

# Historia pogrzebania skał kambru na podstawie refleksyjności macerałów wityrinitopodobnych w polskiej części platformy wschodnioeuropejskiej

Elżbieta Swadowska\*, Magdalena Sikorska\*

*W badanych skałach kambryjskich materia organiczna występuje w postaci substancji typu sapropelowego (soczewki, podłużne skupienia lub masa wypełniająca) oraz macerałów wityrinitopodobnych. Zaznacza się regionalna zmienność refleksyjności macerałów wityrinitopodobnych wyrażająca się jej wzrostem w kierunku południowo-zachodnim. Pomiary refleksyjności ( $R_o$ ) wykorzystano do oszacowania wielkości paleogradientu termicznego dla skał kambru. Jego wartość była o  $10^\circ\text{C}/\text{km}$  wyższa od obecnego gradientu termicznego. Krzywe pogrzebania wskazują, że w zachodniej części badanego obszaru generowanie ropy miało miejsce w sylurze, podczas gdy we wschodniej części nie doszło do generowania węglowodorów.*

**Słowa kluczowe:** kambryjski, substancja organiczna, wityrinit, wskaźnik refleksyjności węgla, paleotemperatura, diagenetyzacja, generowanie węglowodorów, platforma wschodnioeuropejska

---

Elżbieta Swadowska & Magdalena Sikorska — **Burial history of Cambrian rocks of the Polish part of the East European Platform as based on reflectance of vitrinite-like macerals.** Prz. Geol., 46:

*S u m m a r y. In the investigated Cambrian rocks, the organic matter occurs as a sapropelic substance (lenses, elongate aggregates or groundmass) and vitrinite-like macerals. The vitrinite-like macerals show distinct regional variability consisting in an increase of their reflectance towards the southwest. The measurements of reflectance ( $R_o$ ) were used to determine the approximate value of thermal palaeogradient for Cambrian rocks. The value of palaeogradient was  $10^\circ\text{C}/\text{km}$  higher than the recent thermal gradient. The burial curves indicate that in the western part of the area studied oil generation took place in Silurian while in the eastern part of the area hydrocarbon generation did not occur.*

**Key words:** Cambrian, buried diagenesis, thermal history, organic materials, thermal maturity, vitrinite-like macerals, reflectance, regional patterns, Baltica, Poland

---

Badania zdolności odbicia światła (refleksyjności) niektórych składników materii organicznej odgrywają istotną rolę przy rekonstruowaniu termalnej historii serii geologicznych. Na ich podstawie można prześledzić zmiany stopnia dojrzałości termicznej rozproszonych materii organicznej, w zależności od głębokości pogrzebania osadów i w dalszej

