

Dariusz BOTOR
Akademia Górniczo-Hutnicza, Kraków

EWOLUCJA PALEOTERMICZA UTWORÓW KARBOŃSKICH NIECKI WAŁBRZYSKIEJ: WYNIKI MODELOWAŃ STOPNIA UWĘGLENIA

Streszczenie. W celu rekonstrukcji historii uwęglenia w niecce wałbrzyskiej wykonano modelowania termicznej dojrzałości substancji organicznej zawartej w utworach karbońskich za pomocą programu PetroMod. Uzyskane wyniki modelowań utworów karbońskich niecki wałbrzyskiej wskazują, że utwory te osiągnęły maksymalne wartości paleotemperatur (wynoszące od 83 do 270 °C) w stefanie i/lub wczesnym permie. W skali regionalnej utwory karbońskie nie były już później poddane tak wysokim temperaturom. Obliczony paleostrumień ciepły dla wybranych profili niecki wałbrzyskiej waha się od 120 mW/m² do 147 mW/m². Powyższa wielkość jest ponad dwukrotnie większa od współczesnej średniej wartości strumienia ciepłego w tym basenie. Powyższe wysokie temperatury doprowadziły do uwęglenia pokładów węgla w utworach górnokarbońskich. Uwęglenie nastąpiło w efekcie znacznej subsydencji osadów górnokarbońskich przy wysokim strumieniu ciepłym zdeterminowanym rozwojem intruzji magmowych, chociaż ich bezpośredni wpływ (metamorfizm kontaktowy) odgrywał znikomą rolę w skali regionalnej.

THERMAL HISTORY OF THE CARBONIFEROUS STRATA IN THE WALBRZYCH COAL BASIN: RESULTS OF THERMAL MATURITY MODELING

Summary. In order to reconstruct thermal history of the coal-bearing Carboniferous strata in the Walbrzych Coal Basin numerical modeling of thermal maturity has been performed by PetroMod software. Paleoheat flow of 120-147 mW/m² was calculated for the time of maximum burial (Late Carboniferous to Early Permian). Maximum paleotemperatures of the Carboniferous rocks ranged between 83 (top of the Carboniferous) and 270 °C (bottom of the Carboniferous). Based on this modeling it can be shown that coalification of organic matter contained in Carboniferous rocks was achieved in the Latest Carboniferous to the Early Permian times. It was likely caused both high heat flow related to magmatic activity and high subsidence rate in this basin.

1. Wprowadzenie

Dotychczasowe badania węgla Dolnośląskiego Zagłębia Węglowego (DZW) podejmowały już problematykę dotyczącą stopnia uwęglenia węgla kamiennych [10, 14, 19, 20]. Brak jednak ścisłego określenia warunków paleotermicznych procesu uwęglenia utworów karbońskich, którą to lukę próbuje wypełnić niniejsza praca. Badania te mają na celu rekonstrukcję warunków paleogeotermicznych uwęglenia pokładów węgla kamiennych w utworach karbońskich niecki wałbrzyskiej.

Rekonstrukcja historii termicznej ma podstawowe znaczenie zarówno dla rozpoznania procesów diagenetycznych, jak i ich efektów w postaci złóż węgla, gazu ziemnego, ropy naftowej, czy niektórych rud metali, a w przypadku Dolnośląskiego Zagłębia Węglowego (DZW) złóż węgla kamiennego [4, 5, 6, 15, 16, 17, 18, 20, 21, 22].

