
W przypadku algorytmu genetycznego wygenerowana zostaje populacja początkowa, czyli zbiór osobników reprezentujących pole prędkości. Dla każdego osobnika obliczono funkcję celu oraz funkcję przystosowania. Funkcja celu została zdefiniowana jako błąd średniokwadratowy pomiędzy hodografami pomierzonymi a hodografami wymodelowanymi dla konkretnego pola prędkości (osobnika). Funkcja przystosowania przekształca wartości funkcji celu w taki sposób, aby najlepiej przystosowanymi osobnikami były te, dla których obliczone hodografy optymalnie przybliżają hodografy pomierzone [4].

W przypadku metody symulowanego wyżarzania funkcja celu liczona jest dla jednego rozważanego w danym momencie modelu prędkości.

Jeśli dopasowanie hodografów syntetycznych, wyliczonych dla tymczasowo najlepszego modelu, do hodografów pomierzonych nie jest wystarczająco dobre, pole prędkości modyfikowane jest zgodnie z zasadami odpowiedniego algorytmu. Następnie, dla nowego pola prędkości, za pomocą metody migracji, aktualizowane są parametry związane z geometrią modelu – czyli głębokości poszczególnych granic.

Algorytm zatrzymuje się, gdy spełnione zostaje kryterium zakończenia algorytmu, czyli osiągnięcie zdefiniowanej maksymalnej liczby iteracji. Ogólny schemat działania programu optymalizacyjnego przedstawiono na rysunku 1.

Posłużono się programem `susynvxzcs` do modelowania sejsmogramów syntetycznych, należącym do ogólnodostęp-



Rys. 1. Schemat blokowy rozwiązania problemu szacowania pola prędkości propagacji fal za pomocą metod SA i GA

tego oprogramowania geofizycznego Seismic Unix. Pakiet SU został stworzony i jest rozwijany w Center for Wave Phenomena w Department of Geophysical Engineering w Colorado School of Mines [1]. Przy spełnieniu warunku zaakceptowania licencji dotyczącej danej wersji pakietu, można bez ograniczeń korzystać z kodów programów dla celów przetwarzania danych lub tworzenia oprogramowania. Program susynvxxcs służy do generowania sejsmogramów syntetycznych dla ośrodka izotropowego z dowolnie zadaniem w siatce polem prędkości.

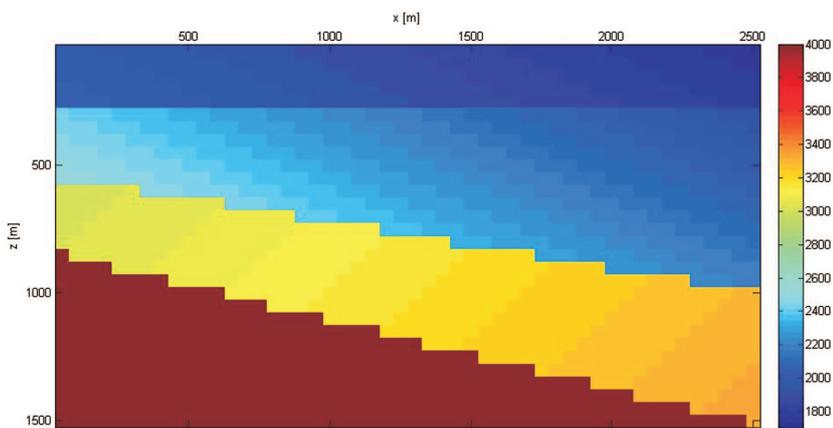
### Obliczenia dla danych syntetycznych

Obliczenia przeprowadzono dla dwóch modeli:

- model syntetyczny 1 – jest to model o trzech granicach: pierwsza granica jest płasko-równoległa, o głębokości 200 m, druga i trzecia – nachylone odpowiednio pod kątem 10 i 15°. Ich głębokości na początku modelu wynoszą 500 i 800 m. Prędkość została zadana funkcją liniową o wartości początkowej  $v_0$ , równej 2200 m/s,

i gradientach: pionowym  $dvdz$ , równym 0,2, i poziomym  $dvdz$ , równym  $-0,1$ . Model prędkościowo-głębokościowy przedstawiono na rysunku 2. Wartości parametrów związanych z prędkością przedstawiono w tabelicy 1, natomiast parametry dotyczące geometrii umieszczono w trzeciej kolumnie tabelicy 3;

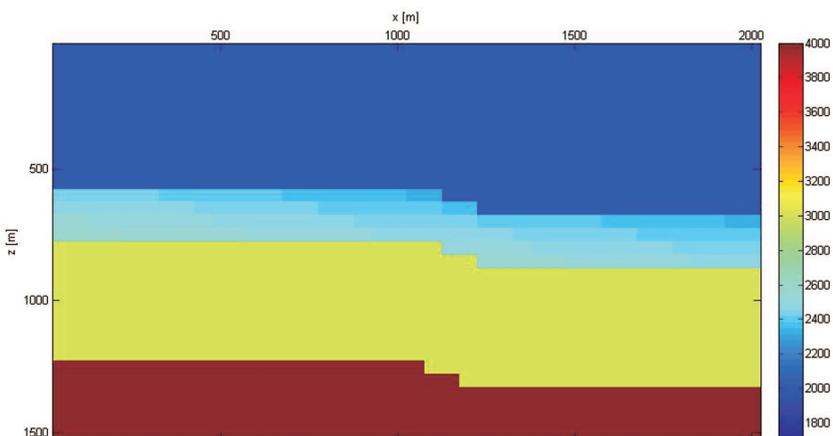
- model syntetyczny 2 – jest to model o trzech grani-



Tabelica 1. Parametry prędkości dla modelu syntetycznego 1

	$v_0$ [m/s]	$dvdz$	$dvdz$
Warstwa 1	2000	0,2	$-0,1$
Warstwa 2	2400	0,4	$-0,2$
Warstwa 3	3000	0,1	0,1
	4000	0,0	0,0

Rys. 2. Model prędkościowo-głębokościowy dla modelu syntetycznego 1



Tabelica 2. Parametry prędkości dla modelu syntetycznego 2

	$v_0$ [m/s]	$dvdz$	$dvdz$
Warstwa 1	2000	0,0	0,0
Warstwa 2	2400	0,9	$-0,1$
Warstwa 3	3000	0,0	0,0
	4000	0,0	0,0

Rys. 3. Model prędkościowo-głębokościowy dla modelu syntetycznego 2

cach płasko-równoległych z uskokiem pomiędzy  $x = 1000$  m a  $x = 1200$  m. Prędkość została zadana jako stała w warstwie pierwszej i trzeciej, zaś w warstwie drugiej została zdefiniowana funkcją liniową o wartości początkowej  $v_0$ , równej 2400 m/s, i gradientach: pionowym  $dv/dz$ , równym 0,9, i poziomym  $dv/dx$ , równym  $-0,1$ . Model prędkościowo-głębokościowy przedstawiono na rysunku 3. Wartości parametrów związanych z prędkością przedstawiono w tabelicy 2, natomiast parametry dotyczące geometrii umieszczono w trzeciej kolumnie tabelicy 5.