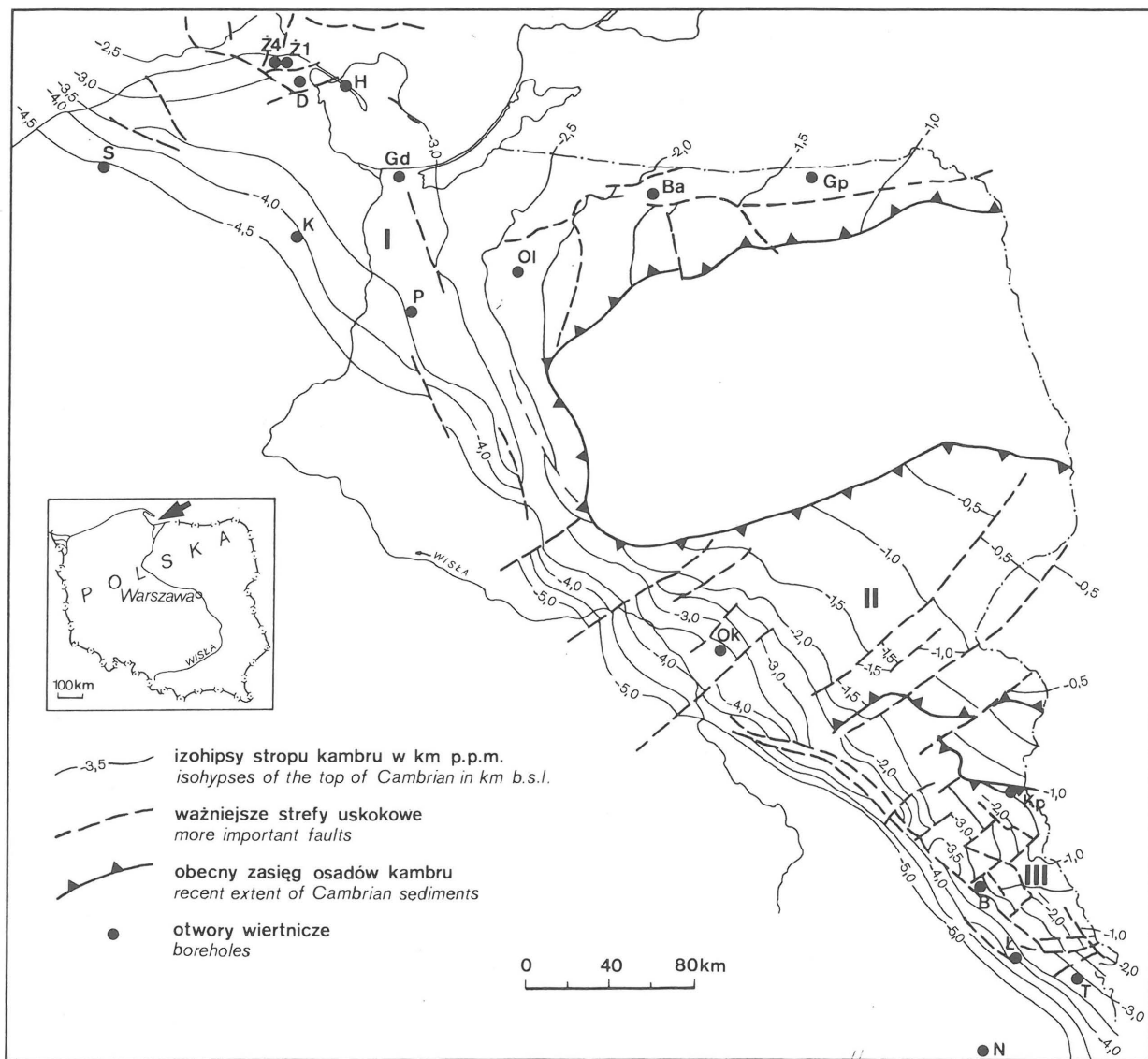
kolejności wyznaczyć maksymalne paleotemperatury jakim zostały poddane osady w czasie procesów diagenetycznych i epigenetycznych.

Podstawowym składnikiem materii organicznej dobrze rejestrującym efekty termiczne jest wityrinit, a w osadach, w których wityrinit występuje w ilości śladowej lub jest nieobecny rolę „paleotermometru” mogą spełniać bituminit (Alpern, 1978) i tzw. macerały wityrinitopodobne.

W skałach dolnego paleozoiku, a w szczególności kam-

---

\*Państwowy Instytut Geologiczny, ul. Rakowiecka 4, 00-975 Warszawa



**Ryc. 1.** Szkic strukturalny stropu kambru (na podstawie mapy strukturalnej kambru Modlińskiego i Żelichowskiego, 1990)  
 Ba — Bartoszyce IG 1, B — Busówno IG 1, D — Darżlubie IG 1, Gd — Gdańsk IG 1, Gp — Gołdap IG 1, H — Hel IG 1, K — Kościerzyna IG 1, Kp — Kaplonosy IG 1, Ł — Łopiennik IG 1, N — Narol PIG 2, Ok — Okuniew IG 1, Ol — Olsztyn IG 2, P — Prabuty IG 1, S — Słupsk IG 1, T — Terebiń IG 5, Ż1 — Żarnowiec IG 1, Ż4 — Żarnowiec IG 4; I — synekliza perybaltycka, II — obniżenie podlaskie, III — lubelski skłon platformy  
**Fig. 1.** Structural sketch of the top of Cambrian (based on structural map of Cambrian — Modliński & Żelichowski, 1990)  
 I — Peribaltic Syncline, II — Podlasie Depression, III — Lublin Slope of the Craton