2. Metodyka

Modelowania dojrzałości termicznej materii organicznej przeprowadzono za pomocą programu PetroMod metodą progresywną (*forward*) w trybie iteratywnym, tj. zakładano stan wyjściowy systemu oraz określony proces geologiczny, a następnie wyliczano jego skutek dla współczesnego rozkładu dojrzałości termicznej (rozkładu refleksyjności wityrnytu) w analizowanym profilu litostratygraficznym danego wiercenia (np. 7). W przypadku niezgodności między dojrzałością wyliczaną (modelem) a rzeczywistą (pomierzoną) procedurę powtarzano przy korygujących parametrach modelu aż do osiągnięcia optymalnej zbieżności parametrów kalibracji modelu. Dane na temat stopnia uwęglenia zestawiono dla otworów wiertniczych (wg 10, 20), w których istniało co najmniej kilka pomiarów refleksyjności wityrnytu, co pozwoliło na kalibrację modelu 1-D historii termicznej. W procedurze modelowań szczególną uwagę poświęcono problemowi jednoznaczności modelu, to jest analizowano alternatywne modele o analogicznej lub zbliżonej jakości kalibracji. Dojrzałość termiczną materii organicznej w skali refleksyjności wityrnytu wyliczano za pomocą algorytmu Sweeneya i Burnhama [25]. W rekonstrukcji historii pograżania zastosowano poprawkę na dekompleksję według algorytmu Baldwina i Butlera [3]. Rekonstruowano również miąższości zerodowanych fragmentów profilu litostratygraficznych. Współczesne dane termiczne dla obszaru badań zestawiono na podstawie danych

literaturowych [8, 9]. Miąższości zerodowanych utworów oraz wartości paleostrumienia ciepłego obliczono na podstawie profili refleksyjności wityrynytu. Bardziej szczegółowe omówienie metodyki modelowań podają e.g. Botor & Kosakowski [7].

3. Zarys budowy geologicznej obszaru badań

Niecka wałbrzyska stanowi północą część Dolnośląskiego Zagłębia Węglowego (DZW), które jest usytuowane w brzeżnej części depresji śródsudeckiej w głębokiej, zuskokowanej strefie synklinalnej (rys. 1). Jedynie część tego basenu leży na terytorium Polski (około 500 km²). Depresja śródsudecka została utworzona w trakcie rozwoju waryscyjskiego orogenu i jest uważana za zapadlisko śródgórskie stanowiące najbardziej na NE wysuniętą strukturę tego typu związaną z Masywem Czeskim. Złóża węgla kamiennego były eksploatowane do niedawna w dwóch obszarach (nieckach): wałbrzyskim i noworudzkim [4, 13].

Poligenetyczna struktura tej niecki jest zdeterminowana przez szereg czynników, przede wszystkim przez kompresyjną tektonikę i późnopaleozoiczny magmatyzm. Typową cechą tej niecki jest znaczna liczba uskoków normalnych i odwróconych [1]. Tektogen sudecki jest pocięty szeregiem głębokich uskoków (rys. 1). Niektóre z nich mogą sięgać nawet górnego płaszczka [26]. Wydzwignięcie, zuskokowanie i sfałdowanie utworów karbońskich było związane głównie z fazą asturyjską [23]. Końcowa przebudowa depresji śródsudeckiej odbyła się w kredzie w fazach orogenicznych subhercyńskiej i laramijskiej [23]. Sekwencja litostratygraficzna depresji śródsudeckiej obejmuje: dolny karbon, karbon górny i dolny perm, trias dolny oraz górną kredę. Górnokarbońskie osady węglonośne są uważane za molasę zdeponowaną w wewnętrznej strefie waryscyjskiego pasa orogenicznego [5, 6, 14]. Utwory górnokarbońskie dzieli się na następujące formacje: wałbrzyską, Białego Kamienia i żaclerską (której dolną część określa się jako grupę produktywną Boguszów, a górną część jako grupę produktywną Gorce). Warstwy te zawierają 80 pokładów węgla, z których 30 należy do formacji Wałbrzycha (pokłady 680 do 651), dwa znajdują się w warstwach białokamienieckich (pokłady 550 i 549), a pozostałych 48 pokładów należy do formacji żaclerskiej (pokłady 448 to 423 w grupie produktywnej Boguszów, natomiast pokłady 322 do 301 grupie produktywnej Gorce) [4, 5, 6, 14, 17, 19].

