



Lidia DZIEWIŃSKA*, Radosław TARKOWSKI**

Seismiczna interpretacja struktury Wierzchowa dla potrzeb podziemnego składowania CO₂ z wykorzystaniem efektywnych współczynników odbicia

Streszczenie: Zaprezentowano wyniki interpretacji 3 sekcji w wersji współczynników odbicia (EWO) dla struktury Wierzchowa. Wykonana interpretacja istotnie wzbogaciła zakres informacji przedstawianych w standardowych dokumentacjach sejsmicznych. Uwzględniając dane geologiczne z otworów przebijających strukturę, zidentyfikowano i skorelowano wzdłuż przekrojów kompleksy skalne oraz strefy nieciągłości tektonicznych w obrębie skał permomezozoicznych. Scharakteryzowano poziom o zwiększonej zawartości piaskowców formacji polczyńskiej, zaproponowany do składowania dwutlenku węgla. Stwierdzone zaburzenia tektoniczne występujące w obrębie formacji polczyńskiej przechodzące do wyżej zalegających warstw oraz obecność przewarstwień ilastych obniżają przydatność rozpatrywanej struktury do podziemnego składowania CO₂. Wydaje się celowe szersze zastosowanie, także dla innych struktur, procesu przetwarzania materiałów sejsmicznych w postaci efektywnych współczynników odbicia z zadaniem rozpoznania budowy geologicznej przypuszczalnych poziomów zbiornikowych pod kątem określenia ich przydatności do składowania gazów przemysłowych.

Słowa kluczowe: efektywne współczynniki odbicia, CCS, Wierzchowo

Seismic interpretation of the Wierzchowo structure for the need of underground CO₂ storage, using effective reflection coefficients

Abstract: The paper presents the results of the interpretation of three sections of effective reflection coefficients (ERC) in the Wierzchowo structure. The interpretation significantly enriched the amount of information presented in the standard seismic materials. Taking the geological data from boreholes piercing the structure into account, the Permo-Mesozoic rock complexes and zones of tectonic discontinuities have been identified and correlated along the sections. A horizon of increased content of sandstones in the Polczyn Formation has been characterized, which is the target formation for the storage of carbon dioxide. The observed tectonic disturbances occurring

* Dr, ** Dr hab. inż., prof. IGSMiE PAN, Instytut Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią PAN, Kraków;
e-mail: tarkowski@min-pan.krakow.pl

within the Polczyn Formation, which continue into the overlying beds, and the presence of clayey interbeds reduce the usefulness of this structure for the underground storage of CO₂. It seems advisable to use the processing of seismic materials into sections of effective reflection coefficients more widely, also for other geological formations, in the exploration of the geological structure of potential reservoir levels to determine their suitability for the storage of industrial gases.

Keywords: effective reflection coefficients, CCS, Wierzchowo

Wprowadzenie

W utworach mezozoiku Niżu Polskiego wstępnie zidentyfikowano kilkadziesiąt struktur do podziemnego składowania dwutlenku węgla (Tarkowski red. 2010). Ich stopień poznania jest nierównomierny, a liczba i rozmieszczenie otworów wiertniczych oraz jakość danych sejsmicznych ma w tym przypadku istotne znaczenie. Dla sprecyzowania ich wgłębnej budowy geologicznej nieodzowne jest określenie geometrii poszczególnych kompleksów skalnych w obrębie warstw zbiornikowych i uszczelniających oraz lokalizacji stref uskoko- wych. Te elementy budowy strukturalno-tektonicznej są często słabo zbadane powszechnie stosowanymi geofizycznymi metodami interpretacyjnymi, głównie z powodu niewystarczającej rozdzielczości obrazu falowego przekrojów sejsmicznych. Na ten problem zwracali uwagę autorzy licznych prac, m.in. zajmujący się problematyką CCS (*Carbon Capture and Storage*) (Chełmiński i in. 2010; Feldman-Olszewska i in. 2012; Wróbel i Kijewska 2010).

Jednym z interesujących obiektów do podziemnego składowania CO₂ w północno-zachodniej Polsce jest struktura Wierzchowa (Tarkowski red. 2010). Autorzy podjęli się wykorzystania istniejących zapisów sejsmicznych z tego rejonu, które zostały przetworzone do postaci efektywnych współczynników odbicia (EWO). Wykonana interpretacja istotnie wzbogaciła zakres informacji przedstawianych w dotychczasowych opracowaniach (Tarkowski red. 2010; Żelichowski red. 1995).

Przekroje geologiczno-geofizyczne obrazujące budowę struktur do składowania CO₂ zwykle przedstawiają uproszczony model formacji geologicznych składający się z naprzemianległych warstw piaskowców oraz mułowców i iłowców. W rzeczywistości osady mezozoiczne Niżu Polskiego charakteryzują się często dużymi zmianami miąższości warstw i ich wykształcenia litologicznego. Nieregularnie rozmieszczone i miejscami zuskokowane formacje skalne poziomów zbiornikowych oraz warstw uszczelniającego nadkładu tworzą niejednorodną strukturę przypuszczalnego zbiornika. Dlatego też do oceny przydatności podziemnych struktur do składowania CO₂ niezbędne jest dokładne rozpoznanie ich wewnętrznej budowy geologicznej oraz otoczenia w przedziale głębokościowym obejmującym kompleks utworów permomezozoicznych. Jeśli istnieje możliwość, jak w przypadku prezentowanej pracy, przekroje obrazują także interwał głębszy poszerzony o podpermski pakiet karbońsko-dewoński.