Za pomocą programów do modelowania dla modeli obliczono hodografy dla kolejnych granic, dla 53 punktów wzbudzenia. Przyjęto rozstaw prawostronny z 45 odbiornikami rozstawionymi co 50 m. Wybrane wymodelowane hodografy potraktowano następnie jako dane pomiaro-

Tabela 3. Parametry głębokości dla modelu syntetycznego 1

Granica	$x$ [m]	Rzeczywista głębokość [m]	Początkowa głębokość [m]	Optymalna głębokość [m] metoda GA	Optymalna głębokość [m] metoda SA
1	0	200	215	180	190
	500	200	222	200	180
	1000	200	230	190	200
	1500	200	236	200	190
	2000	200	245	210	190
2	0	500	481	420	410
	500	590	569	500	500
	1000	680	684	600	600
	1500	770	793	730	740
	2000	860	922	930	930
3	0	800	700	630	630
	500	934	806	780	780
	1000	1068	951	980	980
	1500	1202	1094	1220	1190
	2000	1336	1248	1430	1390

Tabela 4. Podział na 6 mniejszych warstw dla modelu syntetycznego 1 – parametry głębokości, wyestymowane prędkości oraz uśrednienie prędkości w obrębie oszacowanych warstw modelu

Warstwa	Strop	Spąg	Prędkość początkowa	Prędkość – optymalny wynik, metoda GA	Prędkość – optymalny wynik, metoda SA	Lokalizacja granicy	Prędkość średnia, metoda GA	Prędkość średnia, metoda SA
1	0	40	2200	1926	1600			
2	40	80	2200	2086	2400			
3	80	120	2200	2303	2400			
4	120	160	2200	1606	1600			
5	160	210	2200	1619	2400	-->granica 1	1908	2080
6	210	260	2200	1638	2151			
<b>Warstwa 7</b>								
1	260	330	2200	1747	1914			
2	330	400	2200	2384	2133			
3	400	470	2200	1666	1717			
4	470	540	2200	1669	1600			
5	540	610	2200	1685	1623			
6	610	680	2200	2011	1653	-->granica 2	1829	1827
<b>Warstwa 8</b>								
1	680	780	3600	3625	3565			
2	780	880	3600	2970	4259			
3	880	980	3600	3631	2880			
4	980	1080	3600	3371	2880	-->granica 3	3400	3396
5	1080	1280	3600	3145	2880			
6	1280	2500	3600	3970	2917			

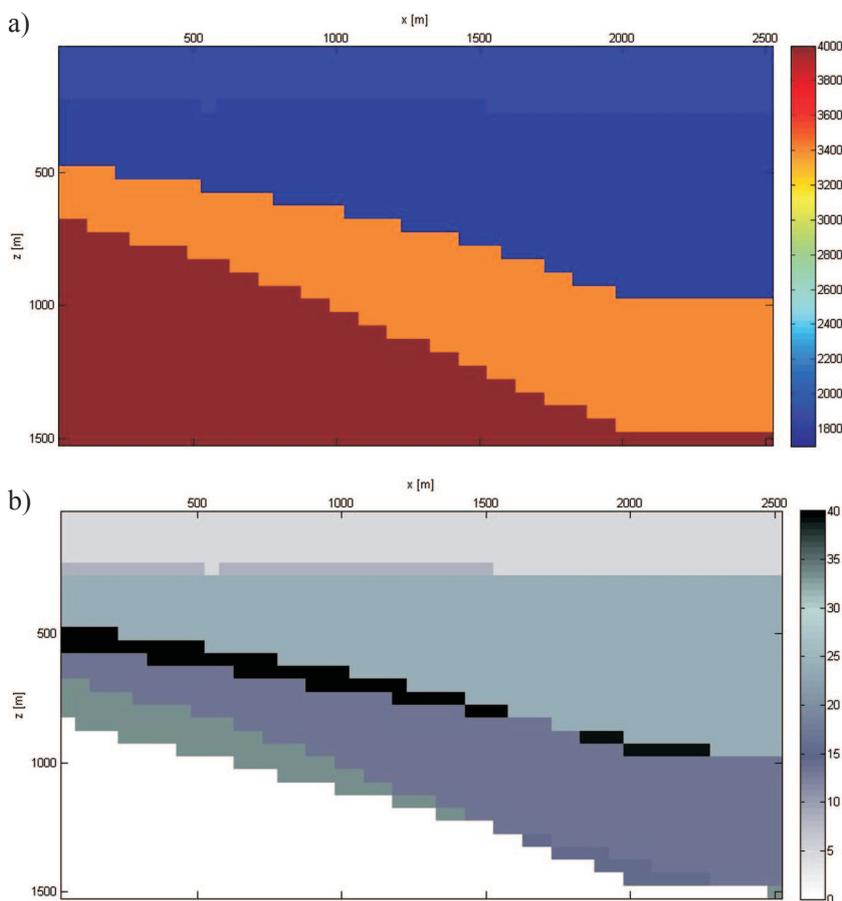
we, na podstawie których należało oszacować parametry ośrodka. W przypadku modelu 1 obliczenia prowadzono dla 5 rekordów, dla których punkty wzbudzenia umieszczone były w  $x = 0, 500, 1000, 1500, 2000$  m; natomiast dla modelu 2 punkty wzbudzenia wybranych rekordów umieszczone były w  $x = 600, 800, 1000, 1200, 1400$  m.

Ponieważ wyniki pierwszych obliczeń dla modelu syntetycznego 1 (początkowo pole prędkości poszukiwane było w każdej warstwie jako zbiór trzech wartości: prędkości początkowej oraz poziomego i pionowego gradientu) nie były najlepsze, zdecydowano się na zmianę parametryzacji modelu. Poszczególne warstwy modelu 1 podzielono na 6 mniejszych warstw; głębokości poszczególnych warstw przedstawiono w kolumnie drugiej i trzeciej w tabelicy 4, w której przedstawiono również wyniki optymalizacji w poszczególnych mniejszych warstwach (kolumna piąta oraz szósta) oraz uśrednienie prędkości w warstwach do wyznaczonych granic odbijających (kolumna ósma oraz dziewiąta). Podobną parametryzację przyjęto dla modelu syntetycznego 2.

