

## MODELOWANIE ELEMENTÓW GEOLOGICZNEGO RYZYKA SKŁADOWANIA CO<sub>2</sub> Z WYKORZYSTANIEM PROGRAMU PETREL NA PRZYKŁADZIE ANALIZY RYZYKA STRUKTURALNEGO ANTYKLINY ZAOSIA

### MODELLING CONSTITUENTS OF GEOLOGICAL RISK OF THE CARBON CAPTURE AND STORAGE (CCS) USING THE EXAMPLE OF PETREL-BASED STRUCTURAL UNCERTAINTY ANALYSIS OF THE ZAOSIE ANTICLINE

BARTOSZ PAPIERNIK<sup>1</sup>, MICHAŁ MICHNA<sup>2</sup>

**Abstrakt.** W artykule przedstawiono wyniki wstępnej analizy ryzyka geologicznego przestrzennego modelu strukturalnego (3D) antykliny Zaosia. zilustrowano je na przykładzie analizy ryzyka (*Uncertainty Analysis*) powierzchni stropu warstw ciechocińskich – potencjalnego uszczelnienia dolnojurajskiego układu sekwencyjnego. Artykuł skupia się na aspektach metodycznych modelu ryzyka, jednak uzyskane wyniki mają praktyczne znaczenie dla podniesienia bezpieczeństwa i zwiększenia wiarygodności geometrii modelu potencjalnej struktury magazynowej. Pokazują one, że do jednoznacznej oceny amplitudy i geometrii zamknięcia antykliny niezbędne jest wprowadzenie dodatkowych danych wejściowych.

**Słowa kluczowe:** ryzyko geologiczne, modelowanie 3D, modelowanie strukturalne, składowanie dwutlenku węgla.

**Abstract.** The article presents the results of a preliminary risk analysis of the spatial geological structural model (3D) of the Zaosie Anticline. They are illustrated by the example of structural uncertainty analysis of the top surface of the Ciechocinek Beds – a potential seal of the Lower Jurassic CCS system. The article focuses on methodological aspects of uncertainty modelling, however, the results obtained have practical importance for improving the safety and enhance the credibility of the geometry of the potential storage structure model. They show that it is necessary to introduce additional input data for unambiguous assessment of the amplitude and geometry of the anticline closure.

**Key words:** geological risk, uncertainty analysis, 3D modeling, structural modeling, Carbon Capture and Storage (CCS).

### WSTĘP

Badania nad magazynowaniem substancji w formacjach geologicznych rozpoczęto w latach 70. XX wieku. Początkowo dotyczyły one wykorzystania struktur geologicznych pod kątem składowania w nich odpadów radioaktywnych. Idea podziemnego magazynowania CO<sub>2</sub> (CCS) pojawiła się w latach 90. ubiegłego wieku (Pearce i in., 1996). Poglądy na temat magazynowania ewoluowały od tego czasu, prowadząc do zdefiniowania pięciu głównych mechanizmów

uwięzienia CO<sub>2</sub> w warunkach podpowierzchniowych. Do najbardziej efektywnych należy zaliczyć magazynowanie w strukturach zawodnionych. W projektach SACS, SACS2 oraz CO<sub>2</sub>STORE rozpoczętych od 1998 roku badano możliwości wykorzystania formacji solankowych do sekwestracji CO<sub>2</sub> na skalę przemysłową, uwzględniając czynniki ekonomiczne i geologiczne (CO<sub>2</sub>GEOSTORE; Chadwick i in., 2008; Stolarz, 2009; Tarkowski i in., 2009). Do najistotniej-

<sup>1</sup> Katedra Surowców Energetycznych, Wydział Geologii, Geofizyki i Ochrony Środowiska AGH, al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków; e-mail: papiern@geol.agh.edu.pl

<sup>2</sup> Wydział Geologii, Geofizyki i Ochrony Środowiska, Akademia Górniczo-Hutnicza, al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków; e-mail: michna@agh.edu.pl

szych geologicznych czynników ryzyka składowania należą jakość kompleksów zbiornikowych i ich uszczelnienia (Tarkowski i in., 2005; Chadwick i in., 2008).