bru i ordowiku, gdzie nie występuje typowy witynit obecne są pozostałości organiczne bogate w polisacharydy wykazujące pod mikroskopem cechy optyczne witynit (Buchard & Lewan, 1990). Pozostałości te nazwane macerałami witynitopodobnymi wykazują refleksyjność, która tak samo jak refleksyjność witynit dobrze koreluje się z atomowym współczynnikiem dojrzałości H/C. Zatem refleksyjność macerałów witynitopodobnych jest w pełni wartościowym parametrem, który może być wykorzystany w badaniach dojrzałości termicznej materii organicznej w skałach staropaleozoicznych.

Celem badań przedstawionych w niniejszej pracy było określenie (metodą pomiarów zdolności odbicia światła) stopnia przeobrażenia materii organicznej rozproszonej w osadach kambryjskich polskiej części platformy wschodnioeuropejskiej i na tej podstawie wyznaczenie maksymalnych paleotemperatur oddziaływujących na skały, w których dojrzała materia organiczna. W dalszej zaś kolej-

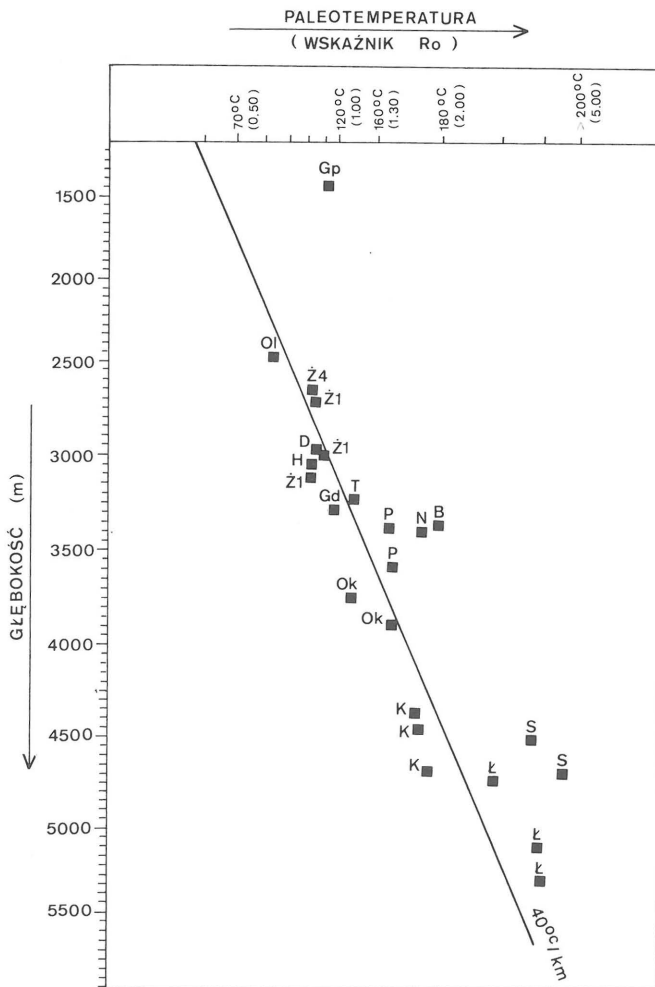
ności określenie wielkości paleogradientu termicznego, co pozwoliło odtworzyć termiczną historię skał kambru. W tym celu wykorzystano krzywe subsydencji ogólnej dla spągu kambru dolnego (Sikorska & Paczeńska, 1987).