Charakterystyczną cechą budowy geologicznej depresji śródsudeckiej jest znaczący rozwój procesów wulkanicznych. W rejonie Wałbrzycha istnieją liczne przykłady

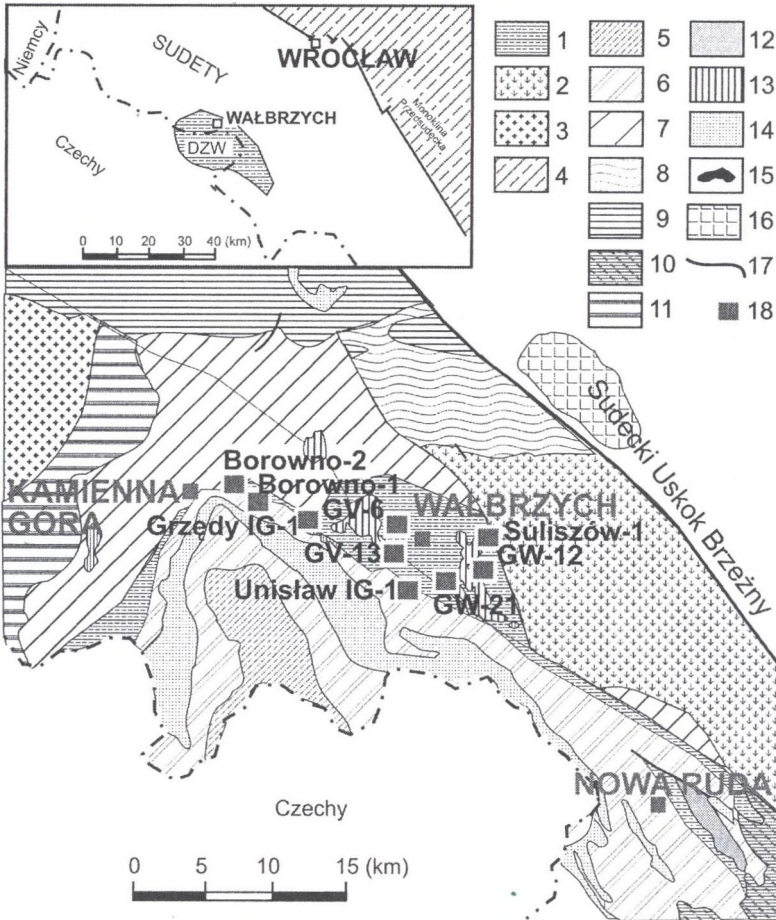
waryscyjskiego wulkanizmu [24]: alkaliczne ryolity, ryolity (lakolit Chełmca), leukoryolity, kwarcowe leukoryolity (głównie sille, apofizy występujące w centralnej części basenu). Wystąpienia ryolitowych i melafirowych tufów są również odnotowywane. Wulkanyty powyższe są pochodnymi kwaśnych magm szeregu alkalicznego [24]. Dalsze badania ujawniły obecność wtórnego, intensywnego magmatyzmu alkalicznego [2]. Waryscyjski wulkanizm basenu wałbrzyskiego prawdopodobnie należał do mieszanego, eksplozyjno-intruzywnego typu i był związany ze strefą tensyjną skorupy [11]. Skały magmowe występują zarówno w górnokarbońskich, jak i dolnopermskich utworach [2, 11, 24]. Magmatyzm neogeński nie jest obserwowany w karbońskich utworach węglonośnych depresji śródsudeckiej, chociaż występuje w pobliżu. Kenozoiczne bazalty, znane z okolic miasta Jawora (rys. 1), są związane z późnoalpejską prowincją bazaltową. Magmatyzm neogeński wydaje się być wielofazowy i jest genetycznie powiązany uskokami głębokoskorupowymi. Bazalty neogeńskie i ich tufy związane z sudeckim uskokiem brzeżnym są również znane z rejonu Mokrzeszowa [12], 14 km na NE od Wałbrzycha (rys. 1). Dlatego też istnienie komór magmowych związanych z głębokim systemem sudeckiego uskoku brzeżnego wydaje się być prawdopodobne.

