

ESTYMACJA CIŚNIEŃ POROWYCH NA PODSTAWIE WOLUMENU PRĘDKOŚCI SEJSMICZNYCH

**Estimation of pore pressures based on the volume
of seismic velocities**

Wojciech GÓRECKI¹ & Tomasz MARECIK²

¹*Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Geologii, Geofizyki i Ochrony Środowiska,
Katedra Surowców Energetycznych;
al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków;
e-mail: wgorecki@agh.edu.pl*

²*Geofizyka Kraków Sp. z o.o.; ul. Łukaszczyka 3, 31-429 Kraków;
e-mail: marecik@op.pl*

Treść: W artykule przedstawiono metodykę obliczenia ciśnień porowych wykorzystującą profil prędkości sejsmicznych z migracyjnych analiz w wersji przed składaniem. Obszar badań znajduje się we wschodniej części polskich Karpat pomiędzy Rzeszowem a Przemyślem, w sąsiedztwie otworów Rączyna, Jodłówka oraz Drohobyczka. Przedstawiono przekrój prędkości z migracyjnych analiz dla profilu 17-2-91K. Do obliczenia rozkładu ciśnień w ośrodku geologicznym została zastosowana metoda Eatona. Na potrzeby przyjętej metodyki obliczone zostały trendy prędkości w funkcji kompaktacji w utworach o zaileniu powyżej 65% występujących w warunkach ciśnienia normalnego. Opisany został sposób obliczenia przestrzennego modelu prędkości propagacji fali sejsmicznej na podstawie danych 1D i 2D. Przedstawiono finalny rozkład ciśnień porowych na profilu sejsmicznym 17-4-91K znajdującym się na wschód od Rzeszowa.

Słowa kluczowe: ciśnienie porowe, anomalnie wysokie ciśnienia, metoda Eatona, przestrzenny model prędkości

Abstract: The paper presents the methodology of computing the pore pressures with the use of the seismic velocity profile from migration analyses in the pre-stack version. The area of interest is localized in eastern part of Polish Carpathians between Rzeszów and Przemyśl in the vicinity of Rączyna, Jodłówka nad Drohobyczka wells. The migration velocity crosssection were included for 17-2-91K seismic profile. The Eaton method was applied to calculate the pressure distribution in the geologic medium. According to Eaton's methodology the velocity compaction trend for normal condition were computed in clay intervals (clay volume more than 65%). The way of calculating the spatial model of seismic-wave propagation velocity based on 1D and 2D data was described. Final distribution of the pore pressures along the seismic section 17-4-91K located east of Rzeszów was presented.

Key words: pore pressure, abnormally high pressures, Eaton method, spatial model of velocity

WSTĘP

Wiedza na temat rozkładu ciśnień górotworu jest bardzo przydatna w trakcie projektowania otworów naftowych. Informacje takie umożliwiają optymalny dobór gęstości płuczki na poszczególnych etapach prowadzenia robót wiertniczych, zapewniając zminimalizowanie kosztów czy też uniknięcie strat związanych z przestojami. Odpowiednio dobrana gęstość płuczki powinna zrównoważyć ciśnienie górotworu, zapobiegając erupcji płynów złożowych, jednocześnie nie powinna doprowadzać do spekania górotworu i ucieczki płuczki.

Prace nad metodami predykcji ciśnień porowych trwają od końca lat 60. minionego wieku. Na początku badania prowadzone były w obrębie poszczególnych otworów (1D). Obecnie inżynierowie koncentrują swoje wysiłki na danych sejsmiki 3D, wykorzystując owoce zaawansowanych technik przetwarzania, m.in.: migracyjną analizę prędkości, inwersję sejsmiczną, analizy AVO, a ostatnio coraz częściej sejsmikę fali przemiennej PP-PS i analizy anizotropii ośrodka geologicznego w kontekście wykrywania stref anomalnych ciśnień porowych. Połączenie wiedzy z wielu płaszczyzn, zarówno inżynierii złożowej, geofizyki otworowej, sejsmiki, geologii, jak i petrofizyki, pozwala rozpatrywać zagadnienia predykcji ciśnień bardziej kompleksowo. Dzięki temu otrzymany profil rozkładu ciśnień może być wykorzystany do wytypowania niebezpiecznych stref alternatywnych lokalizacji projektowanego otworu naftowego, jak również analizy dystrybucji ciśnień jako zagadnienia związanego z budową strukturalną ośrodka geologicznego, zwłaszcza w kontekście analizy własności uszczelniających, uskoków czy tektonicznych zamknięć pułapek złożowych.

Kluczowym zagadnieniem dla oceny magnitudy ciśnień porowych na podstawie danych sejsmicznych jest uzyskanie możliwie wiarygodnego pola prędkości propagacji fali sejsmicznej. Prędkość fali sejsmicznej dostarcza w sposób pośredni informacji na temat rozkładu ciśnień w górotworze, ponieważ prędkość zależy od wielu czynników, w głównej mierze od porowatości. W utworach klastycznych zarówno porowatość, jak i ciśnienie płynów porowych jest funkcją kompaktacji. Dlatego dzięki ustaleniu empirycznych zależności pomiędzy prędkością fali sejsmicznej w funkcji kompaktacji a ciśnieniem porowym możliwe jest odtworzenie rozkładu ciśnień płynów wzdłuż profilu sejsmicznego czy w obrębie przestrzennego wolumenu w przypadku danych sejsmiki 3D (Kan & Swan 2001, Den Boer *et al.* 2006, van de Coevering *et al.* 2007)