Badania refleksyjności wykonano przede wszystkim na materiale organicznym syngenetycznym z osadem (*in situ*) i dodatkowo, dla pełnej dokumentacji na materiale redeponowanym.

Badania przeprowadzono na zgładach kawałkowych, w świetle odbitym białym i niebieskim, pod imersją, za pomocą mikroskopu Axioskop (Zeiss). Do pomiarów refleksyjności użyto mikrofotometru MPM 200 (Zeiss).

### Tło geologiczne

Przeprowadzone badania dotyczą materii organicznej rozproszonej w skałach kambryjskich polskiej części platformy wschodnioeuropejskiej. Osady dolnego i środkowego



**Ryc. 2.** Wykres zależności paleotemperatur w jakich przebywały skały kambryjskie od głębokości ich pogrzebania (na podstawie pomiarów  $R_0$ )

B — Busówno IG 1, D — Darżlubie IG 1, Gd — Gdańsk IG 1, Gp — Gołdap IG 1, H — Hel IG 1, K — Kościerzyna IG 1, Ł — Łopiennik IG 1, N — Narol PIG 2, Ol — Olsztyn IG 2, Ok — Okuniew IG 1, P — Prabuty IG 1, S — Słupsk IG 1, T — Terebiń IG 5, Ż1 — Żarnowiec IG 1, Ż4 — Żarnowiec IG 4

**Fig. 2.** Relation between palaeotemperatures and burial depth of Cambrian sediments (on the basis of the  $R_0$  measurements)

IG 1, Żarnowiec IG 4 oraz dodatkowo z Narola PIG 2 (blok małopolski).

Pobrane do badań próbki to głównie ciemne iłowce, mułowce, wyjątkowo piaskowce i czarne wapienie. Analizowane osady kambru są na ogół dość ubogie w materię organiczną, przeważnie występuje ona w małej lub śladowej ilości. Jedynie w kilku próbkach, pochodzących z otworów Darżlubie IG 1 (gł. 3015,0 m), Hel IG 1 (gł. 3044,2 m), Słupsk IG 1 (gł. 4560,9 m), Żarnowiec IG 1 (gł. 2725,6 m) i Żarnowiec IG 4 (gł. 2707,5 m) materia organiczna jest obfita.

Forma występowania organiki świadczy o jej syngenetycznym jak i epigenetycznym pochodzeniu. Materiał syngenetyczny zdecydowanie dominuje i jest związany głównie ze skałami ilastymi. Występujący znacznie rzadziej materiał epigenetyczny obserwuje się najczęściej w wapieniach i piaskowcach. Nieznaczna domieszka w kilku próbkach stanowi materiał redeponowany.

Materia organiczna syngenetyczna z osadem jest reprezentowana przede wszystkim przez amorficzny materiał typu sapropelowego. Występuje on bądź w postaci smug i wyizolowanych skupień o nieregularnych i rozmytych zarysach bądź zmieszany z mineralnymi składnikami skały (minerałami ilastymi, mikroziarnistym pirytem) tworzy jej podstawową masę. W skałach słabo zdiagenezowanych amorficzna materia organiczna charakteryzuje się w białym świetle odbitym (w imersji) bardzo ciemnymi barwami (ciemnoszarą i brunatną). Na tle ciemnej, prawie jednorodnej masy, są widoczne drobne skupienia ziarenek mikrynit (ryc. 7). We fluorescencji ujawnia się ziarnistość materiału oraz obserwuje się intensywne świecenie cząsteczek w barwach żółtopomarańczowych (ryc. 10). Wśród intensywnie fluoryzujących okruchów liptodetrynit można wyróżnić pojedyncze drobne fragmenty alginu.

