

Karolina Pieniążek
Instytut Nafty i Gazu, Kraków

Przegląd zastosowań algorytmów optymalizacji globalnej w przetwarzaniu danych sejsmicznych

W artykule omówiono zaczerpnięte z literatury światowej przykłady aplikacji metod optymalizacji globalnych w przetwarzaniu danych sejsmicznych. Metody optymalizacyjne są pomocne zwłaszcza w zaawansowanych procedurach przetwarzania – inwersji, czy analizie AVO. Techniki takie jak metoda symulowanego wyżarzania czy algorytmy genetyczne próbuje się stosować w rozwiązaniu problemów, które w dużym stopniu uwzględniają niejednorodność i złożoność budowy ziemi i dla których rozwiązanie analityczne jest trudne lub niemożliwe do otrzymania.

Review of the application of algorithms of global optimization in seismic data processing

In this paper the examples from literature of application algorithms of global optimization in seismic data processing are presented. Optimization methods are helpful especially in advanced processing procedures – inversion or AVO analysis. Technique such as simulated annealing or genetic algorithms are tried to be applied in solving the problems which take into account heterogeneity and complexity of the geological media and which can not be solved in a traditional way.

Wstęp

Teoria optymalizacji to szczególnie ważny dział matematyki, ponieważ wykorzystywana jest praktycznie w każdej dziedzinie współczesnego życia. Metody optymalizacji są pomocne wszędzie tam, gdzie pojawia się problem dotyczący wyznaczania wartości zbioru parametrów w taki sposób, aby osiągnąć największe korzyści. Korzyść, którą identyfikujemy z funkcją celu, może oznaczać np. minimalizację kosztów produkcji w przemyśle czy minimalizację zużycia benzyny w rozwiązaniach logistycznych. Optymalizacja jest również stosowana w problemach geofizycznych, w tym w procesie przetwarzania danych sejsmiki powierzchniowej. Metody optymalizacyjne są pomocne zwłaszcza w zaawansowanych procedurach przetwarzania – inwersji, czy analizie AVO. W podejściu optymalizacyjnym funkcją celu jest funkcją dopasowania, która charakteryzuje różnice pomiędzy zaobserwowanymi danymi, a syntetycznymi danymi określonymi dla założonego

modelu ziemi. Wyznaczenie modelu ziemi, który najlepiej tłumaczy geofizyczne obserwacje, niejednokrotnie oznacza optymalizację bardzo skomplikowanej, wielowymiarowej funkcji. Dla modeli, które w dużym stopniu uwzględniają niejednorodność i złożoność budowy ziemi, rozwiązania analityczne są zazwyczaj niemożliwe do otrzymania. Stosowane są techniki numeryczne lub kombinacja technik analitycznych i numerycznych, a z nastaniem ery superkomputerów i komputerów równoległych, coraz częściej próbuje się aplikować probabilistyczne metody optymalizacji globalnej: metody bazujące na technice Monte Carlo, metodę symulowanego wyżarzania, algorytmy genetyczne i techniki ewolucyjne. Pomimo trudności ze ścisłą analizą, metody te są od dawna używane jako narzędzia służące do symulacji procesów fizycznych, ekonomicznych itp. Znalazły one również szerokie zastosowanie w biologii, w problemach inżynierskich i technologiach komputerowych.

Zastosowanie metody symulowanego wyżarzania (SA) w przetwarzaniu danych sejsmicznych

Metoda symulowanego wyżarzania (SA – *Simulated Annealing*) jest metodą, która naśladuje proces krystalizacji substancji. W celu uzyskania minimalnej energii substancji najpierw podgrzewa się ją do wysokiej temperatury, a następnie bardzo powoli schładza. Proces optymalizacji

przebiega analogicznie. Odpowiednikiem minimalizowanej energii substancji jest funkcja celu, natomiast temperatura jest parametrem mówiącym o wielkości przeszukiwanej podprzestrzeni. Rozwiązania w kolejnych iteracjach generowane są losowo według ustalonego, składającego się

z bardzo dużej ilości iteracji schematu. Zaletą metody jest to, że nie wykorzystuje ona informacji o gradiencie funkcji celu oraz nie wymaga obliczeń na macierzach. Kłopotliwe jednak może być odpowiednie dobranie parametrów sterujących metodą, między innymi tzw. schematu chłodzenia, który warunkuje znalezienie rozwiązania bliskiego minimum globalnemu funkcji celu.