Obszar badań

Opracowanie rozkładu ciśnień porowych górotworu zostało wykonane na profilu sejsmicznym 17-2-91K (Fig. 1), jednak na potrzeby opracowania modelu prędkości obszar poddany analizie został rozszerzony na profile 16A-2-91K, 18A-2-91K, 1-13-94K. W sąsiedztwie wytypowane zostały otwory wiertnicze Rączyna-6, -8; Jodłówka-3, -4, -31 oraz Drohobyczka-1, -2, -3, -4, -5, które posłużyły do kalibracji prędkości. Obszar objęty opracowaniem znajduje się pomiędzy Rzeszowem a Przemyślem w brzeżnej części Karpat. Na obszarze tym zostały wyróżnione płaszczowina skolska oraz jednostka stebnicka (Tołwiński 1927). Występuje tutaj bardzo intensywne złuskowanie orogenu. Łuski w tym obszarze są ponasuwane na siebie dachówkowo, odkorzenione i podcięte od dołu jedną wspólną płaszczyzną nasunięcia (m.in. Wdowiarz 1949, Wdowiarz & Jucha 1981, Młynarski & Bachan *et al.* 1982, Kotlarczyk 1988).

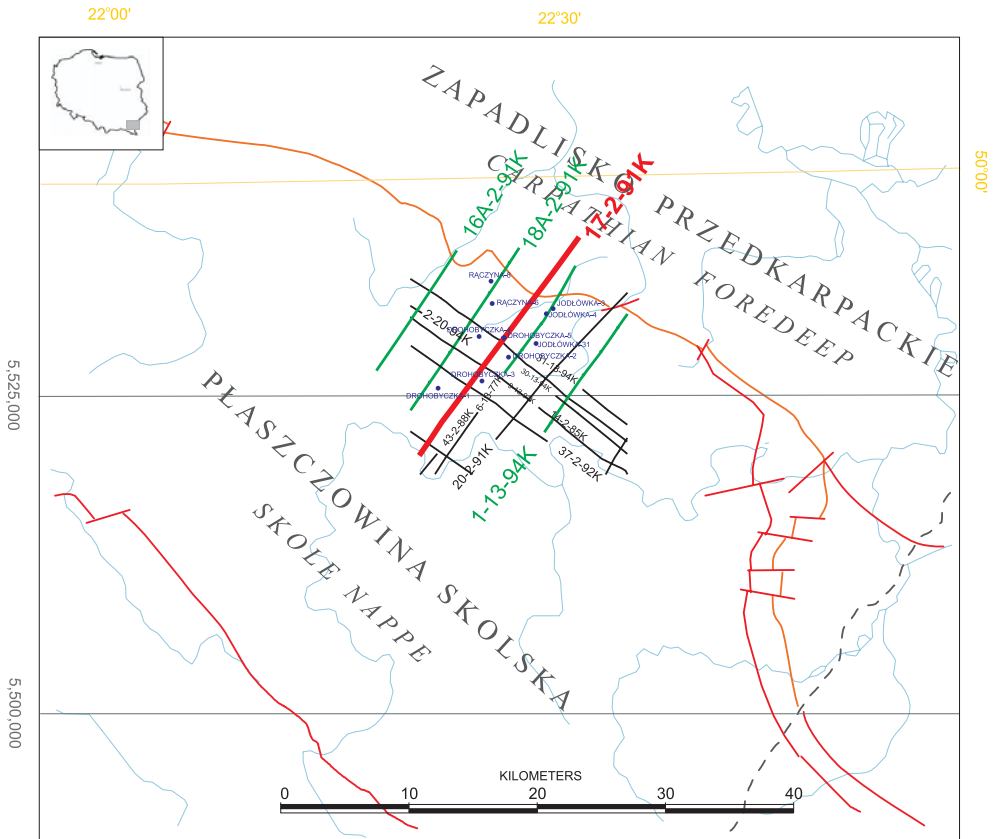


Fig. 1. Mapa lokalizacyjna profili sejsmicznych

Fig. 1. Seismic lines localization map

Jednostka skolska reprezentowana jest głównie przez kompleks warstw inoceramowych (formacja z Ropianki) (Kotlarczyk 1978) wieku senon-paleocen, podścielonych warstwami spaskimi. Jednostka stebnicka przed czołem jednostki skolskiej wykształcona jest jako molasa wieku ottang-starszy baden, natomiast u czoła i w spągu jednostki skolskiej, na NW od Przemyśla, występuje w postaci płatów. Tak skomplikowana budowa geologiczna miała istotny wpływ na dobór zastosowanych procedur obliczeniowych.

Predykcja ciśnienia porowego na podstawie danych sejsmicznych

Prędkość propagacji fali sejsmicznej w ośrodku geologicznym jest silnie uzależniona od kompaktacji i wielkości nadkładu powodującego redukcję porowatości oraz wzrost stopnia przylegania na granicy styku ziaren. Dlatego jakkolwiek wzrost ciśnienia porowego płynów, powyżej gradientu hydrostatycznego (w efekcie ograniczenia drogi ucieczki płynów),

powoduje ograniczenie redukcji przestrzeni porowej w czasie kompaktacji i w większości przypadków spadek prędkości propagacji fali sejsmicznej. Prawidłowość ta dotyczy przede wszystkim utworów klastycznych (Sayers *et al.* 2002), ale w utworach węglanowych wzrost ciśnienia porowego do wartości anomalnych również powoduje spadek prędkości fali sejsmicznej, lecz w znacznie mniejszym stopniu w porównaniu z prędkościami utworów otaczających i anomalia taka jest bardzo trudna do zidentyfikowania (Huffman 1998). Po raz pierwszy zastosowanie prędkości z profilowania akustycznego do predykcji ciśnień zostało przedstawione przez Hottmana & Johnsona (1965), a prędkości sejsmiczne (składania) przez Pennebakera (1968). Prace te oparte są na założeniu, że zmiany prędkości propagacji fali sejsmicznej (fali P) wskutek zmiany ciśnienia porowego i ciśnienia nadkładu są funkcją ciśnienia efektywnego. Zależność tę sformułował Terzaghi (1943) i jest często przytaczana w literaturze. Mówi ona, że naprężenie pochodzące od ciężaru nadkładu jest równe sumie naprężenia w szkielecie skalnym (ciśnienie efektywne) oraz ciśnieniu porowemu. Zapisując tą zależność w funkcji naprężenia efektywnego, możemy otrzymać

$$\sigma_v = S_v - P_p \quad (1)$$

gdzie:

- σ_v – naprężenie efektywne,
- S_v – naprężenie pionowe pochodzące od ciężaru nadkładu,
- P_p – ciśnienie porowe.

Ciśnienie pionowe nadkładu S_v w danym punkcie jest funkcją ciężaru nadległego szkieletu skalnego oraz płynów zawartych w przestrzeni porowej nadległego interwału i może być opisane zależnością

$$S_v(z) = g \int_0^z \rho(z) dz \quad (2)$$

gdzie:

- $\rho(z)$ – gęstość na głębokości z ,
- g – przyspieszenie grawitacyjne.

W niniejszym opracowaniu do oceny magnitudy ciśnienia porowego została zastosowana metoda Eatona (Eaton 1972, 1975, Eaton *et al.* 1997), która jest z powodzeniem stosowana w praktyce przemysłowej, a polega na estymacji pionowej składowej naprężenia efektywnego na podstawie zależności

$$\sigma = \sigma_{normal} (V/V_{normal})^n \quad (3)$$

W równaniu (3) σ_{normal} oraz V_{normal} są, kolejno, pionową składową naprężenia efektywnego oraz prędkością propagacji fali sejsmicznej w utworach znajdujących się w warunkach ciśnienia normalnego natomiast n jest wykładnikiem potęgi, który definiuje wielkość

wpływu parametru prędkości na wartość ciśnienia estymowanego. Stąd po przekształceniu ciśnienie porowe jest dane następującym równaniem

$$p = S_v - (S_v - p_{normal})(V/V_{normal})^n \quad (4)$$

Dane sejsmiczne wykorzystane w niniejszym opracowaniu są wynikiem badań realizowanych w ramach polsko-ukraińskiego projektu badawczego (Maćkowski *et al.* 2009). Dostępne dane sejsmiczne charakteryzowały się słabą jakością. Główne problemy wynikały z niejednorodności przestrzennej pomiarów polowych, znacznej liczby opuszczonych punktów wzbudzenia oraz odsunięć od płaszczyzny rejestracji (Marecik *et al.* 2008). W trakcie ponownego przetwarzania istotne było obliczenie poprawek statycznych z uwzględnieniem wpływu morfologii terenu oraz skomplikowanej budowy stref małych prędkości. Dodatkowo pogorszenie jakości danych było związane z licznym występowaniem stromo zalegających łusek i powodowało osłabienie koherencji sygnału użytecznego.

Z punktu widzenia problematyki predykcji ciśnień najistotniejszym problemem było uzyskanie wiarygodnego pola prędkości propagacji fali sejsmicznej. Dostępne prędkości na profilach 17-2-91K oraz 1-13-94K obliczono za pomocą migracyjnych analiz (Fig. 2). Na pozostałych wymienionych profilach dostępne były prędkości składania, które z powodu słabej rozdzielczości nie zostały odrzucone.

Aby w pełni wykorzystać dostępne dane (profile sejsmiczne 2D oraz punktową informację z danych otworowych), obliczony został przestrzenny wolumen prędkości 3D (Fig. 3), który pozwolił zintegrować dostępne informacje przez zastosowanie interpolacji i kalibracji w obrębie osnowy strukturalnej. Takie podejście pozwoliło uzyskać prawidłowy rozkład prędkości w otworach zachować jednocześnie trend zmian prędkości sejsmicznych w przestrzeni.

Obliczony wolumen 3D był syntezą danych 1D i 2D, a uzyskane wartości w przestrzeni pomiędzy liniami mają charakter przybliżony z dokładnością wystarczającą do wykonania poprawnej konwersji z domeny czasu do głębokość, natomiast niewystarczającą do wiarygodnego oszacowania ciśnień porowych mających charakter lokalny (poprawność wykonanej konwersji z domeny czasu do głębokości została zweryfikowana w dostępnych otworach). Dlatego z bloku prędkości zostały wyekstrahowane prędkości wzdłuż profilu 17-2-91K, które zachowały rozdzielczość z analiz migracyjnych i w niewielkim stopniu uległy modyfikacji wskutek kalibracji. Trend zmiany prędkości z głębokością w funkcji kompaktacji dla warunków normalnych został opisany wielomianem trzeciego stopnia na podstawie akustycznego profilowania prędkości dla interwałów o zawartości minerałów ilastych powyżej 65% (Fig. 4).

Dane geofizyki wiertniczej oraz ich interpretacja zostały opracowane w ramach projektu badawczego (Bała *et al.* 2003). Trend zmian ciśnienia porowego oraz naprężenia pionowego nadkładu były estymowane w otworach Rączyna-6, Rączyna-8, Jodłówka-21, Kańczuga-25 oraz Drohobyczka-3. Otwory te posiadały pomiary ciśnień oraz gradientów ciśnień (Fig. 5). Finalny przekrój rozkładu ciśnień płynów porowych przedstawia figura 6.