4. Wyniki i dyskusja

Analizę warunków paleotermicznych uwęglenia w niecce wałbrzyskiej przeprowadzono w 9 profilach litostratygraficznych odwiertów: Borówno-1, Borówno-2, Grzędy IG-1, GV-6, GV-13, GW-12, GW-21, Suliszów-1 i Unisław IG-1. Uzyskane modele wykazują znaczące podobieństwa w skali jakościowej i różnią się jedynie wartościami ilościowymi (rys. 2, tabl. 1).

Współczesne wartości gradientu geotermicznego w DZW wahają się w granicach 22-25 °C/km, a wartości strumienia ciepłego wynoszą około 50-60 mW/m² [8]. Są one zdecydowanie niewystarczające do uwęglenia takiego, jak obecnie jest obserwowane w niecce wałbrzyskiej. Jednym z głównych czynników wzrostu stopnia przeobrażenia substancji organicznej (uwęglenia) w niecce wałbrzyskiej jest pograżanie osadów związane z subsydemacją basenu na etapie waryscyjskiego rozwoju, z uwagi na wzrost R_0 z głębokością i stratygrafią zgodnie z prawem Hilta. Zasadniczy wpływ na uwęglenie utworów karbońskich miała bardzo szybka subsydemacja w warunkach wysokiego strumienia ciepłego (rys. 2, tabl. 1) już na etapie waryscyjskiego rozwoju basenu niecki wałbrzyskiej. Natomiast

późniejsza, postwaryscyjska historia pograżania nie wpłynęła w znaczący sposób na maksymalne wartości pograżenia osiągnięte przez węglonośne utwory karbońskie z uwagi na niewielkie miąższości deponowanych osadów stanowiących nadkład karbonu węglonośnego.



Rys. 1. Uproszczona mapa geologiczna obszaru badań. Na podstawie Augustyniak & Grocholski [1], Bossowski & Ihnatowicz [4]. 1 - węglonośne utwory górnokarbońskie, 2 - proterozoiczny blok gnejsowy G. Sowich, 3 - karkonoski masy granitoidowy, 4 - utwory fliszowe (dinant - niższy namur A), 5 - utwory dolnego triasu i górnej kredy, 6 - utwory dolnopermkie, 7 - utwory dolnokarbońskie, 8 - utwory górnodońskie i dolnokarbońskie depresji Świebodziec, 9 - kompleks metamorficzny G. Kaczawskich, 10 - kompleks metamorficzny kłodzki i bardzki, 11 - kompleks metamorficzny Rudaw Janowickich, 12 - masyw gabrowo-diabazowy Nowej Rudy, 13 - karbońskie skały magmowe, 14 - dolnopermkie skały magmowe, 15 - bazalty neogeńskie, 16 - bazalty i tufy neogeńskie pod pokrywą innych utworów kenozoicznych (rejon Mokrzeszowa), 17 - główne uskoki, 18 - lokalizacja analizowanych profili

Fig. 1. Geological sketch map of the (after Augustyniak & Grocholski [1], Bossowski & Ihnatowicz [4])