Pierwsze próby zastosowania symulowanego wyżarzania w geofizyce – do problemów związanych z inwersją nieliniową, mechaniką statystyczną i poprawkami statycznymi – przedstawił w swojej pracy D.H. Rothman [17]. Ogromny wkład w rozpoznanie nowych technik miały również prace autorstwa: M.K. Sen i P.L. Stoffa [20, 21] oraz K. Mosegaard i A. Tarantola [12].

P.D. Vestergaard i R. Mosegaard [22] zbadali możliwość zastosowania metody SA do wyznaczenia czasów przyjęcia i współczynników odbicia na drodze optymalizacji inwersji wybranych fragmentów profili sejsmicznych po migracji. Następnie algorytm użyto do rozwiązania problemu inwersji trasy sejsmicznej, w wyniku której ustalone zostają czasy przyjęcia i współczynniki odbicia, i w przybliżeniu może zostać odtworzona impedancja akustyczna. Metoda rozwiązała zadanie rozróżnienia soli i węgla o niskiej porowatości na podstawie impedancji akustycznej. Sprawdzono również, że metoda może dać godne zaufania rezultaty nawet w przypadku braku informacji *a priori* o optymalizowanych parametrach.

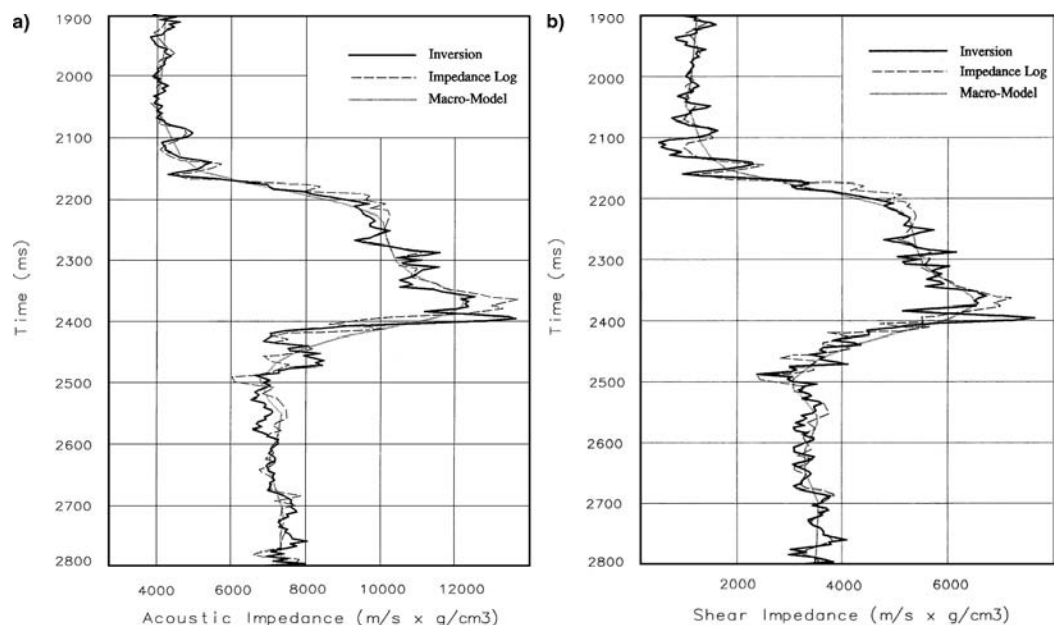
Natomiast wyniki zaprezentowane przez P. Carrion i G. Bohm [1] pozwalają stwierdzić, że za pomocą zastosowania metody symulowanego wyżarzania w tomografii refleksyjnej z powodzeniem mogą być odwzorowane granice odbijające i poprzeczny gradient prędkości – nawet w przypadku błędnie wyznaczonych pików i istotnego poziomu szumu.