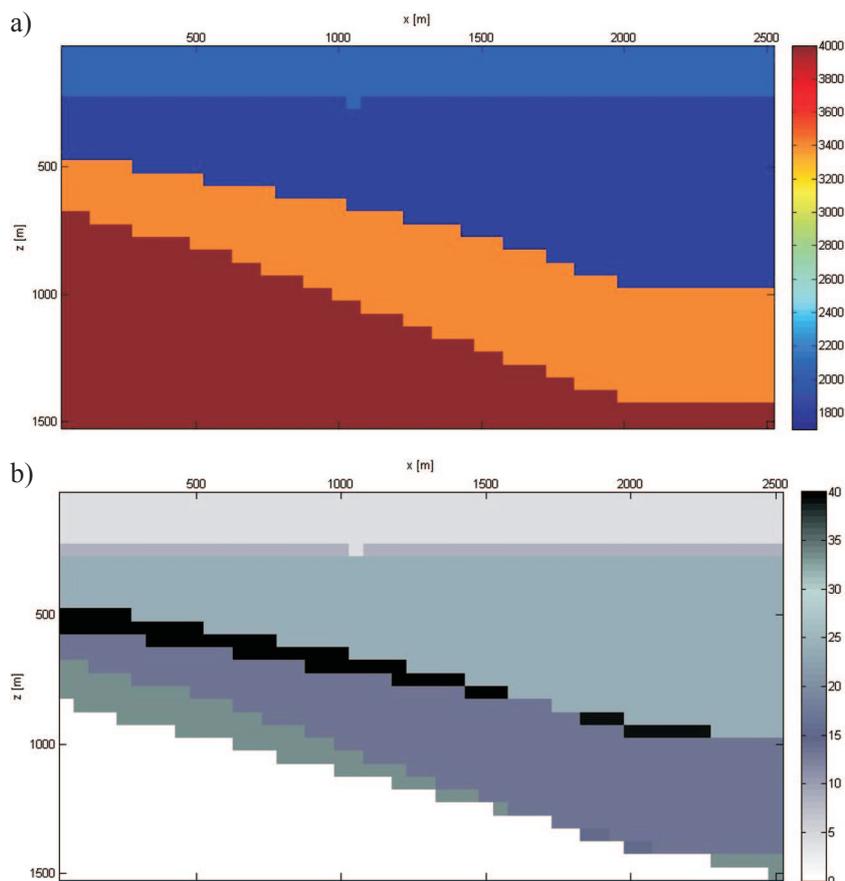
Dla modelu 1, dla przyjętej parametryzacji, przybliżenie parametrów dotyczących prędkości i geometrii jest nienajlepsze dla obu algorytmów. Wartości parametrów dotyczących prędkości startowej i otrzymanej w wy-

ku działania programu umieszczono w tabelicy 4, natomiast pole prędkości uzyskanej w wyniku odpowiedniego uśrednienia w obrębie oszacowanych warstw przedstawiono na rysunku 4a i 5a. Względny błąd procentowy oszacowania pola prędkości uśrednionej osiąga wielkość do 46,5% (średnio 7,7%) dla metody GA oraz do 46,5% (średnio 8,3%) dla metody SA (rysunek 4b i 5b). Analizując dane zawarte w tabelicy 3, można porównać parametry reprezentujące geometrię modelu. Oszacowanie głębokości jest nienajlepsze. Błąd bezwzględny oszacowania wynosi dla obu metod maksymalnie do 20 m dla granicy pierwszej, do 90 m dla granicy drugiej oraz do 150 m (170 m dla metody SA) dla granicy trzeciej.

Wyniki obliczeń dla modelu 2 przedstawiono w tabelicy 5 i 6. Odpowiednie uśrednienie prędkości w poszczególnych mniejszych warstwach, na które podzielono model (tablica 6), pozwoliło otrzymać satysfakcjonujące rezultaty (lepsze za pomocą algorytmu genetycznego). Pole prędkości uzyskanej w wyniku odpowiedniego uśrednienia w obrębie oszacowanych warstw przedstawiono na rysunku 6a i 7a. Względny błąd procentowy oszacowania pola prędkości uśrednionej dla obu metod (rysunek 6b i 7b) osiąga wielkość do 33,3% jedynie w cienkich fragmentach modelu, co jest wynikiem błędu przybliżenia



Rys. 4. Pole prędkości dla modelu 1. Kolejno przedstawiono: a) pole prędkości otrzymane w wyniku odpowiedniego uśrednienia prędkości wyznaczonych za pomocą metody GA, b) błąd względny procentowy wyznaczonego pola



Rys. 5. Pole prędkości dla modelu 1. Kolejno przedstawiono: a) pole prędkości otrzymane w wyniku odpowiedniego uśrednienia prędkości wyznaczonych za pomocą metody SA, b) błąd względny procentowy wyznaczonego pola

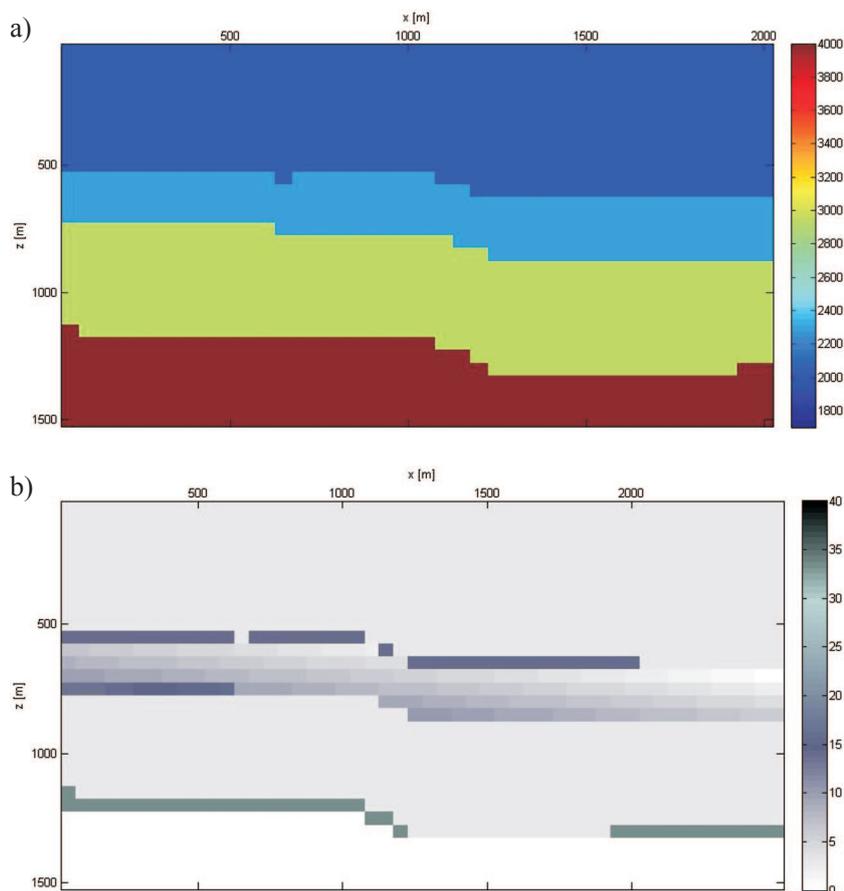
głębokości poszczególnych granic. Średnio względny błąd procentowy nie przekracza 4% dla metody GA oraz 5% dla metody SA. Oszacowanie głębokości jest zadowalające. Błąd bezwzględny oszacowania dla metody GA wynosi maksymalnie do 10 m dla granicy pierwszej i drugiej oraz do 160 m dla granicy trzeciej. Dla metody SA błąd bezwzględny oszacowania wynosi maksymalnie do 10 m dla granicy pierwszej, do 20 m dla granicy drugiej oraz do 90 m dla granicy trzeciej.