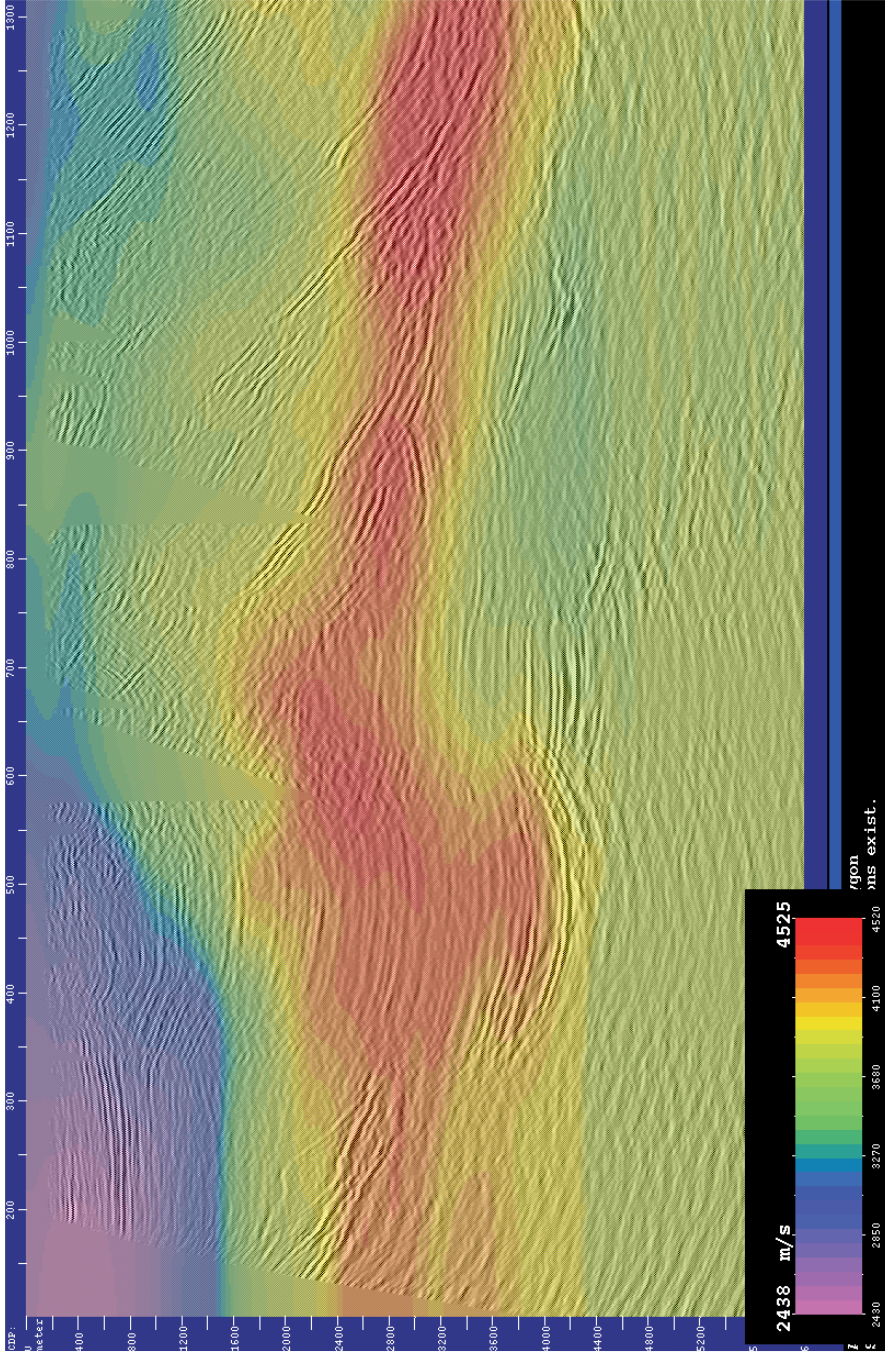


Fig. 2. Przekrój prędkości sejsmicznych PSDM dla profilu 17-2-91K

Fig. 2. The PSDM velocity cross-section

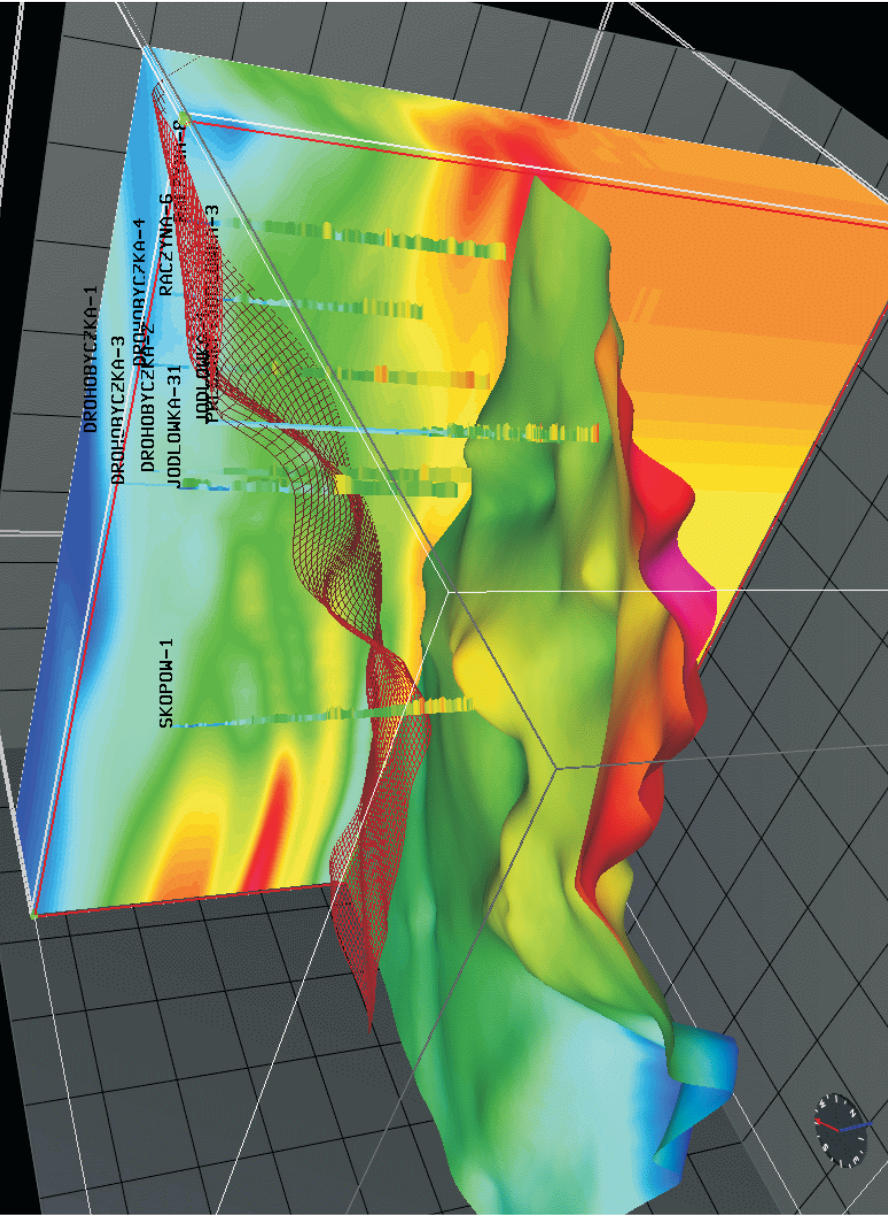