Szczelność nadkładu potencjalnych zbiorników ma kluczowe znaczenie dla bezpieczeństwa składowania CO<sub>2</sub>. Wpływa na nią m.in. odpowiednia miąższość i lateralna ciągłość kompleksów uszczelniających, brak uskoku rozcinających nadkład (Chadwick i in., 2008; Stolarz, 2009; Tarkowski i in., 2009). Bezpieczeństwo i ekonomiczna opłacalność potencjalnego magazynu gazu jest w ogromnej mierze uzależniona od jego geometrii. Zagadnienia oceny ryzyka modelu strukturalnego mają szczególne znaczenie w przypadku rozległych spłaszczonych struktur o niewielkiej amplitudzie i słabo zdefiniowanym zamknięciu struktural-

nym (Holloway i in., 2003), w których nieznaczne, kartowane sejsmicznie zmiany geometrii mogą w zasadniczy sposób wpływać na drogi i/lub kierunek migracji CO<sub>2</sub> w obrębie struktury i poza nią. Wielu autorów (Bu i in., 1996; Siemek, Nagy, 2004) podaje, że 75% niepewności jest związane z parametrami strukturalnymi i geologicznymi, a tylko 25% z parametrami petrofizycznymi.

Wstępne modelowanie ryzyka strukturalnego autorzy wykonali dla granic pięciu sekwencji stratygraficznych w rejonie antykliny Zaosia. Uzyskane wyniki zilustrowano w artykule na przykładzie modelu powierzchni strukturalnej stropu warstw ciechocińskich, stanowiących potencjalne uszczelnienie dolnojurajskiego układu sekwestracyjnego.

## MODEL STRUKTURALNY ANTYKLINY ZAOSIA

Do opracowania elementów składowych modelu ryzyka strukturalnego autorzy wykorzystali opracowany w KSE AGH, w programie Petrel 2009.1, trójwymiarowy model statyczny (grid 3D), obejmujący pięć sekwencji stratygraficznych (*zones*): A – toark górny, B – warstwy ciechocińskie (toark dolny), C – pliensbach, D – synemur–hetang, E – retyk.

Powierzchnie stropowe sekwencji B, C i D, oraz spągów sekwencji E obliczono na podstawie strukturalnych map

sejsmicznych przygotowanych przez zespół pracowników PIG–PIB Warszawa (Wójcicki i in., 2010), w formie gridów 2D, dowiązując je ponownie do danych otworowych na badanym obszarze. Dodatkowo wykorzystując wyniki modelowania miąższości, w pierwszym etapie tematu (Górecki i in., 2009), do modelu wprowadzono sekwencję stropu toarku górnego (strop sekwencji A oraz powierzchnię stropu triasu (spąg sekwencji D i strop sekwencji E).

## OCENA RYZYKA INTERPRETACJI STRUKTURALNEJ

Do kluczowych czynników warunkujących jakość struktury magazynowej i jej pojemność autorzy zaliczyli jej geometrię. W świadomości wielu geologów wyniki interpretacji sejsmiki oraz jej późniejsze kartowanie w formie map przedstawia wyważone, wspomagane doświadczeniem, najbardziej prawdopodobne rozwiązanie strukturalne badanego obszaru. Rozwój technik komputerowych wykorzystywanych do wspomagania procesu interpretacji sejsmiki, modelowania prędkości oraz kartowania wgłębnego pokazuje jednak, że na podstawie tego samego zbioru danych wejściowych można uzyskać w zasadzie nieskończoną liczbę rozwiązań (Dubrule, 1998, 2003; Mallet, 2008). Czynniki, które wpływają na wiarygodność uzyskanych wyników są jakość danych wejściowych i ich przestrzenna dystrybucja.

Zła jakość danych wpływa głównie na poprawność interpretacji sejsmiki refleksyjnej oraz dokładność modelu prędkościowego użytego do konwersji czasowo-głębokościowej.