Tablica 5. Parametry głębokości dla modelu syntetycznego 2

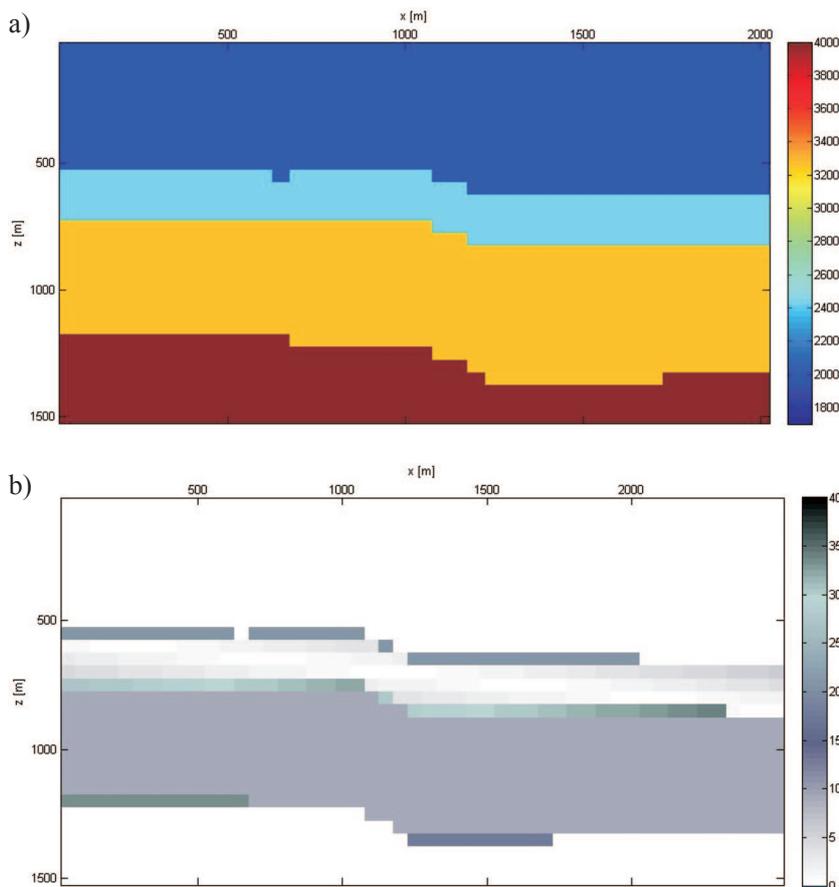
Granica	$x$ [m]	Rzeczywista głębokość [m]	Początkowa głębokość [m]	Optymalna głębokość [m] metoda GA	Optymalna głębokość [m] metoda SA
1	0	500	535	490	490
	600	500	535	500	500
	800	500	540	490	490
	1000	600	540	490	490
	1200	600	655	590	590
	1400	600	650	590	590
2	0	700	710	690	690
	600	700	720	700	680
	800	700	720	710	690
	1000	700	730	710	690
	1200	800	820	810	790
	1400	800	830	810	790
3	0	1200	1070	1100	1130
	600	1200	1080	1110	1140
	800	1200	1080	1140	1190
	1000	1300	1090	1140	1190
	1200	1300	1170	1260	1310
	1400	1300	1185	1260	1310

Tablica 6. Podział na 6 mniejszych warstw dla modelu syntetycznego 2 – parametry głębokości, wyestymowane prędkości oraz uśrednienie prędkości w obrębie oszacowanych warstw modelu

Warstwa	Strop	Spąg	Prędkość początkowa	Prędkość optymalny wynik, metoda GA	Prędkość optymalny wynik, metoda SA	Lokalizacja granicy	Prędkość średnia, metoda GA	Prędkość średnia, metoda SA
1	0	100	2200	2119	2138			
2	100	200	2200	2295	1975			
3	200	300	2200	2533	1901			
4	300	400	2200	1767	1760			
5	400	500	2200	1781	1943			
6	500	600	2200	1801	2305	-->granica 1	2049	2003
<hr/>								
1	600	660	2200	2512	2603			
2	660	720	2200	2616	2636			
3	720	780	2200	2012	2640			
4	780	840	2200	1998	1817	-->granica 2	2285	2424
5	840	900	2200	2450	1898			
6	900	960	2200	2129	2548			
<hr/>								
1	960	1000	3600	3569	4087			
2	1000	1100	3600	3021	3661			
3	1100	1200	3600	3267	4320			
4	1200	1400	3600	3100	3152	-->granica 3	2923	3278
5	1400	2000	3600	3755	4320			
6	2000	3000	3600	4134	3698			



Rys. 6. Pole prędkości dla modelu 2. Kolejno przedstawiono: a) pole prędkości otrzymane w wyniku odpowiedniego uśrednienia prędkości wyznaczonych za pomocą metody GA, b) błąd względny procentowy wyznaczonego pola



Rys. 7. Pole prędkości dla modelu 2. Kolejno przedstawiono: a) pole prędkości otrzymane w wyniku odpowiedniego uśrednienia prędkości wyznaczonych za pomocą metody SA, b) błąd względny procentowy wyznaczonego pola