W skałach o wyższym stopniu zdiagenezowania amorficzny materiał organiczny wykazuje w świetle odbitym białym gąbczastą strukturę przechodzącą w drobnoziarnistą oraz barwę od szarej do jasnoszarej (ryc. 5, 6).

Z materiałem sapropelowym asocjują często macerały o cechach optycznych wityrnytu. Macerały te mają na ogół ostro zarysowane kontury i wydłużone soczewkowate kształty (ryc. 5–7). Ich grubość zmienia się od 2 do 40  $\mu\text{m}$ , a długość osiąga ponad 200  $\mu\text{m}$ . Macerały wityrnytopodobne mają niekiedy postać drobnych skupień (średnicy  $<5 \mu\text{m}$ ) o postępujących brzegach lub falistych żyłek o grubości 1–5  $\mu\text{m}$ . W niektórych przypadkach macerały wityrnytopodobne zawierają skupienia framboidalnego pirytu. Barwa macerałów wityrnytopodobnych w świetle odbitym białym zmienia się od ciemnoszarej w skałach słabo zdiagenezowanych (ryc. 3) do jasno- i białoszarej w skałach o wysokim stopniu zdiagenezowania (ryc. 5, 6). Macerały wityrnytopodobne w wy-

kambru reprezentują wysokoenergetyczną szelfową asocjację silikoklastyczną. Przeważają w niej drobnoziarniste piaskowce z wkładkami iłowców i mułowców. Mułowce z cienkimi przewarstwieniami piaskowców tworzą typowe dla tych osadów heterolity.

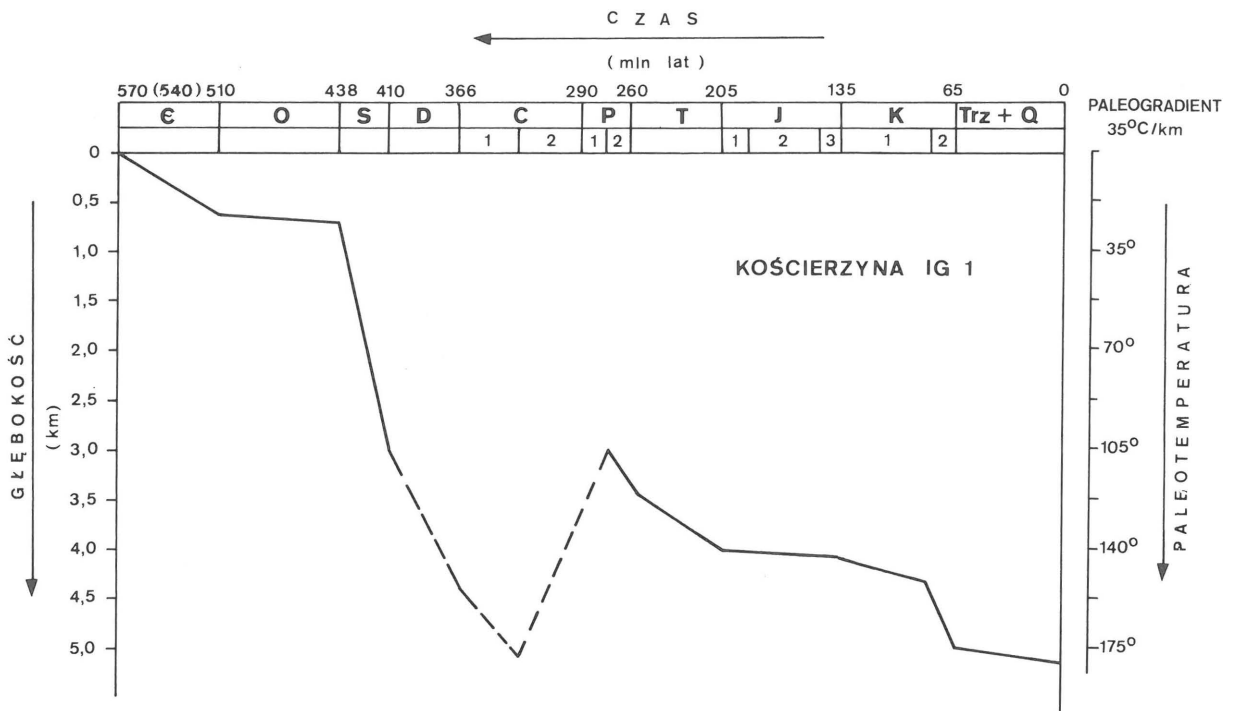
Osady kambru górnego tworzyły się w płytkowodnym basenie euksynicznym i są reprezentowane przez ciemne iłowce z wkładkami i soczewkami czarnych wapieni. Utwory te w obrębie polskiej części platformy wschodnioeuropejskiej zostały niemal całkowicie zerodowane. Zachowały się fragmentarycznie jedynie w NW części badanego obszaru.