Mała miąższość i zróżnicowanie prędkościowe poszczególnych serii litologiczno-stratygraficznych utrudniają identyfikację wydzielen geologicznych metodami sejsmicznymi. Wynika to z niewystarczającej rozdzielczości rejestrowanych granic na sekcjach sejsmicznych niezbędnych do przeprowadzenia rozważań dotyczących zmian litologicznych i wyznaczenia stref nieciągłości tektonicznych. Granice przedstawiają na sekcjach obraz falowy zinterferowany. Sytuacja ta wymaga podjęcia prac w celu uzyskania obrazu sejsmicznego

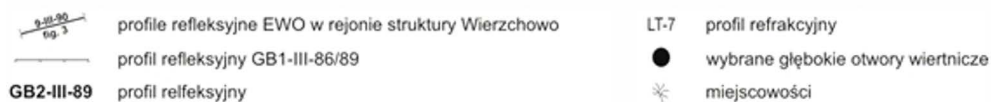
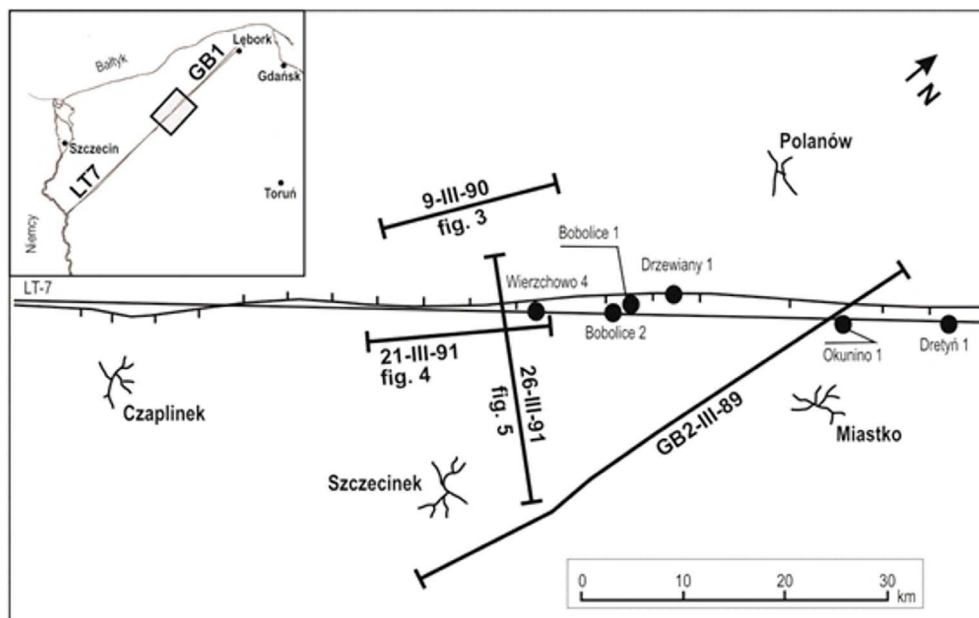
o zwiększonej rozdzielczości zapisu w stosunku do zapisu falowego. Powyższa metoda wykorzystuje związek wielkości i znaku współczynnika odbicia z sejsmicznymi prędkościami warstwowymi, a w przypadku dowiązania poprzez prędkość w otworze – także ze zmianami litologicznymi w warstwach. Przekształcenie sekcji sejsmicznych w wersję EWO umożliwia zastosowanie tych parametrów (znak i wielkość współczynnika odbicia) do identyfikacji i korelacji granic sejsmicznych, i przedstawienia granic sejsmicznych zgodnie z rzeczywistymi granicami litologicznymi danego przekroju.

Dotychczas metodę efektywnych współczynników odbicia wykorzystano w Polsce dla zagadnień mających na celu bardziej precyzyjne wyznaczenie warstw geologicznych określonych na podstawie refleksyjnych badań sejsmicznych. Zastosowano ją z pozytywnym rezultatem m.in. do śledzenia zmian litologicznych i wydzielenia serii piaskowcowych w utworach karbonu rowu lubelskiego (Dziewińska i Józwiak 2000), rozpozniowania utworów cechsztynu NW obrzeżenia Gór Świętokrzyskich (Dziewińska i Petecki 2004) oraz rozpoznania złóż prognostycznych miedzi i srebra (Cu-Ag) (Speczik i in. 2011). Wykorzystano ją również dla określenia przydatności struktur geologicznych wytypowanych do podziemnego składowania CO₂ (Dziewińska i in. 2011; Dziewińska i Tarkowski 2012). W przypadku struktury Wilkowa (Dziewińska i in. 2011) otrzymano zadowalające rezultaty w zakresie wyznaczenia zróżnicowania litologicznego warstw o niewielkich rozmiarach oraz stref nieciągłości tektonicznych. W przypadku utworów jurajsko-triasowych struktury Choszczna (Dziewińska i Tarkowski 2012) pozwoliła ona ocenić szczelność wyznaczonych poziomów zbiornikowych i zwrócić uwagę na zaburzenia tektoniczne w części szczytowej antykliny mające wpływ na bezpieczeństwo podziemnego składowania dwutlenku węgla.

1. Dotychczasowe rozpoznanie geologiczno-geofizyczne

Struktura Wierzchowo położona jest w niecce pomorskiej (Dadlez red. 1998, 2000; Znosko red. 1998) około 10 km na NW od Szczecinka (rys. 1). Została ona rozpoznana kilkoma profilami sejsmicznymi i kilkunastoma głębokimi otworami geologicznymi (Katalogi wierceń 1971–1979), z których najistotniejsze to osiagające: perm – Wierzchowo 1 (3263,0 m) i Wierzchowo 2 (3202,0 m), karbon – Wierzchowo 8 (3552,0 m) i Wierzchowo 9 (3510,0 m), oraz dewon – Wierzchowo 4 (5016,0 m). Prace sejsmiczne wykonano w latach siedemdziesiątych, a ostatnie w latach dziewięćdziesiątych ubiegłego wieku w ramach tematu „Białogard–Czarne–Wilcze, rejon Czechy–Szczecinek”. Rozpoznanie sejsmiczne tego rejonu ma charakter zdjęcia półszeregółowego. Rozmieszczenie otworów jest nierównomierne. Poza wierceniem Wierzchowo 4 zlokalizowanym na południowo-zachodnim zboczu jurajskiego elementu antyklinalnego, pozostałe otwory skupione są w części szczytowej struktury w obrębie bloku północnego lub południowego.