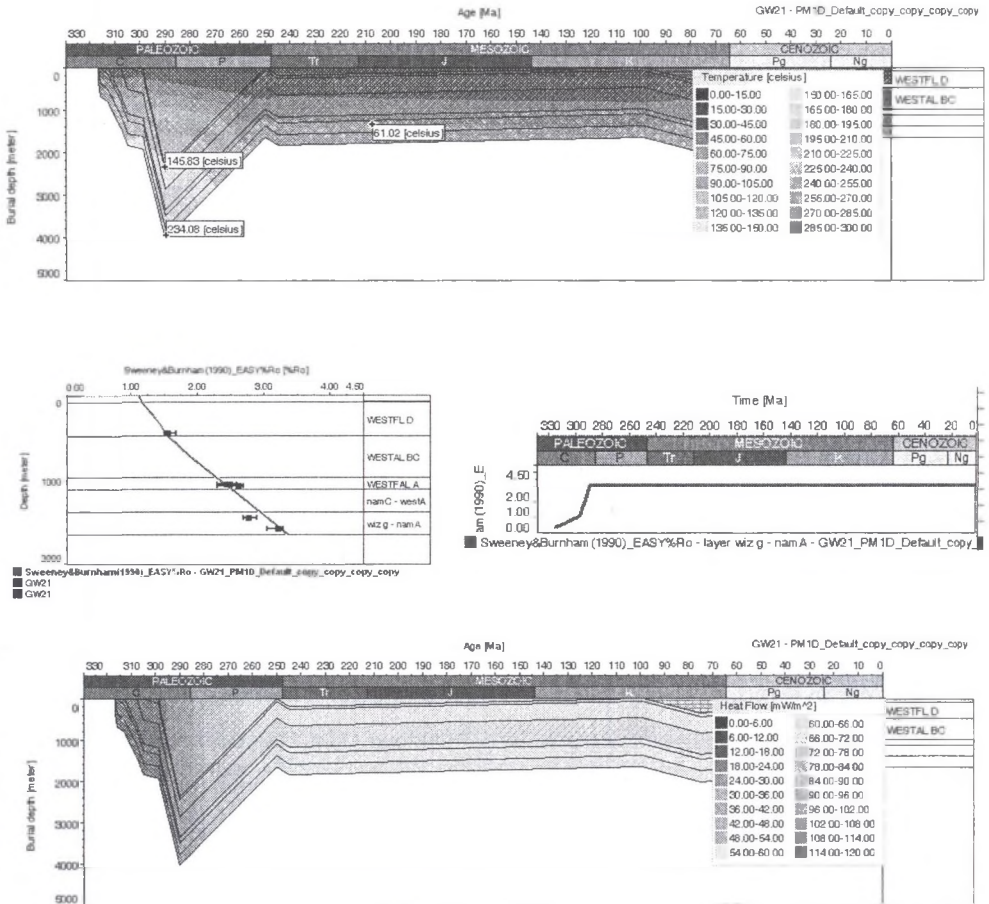
Charakterystyczny dla całej Depresji Śródsudeckiej jest intensywny rozwój procesów wulkanicznych podczas karbonu i permu [2], co wskazywałoby na wysokie wartości strumienia ciepłego w skali regionalnej. Wzrost paleotemperatur w utworach karbońskich

niecki wałbrzyskiej był największy bezpośrednio po depozycji osadów górnokarbońskich i/lub wczesopermskich. Maksymalna paleotemperatura dla wszystkich formacji karbonu w obszarze badań występuje podczas maksymalnego pograżenia. Obliczone wartości refleksyjności wityryny [wg 25] wzrastają aż do maksymalnego pograżenia i maksymalnych temperatur. Temperatury formacyjne osiągnięte później są zbyt niskie, aby mógł nastąpić dalszy znaczący wzrost uwęglenia substancji organicznej. W efekcie zmiany współczesnego strumienia cieplnego nie mają istotnego wpływu na ocenę paleostrumienia cieplnego. Zatem najważniejszym okresem dla rekonstrukcji paleostrumienia był późny karbon i wczesny perm.

Uzyskane wyniki modelowań sugerują, że utwory karbońskie niecki wałbrzyskiej osiągnęły maksymalne wartości paleotemperatur z końcem późnego karbonu lub we wczesnym permie: około 280-300 milionów lat temu. Temperatury te osiągnęły w badanym obszarze od 153 do 270 °C dla spągu utworów karbońskich oraz od 83 do 161 °C dla stropu utworów karbońskich (rys. 2, tabl. 1). Nie wyklucza to oczywiście zjawisk termicznych w zakresie temperatur poniżej 100 °C lub też lokalnych krótkotrwałych epizodów związanych z ewentualnymi procesami hydrotermalnymi w strefach przyskokowych.