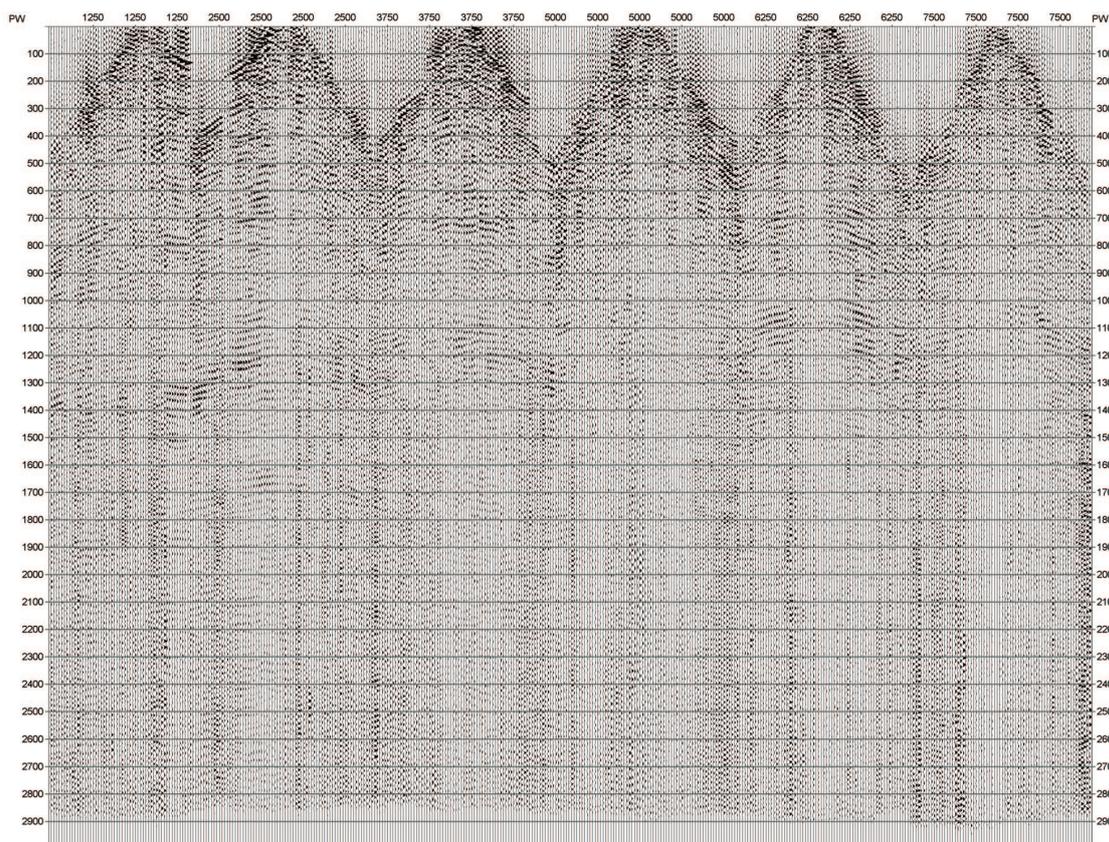
### Obliczenia dla danych rzeczywistych

Wyniki dla danych rzeczywistych dla programu bazującego na algorytmie genetycznym były prezentowane w formie posteru na międzynarodowej konferencji Geopetrol 2012 [5]. Niniejszą publikację wzbogacono o wyniki dla programu bazującego na metodzie symulowanego wyżarzania.

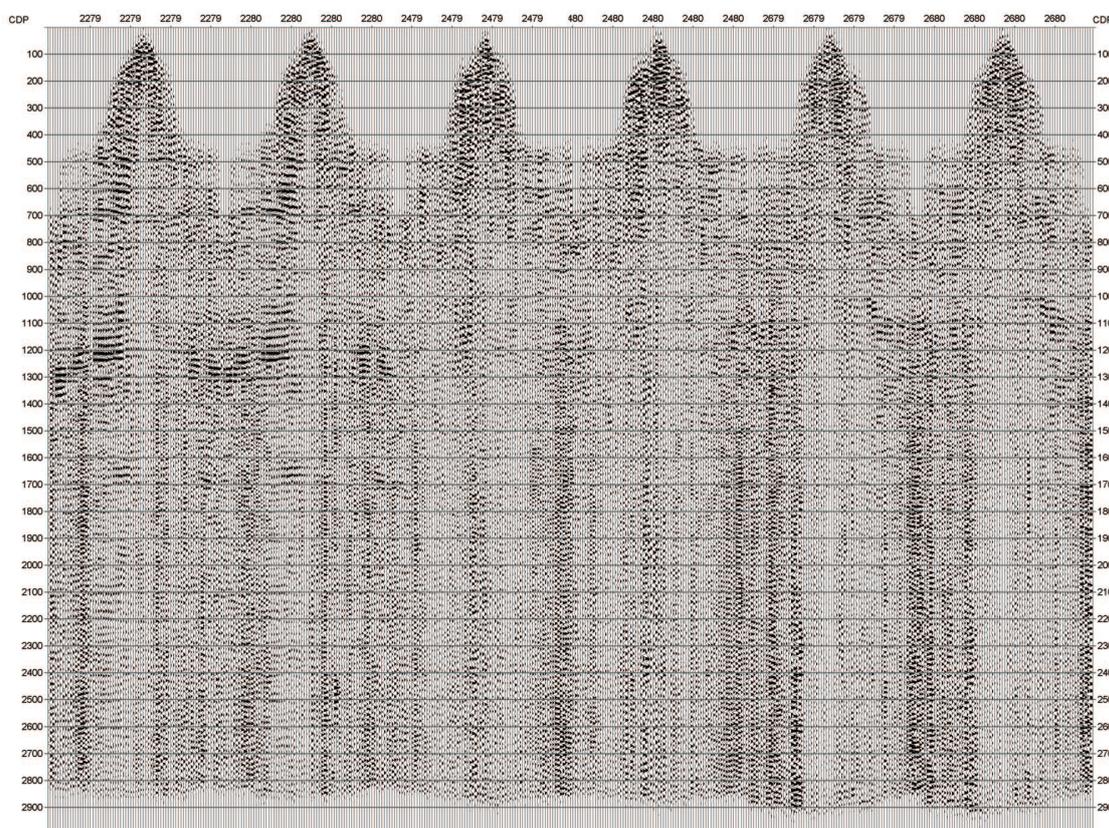
Zaproponowaną metodykę przetestowano dla profilu danych sejsmicznych rzeczywistych P1. Do obliczeń wybrano 6 rekordów w odległości punktu wzbudzenia co 1250 m (rysunek 8). Przyjęto współrzędne kolejnych punktów wzbudzenia  $sx = 1250, 2500, 3750, 5000, 6250, 7500$ . Wypunktowano po 2 najbardziej widoczne hodografy. Dla niektórych rekordów zadanie to było trudne ze względu na brakujące offsety oraz wysoki poziom szumu. Następnie za pomocą wcześniej przygotowanego programu dokonano interpolacji wypunktowanych hodografów rzeczywistych w taki sposób, aby uzupełnić brakujące offsety (ostatecznie 144 punktów pomiaru od  $-1800$  do  $1800$  m, co 25 m). Za model początkowy przyjęto model złożony z dwóch granic o głębokościach odczytanych z sekcji sejsmicznej po konwersji głębokościowej oraz o stałych prędkościach w obrębie każdej z granic (przyjęto odpowiednio: 2000 m/s dla pierwszej warstwy i 3600 m/s dla warstwy drugiej).