Wykonane prace geofizyczno-geologiczne umożliwiły rekonstrukcję ogólnej budowy kompleksu cechsztyńsko-mezozoicznego (Marek i Pajchłowa red. 1997). Jest to antyklina niesolna nałożona i genetycznie związana z systemem uskoków zakorzenionych w podłożu cechsztynu, częściowo odnowionych w starszym mezozoiku, o odmiennych parametrach geometrycznych. Antyklina ograniczona jest uskokami o kierunku NW-SE i przecięta jest diagonalnie uskokiem zrzucającym w podłożu cechsztynu blok północny. Uskok ten został



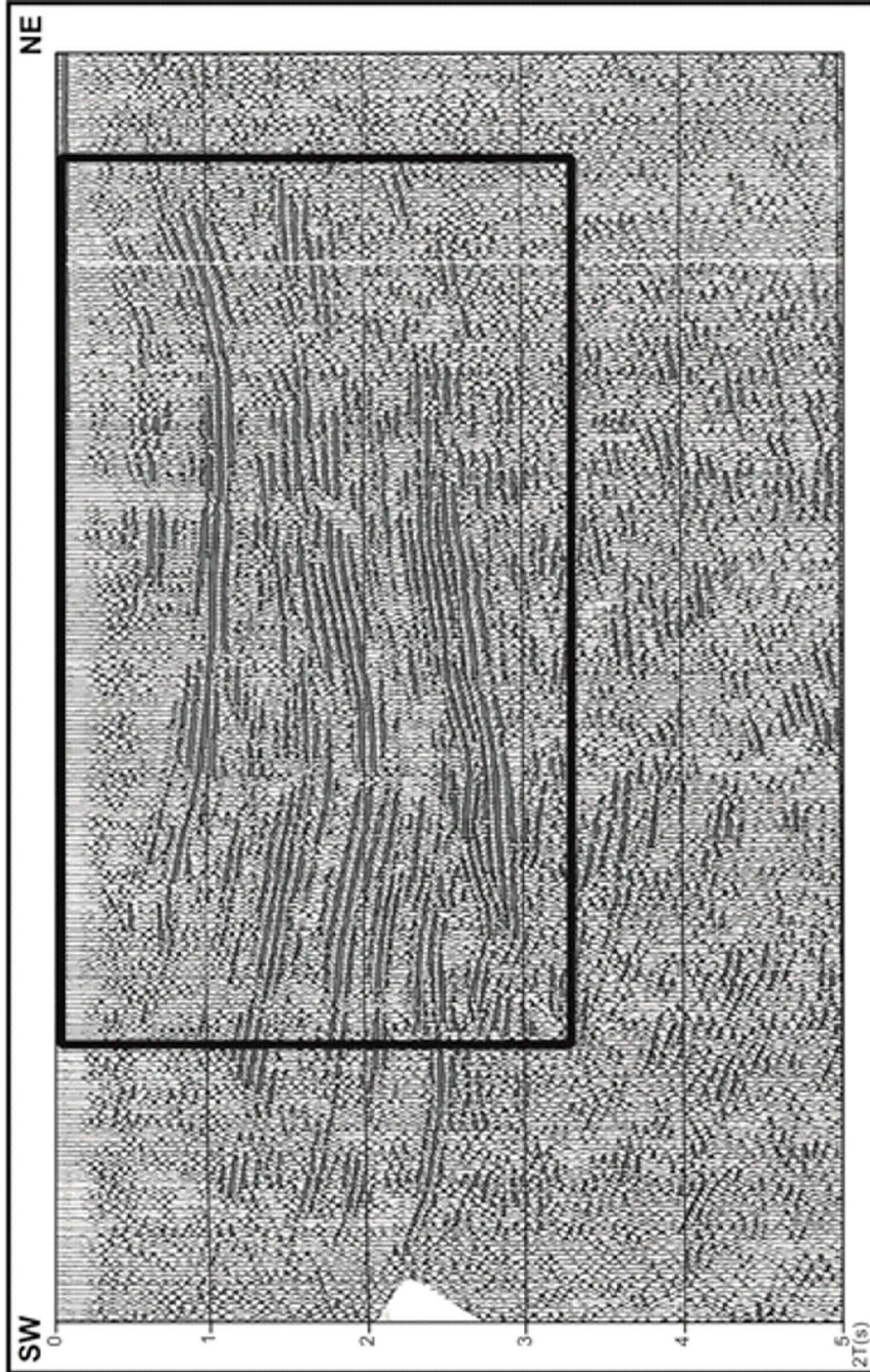
Rys. 1. Szkic lokalizacyjny obszaru prac

Fig. 1. Location sketch-map of the study area

odnowiony w triasie i we wczesnej jurze, z przeciwnym kierunkiem zrzutu. W młodszej jurze i kredzie uległ on ponownemu odnowieniu, w trakcie którego kierunek zrzutu wrócił do pierwotnego położenia. Dotychczasowe wyniki uwiadcniają bardziej skomplikowaną budowę poszczególnych warstw, na co wskazują obserwowane zaburzenia obrazu sejsmicznego (rys. 2).

Wstępna charakterystyka struktury Wierzchowa pod kątem podziemnego składowania CO₂ została przedstawiona w monograficznym opracowaniu pod redakcją Tarkowskiego (2010). Zaprezentowano w niej m.in. przekrój geologiczny oraz profil geologiczny jednego z otworów położonego na strukturze, ze szczególnym uwzględnieniem warstw zbiornikowych i ich nadkładu. Przyjmując, że zarys antykliny wyznacza izohipsa spągu albu górnego o wartości – 700 m, antyklina ma kształt elipsy o długości 15 km i szerokości 5 km, a jej powierzchnia wynosi około 75 km². W planie strukturalnym spągu kredy górnej uwiadczenia się nałożony charakter antykliny bez rozbicia na bloki N i S.

Z dotychczasowego rozpoznania wynika, że potencjalnym poziomem zbiornikowym do składowania CO₂ w tym rejonie są, udokumentowane wiertniczo, piaskowce formacji półczyńskiej pstrego piaskowca środkowego (trias dolny) o średniej miąższości ~220 m. Formację półczyńską tworzy kompleks czerwono-ceglastych i czerwono-różowych piaskowców z przewarstwieniami i wkładkami iłowcowo-mułcowymi. Udział piaskowców



Rys. 2. Obraz falowy – rejon struktury Wierzchowo (fragment profilu GB1-III-86/89)

Fig. 2. Seismic image – Wierzchowo structure region (part of seismic section GB1-III-86/89)

w poziomie zbiornikowym wynosi ~70%, resztę stanowią iłowce i mułowce. Nadkład poziomemu zbiornikowemu to ilasto-ewaporatowe i węglanowe osady retu i wapienia muszlowego o miąższości ~170 m. Otwory, w tym przeanalizowane w ramach monografii (Tarkowski red. 2010) określają głębokości zalegania stropu i spągu formacji połczyńskiej oraz jej miąższość. Zwraca uwagę duża rozpiętość miąższości od 89,0 do 310,0 m. Uwzględniając pozostałe głębokie otwory wykonane w ramach naftowego programu wierceń poszukiwawczych na strukturze Wierzchowo – wartość ta wzrasta do 535 m. Są to dane punktowe, na podstawie których korelacja poziomów zbiornikowych i uszczelniających wymaga uzupełnienia wynikami badań sejsmicznych i to o odpowiednio wysokiej rozdzielczości. Ograniczona rozdzielczość dotychczasowych danych sejsmicznych nie umożliwia kartowania wspomnianych powyżej formacji geologicznych.