Karboński paleogradient geotermiczny, jak szacuje Dziedzic [11], był przypuszczalnie dwukrotnie wyższy od współczesnego, osiągając wartości ponad 50 °C/km, jak można sądzić na podstawie stopnia uwęglenia węgla kamiennych w niecce wałbrzyskiej, które jest bardzo wysokie. Występują w nim głównie węgle koksujące [15, 16, 17, 18, 20]. Wyróżniono typy 34 do 42 [4]. Zatem strumień cieplny w późnym paleozoiku, zakładając typowe średnie wartości przewodności cieplnej skał na poziomie 2-3 W/mK, mógł osiągać wartości rzędu 100-150 mW/m², co znajduje potwierdzenie w wynikach modelowań w niniejszej pracy.

Uwęglenie węgla kamiennych DZW było efektem procesów waryscyjskich i zostało zakończone, jak twierdzi Kułakowski [14], już przed rozpoczęciem się wczesnego permu. Zatem według tej hipotezy maksymalne paleotemperature występowały w utworach karbońskich na przełomie karbonu i permu. Masztalerz i Jonem [19] podają, na podstawie badań refleksyjności wityryny w utworach górnokarbońskich Dolnośląskiego Zagłębia Węglowego, że uwęglenie materii organicznej nastąpiło w przeważającej mierze już w westfalu B/C, a ostateczny poziom uwęglenia, zwłaszcza w centralnej części DZW, jest rezultatem dalszego wzrostu pograżenia przy podwyższonym strumieniu cieplnym, i został osiągnięty z końcem stefanu.



Rys. 2. Model paleotermiczny dla profilu litostratygraficznego GW-21. A. Krzywe pograżenia i ewolucja paleotemperatur, B. Kalibracja modelu przez wartości refleksyjności wityrnytu, C. Ewolucja stopnia uwęglenia, D. Ewolucja strumienia ciepłego

Fig. 2. Thermal history model for GW-21 borehole. A. Burial history and paleotemperature development, B. model calibration by vitrinite reflectance, C. coalification (thermal maturity) development, D. heat flow development

Bezpośredni wpływ intruzji subwulkanicznych, znanych z utworów karbońskich, na stopień uwęglenia (metamorfizm kontaktowy) ma bardzo ograniczony zasięg [14, 15, 16, 19, 20] i nie odnotowano jego wpływu na refleksyjność wityrnytu w analizowanych profilach litostratygraficznych (rys. 2). Niniejsze modelowania historii termicznej potwierdzają w pełni hipotezę występowania maksymalnych paleotemperatur na przełomie późnego karbonu i wczesnego permu i braku wpływu procesów postwaryscyjskich.

Tablica 1

Wyniki modelowań termicznej dojrzałości substancji organicznej w niecce wałbrzyskiej

Odwiert	Erozja	Paleotemperatura	Paleotemperatura	Strumień	Ro	Ro
Nazwa	Post-Variscan	max.	max.	cieplny		
		spąg karbonu	strop karbonu	waryscyjski	spąg karbonu	strop karbonu
	(m)	(°C)	(°C)	mW/m ²	(%)	(%)
Borówno-1	2000.00	153.00	115.00	132.00	1.22	0.73
Borówno-2	1650.00	163.00	119.00	128.00	1.39	0.75
Grzędy IG-1	1750.00	270.00	161.00	139.00	4.05	1.76
GV-13	2450.00	257.00	159.00	137.00	3.83	1.33
GV-6	1900.00	215.00	130.00	129.00	2.64	0.86
GW-12	1500.00	192.00	83.00	133.00	2.10	0.50
GW-21	2100.00	234.00	146.00	120.00	3.33	1.24
Suliszów-1	1400.00	223.00	86.00	147.00	2.95	0.55
Unisław IG-1	2260.00	239.00	136.00	145.00	3.49	0.93