Fig. 3. Przestrzenny wolumen prędkości
Fig. 3. 3D velocity cube

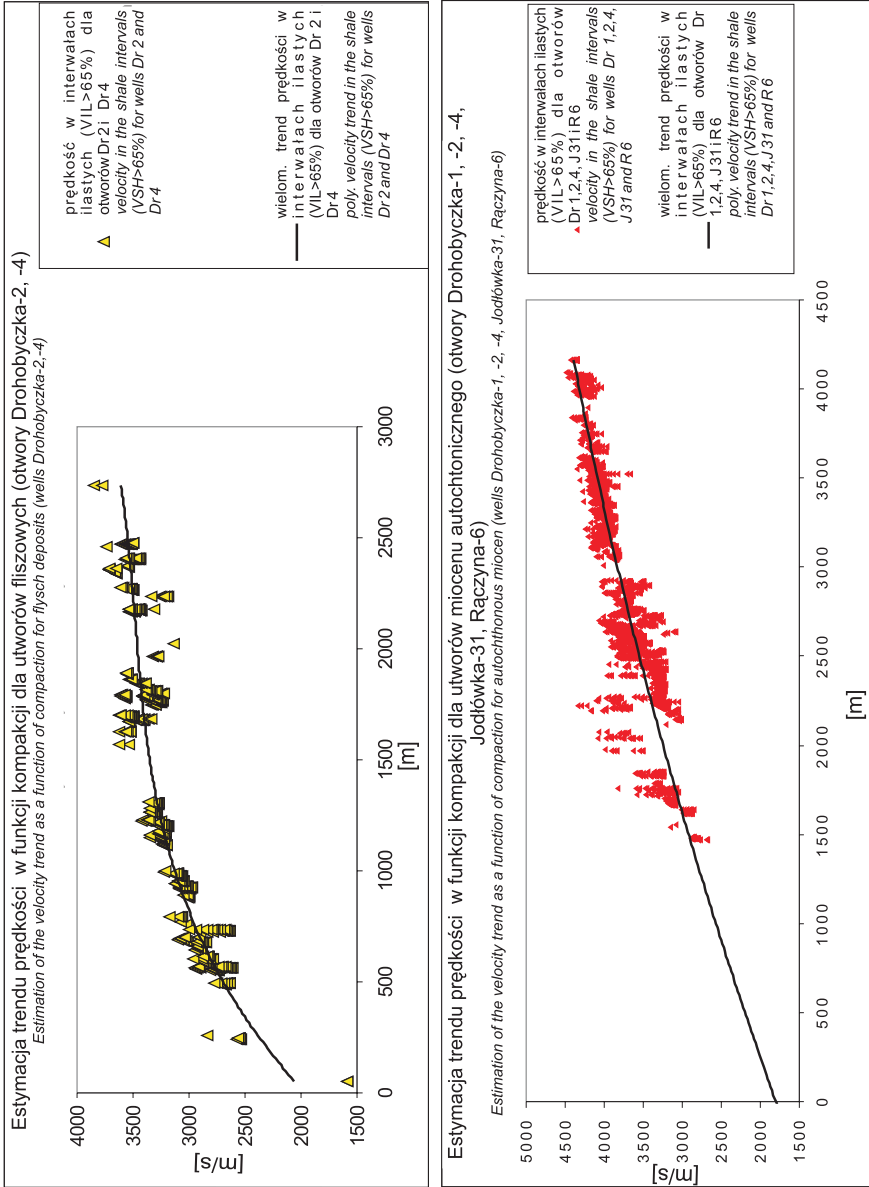


Fig. 4. Estymacja trendu prędkości w funkcji kompaktacji dla warunków normalnych
 Normal compaction trend estimation