2. *Metodyka prac*

Podstawy metody efektywnych współczynników odbicia pod nazwą „Reapak” zostały opracowane w ZSRR w „Sibgeo Nowosybirsk” w latach osiemdziesiątych ubiegłego wieku (Rudnickaja i in. 1987). Jest ona szeroko stosowana w Rosji do dzisiaj w wielu zagadnieniach. Są to zarówno badania utworów jurajskich w związku z poszukiwaniami nieantyklinalnych złóż ropy i gazu, jak i interpretacja głębokich badań sejsmicznych wykonanych w obszarach naftogazowych. W Polsce schemat przetwarzania jest systematycznie udoskonalany i rozbudowywany na podstawie specjalistycznych oprogramowań autorskich z wykorzystaniem odpowiednich podstawowych algorytmów.

Obliczenie efektywnych współczynników odbicia umożliwia przekształcenie falowego obrazu sejsmicznego w impulsową postać zapisów sejsmicznych, czyli w czasowy ciąg współczynników odbicia odwzorowujących kolejne warstwy budujące badany ośrodek geologiczny. Wykorzystuje się w tym celu jedną z najważniejszych cech zapisu sejsmicznego – amplitudę, której wielkość przyjmuje się za proporcjonalną do wielkości współczynnika odbicia dla określonej granicy geologicznej. Pod terminem „efektywności” należy rozumieć charakterystykę impulsową zawierającą nieznacznie mniejszą, lecz kontrolowaną przez system, liczbę elementów odbijających (reakcji impulsowych) niż pierwotna (wyjściowa) trasa sejsmiczna. Kontrola efektywności polega na wykonywaniu wielokrotnych procesów matematycznych aż do momentu uznania, że resztkowa trasa amplitudowa składa się tylko z fal zakłócających. W konsekwencji współczynniki odbicia przedstawiają granice sejsmiczne zgodne z rzeczywistymi granicami danego przekroju.

Współczynnik odbicia określany jest przez prędkość warstwową oraz gęstość ośrodka nad i pod daną granicą odbijającą. Przyjmując założenie, że interwał zmian gęstości jest stosunkowo niewielki w porównaniu z interwałem zmian prędkości (Dziewińska i Józwiak 2000) uznaje się, że współczynnik odbicia zależy w głównej mierze od zmian prędkości. Przekroje otrzymuje się w formie kreskowej. Na sekcji współczynników odbicia poziome linie wyznaczają położenie efektywnych granic odbijających pomiędzy dwoma ośrodkami różniącymi się prędkościami, a pionowe kreski wskazują znak i wielkość współczynników odbicia, który jest funkcją różnic (zmian) prędkości dwóch sąsiednich warstw. Długość pionowych kresek jest proporcjonalna do wartości współczynnika odbicia, tzn. do różnicy prędkości sąsiadujących ze sobą warstw. Położenia kreski w górę od granicy odpowiadają

dodatnim znakiem współczynnika, tzn. charakteryzują stosunki prędkości, w których warstwa nadległa posiada prędkość mniejszą od warstwy leżącej poniżej, a w dół – ujemnym, tzn. o przeciwnej charakterystyce (warstwa nadległa posiada prędkość większą od warstwy leżącej poniżej). Kierunek impulsów ułatwia rejestrację zmian zachodzących w granicach. Litologię kompleksów uwzględnia się poprzez zaliczanie warstw do tego samego kompleksu na podstawie współczynników odbicia o podobnym charakterze.

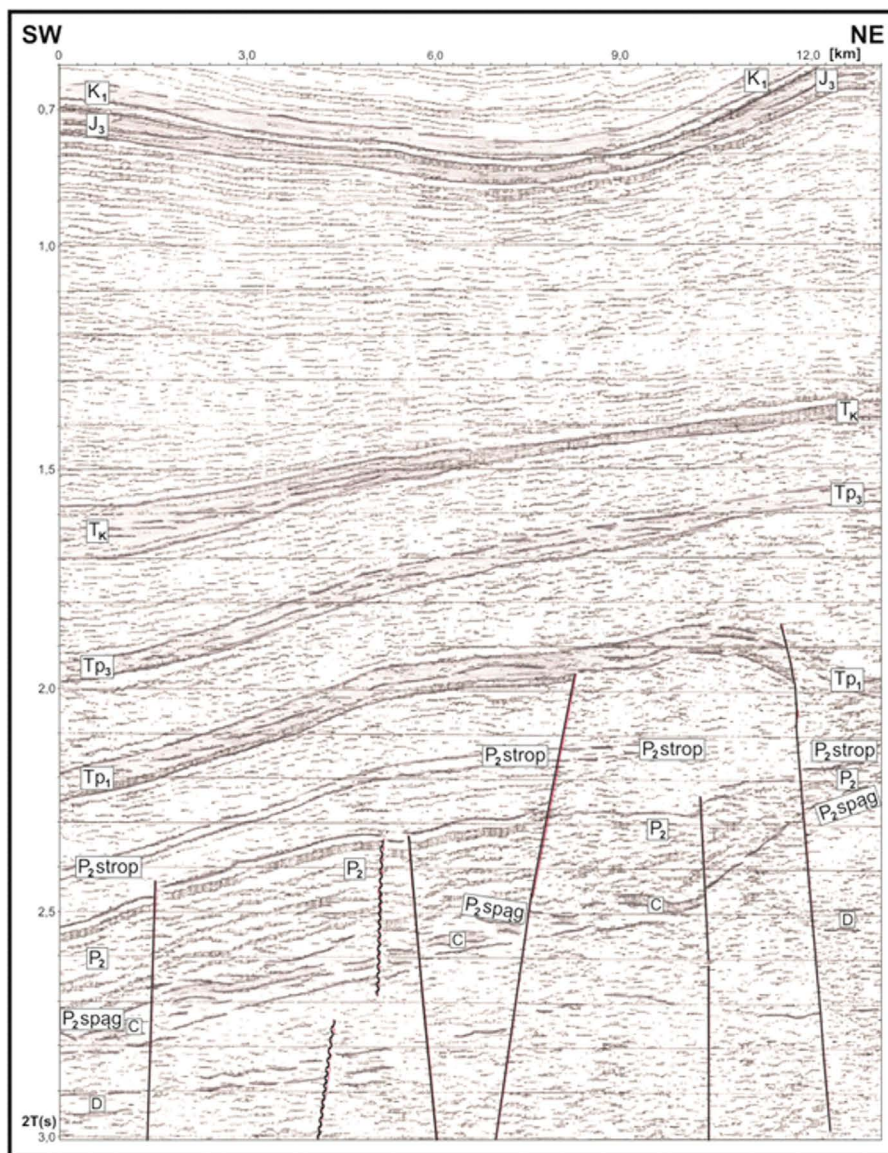
W ten sposób na przekrojach EWO można prześledzić położenie granic efektywnych, ustalić znak efektywnego współczynnika odbicia i jego wielkość związaną z intensywnością odbitej fali. Względne zmiany wielkości współczynników odbicia umożliwiają wyróżnienie śledzonych serii z ogólnego obrazu sekcji sejsmicznej. W przedstawionej metodzie odtworzone na sekcjach granice odpowiadają rzeczywistym granicom geologicznym przy rozdzielaniu do czterech sygnałów elementarnych interferujących z przesunięciem większym od $0,25 T$, gdzie T jest okresem sygnału elementarnego. Odpowiada to warstwom o miąższości około 15 metrów. Rozdzielenie interferencyjnych sygnałów zwiększa możliwość wydzielenia granic sejsmicznych w stosunku do obrazu falowego. Zastosowanie tego sposobu przekształcenia tras sejsmicznych stwarza warunki do bardziej szczegółowego odwzorowania przekroju geologicznego aniżeli na amplitudowej sekcji sejsmicznej, z równoczesną charakterystyką układu geometrycznego i fizycznego budujących go warstw.