Bardzo dobre rezultaty dla danych syntetycznych i satysfakcjonujące wyniki dla danych polowych otrzymał W.T. Wood [25], który metodę symulowanego wyżarzania, a dokładniej wersję *Very Fast Simu-*

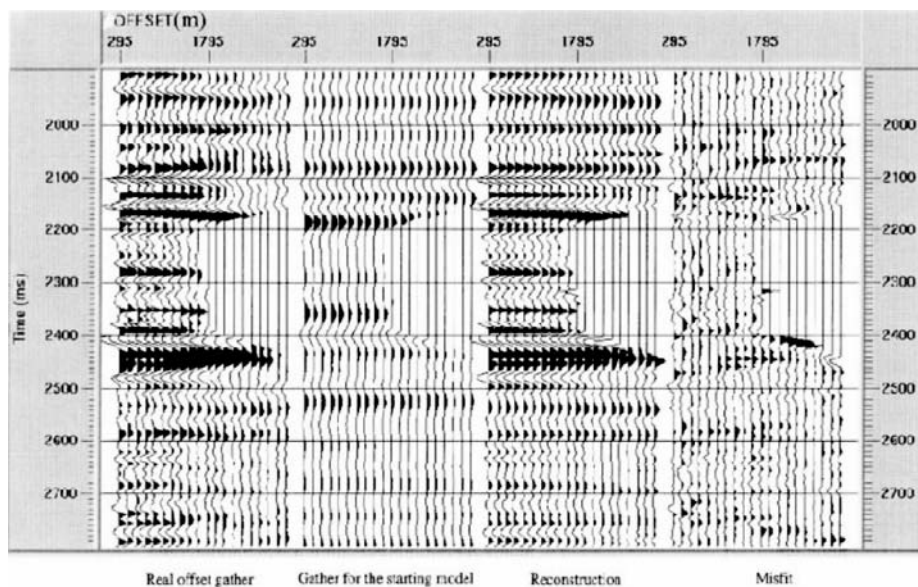
lated Annealing (VFSA), zastosował do jednoczesnego oszacowania sygnału źródła i współczynników odbicia w ograniczonym paśmie, na drodze optymalizacji wyników dekonwolucji.

Ważne badania przeprowadził Ma Xin-Quan [27], który metodę SA zastosował w problemie jednoczesnego oszacowania impedancji akustycznej i głębokości granic warstw z danych sejsmicznych po sumowaniu. Jedynym ograniczeniem zaproponowanej metody optymalizacji globalnej jest dodanie składnika do funkcji celu, który nie pozwala, aby model końcowy był bardzo odległy od niskoczęstotliwościowego trendu impedancji *a priori*. Włączenie informacji *a priori* przyspiesza zbieżność i stabilizuje rozwiązanie. Wynik optymalizacji nie zależy od modelu początkowego i losowego ciągu rozwiązań. Zaletą jest możliwość użycia metody dla inwersji sejsmicznej, gdy informacje z otworów są rzadkie lub gdy korelacja między sejsmicznymi wydarzeniami i pobliskimi otworami jest utrudniona poprzez uskoki, wyklinowania lub w obecności dużego szumu. Otrzymane rezultaty inwersji dobrze odpowiadają rzeczywistemu modelowi ziemi, ze względnym błędem mniejszym niż 3%.

Ma Xin-Quan opracował również nowy, bazujący na metodzie SA algorytm inwersji danych przed składaniem, polegający na jednoczesnym szacowaniu impedancji akustycznej i impedancji fali poprzecznej (*shear impedance*) z danych sejsmiki refleksyjnej fali P (*joint inversion*). Otrzymane wyniki, które pokazano na rysunkach 1 i 2, pozwoliły stwierdzić, że metoda jest odpowiednim narzędziem dla charakteryzowania zbiorników.