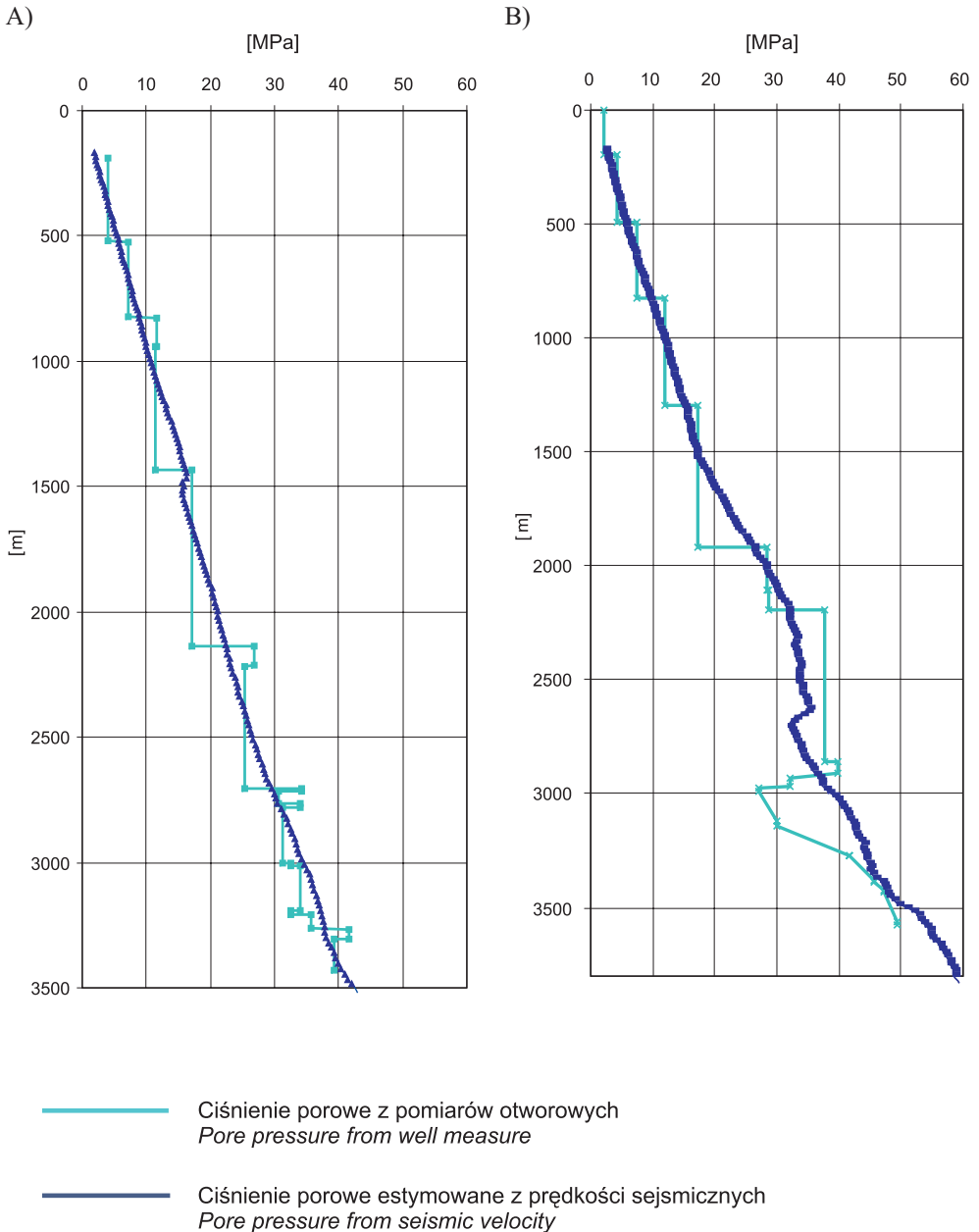


Fig. 5. Porównanie wartości ciśnienia porowego z pomiarów otworowych oraz estymowanego z prędkości sejsmicznych dla: A) Rączyna-6; B) Drohobyczka-3