3. Interpretacja sekcji EWO

Interpretacja sekcji EWO dla rejonu Wierzchowo obejmująca utwory mezozoiku, permu i podpermskie została wykonana według jednolitych kryteriów poprzez wyznaczenie dominujących kompleksów litologiczno-stratygraficznych wyróżniających się ciągłością korelacji, wielkością i znakiem współczynnika odbicia oraz w wyniku wyznaczenia linii tektonicznych. Dowiązanie litologiczno-stratygraficzne korelowanych kompleksów do otworów wiertniczych ułatwiło to zadanie.

W trakcie interpretacji na sekcjach EWO wyróżniono i przyporządkowano grupy współczynników określonym warstwom, które dość dobrze korelują się na dłuższych odcinkach profili. Interpretacja została oparta na śledzeniu poszczególnych współczynników i ich pakietów, jak również obserwacji kontynuowania się granic oraz wszelkich stref zaburzeń ciągłości. Istotną informacją są zmiany kierunków ułożenia granic lub całych pakietów, a także zmiany kąta nachylenia linii i miejsca przerwania ciągłości. W wyniku analizy sekcji EWO uzyskano możliwość określenia kierunków zapadania granic odbijających oraz linii nieciągłości litologiczno-tektonicznych. Na podstawie charakterystycznego ułożenia warstw zostały zidentyfikowane strefy uskokowe.

Strukturę Wierzchowo reprezentują cztery przekroje: przekrój falowy (rys. 2) stanowiący fragment przekroju GB1-III-86/89 oraz trzy sekcje EWO (Żelichowski red. 1995): 9-III-90T (rys. 3), 21-III-91T (rys. 4) oraz 26-III-91T (rys. 5) – przekrój podłużny. Profile obejmują swym zasięgiem SW zbocze antykliny i przedział czasowy $2T$ od 0,6 do 3,3 sek., co odpowiada głębokości ponad 5000 m. Przekroje zawierają informacje o budowie kompleksu cechsztyńsko-mezozoicznego (również kompleksu utworów podcechsztyńskich nieanalizowanych szerzej w pracy) oraz przebiegu najważniejszych nieciągłości tektoniczno-litologicznych.