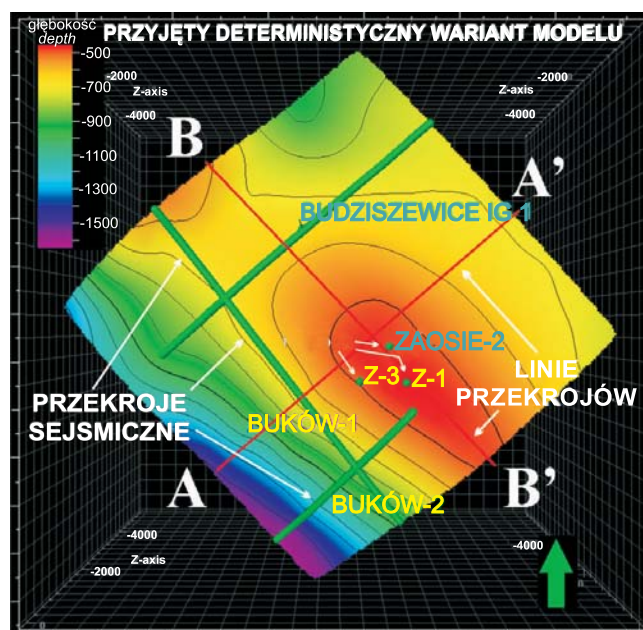


Fig. 1. Lokalizacja profili sejsmicznych i odwiertów na tle deterministycznego wariantu mapy strukturalnej stropu warstw ciechocińskich

Location of seismic profiles and boreholes in the deterministic version of the Ciechocinek Beds top structure map

Przestrzenna dystrybucja danych wejściowych wpływa zaś na wyniki przestrzennego kartowania granic sekwencji geologicznych. Nowoczesne oprogramowanie komputerowe umożliwia ocenę wszystkich wymienionych elementów w procesie interpretacji. W programie Petrel statystyczną optymalizację procesu interpretacji strukturalnej umożliwiają elementy procedury *Uncertainty Analysis*. W wykonanych badaniach autorzy skupili się na ocenie wielkości ryzyka związanego wyłącznie z procesem modelowania powierzchni strukturalnych budujących osnowę geometryczną modelu struktury Zaosia.

Do opracowania siatek interpolacyjnych (gridów 2D), stanowiących dane wejściowe dla modelowania strukturalnego, wykorzystano wyniki interpretacji strukturalnej trzech profili sejsmicznych oraz stratygrafię sześciu odwiertów położonych w rejonie antykliny Zaosia (fig. 1). Mała ilość i nierównomierna przestrzenna dystrybucja danych wejściowych umożliwiają stworzenie bardzo wygładzonych „deterministycznych” modeli geometrii struktury (fig. 1, 2A). Wiarygodność takiej interpretacji może być jednak stosunkowo niska, co pokazują wyniki zastosowania procedury *Uncertainty Analysis*, wykorzystanej przez autorów do obliczenia alternatywnych, stochastycznych wariantów powierzchni strukturalnych wchodzących w skład modelu 3D (*horizons*).

Stochastycznie oceniane ryzyko jest obliczane z wykorzystaniem poniższego równania:

$$S_r = S_{bc} + U_{1s} \cdot U_{sgs}$$

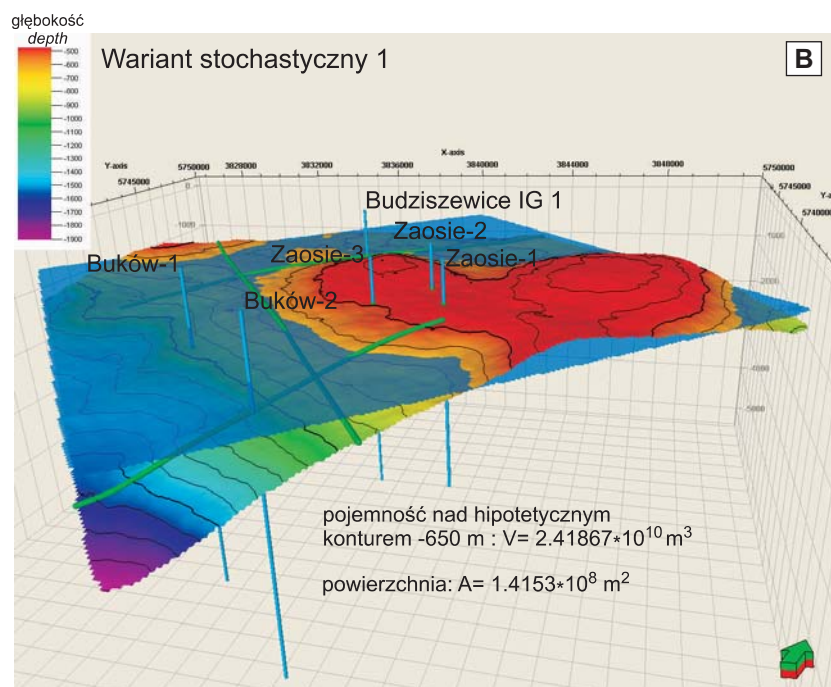
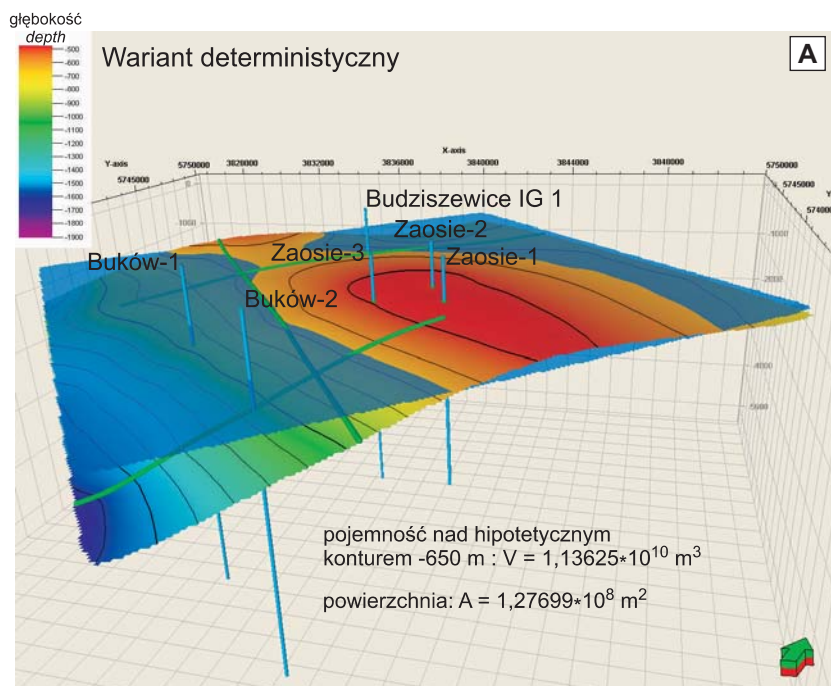
gdzie:

$S_r$  – obliczony wariant powierzchni (*surface realization*);

$S_{bc}$  – wejściowa powierzchnia obliczana w sposób deterministyczny;

$U_{1s}$  – błąd głębokości wynoszący 1 odchylenie standardowe (s) (może być powierzchnią lub wartością stałą);

$U_{sgs}$  – powierzchnia obliczona algorytmem SGS (średnia = 0, s = 1, jej odchyłka od powierzchni wejściowej w miejscu występowania danych wejściowych wynosi 0).



**Fig. 2. Struktura Zaosia obserwowana w stropie warstw ciechocińskich wraz z hipotetycznym konturem złoża**

A. Model deterministyczny. B. Model stochastyczny – wariant I

The shape of the Zaosie structure observed at the top of Ciechocinek Beds together with a hypothetical gas–water contact