Fig. 5. Pore pressure check for: A) Rączyna-6; B) Drohobyczka-3

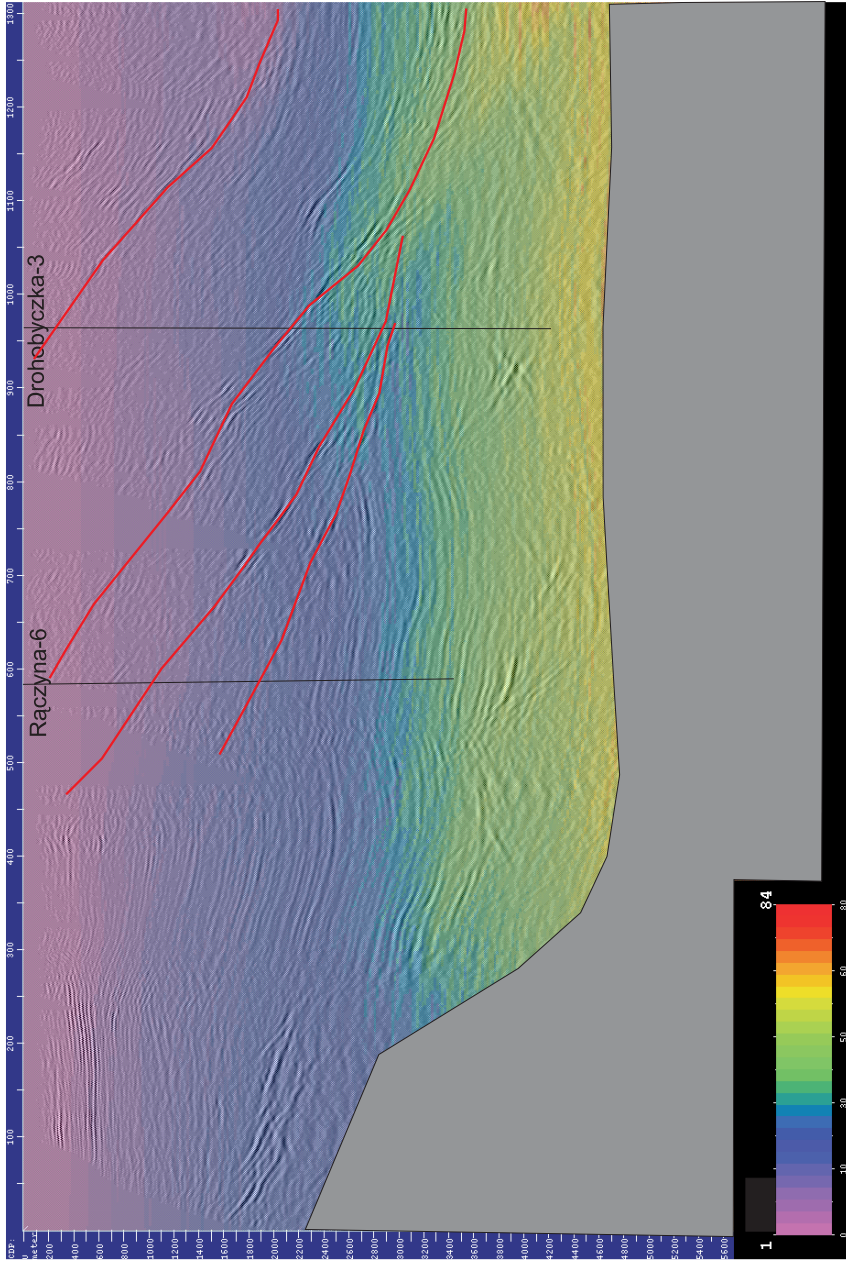


Fig. 6. Rozkład ciśnień porowych dla profilu 17-2-91K [MPa]

Fig. 6. Pore pressure cross-section for seismic line 17-2-91K [MPa]

PODSUMOWANIE

Dzięki dobrej jakości danych sejsmicznych istnieje możliwość obliczenia rozkładu ciśnień porowych. Profil rozkładu ciśnień może być wykorzystany w trakcie projektowania prac wiertniczych i na etapie analizy zbiorników naftowych, umożliwiając ustalenie dróg migracji węglowodorów i wytypowanie potencjalnych obiektów złożowych. Prędkości propagacji fali sejsmicznej obliczono za pomocą analiz migracyjnych na profilach 17-2-91K oraz 1-13-94K (Fig. 1, 2). Obliczony został przestrzenny wolumen prędkości (Fig. 3), który pozwolił zintegrować dostępne informacje przez zastosowanie osnowy strukturalnej oraz kalibracji. Z kolei trend zmian prędkości z głębokością w funkcji kompaktacji został opisany na podstawie profilowania akustycznego prędkości w interwałach o zawartości minerałów ilastych powyżej 65% (Fig. 4). Wizualizacja ciśnienia porowego z pomiarów otworowych oraz estymowanego z prędkości sejsmicznych dla otworu Rączyna-6 i Drohobyczka-3 jest przedstawiona na figurze 5. Rozkład ciśnień porowych na profilu 17-2-91K zilustrowano jest na figurze 6. Wyestymowane wartości ciśnień naśladują trend pomiarów w otworach, wykazując jednocześnie pewne niedoszacowanie. Jest to związane prawdopodobnie z lokalnymi uwarunkowaniami, których nie udało się odtworzyć lub które nie manifestowały się na profilu sejsmicznym, przebiegającym w pewnej odległości od otworów. Może to również być związane z poziomą składową naprężeń powstających w górotworze w trakcie ruchów masywów związanych z formowaniem się Karpat, jednak potwierdzenie tego przypuszczenia wymaga dodatkowych badań. Dlatego uzyskane wyniki (Fig. 6) mają znaczenie jakościowe, natomiast pod względem ilościowym mogą być obciążone błędem trudnym do oszacowania na tym etapie. Analiza obliczonego rozkładu ciśnień wskazuje, że od NE w utworach miocenu zapadliska przedkarpackiego występują ciśnienia wykazujące normalny trend zmian z głębokością, w kierunku na SW widoczne jest podniesienie magnitudy ciśnień szczególnie wyraźne w okolicy otworu Drohobyczka-3 w przedziale głębokości 2200–2700 m. Anomalia ta w pewnym stopniu naśladuje geometrię nasuniętych utworów fliszowych. Sugeruje to uszczelniający charakter powierzchni nasunięcia w tym przedziale głębokości, stanowiącej barierę dla migracji płynów. Dodatkowo sytuację tę potwierdza spadek ciśnienia poniżej zaznaczonej powierzchni nieciągłości. Dalej na SW od otworu Drohobyczka-3 w utworach fliszowych, w przedziale głębokości 2600–3600 m, wartości ciśnień są wyższe w porównaniu z ciśnieniami występującymi na analogicznych głębokościach po stronie NE w utworach mioceńskich. Anomalia widoczna przy końcu profilu na SE poniżej zaznaczonej powierzchni nasunięcia jest trudna do zweryfikowania.

LITERATURA

- Bała M., Jarzyna J., Górecka N., Czopek B., Nowak J., Kotuła M., Wawrzyniak A. & Naleźniak A., 2003. *Dokumentacja merytoryczna projektu „Analiza potencjalnych pułapek złożowych w oparciu o badania sejsmiczne i analizę geologiczną w strefie Drohobyczka-Skopów”*. Archiwum AGH, Kraków.
- Coevering N. van de, Al.-Dabagh H.H., Hoe L.M. & Jolly T., 2007. Large-scale pore pressure prediction after pre-stack depth migration in the Caspian Sea. *First Break*, 25, 39–51.