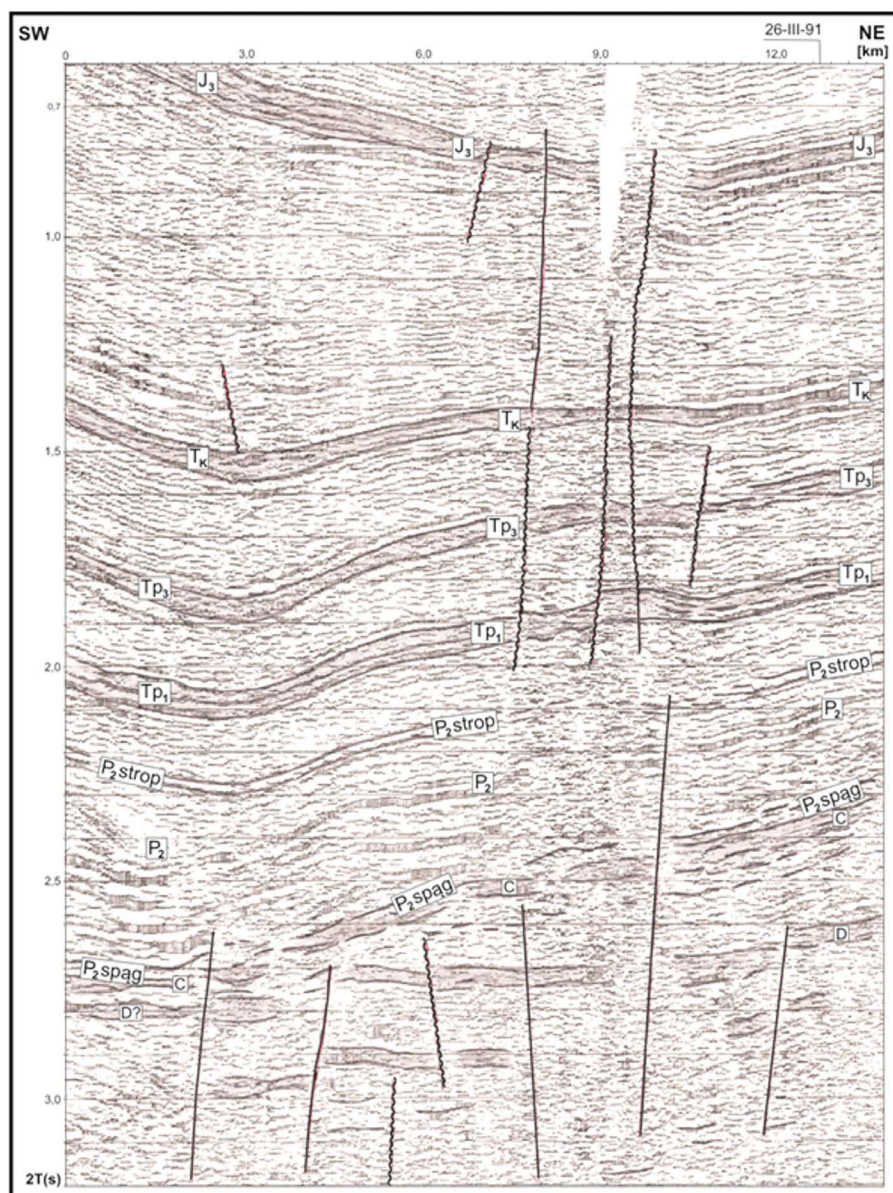


-  Wydzielone granice współczynników obicia
 Uskoki i linie (strefy) nieciągłości litologiczno-tektoniczne
- | | | |
|----------------------------------|--|---|
| K₁ kreda dolna | Tp₃ górny pstry piaskowiec | P₁ czerwony spagowiec |
| J₃ jura górna | Tp₁ dolny pstry piaskowiec | C karbon |
| T_k kajper | P₂ cechszyn | D dewon |

Rys. 3. Struktura Wierzchowo – sekcja EWO (przekrój 9-III-90T)

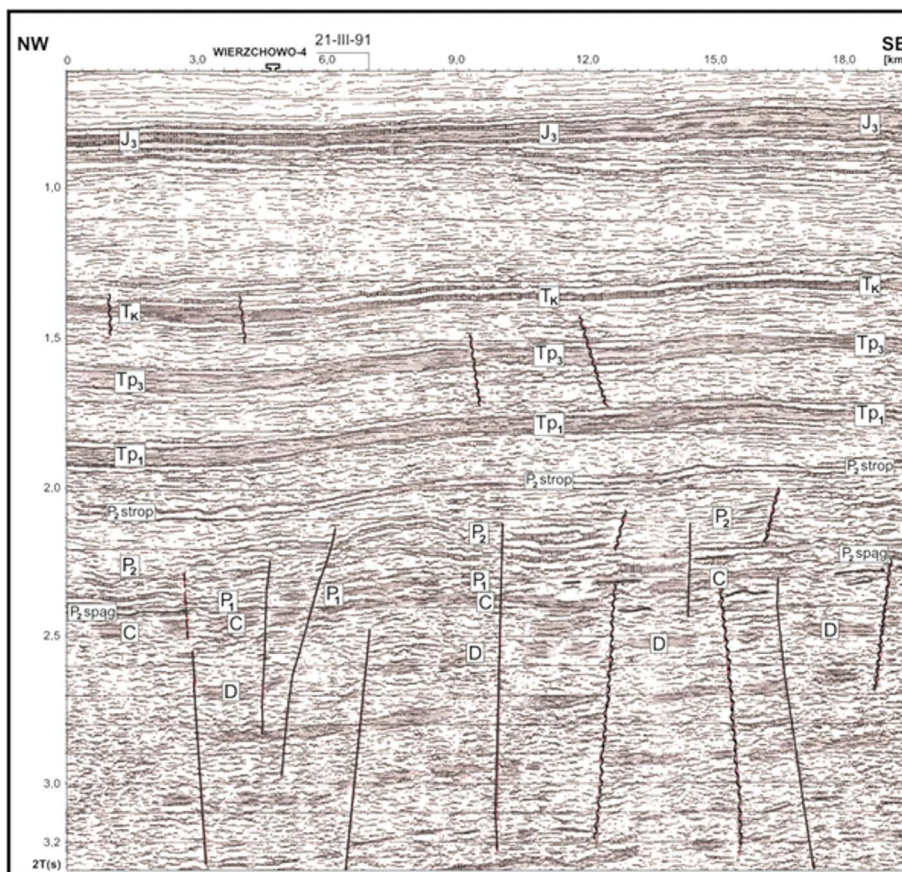
Fig. 3. Wierzchowo structure – ERC section (section 9-III-90T)

Na przekrojach zaznacza się forma antyklinalna inwersyjna w stosunku do wyżej leżącej w kompleksie kredowo-jurajskim formy synklinalnej (SW skrzydło struktury jurajskiej). Forma wyniesiona Wierzchowa przedstawia budowę blokową z kolejnymi uskokami zrzucającymi za każdym razem skrzydło południowe. Jest to układ uskoków angażujących warstwy stropowe cechsztynu i mezozoiku, jak również zaburzających głównie niżej zale-



Rys. 4. Struktura Wierzchowo – sekcja EWO (przekrój 21-III-91T). Objasnienia jak na rys. 3

Fig. 4. Wierzchowo structure – ERC section (section 21-III-91T)



Rys. 5. Struktura Wierzchowo – sekcja EWO (przekrój 26-III-91T). Objasnienia jak na rys. 3

Fig. 5. Wierzchowo structure – ERC section (section 26-III-91T)

gające utwory karbonu i dewonu, tworzący w wyniku system bloków. W pełni wiarygodny i dobrze czytelny jest również kompleks pokrywy cechsztyńsko-mezozoicznej oddzielający się wyraźnie od dołu granicami z partii przyspągowej P2, śledzony w sposób prawie ciągły wzdłuż całej długości przekrojów. Wewnętrzną budowę tego kompleksu charakteryzują granice kredy dolnej, jurajskie, triasowe oraz cechsztyńskie.

Interpretacja zróżnicowanego obrazu EWO stanowiła podstawę do wyróżnienia kompleksów o odmiennym wykształceniu litologicznym w stosunku do otoczenia. Poniżej przedstawiono najbardziej istotne informacje wynikające z przeprowadzonej interpretacji.

Granica J3 stanowi najbardziej dynamiczną granicę korelującą się w sposób ciągły między jurą a kredą. Ten horyzont sejsmiczny wiąże się ze spągami utworów kredy na kontakcie z przystropowymi utworami wapieni oksfordu jury górnej (J3). Charakteryzuje się on bardzo dużymi prędkościami wykazującymi bardzo małe zróżnicowanie. W obrębie utworów jury środkowej i dolnej charakter ułożenia granic i intensywność zapisu współczynników odbicia na całej długości interpretowanych przekrojów są zbliżone. Układ granic w obrębie tego

kompleksu jurajskiego wskazuje na występowanie naprzemianległych warstewek mułowcowo-ilastych z przewarstwieniami piaskowcowymi.