Przyjęto podział modelu na 18 warstw od powierzchni do głębokości 1000 m oraz 18 warstw od 1000 m do 3000 m – zgodnie ze spodziewanym położeniem granic refleksyjnych (odpowiednio około 900 m dla pierwszej granicy, 1500÷1900 m dla drugiej granicy). W ten sposób ilość szacowanych parametrów (prędkości) wyniosła po 18 dla każdej warstwy.

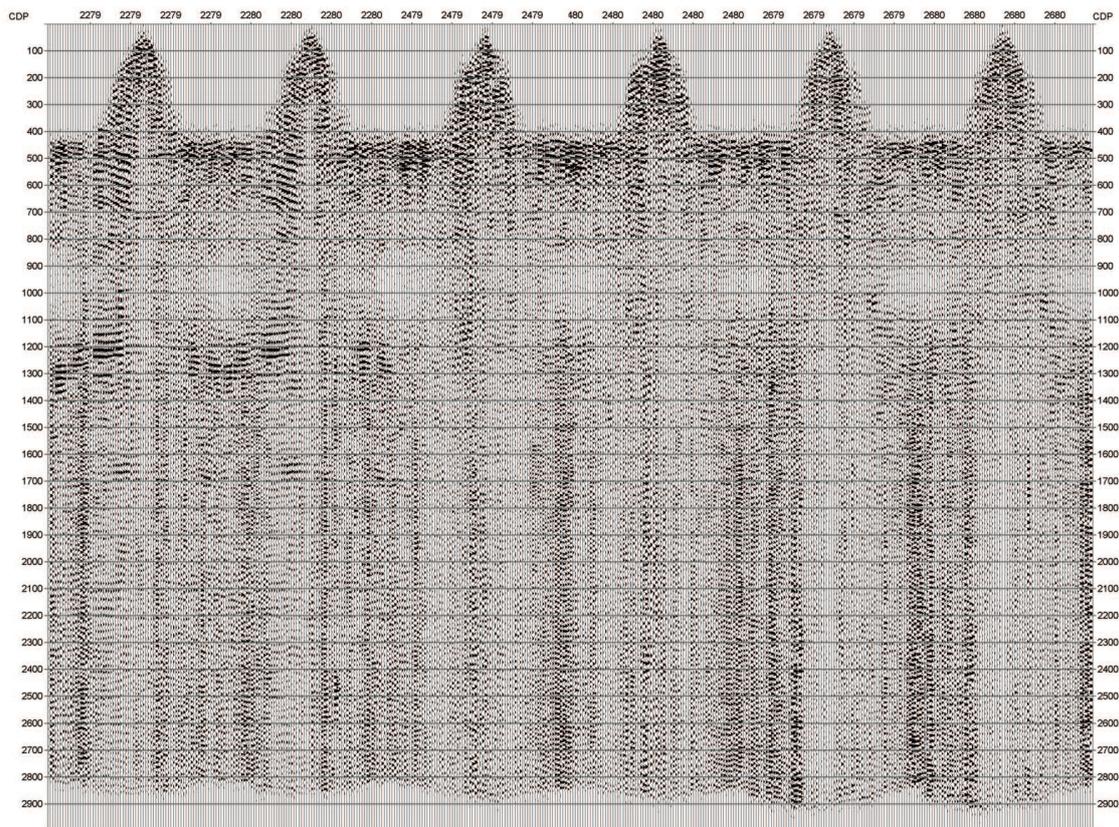
Wyniki obliczeń dla obu programów są podobne i przedstawiono je na rysunkach 9–11 (wybrane rekordy po zastosowaniu poprawki NMO, model prędkościowo-głębokościowy, dane po poprawce NMO i sumowaniu). Do oceny jakości wyników posłużono się wynikiem procedury NMO dla wyestymowanego pola prędkości oraz sumowaniem. Można zaobserwować, że poprawka NMO z oszacowanymi wartościami prędkości przynosi lepsze rezultaty w przypadku programu bazującego na algorytmie genetycznym – uzyskane zostało wypłaszczenie czasów przyjscia na rekordach, porównywalne z wynikami tradycyjnej analizy prędkości. Obraz nie jest idealny – warto byłoby podzielić model na jeszcze mniejsze warstewki, zwłaszcza dla płytszych głębokości, a także dodać więcej potencjalnych granic refleksyjnych. Obliczenia prowadzono jedynie dla dwóch najbardziej widocznych granic.



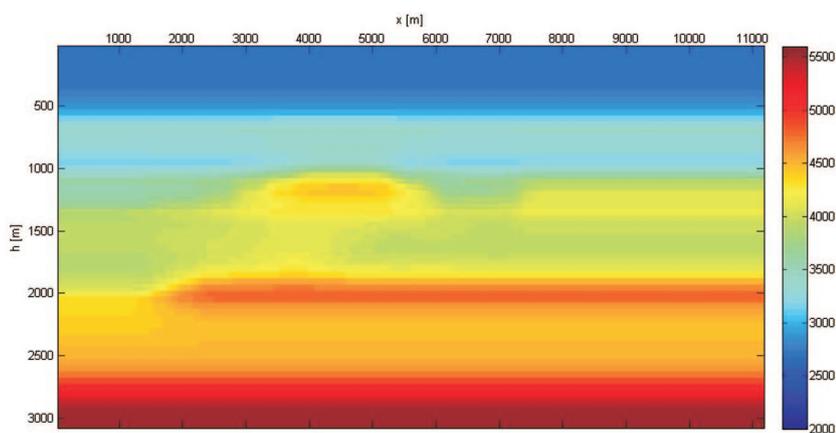
Rys. 8. Wybrane do obliczeń rekordy polowe – 6 punktów wzbudzenia o współrzędnych od 1250 m do 7500 m, co 1250 m. Na osi poziomej zaznaczono współrzędne punktów wzbudzenia [m], na osi pionowej – czas [μs]