Paleotemperatura maksymalna dla okresu maksymalnego pogażania,

Ro - wartości obliczone metodą Sweeny & Burnham (1990) dla okresu maksymalnego pogażania osadów

Badania regionalnego metamorfizmu pasa waryscyjskiego [26] wykazały, że gradient geotermiczny był rzędu 40-60 °C/km w strefie intruzji subwulkanicznych, a zatem w obszarze, w którym węgle antracytowe były tworzone [11]. Chociaż wytwarzanie ciepła radiogenicznego przez intruzje waryscyjskie (zwłaszcza lakolit Chelmea) mogło podnieść wartość gradientu geotermicznego lokalnie nawet do 90 °C/km w niecce wałbrzyskiej [14]. Wysoki strumień cieplny spadał stopniowo wraz ze spadkiem waryscyjskiej aktywności wulkanicznej, aby następnie wzrosnąć jedynie lokalnie w trzeciorzędzie.

5. Wnioski

Uzyskane wyniki modelowań historii paleotermicznej sugerują, że utwory karbońskie niecki wałbrzyskiej osiągnęły maksymalne wartości paleotemperatur (wynoszące od 83 do 270°C) w stefanie i/lub wczesnym permie (około 280-300 milionów lat temu). W skali regionalnej utwory karbońskie nie były już później poddane tak wysokim temperaturom. Paleostrumień cieplny obliczony poprzez numeryczne modelowania dla wybranych profili Niecki Wałbrzyskiej waha się od 120 mW/m² do 147 mW/m². Powyższa wielkość jest, generalnie rzecz biorąc, ponad dwukrotnie większa od współczesnego strumienia cieplnego wnoszącego średnio 52 mW/m². Uwęglenie pokładów węgla Niecki Wałbrzyskiej nastąpiło, na przełomie karbonu i permu, w efekcie znacznej subsydencji utworów górnokarbońskich

przy wysokim strumieniu ciepłym zdeterminowanym rozwojem intruzji magmowych, chociaż ich bezpośredni wpływ (metamorfizm kontaktowy) odgrywał znikomą rolę w skali regionalnej.

Badania powyższe były dofinansowane przez Ministerstwo Nauki i Informatyzacji w ramach prac statutowych KGZiG AGH nr 11.11.140.562.