Utworom triasu zostały przyporządkowane trzy główne granice: T_k – przystropowe utwory kajpru, Tp_3 – przystropowe utwory górnego pstręgo piaskowca i Tp_1 – przystropowe utwory dolnego pstręgo piaskowca. Obraz sejsmiczny EWO wyznacza dość jednolitą cienkoarstwową strefę o małej miąższości utworów kajpru. Kompleks skał zawarty między serią utworów T_k i Tp_3 (w tym trias środkowy) wykazuje na przekrojach 9-III-90T (rys. 3) i 21-III-91T (rys. 4) wzrost miąższości z NE w kierunku SW. Na profilu 21 jest on znaczny.

Budowę geologiczną dolnego triasu (pstry piaskowiec) charakteryzują dwie granice Tp_3 (ret) i Tp_1 , między którymi wydziela się szczególnie dla nas interesujący poziom zbiornikowy formacji połczyńskiej i podścielające go utwory formacji pomorskiej. Charakter EWO wskazuje na odrębność litologiczną i granicę między warstwami Tp_3 , wykształconymi głównie w facji węglanowej z przeławieniami iłowców i mułowców, a niżej leżącymi utworami.

Poniżej warstw retu interpretacja EWO pozwoliła na wydzielenie serii odpowiadającej formacji połczyńskiej stanowiącej poziom zbiornikowy dla składowania dwutlenku węgla. Wyżej leży pakiet utworów tworzy serię uszczelniającą dla tego poziomu. Zaprezentowany obraz sejsmiczny potwierdza piaskowcowe wykształcenie formacji połczyńskiej z nielicznymi wkładkami iłowcowo-mułowcowymi, występującymi głównie w części dolnej kompleksu. Określenie rozkładu podrzędnych przewarstwień ilastych, jako obniżających zdolności zbiornikowe, jest istotną informacją. Utwory tej serii na przekrojach 21-III-91T (rys. 4) i 26-III-91T (rys. 5) charakteryzują się stałą miąższością z lokalnymi tylko wahaniami.

Natomiast na profilu 9-III-90T (rys. 3) w jego NE części obserwuje się bardzo duży wzrost miąższości utworów zalegających między horyzontami Tp_3 i Tp_1 z jednoczesnym znacznym zmniejszeniem miąższości skał P2. Zaburzenia ciągłości litologiczno-tektonicznej granic obejmujące utwory paleozoiku i dolnego pstręgo piaskowca oraz towarzyszące im zmiany formy zapisu sejsmicznego potwierdzają anomalny charakter tej strefy.

Granice w części stropowej kompleksu zbiornikowego charakteryzują się zmienną intensywnością zapisu w różnych częściach przekroju – słabszą w części SW. Jej przebieg jest nieregularny, obrazujący fleksuralne ugięcia. Kompleks tych utworów charakteryzuje się zasadniczo mniejszą intensywnością zapisu w stosunku do wyżej wspomnianych, słabą ciągłością śledzenia granic sejsmicznych, często nieregularnym ułożeniem względem siebie oraz względem granic wyżej i niżej leżących. Zwracają uwagę strefy zaniku granic lub ich chaotyczne ułożenie, które mogą być związane z utworami o innych parametrach fizycznych w stosunku do otoczenia.

Wyznaczenie w obrazie EWO ostrej granicy między utworami formacji połczyńskiej i formacji pomorskiej było trudne do przeprowadzenia ze względu na zbliżoną mułowcowo-ilastą litologię warstw spągowych formacji połczyńskiej i stropowych formacji pomorskiej. Na przekrojach obserwuje się ciągle przechodzenie najniższych części formacji połczyńskiej w najwyższą część formacji pomorskiej. Taki układ zwiększa miąższość iłowcowo-mułowcowego kompleksu podścielającego warstwy zbiornikowe, co należy uznać za fakt korzystny dla składowania dwutlenku węgla. Natomiast pasma zwiększonych EWO zarejestrowane w części przyspągowej formacji pomorskiej mogą być związane z poszczególnymi warstwami piaskowców, występującymi wśród utworów iłowcowo-mułowcowych tego kompleksu.

Ta sytuacja stwarza fizyczne warunki, które pozwoliły na wyznaczenie na sekcjach EWO horyzontu Tp_1 . Zanotowany poniżej dość monotony litologicznie obraz ilustruje, zgodnie z danymi geologicznymi, iłowcowo-mułowcowy kompleks skał formacji bałtyckiej (pstry piaskowiec dolny).

Poniżej osadów mezozoicznych zostały wyznaczone horyzonty związane ze stropem i spągiem P2 oraz granice z utworów śródcechsztyńskich. Jest to obraz skał węglanowych w otoczeniu utworów solnych i anhydrytów, urozmaicony lokalną tektoniką. Wyznaczono również granice odbijające z kompleksu karbońsko-dewońskiego zakłócone licznymi strefami dyslokacyjnymi. Osady dewońskie w stosunku do nadkładu przedstawiają odmienny układ strukturalny.

Zauważono, że system spękań w podłożu P2 kontynuuje się często w górę w postaci silnych zaburzeń obrazu sejsmicznego. Dla dwóch z nich występujących w części środkowej przekroju 21 (rys. 4) stwierdzone zakłócenia w ciągłości warstw zdefiniowano jako linie nieciągłości tektoniczno-litologicznej. Strefa ta naruszająca kolejne warstwy, aż do J3 tworzy gęstą sieć spękań, obejmującą swym zasięgiem również skały poziomu zbiornikowego formacji połczyńskiej (przekrój 21 i 26 – rys. 4 i 5) oraz utwory położone bezpośrednio nad i pod nią.

Podsumowanie

W artykule zaprezentowano wyniki interpretacji 3 sekcji w wersji współczynników odbicia dla struktury Wierzchowa. Pozwalają one na pełniejsze wykorzystanie cech zapisu sejsmicznego w rozpoznaniu budowy geologicznej. Poprzez dowiązanie do otworów wiertniczych dają możliwość interpretacji odzwierciedlającej litologiczne i tektoniczne zmiany wzdłuż analizowanych przekrojów. Wykonana interpretacja istotnie wzbogaciła zakres informacji przedstawianych w standardowych dokumentacjach sejsmicznych.