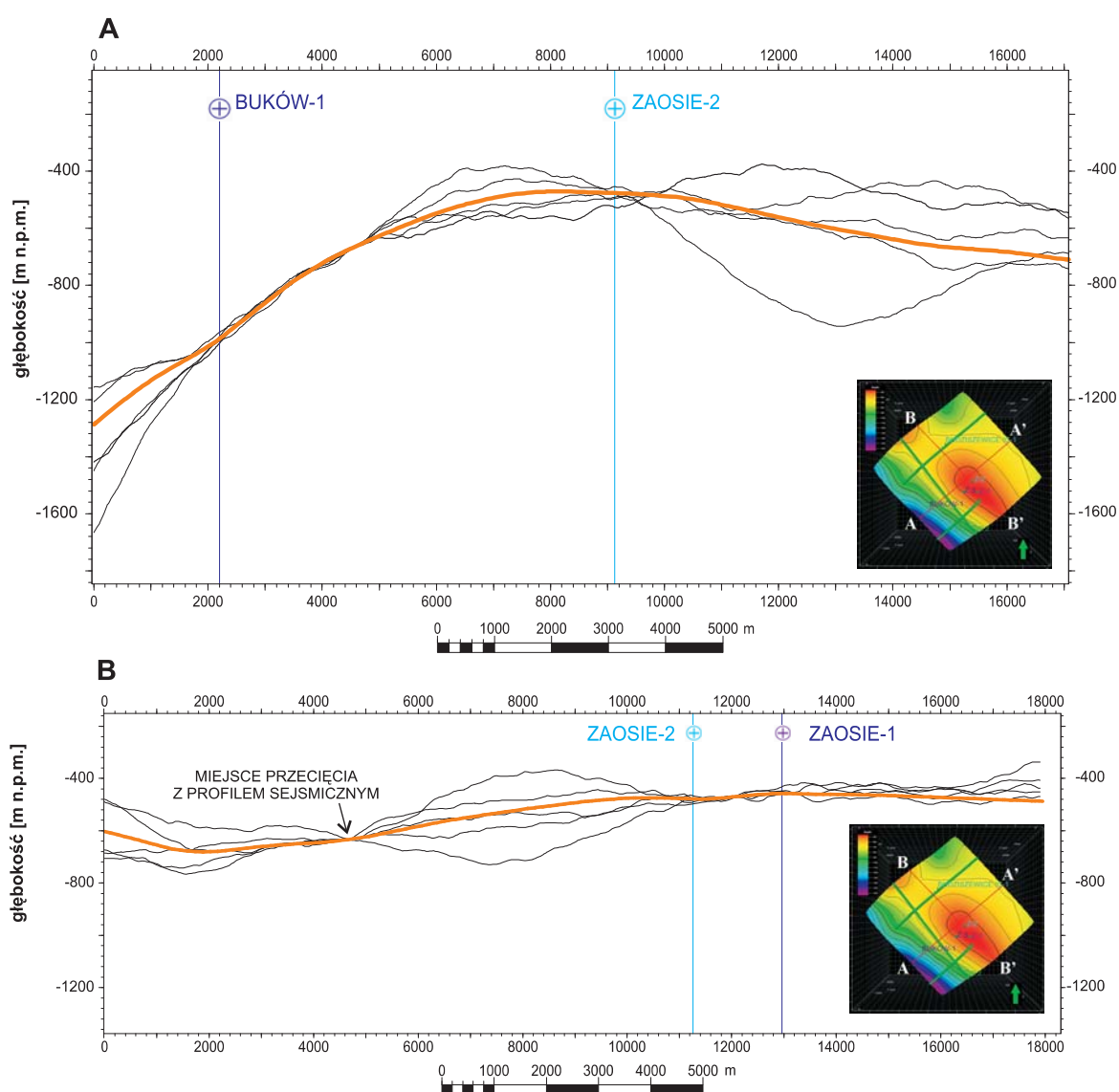
A. Deterministic model. B. Stochastic model – realization I



Opracowane modele stochastyczne charakteryzują się pełną zgodnością z danymi wejściowymi (interpretacje sejsmiki i wierceń), natomiast w strefach nie kontrolowanych danymi wykazują odchyłkę od modelu zamykającą się w granicach odchylenia standardowego. **Figura 2B** ilustruje jeden z możliwych, równie prawdopodobnych wariantów ukształtowania powierzchni strypu warstw ciechocińskich, stanowiących uszczelnienie potencjalnego dolnojurajskiego układu sekwestracyjnego. Więcej możliwych, równie prawdopodobnych, rozwiązań modelu strukturalnego tej powierzchni ukazuje w formie przekroju **figura 3**. Ujawnia on, że deterministyczny wariant powierzchni strukturalnej jest w przybliżeniu odpowiednikiem średniej obliczonej z wariantów stochastycznych, jednak prawdopo-