Rys. 1. Wyniki jednoczesnej inwersji impedancji dla fali P (a) i S (b)



Rys. 2. Porównanie rzeczywistych danych, modelu początkowego i wyników inwersji. W ostatnim panelu pokazana jest różnica pomiędzy rzeczywistymi danymi, a wynikiem optymalizacji

Jedną z ostatnich aplikacji zaprezentowali w swojej publikacji N. Ryden oraz C.B. Park [18]. Metoda FSA

została zastosowana do określenia właściwości chodnika za pomocą metod badania fali powierzchniowej. Za pomocą metody FSA można znaleźć możliwie najlepsze dopasowanie danych pomierzonych, z wymodelowanym widmem prędkości fazowej fal powierzchniowych. Jednak jest to metoda znacznie bardziej kosztowna pod względem czasu niż tradycyjne metody, więc w niektórych przypadkach lepiej użyć konwencjonalnych metod i obliczenia przeprowadzić dla różnych modeli startowych. Mięszłość i prędkość propagacji fali poprzecznej w niższej zalegających warstwach jest związana z odchyleniem 10% do wartości pomierzonych osobno podczas konstruowania chodnika.

Zastosowanie algorytmów genetycznych w przetwarzaniu danych sejsmicznych

Metodologia algorytmów genetycznych (GA – *Genetic Algorithm*) została oparta na analogii do biologicznego procesu ewolucji. Żyjące gatunki biologiczne reprezentują najsilniejsze, optymalne rozwiązanie problemu przetrwania we wrogim środowisku. Algorytm GA próbuje znaleźć optymalne rozwiązanie w sposób, który naśladuje ewolucję biologiczną. Rozwiązania w kolejnych iteracjach generowane są losowo za pomocą trzech operatorów: selekcji, krzyżowania i mutacji. Tak jak w przypadku techniki symulowanego wyżarzania, zaletą metody jest to, że nie wykorzystuje ona informacji o gradiencie funkcji celu oraz nie wymaga obliczeń na macierzach. Trudność stanowi sposób zakodowania modelu w ciąg binarny oraz ustalenie sposobu i prawdopodobieństw wykonywania poszczególnych operacji modyfikujących model.

Pierwszymi problemami, które próbowano rozwiązać za pomocą algorytmów genetycznych w sejsmologii i sejsmice były:

- estymacja prędkości tła (*background velocity*) [7],
- estymacja dyspersji fal grupy Rayleigha (*Rayleigh group dispersion*) [8],
- pionowe profilowanie sejsmiczne (*vertical seismic profiling*) [15],
- inwersja sygnału sejsmicznego (*seismic waveform inversion*) [19, 21],

– analiza AVO w ośrodkach izotropowych (*isotropic AVO analysis*) [9, 21].

W.G. Wilson, W.G. Laidla., K. Vasudevan [23] z powodzeniem zastosowali algorytm genetyczny do wyznaczania resztkowych poprawek statycznych, co zazwyczaj jest związane ze znalezieniem od 100 do 1000 parametrów warunkujących najlepszą koherencję w obrazie sejsmicznym.

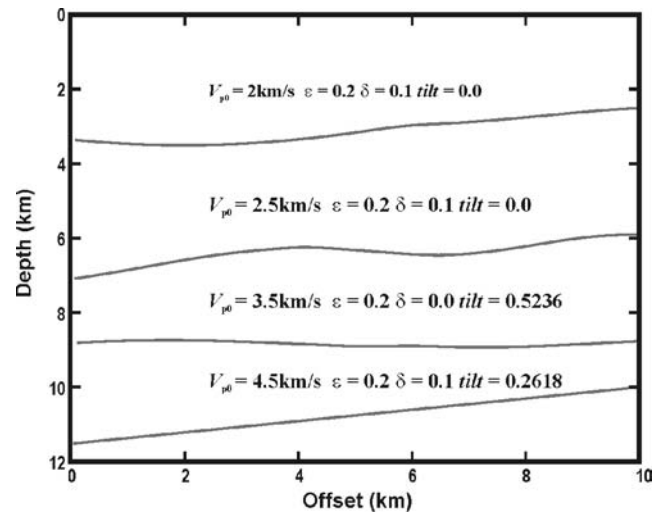
Metoda okazała się bardzo użyteczna w rozwiązaniu problemu równowagi materiału (*material balance*) w technologii produkcji i problemu wielokrotnego tłumienia w procesie przetwarzania danych sejsmicznych. Testowana przez M.D. McComarck, R.F. Stoitsis, D.J. MacAllister, K.D. Crawford [10] technika znalazła zastosowanie w rozwiązaniu problemu równowagi materiału w grupach operacyjnych dużych firm z przemysłu naftowego oraz pozwoliła na zwiększenie dokładności obliczeń w zarządzaniu zbiornikami i polepszenie efektywności produkcji (odkrycie dodatkowych 12 mln baryłek ropy). Dodatkowo metoda pozwala osiągnąć rezultaty w ciągu 12-18 godzin, podczas gdy manualne obliczenia zajmują około 9-12 miesięcy pracy jednego inżyniera.