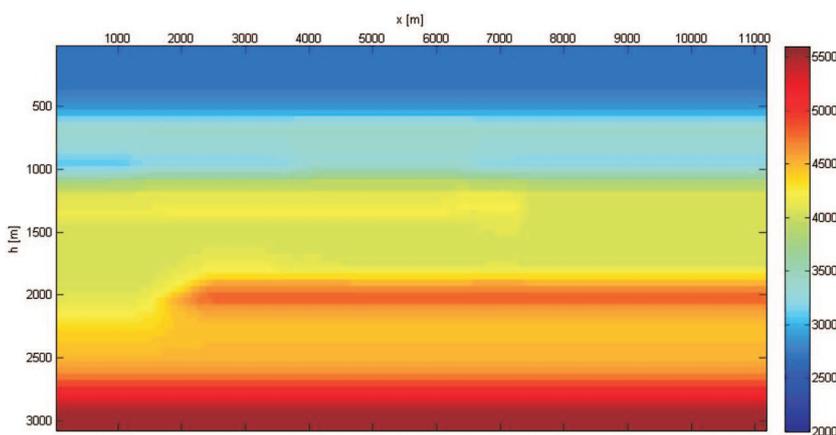
Rys. 9a. Wybrane rekordy polowe po przeprowadzeniu poprawki NMO z polem prędkości otrzymanym za pomocą algorytmu genetycznego. Wyestymowany model prędkościowo-głębokościowy przedstawiono na rysunku 10a



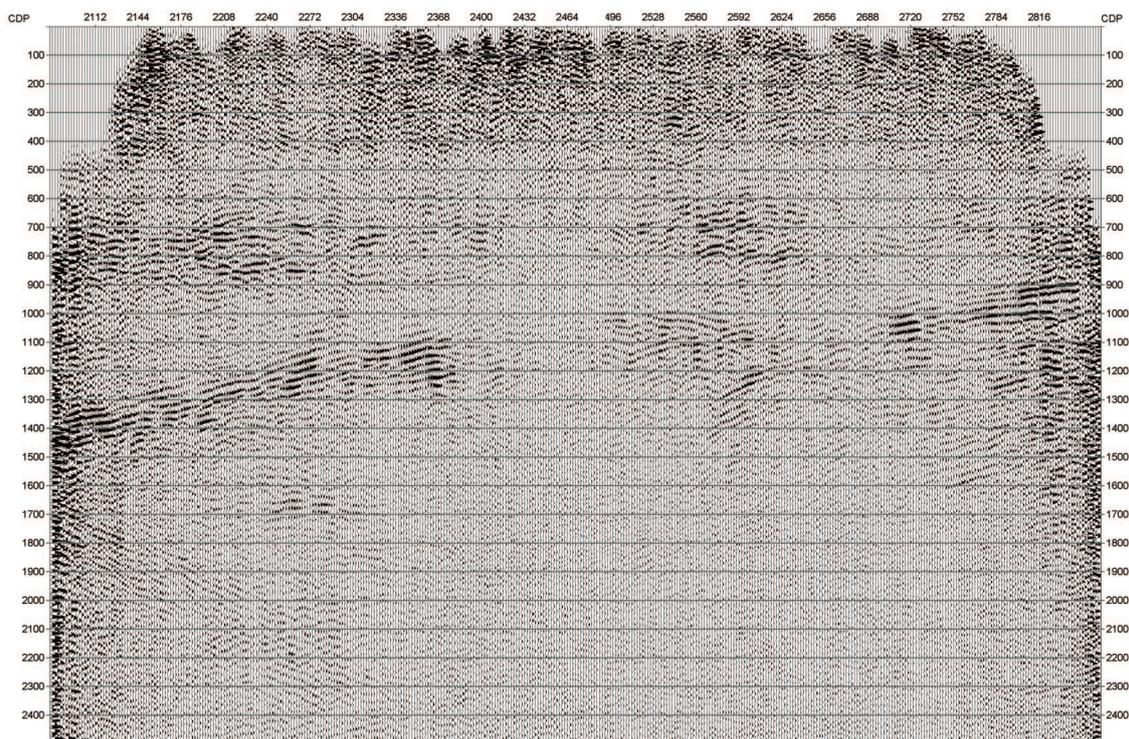
Rys. 9b. Wybrane rekordy polowe po przeprowadzeniu poprawki NMO z polem prędkości otrzymanym za pomocą metody symulowanego wyżarzania. Wyestymowany model prędkościowo-głębokościowy przedstawiono na rysunku 10b



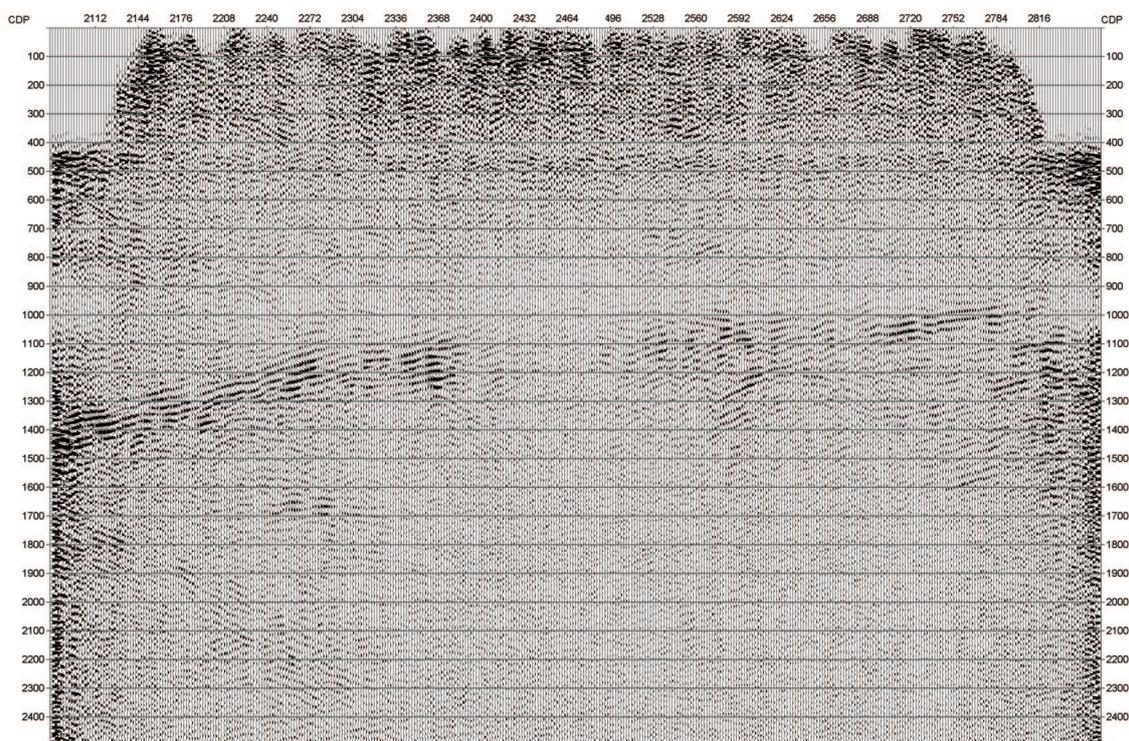
Rys. 10a. Model prędkościowo-głębokościowy otrzymany za pomocą algorytmu genetycznego