dobieństwo znacznych odchyłeń kartowanej powierzchni strukturalnej od modelu jest bardzo znaczne. Pełną zgodność modelu deterministycznego i wariantów stochastycznych uzyskują w punkcie przecięcia linii przekroju z profilem sejsmicznym (**fig. 1, 3**). W rejonie odwiertów Zaosie-1 i Zaosie-2 jest widoczna nieznaczna rozbieżność dyskusyjnych wariantów, gdyż ślad przekroju nie przebiega przez odwierty.

Sytuacja uwidoczniiona na **figurze 3** wskazuje, że w strefach słabo kontrolowanych danymi przewidywanie rzeczywistej geometrii struktury jest wysoce hipotetyczne, bowiem odchyłki poszczególnych równie prawdopodobnych modeli sięgają w pionie kilkuset metrów w strefie osiowej struktury oraz na ich krawędziach.



**Fig. 3.** Ukształtowanie powierzchni strypu warstw ciechocińskich w wariantach stochastycznych i deterministycznym

A. Przekrój poprzeczny A–A'. B. Przekrój podłużny B–B'

Stochastic and deterministic variants of variability of the Ciecocińskie Beds top structure

A. Transverse cross-section A–A'. B. Longitudinal cross-section B–B'

W celu zilustrowania możliwych rozbieżności między potencjalnie rzeczywistym rozmiarem struktury, a jej uśrednionym rozmiarem wyznaczono hipotetyczny kontur struktury magazynowej na głębokości 650 p.p.m. Powierzchnia

struktury położonej nad konturem wynosi w wariancie deterministycznym (fig. 2A) ok. 127,7 km<sup>2</sup>, a jej objętość całkowita ok. 11,3 km<sup>3</sup>. W przypadku zaprezentowanego wariantu stochastycznego (fig. 3) są to odpowiednio 141,5 i 24,2 km<sup>3</sup>.

## PODSUMOWANIE

Uzyskane wyniki badań mają duże znaczenie dla podniesienia jakości metodologii modelowania strukturalnego w procesie opracowania modelu statycznego. Zdaniem autorów w przyszłości procedura *Uncertainty Analysis* powinna być standardowo stosowana do opracowania osnowy geometrycznej modeli 3D struktur wgłębnich przeznaczonych do składowania CO<sub>2</sub>.

Przedstawione elementy analizy ryzyka pokazują, że obecnie wykorzystywany deterministyczny model strukturalny wymaga reambulacji przez zwiększenie obszaru oraz poprawę przestrzennej kontroli wiarygodności modelowania poprzez uwzględnienie profili sejsmicznych z lat 70. ubiegłego wieku położonych w rejonie antykliny Zaosia. W przypadku zadawalającej jakości tych materiałów możliwe będzie wiarygodne odwzorowanie tektoniki nieciągłej w strefie osiowej antykliny Zaosia, wiarygodne skontrolowanie jej amplitudy pionowej, a przede wszystkim ocena geometrii lateralnego zamknięcia struktury w kierunku NE i SW. Informacje te mają kluczowe znaczenie dla bezpieczeństwa składowania CO<sub>2</sub>, a także dla poprawnego określenia maksymalnej objętości składowiska, które w korzyst-

nych warunkach prawdopodobnie mogłoby mieć ogromną objętość.

Przedstawione badania wykonano w 2009 roku w KSE AGH w ramach realizacji tematu „Rozpoznanie formacji i struktur do bezpiecznego składowania CO<sub>2</sub> wraz z ich programem monitorowania”. Część prac metodycznych niezbędnych do powstania artykułu wykonano w ramach prac statutowych KSE AGH pt. „Wielowariantowe, trójwymiarowe modele komputerowe zmienności strukturalnej, facjalnej i petrofizycznej wybranych potencjalnych poziomów zbiornikowych w polskich basenach naftowych” zamówionego przez Ministerstwo Środowiska i finansowanego ze środków NFOŚiGW. Do opracowania wykorzystywanych modeli 3D w KSE AGH wykorzystano program Petrel 2009.1 udostępniony Wydziałowi Geologii, Geofizyki i Ochrony Środowiska AGH przez SIS Schlumberger w ramach umowy o wspieraniu działalności dydaktycznej i naukowej.