Algorytmy genetyczne próbuje się także stosować do problemów związanych z uwzględnieniem anizotropii ośrodka geologicznego. W swojej pracy F.A. Neves i M.V. de Hoop [14] dokonali analizy wykonalności inwer-

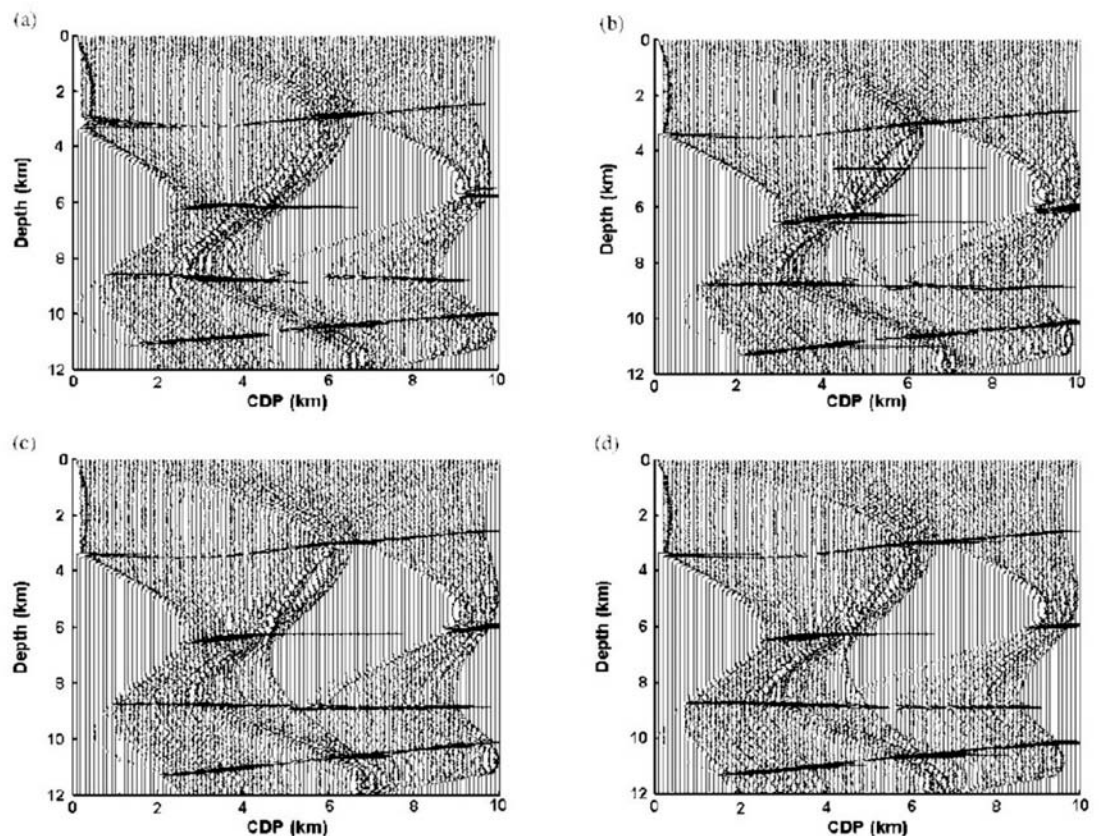
sji amplitudy dla modelu o jednej granicy, składającego się z łupków (ośrodek poprzecznie izotropowy z pionową osią symetrii VTI) leżących nad spękany piaskowcami (ośrodek ortorombowy, z poziomą, płaską, lustrzaną osią symetrii). Po wprowadzeniu odpowiedniej parametryzacji i hierarchii parametrów, opracowany algorytm pozwolił na rozwiązanie zadania – co nie było możliwe do osiągnięcia za pomocą tradycyjnych metod.