BIBLIOGRAFIA

1. Augustyniak K., Grocholski A.: Geological structure i outline of the development of the Intra-Sudetic depression: Biuletyn Instytut Geologiczny, v. 227, 1968, s. 87-120.
2. Awdankiewicz M.: Wulkanizm młodowaryscyjski Depresji Śródsudeckiej. Geologica Sudetica v. 32, 1999, s. 13-47.
3. Baldwin B., Butler C.O.: Compaction curves. AAPG Bull., 69, 1985, 622-627.
4. Bossowski A., Ihnatowicz A.: Atlas Geologiczny Dolnośląskiego Zagłębia Węglowego. Wyd. PIG 2006.
5. Bossowski A., Ihnatowicz A.: Palaeogeography of the Upper Carboniferous coal bearing deposits in the NE part of the Intra-Sudetic Depression, Przegląd Geologiczny, v. 38, 1994, s. 231-248
6. Bossowski A., Ihnatowicz A.: Palaeogeography of the uppermost Carboniferous i lowermost Permian deposits in the NE part of the Intra-Sudetic Depression, Przegląd Geologiczny, v. 38, 1994b, s. 709-726.
7. Botor D., Kosakowski P.: Zastosowanie modeli numerycznych do rekonstrukcji paleotemperatur i procesów generowania węglowodorów. Przegląd Geologiczny No 2, 2000, s. 154-162.
8. Cermak V.: Heat flow in the Zacler-Svatonovice Basin: Acta Geophysica Polonica, v. 16, 1968, s. 3-9.
9. Chmura K.: Własności fizykotermiczne skał niektórych zagłębi górniczych. Wydawnictwo Śląsk, Katowice 1970.
10. Chruściel Z., Łonak I., Skowronek E., Dadok U.: Budowa petrograficzna i stopień uwęglenia węgla z otworów wiertniczych DZW. W: Materiały II konferencji „Geologia Dolnośląskiego Zagłębia Węglowego”. Wałbrzych 1985, s. 223-244.
11. Dzedzic K.: The palaeozoic rifting i volcanism in Sudety (western Poland): Zeit. Geol. Wiss., H. 14, 1986, s. 445-457.
12. Grocholski W.: Wulkanity niecki wałbrzyskiej w świetle badań strukturalnych. Biul. PIG 191, 1965, s. 5-67.
13. Ihnatowicz A., Jureczka J.: Baza zasobowa węgla kamiennego Dolnośląskiego Zagłębia Węglowego – zmiany w okresie restrukturyzacji górnictwa i perspektywy zagospodarowania. Biuletyn PIG, Nr 429, 2008, s. 51-59.
14. Kułakowski T.: Geological environments of coalification of the Zacler Beds in the Lower Silesian Coal Basin: Geologica Sudetica, v. 14, 1979, p. 103-139.
15. Kwiecińska B.: Węgłe skoksowane z Zagłębia Wałbrzyskiego: Prace Mineralogiczne PAN, v. 9, 1967. p. 81.
16. Kwiecińska B.: Mineralogy of natural graphites: Prace Mineralogiczne PAN, v. 67, 1980, p. 87.

17. Lipiarski I.: Osady warstw żaclerskich (dolny westfal) w niecce Słupca (Depresja Śródsudecka) oraz morfologia pokładów węgla. *Prace Geologiczne PAN*, v. 101, 1976, s. 1-79.
18. Majorowicz J.: Związki pomiędzy polem geotermicznym a uwęglaniem w polskich basenach węglowych. *Kwartalnik Geologiczny*, v. 22, 1978, s. 497-510.
19. Mastalerz M., Jones J.M.: Coal rank variation in the Intrasudetic Basin, SW Poland. *International Journal of Coal Geology*, v. 10, 1988, s. 79-97.
20. Nowak G.J.: Petrografia węgla DZW. *Biuletyn PIG* v. 391, 2000, s. 89-138.
21. Nowak G.J.: Lithotype variation and petrography of coal seams from Żacler Formation (Westphalian) in the Intrasudetic Basin, southwestern Poland: *Organic Geochemistry*, v. 20, 1993, p. 295-313.
22. Nowak G.J.: Petrological coal seam accumulation model for the Żacler Formation of the Lower Silesian coal basin, southwestern Poland: W: Gayer, R., i Harris, I., eds., *Geological Society Special Publication*, No 109, 1996, s. 261-286.
23. Oberc J.: Budowa Geologiczna Polski T. IV, Tektonika. Cz.2. Sudety. *Wydawnictwa Geologiczne*, Warszawa 1972, s. 307.
24. Plewa M.: Skąły magmowe i przejawy mineralizacji w Niecce Wałbrzyskiej. *Prace Mineralogiczne* nr 12, 1968, s. 1-65.
25. Sweeney J.J., Burnham A.K.: Evaluation of a simple model of vitrinite reflectance based on chemical kinetics. *AAPG Bulletin* 74, 1990, p. 1559-1570.
26. Zeman J.: Waryscyjska tektogeneza Masywu Czeskiego. *Przegląd Geologiczny*, v. 20, 1973, s. 378-382.

Recenzent: Dr hab. inż. Marek Pozzi, prof. nzw. w Pol. Śl.