- Den Boer L.D., Sayers C.M., Nagy Z.R., Hooyman P.J. & Woodward M.J., 2006. Pore pressure prediction using well-conditioned seismic velocity. *First Break*, 24, 43–49.
- Eaton B.A., 1972. Graphical Method Predicts Geopressures Worldwide. *World Oil*, 51–56.
- Eaton B.A., 1975. The equation for geopressure prediction from well logs. *SPE 5544*.
- Eaton B.A. & Eaton T.A., 1997. Fracture Gradient Prediction from the New Generation. *World Oil*, 93–100.
- Hottman C.E. & Johnson R.K., 1965. Estimation of formation pressure from log-derived shale properties. *Journal of Petroleum Technology*, 17, 717–722.
- Huffman A.R., 1998. The Future of Pressure Prediction Using Geophysical Methods. *AAPG Memoir*, 76, 217–233.
- Kan T.K. & Swan H.W., 2001. Geopressure prediction from automatically-derived seismic velocity. *Geophysics*, 66, 1937–1946.
- Kotlarczyk J., 1978. Stratygrafia formacji z Ropianki. Poziomy z olistolitami w Karpatach przemyskich. *Materiały Konferencji Naukowej Sedymentologów*, 7–16.
- Kotlarczyk J., 1988. Geologia Karpat Przemyskich – szkic do portretu. *Przegląd Geologiczny*, 1, 325–332.
- Maćkowski T. *et al.*, 2009. Geofizyczno-geologiczne modele budowy struktur wglębnych. W: Górecki W. *et al.*, *Dokumentacja merytoryczna projektu PBS/ PUPW/6/2005 pt. „Badania transgraniczne wglębnych struktur geologicznych brzeżnej strefy Karpat w aspekcie odkryć i udostępniania nowych złóż ropy naftowej i gazu ziemnego”*, Blok III, cz. 1, Archiwum KSE AGH, Kraków.
- Marecki T. *et al.*, 2008. Metodyka wybranych procedur przetwarzania danych sejsmicznych z obszaru sigmoidy przemyskiej. *Geologia* (kwartalnik AGH), 34, 2, 527–540.
- Młynarski S. & Bachan W. *et al.*, 1982. Interpretacja geofizyczno-geologiczna wyników badań wzdłuż profilów Lublin-Prabuty, Przedbórz-Żebrak, Baligród-Dubienka. *Biuletyn Instytutu Geologicznego*, 333, 5–57.
- Pennebaker E.S., 1968. Seismic data indicate depth, magnitude of abnormal pressure. *World Oil*, 166, 73–78.
- Terzaghi K., 1943. *Theoretical soil mechanics*. John Wiley and Sons, New York.
- Tołwiński K., 1927. Z geologii południowej strefy przedgórze polskich Karpat wschodnich. *Sprawozdanie Państwowego Instytutu Geologicznego*, 4, 1–2.
- Wdowiarz S., 1939. Budowa geologiczna Karpat brzeżnych na południowy wschód od Rzeszowa. *Biuletyn Państwowego Instytutu Geologicznego*, 11, 3–37.
- Wdowiarz S. & Jucha S., 1981. North-western extension of the Borislav-Pokutsie zone of deep-seated folds in the Polish Carpathians. *Biuletyn Instytutu Geologicznego*, 335, 7–27.

Summary

When a good-quality, processed seismic data are at one's disposal, it is possible to compute the pore pressure distribution. Such information can be used as early as during planning of drilling operations and at the stage of petroleum reservoir analysis to investigate

hydrocarbon migration pathways and to appoint potential accumulation objects. The seismic-wave propagation velocity was calculated with application of migration analyses for seismic sections 17-2-91K and 1-13-94K (Figs 1 and 2).

The three-dimensional velocity cube was calculated (Fig. 3), which allowed to integrate available information through application of interpretation and calibration within the structural base. The velocity V_s depth trend as a function of compaction was described based on acoustic-velocity logs for the clay mineral content exceeding 65% (Fig. 4). Visualization of the pore pressure measured in wells and estimated from seismic velocity for the Rączyna-6 and Drohobyczka-3 wells is presented in figure 5. Distribution of pore pressures along the seismic section 17-2-91K is illustrated in figure 6. The estimated pressure values follow the trend of well measurements, at the same time they reveal some underestimation. This is probably related to local conditions which were not successfully reconstructed or did not manifest themselves on the seismic section that was running some distance off the wells. It can also be associated with the horizontal component of stresses generated by the thrusting Carpathians, which requires, however, additional studies. For this reason, the obtained results (Fig. 6) should be treated as qualitative ones rather than quantitative.

When analyzing the calculated pressure distribution, from NE in the Miocene deposits of the Carpathian Foredeep one can observe pressures demonstrating the normal depth trend. Toward SW, an increase of the pressure magnitude can be seen, which is most notably seen in the vicinity of the Drohobyczka-3 well in the 2200–2700 m depth interval. This anomaly to some degree follows the geometry of the thrust flysch deposits. It implies the sealing character of the thrust plane in this depth interval. So the plane represents a fluid migration barrier. This situation is additionally confirmed by the pressure drop below the discontinuity surface. Further to SW from the Drohobyczka-3 well, in the flysch deposits of the 2600–3600 m interval, pressure values are increased compared to pressures that occur at the same depth at the NE side in the Miocene deposits. The anomaly that can be seen in SE, at the end of the section, below the thrust plane, is difficult to verify.