Natomiast Y. Qin, Z. Zhang, S. Xu [16] zaprezentowali metodę analizy prędkości w ośrodku poprzecznie izotropowym (TTI) poprzez połączenie metody odwzorowania CDP z algorytmami genetycznymi. Celem była rekonstrukcja prędkości lub parametrów elastycznych w anizotropowych ośrodkach, z danych sejsmiki powierzchniowej. Wyniki zaprezentowano na rysunkach 3 i 4. Metoda okazała się efektywna.

Zadowolające wyniki uzyskali również S. Horne, C. MacBeth [5]. Algorytm genetyczny został zastosowany do inwersji fali poprzecznej z uwzględnieniem anizotropii, dla dwóch zbiorów danych azymutalnego sejsmicznego profilowania pionowego. Dokonano inwersji horyzontalnych polaryzacji i czasów opóźnień dla symetrii heksagonalnej i ortorombowej. Wyniki porównano z wcześniejszymi badaniami, w których stosowano modelowanie pełnego pola falowego. Metoda okazała się atrakcyjna pod względem czasu obliczeń, jednak dokładność jest porównywalna z dokładnością innych metod. Autorzy stwierdzili, że metoda powinna



Rys. 3. Model ośrodka TTI. V_{p0} oznacza prędkość pionową, ϵ i δ – parametry Thomsena, *tilt* – reprezentuje oś symetrii



Rys. 4. Wyniki odwzorowania CDP w kolejnych generacjach (generacje 1, 8, 20, 40)

być rozważana raczej jako początkowy krok, niż zastępczo za tradycyjne metody.

Zakończenie

W Polsce metody stochastyczne są mało znane, o czym może świadczyć znikoma ilość literatury polskojęzycznej na ich temat. Dopiero w ostatnich latach pojawiły się pierwsze

publikacje i prace doktorskie opisujące wyniki aplikacji tego rodzaju metod w problemach optymalizacyjnych. W przypadku aplikacji w geofizyce, do tej pory przeprowadzono

badania dotyczące m.in. zastosowania metody inwersji bayessowskiej w tomografii sejsmicznej [2] oraz zastosowania algorytmu symulowanego wyżarzania do interpretacji sondowań magnetotellurycznych [11]. W ostatnich latach metodę symulowanego wyżarzania przetestowano dla odwrotnego zadania kinematycznego dla fali PS, w ramach tematów i projektów w Zakładzie Sejsmiki INiG. Problem badawczy sformułowała pani prof. Halina Jędrzejowska-Tyczkowska, a realizacją zajmowała się autorka niniejszej pracy.

Liczne przykłady z literatury wskazują, że probabilistyczne metody optymalizacji globalnej cieszą się żywym zainteresowaniem geofizyków na całym świecie. Dla wielu problemów otrzymane za ich pomocą wyniki są lepsze lub tak samo dobre, jak wyniki otrzymane za pomocą tradycyjnych metod. Jednak jeszcze bardziej cenne jest to, że metody optymalizacji globalnej dają szansę na rozwiązanie zagadnień niemożliwych do rozwiązania za pomocą tradycyjnych metod.