Zaprezentowane sekcje EWO charakteryzują układ geometryczny i fizyczny poszczególnych warstw geologicznych zalegających w kompleksie mezozoicznym struktury Wierzchowa. Dodatkowo obejmują swym zasięgiem przedział utworów paleozoicznych, ilustrując relacje zachodzące między strukturami płytszymi i głębszymi.

Uwzględniając dane geologiczne z otworów przebijających strukturę, zidentyfikowano i skorelowano wzdłuż przekrojów kompleksy skalne oraz strefy nieciągłości tektonicznych. Scharakteryzowano poziom o zwiększonej zawartości piaskowców formacji połczyńskiej, zaproponowany wcześniej do składowania CO_2 . Stwierdzono w nim występowanie podrzędnych przewarstwień ilastych. Oceniając przydatność wyznaczonego poziomu zbiornikowego do składowania CO_2 należy również zwrócić uwagę na zaburzenia tektoniczne występujące w obrębie formacji połczyńskiej i uszczelniającej, przechodzące do wyżej zalegających warstw. Stwierdzone spękania znacząco obniżają przydatność rozpatrywanej struktury do składowania dwutlenku węgla. Jej wykorzystanie w tym celu wymaga przeprowadzenia dodatkowych badań szczelności nadkładu.

Na podstawie istniejących danych geofizycznych możliwe było uzyskanie nowych informacji o szczegółach budowy potencjalnego miejsca składowania dwutlenku węgla. Mogą one pomóc w efektywnym zaprojektowaniu kosztownych, uzupełniających badań geologicznych i geofizycznych. Wydaje się celowe szersze zastosowanie, także dla

innych struktur, procesu przetwarzania materiałów sejsmicznych w postać efektywnych współczynników odbicia z zadaniem rozpoznania budowy geologicznej przypuszczalnych poziomów zbiornikowych pod kątem określenia ich przydatności do składowania gazów przemysłowych.

Praca została zrealizowana w ramach działalności statutowej IGSMiE PAN.

Literatura

- Chelmiński i in. 2010 – Chelmiński, J., Nowacki, Ł., Papiernik, B. i Tomaszczyk, M. 2010. Baza danych oraz szczegółowy model geologiczny 3D dla podziemnego składowania CO₂ w rejonie Belchatowa na przykładzie struktury Budziszewic. *Biul. Państw. Inst. Geol.* 439, s. 53–58.
- Dadlez i in. 2000 – Dadlez, R., Marek, S. i Pokorski, J. red. 2000. *Mapa geologiczna Polski bez utworów kenozoiku*, 1:1 000 000. Warszawa: PIG.
- Dadlez, R. red. 1998. *Mapa tektoniczna kompleksu cechsztyńskiego-mezozoicznego na Niżu Polskim*. Warszawa: PIG.
- Dziewińska, L. i Józwiak, W. 2000. Zmiany litologiczne w utworach karbonu rowu lubelskiego w świetle interpretacji geofizycznej. *Biuletyn Państwowego Instytutu Geologicznego* 392, s. 5–48.
- Dziewińska, L. i Petecki, Z. 2004. Kompleksowa interpretacja badań geofizycznych północnego obrzeżenia Gór Świętokrzyskich. *Instrukcje i metody badań geologicznych* 58, s. 1–107. Warszawa: PIG.
- Dziewińska i in. 2011 – Dziewińska, L., Petecki, Z. i Tarkowski, R. 2011. Budowa geologiczna utworów permu struktury Wilków (monoklina przedsudecka) w świetle interpretacji sekcji współczynników odbicia. *Przeгляд Гóрниczy* 67, s. 64–72.
- Dziewińska, L. i Tarkowski, R. 2012. Budowa geologiczna struktury Choszczna (niecka szczecińska) w świetle interpretacji sekcji efektywnych współczynników odbicia dla potrzeb podziemnego składowania CO₂. *Gospodarka Surowcami Mineralnymi – Mineral Resources Management* 28, s. 173–184.
- Feldman-Olszewska i in. 2012 – Feldman-Olszewska, A., Adamczak-Biały, T. i Becker, A. 2012. Charakterystyka poziomów zbiornikowych i uszczelniających formacji jury i triasu północnego Mazowsza pod kątem geologicznego składowania CO₂ na podstawie danych z głębokich otworów wiertniczych. *Biuletyn Państwowego Instytutu Geologicznego* 448, 1, s. 27–46.
- Katalogi wierceń Górnictwa Naftowego w Polsce, 1971–1979*. Warszawa: Wyd. Geologiczne.
- Marek, S. i Pajchłowa, M. red. 1997. Epikontynentalny perm i mezozoik w Polsce. *Prace Państwowego Instytutu Geologicznego* 153. Warszawa.
- Rudnickaja i in. 1987 – Rudnickaja, D.J., Danienberg, E.E. i Bielozerow, W.B. 1987. *Principy wydzielenia sejsmicyklotów w kontynentalnych otłożeniach jury Zapadno-Sibirskoj plity w swiazi s poiskami nieantiklinalnych залежей нефти i gazu [W:] Příkladnyje woprosy sedimentacjonnoj ciklicznosti i nieftegazonosnosti*. Nowosibirsk-Nauka, s. 67–72.
- Speczik i in. 2011 – Speczik, S., Dziewińska, L., Pepel, A. i Józwiak, W. 2011. Możliwość wykorzystania impulsowej postaci zapisu sejsmicznego do rozpoznania złóż prognostycznych miedzi i srebra w północnej części monokliny przedsudeckiej. *Zeszyty Naukowe IGSMiE PAN* 81, s. 117–135.
- Tarkowski, R. red. 2010. Potencjalne struktury geologiczne do składowania CO₂ w utworach mezozoiku Niżu Polskiego (charakterystyka oraz ranking). *Studia, Rozprawy, Monografie* 164, s. 1–138, IGSMiE PAN.
- Wróbel, G. i Kijewska, S. 2010. Charakterystyka struktury Zaosia pod kątem jej przydatności do geologicznego składowania dwutlenku węgla – wyniki interpretacji danych sejsmiki refleksyjnej. *Biuletyn Państwowego Instytutu Geologicznego* 439, s. 29–36.
- Znosko, J. red. 1998. *Atlas tektoniczny Polski 1:500 000*. Warszawa: PIG.
- Żelichowski, A.M. red. 1995. *Budowa geologiczna piętra warysycyjskiego i pokrywy permskiej rejonu Wierzchowo-Koszalin*, Centralne Archiwum Geologiczne Państwowego Instytutu Geologicznego, Warszawa.