Autorzy dziękują również za współpracę doktorantowi AGH Wojciechowi Machowskiemu.

## LITERATURA

- BU T., DAMSLETH E., 1996 — Errors and uncertainties in reservoir performance predictions. *SPE Formation Evaluation*, **11**, 3: 194–200.
- CHADWICK A., ARTS R., BERNSTONE C., MAY F., THIBEAU S., ZWEIGEL P., 2008 — Best practice for the storage of CO<sub>2</sub> in saline aquifers – observations and guidelines from the SACS and CO<sub>2</sub>STORE projects. *British Geol. Surv. Occ. Publ.*, **14**.
- CO<sub>2</sub>GEOSTORE — strona internetowa programu sekwestracji. <http://www.co2store.org>.
- DUBRULE O., 1998 — Geostatistics in petroleum geology. AAPG Continuing Education Course Note Series #38. AAPG, Tulsa.
- DUBRULE O., 2003 — Geostatistics for seismic data integration in Earth models. 2003 Distinguished Instructor Short Course. Distinguished Instructor Series. No. SEG/EAGE. Tulsa.
- GÓRECKI W., PAPIERNIK B., HAJTO M., MACHOWSKI G., 2009 — Opracowanie szczegółowego modelu ośrodka składowiska dolnojurańskiego w rejonie Bełchatów (wykonane w ramach tematu: Rozpoznanie formacji i struktur do bezpiecznego składowania CO<sub>2</sub> wraz z ich programem monitorowania). Arch. KSE, WGGiOŚ, AGH, Kraków.
- HOLLOWAY S., CHADWICH A., LINDEBERG E., CZERNI-CHOWSKI-LAURIOL I., ARTS R., 2003 — Best practice manual from SACS – Saline Aquifer CO<sub>2</sub> Storage Project. <http://www.co2store.org>.
- MALLET J.-L., 2008 — Numerical Earth models. EAGE Public.
- PEARCE J.M., HOLLOWAY S., WACKER H., NELIS M.K., ROCHELLE C., BATEMAN K., 1996 — Natural occurrences as analogues for the geological disposal of carbon dioxide. *Energy Convers. Manag.*, **37**, 6–8: 1123–1128.
- SIEMEK J., NAGY S., 2004 — Estimation of uncertainties in gas-condensate systems reserves by Monte Carlo simulation. *Acta Montanistica Slovaca*, **9**, 3: 289–293.
- STOLARZ J., 2009 — Możliwości wykorzystania horyzontów jurajskich na Niziu Polski do celów sekwestracji dwutlenku węgla w świetle modeli komputerowych. [Pr. dyplom.]. Arch. KSE, WGGiOŚ, AGH, Kraków.
- TARKOWSKI R. (red.), NODZEŃSKI A., SOLECKI T., STOPA J., ULIASZ-MISIAK B., 2005 — Podziemne składowanie CO<sub>2</sub> w Polsce w głębokich strukturach geologicznych (ropo-, gazo- i wodonośnych). Wyd. IGSMiE PAN, Kraków.

- TARKOWSKI R., MAREK S., ULIASZ-MISIAK B., 2009 — Wstępna geologiczna analiza struktur do składowania CO<sub>2</sub> w rejonie Bełchatowa. *Gosp. Sur. Miner.*, **25**, 2: 37–45.
- TARKOWSKI R., STOPA J., 2007 — Szczelność struktury geologicznej przeznaczonej do podziemnego składowania dwutlenku węgla. *Gosp. Sur. Miner.*, **23**.
- WÓJCICKI A. (red.), 2010 — Opracowanie szczegółowych statycznych modeli ośrodka geologicznego składowisk (wykonano w ramach tematu: Rozpoznanie formacji i struktur do bezpiecznego składowania CO<sub>2</sub> wraz z ich programem monitorowania). Arch. KSE, WGGiOŚ, AGH, Kraków.