Rys. 10b. Model prędkościowo-głębokościowy otrzymany za pomocą metody symulowanego wyżarzania



Rys. 11a. Sekcja sejsmiczna po procedurze sumowania z polem prędkości z rysunku 10a



Rys. 11b. Sekcja sejsmiczna po procedurze sumowania z polem prędkości z rysunku 10b

### Podsumowanie

Pierwszym nasuwającym się wnioskiem jest fakt, że implementacja obu algorytmów jest stosunkowo łatwa i daje dużą elastyczność. W przypadku dostępu do in-

nego programu modelującego sejsmogramy syntetyczne dla dowolnego pola prędkości, modyfikacja programów optymalizacyjnych, aby działały dla nowego modelowania,

nie powinna stanowić problemu. Jednocześnie doświadczenie pokazało, że parametry sterujące metodami mają bardzo duży wpływ na estymowane wartości parametrów modelu prędkościowo-głębokościowego ośrodka. Reguły rządzące algorytmami nie zawsze są zgodne z intuicją, co istotnie utrudnia właściwy dobór parametrów sterujących. Na przykład wydłużenie działania programu poprzez obniżenie wartości parametru odpowiedzialnego za zatrzymanie algorytmu nie zawsze jest korzystne, a przecież powinno powodować, że otrzymane wyniki będą dokładniejsze. Dla metody symulowanego wyżarzania trudno wskazać najlepszy, optymalny schemat chłodzenia. Różnym modelom odpowiadają różne schematy. Nieco lepiej sytuacja przedstawia się w przypadku algorytmu genetycznego, który dla postawionego zadania jest mniej czuły na zmianę poszczególnych parametrów sterujących i praktycznie dla wszystkich modeli algorytm genetyczny ma tę samą postać.

Mozolne poszukiwanie właściwej konstrukcji algorytmów jest czasochłonne i może zniechęcać do stosowania tego rodzaju technik. Jednak obserwacja wyników pozwala szybko nabrać wprawy, a perspektywa otrzymania satysfakcjonujących wyników może wynagrodzić poniesiony trud. W przypadku obu metod potwierdził się fakt, że nie

zależą one od początkowych wartości modelu. Startując z dowolnie przyjętych wartości początkowych, można otrzymać zbliżone wyniki.

Przyjęta metodyka pozwoliła osiągnąć zadowalające wyniki. W przypadku danych syntetycznych lepsze rezultaty dla modelu 1 otrzymano dzięki zastosowaniu metody symulowanego wyżarzania, natomiast dla modelu 2 lepsze wyniki przyniósł program bazujący na algorytmie genetycznym. Widać więc, że nie można jednoznacznie wskazać lepszego algorytmu. Dla danych rzeczywistych wyniki obu programów były zbliżone, chociaż nieco lepsze dla algorytmu genetycznego. Na podstawie przedstawionych obliczeń można uznać, że metoda symulowanego wyżarzania i algorytm genetyczny są metodami użytecznymi w rozwiązaniu rozważanego zadania szacowania parametrów ośrodka geologicznego.

Zaletą opracowania własnych programów, które powstały w ramach pracy badawczej, jest możliwość modyfikacji i udoskonalania ich w dalszym wykorzystywaniu dla potrzeb naukowo-badawczych w zakresie poszukiwania złóż węglowodorów. Lepsze procedury przetwarzania pozwalają na dokładniejsze rozpoznanie geologiczno-geofizyczne oraz odpowiednią interpretację danych sejsmicznych (np. umożliwiającą precyzyjną lokalizację celu wiercenia).

*Praca naukowa finansowana ze środków na naukę w latach 2010–2012 jako projekt badawczy własny numer N N525 349038.*

## Literatura

- [1] Cohen J. K., Stockwell Jr. J. W.: *Seismic Unix Release No. 38: a free postage for seismic search and processing*. Center for Wave Phenomena. Colorado School of Mines.
- [2] Jędrzejowska-Tyczkowska H., Pieniążek K.: *Zastosowanie metod optymalizacji globalnej, a szczególnie symulowanego wyżarzania (simulated annealing), do rozwiązania odwrotnego zadania kinematycznego w metodzie sejsmicznej*. „Nafta-Gaz” 2007, nr 12, s. 713–725.
- [3] Landa E., Beydoun W., Tarantola A.: *Reference velocity model estimation from prestack waveforms: Coherency optimization by simulated annealing*. „Geophysics” 1989, vol. 54, No. 8, p. 984–990.
- [4] Pirowska K.: *Zastosowanie algorytmu genetycznego do estymacji parametrów ośrodka geologicznego na podstawie pomiarów sejsmicznych*. „Nafta-Gaz” 2012, nr 5, s. 284–292.
- [5] Pirowska K.: *Metoda szacowania pola prędkości ośrodka geologicznego na podstawie danych sejsmicznych z wykorzystaniem algorytmu genetycznego*. Publikacja w materiałach międzynarodowej konferencji Geopetrol 2012, pt.: *Nauka, technika i technologia w rozwoju poszukiwań i wydobywania węglowodorów w warunkach lądowych i morskich*. Kościelisko 17–20.09.2012.
- [6] Pullammanappallil S. K., Louie J. N.: *Inversion of seismic reflection traveltimes using nonlinear optimization scheme*. „Geophysics” 1993, vol. 58, No. 11, p. 1607–1620.
- [7] Pullammanappallil S. K., Louie J. N.: *A combined first arrival travel time and reflection coherency optimization approach to velocity estimation*. „Geophysics Research Letters” 1997, vol. 24, No. 5, p. 511–514.
- [8] Wolpert D. H., Macready W. G.: *No Free Lunch Theorems for Optimization*. „IEEE Transactions on Evolutionary Computation” 1997, No. 1, p. 67–82, <http://ti.arc.nasa.gov/m/profile/dhw/papers/78.pdf>



Mgr Karolina PIROWSKA – absolwentka kierunku Matematyka na Uniwersytecie Jagiellońskim, specjalizacja: Zastosowania Matematyki. Od lutego 2007 roku pracownik Zakładu Seismiki Instytutu Nafty i Gazu w Krakowie. Zajmuje się zastosowaniem metod optymalizacji stochastycznej w rozwiązaniu odwrotnego zadania kinematycznego w metodzie sejsmicznej.