Recenzent: prof. dr hab. inż. Andrzej Kostecki

Literatura

- [1] Carrion P., Bohm G.: *Seismic reflection tomography via simulated annealing*. The Leading Edge, 1994.
- [2] Dębski W.: *Zastosowanie techniki Monte Carlo do rozwiązywania wybranych zagadnień sejsmologicznych*. Instytut Geofizyki PAN, 2004.
- [3] Goldberg D.E.: *Genetic algorithms in search for optimization and machine learning*. Addison-Wesley Publ. Co., 1989.
- [4] Holland J.H.: *Adaptation in natural and artificial systems*: Univ. Michigan Press, 1975.
- [5] Horne S., MacBeth C.: *Inversion for seismic anisotropy using genetic algorithms*. Geophysical Prospecting 42, 953-974, 1994.
- [6] 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.
- [7] Jin S., Madariaga R.: *Background velocity inversion with a genetic algorithm*. Geophys. Res. Lett., 20, 93-96, 1993.
- [8] Lomax A., Snieder R.: *Finding sets of acceptable solutions with a genetic algorithm with application to surface wave group dispersion in Europe*. Geophys. Res. Lett., 21, 2617-2620, 1994.
- [9] Mallick S.: *Model-based inversion of amplitude-with-offset data using a genetic algorithm*. Geophysics, 60, 939-954, 1995.
- [10] McComarck M.D., Stoisits R.F., MacAllister D.J., Crawford K.D.: *Applications of genetic algorithms in exploration and production*. The Leading Edge, 1999.
- [11] Miecznik J., Wojdyła M., Danek T.: *Application of nonlinear methods to inversion of 1D magnetotelluric sounding data based on very fast simulated annealing*. Acta Geophysica Polonica, vol. 51, no. 3, pp. 307-322, 2003.
- [12] Mosegaard K., Tarantola A.: *Monte Carlo sampling of solutions to inverse problems*. J. Geophys. Res., 100, 12431-12447, 1995.
- [13] Mosegaard R., Vestergaard P.D.: *A simulated annealing approach to seismic model optimization with sparse priori information*. Geophysical Prospecting, 39, 599-611, 1991.
- [14] Neves F.A., de Hoop M.V.: *Some remarks on nonlinear amplitude versus scattering angle-azimuth inversion on anisotropic media*. Geophysics, vol. 65, no 1, p. 158-166, 2000.
- [15] Nolte B., Frazer L.N.: *Vertical seismic profile inversion with genetic algorithms*. Geophys. J. Internat, 117, 162-178, 1994.
- [16] Qin Y., Zhang Z. Xu S.: *CDP mapping in tilted transversely isotropic (TTI) media. Part II: Velocity analysis by combining CDP mapping with genetic algorithm*. Geophysical Prospecting, 51, 325-332, 2003.
- [17] Rothmann D.H.: *Nonlinear inversion, statistical mechanics and residual statics estimation*. Geophysics, 50, 2784-2796, 1985.
- [18] Ryden N., Park C.B., 2006, *Fast simulated annealing inversion of surface waves on pavement using phase-velocity spectra*, Geophysics vol. 71 no 4, p. R49-R58
- [19] Sambridge M., Drijkoningen G.: *Genetic algorithms in seismic waveform inversion: Geophys. J. Internat.*, 109, 323-342, 1992.
- [20] Sen M., Stoffa P.L.: *Global optimization methods in geophysical inversion*. Elsevier, 1995.
- [21] Sen M., Stoffa P.L.: *Nonlinear one-dimensional seismic waveform inversion using simulated annealing*. Geophysics, 56, 1624-1638, 1991.
- [22] Vestergaard P.D., Mosegaard R.: *Inversion of post-stack seismic data using simulated annealing*. Geophysical Prospecting, 39, 613-624, 1991.
- [23] Wilson W.G., Laidlaw W.G., Vasudevan K.: *Residual statics estimation using the genetic algorithm*. Geophysics, vol. 59, no 5, p. 766-774, 1994.
- [24] Wojdyła M., Danek T.: *Inversion of magnetotelluric sounding data based on Very Fast Simulated Annealing*. 18th International workshop on Electromagnetic induction in the Earth, El Vendrell, 17-23 September 2006.
- [25] Wood W.T.: *Simultaneous deconvolution and wavelet inversion as a global optimization*. Geophysics, vol. 64, no 4, p. 1108-1115, 1999.
- [26] Xin-Quan Ma: *A constrained global inversion method using an overparametrized scheme: application to poststack seismic data*. Geophysics, vol. 66, no 2, p. 613-626, 2001.
- [27] Xin-Quan Ma: *Simultaneous inversion of prestack seismic data for rock properties using simulated annealing*. Geophysics, vol. 67, no 6, p. 1877-1885, 2002.



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