Na badanym obszarze zaznacza się wyraźny wzrost udziału skał ilasto-mułowcowych z NE na SW.

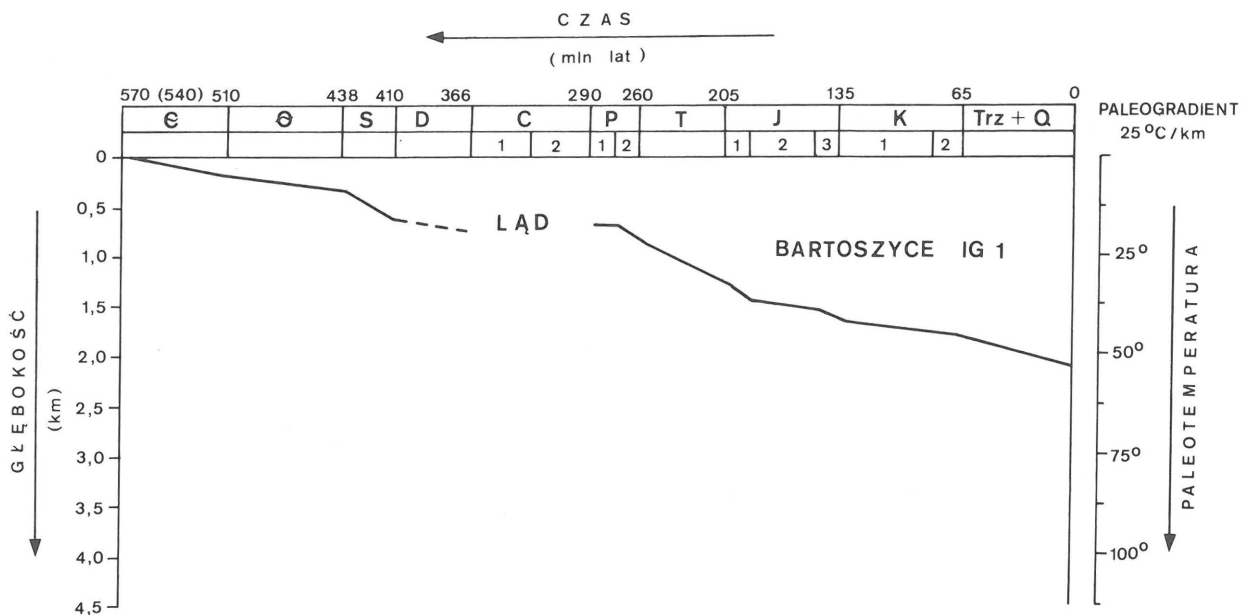
Obecna głębokość pogrzebania osadów kambru jest bardzo zróżnicowana. Zgodnie z kierunkiem nachylenia platformy wschodnioeuropejskiej ku SW, głębokość stropu kambru środkowego w badanych profilach wiertniczych (ryc. 1) waha się od 1479,8 m (Gołdap IG 1) do 4518,3 m (Słupsk IG 1).

### Charakterystyka materiału badawczego

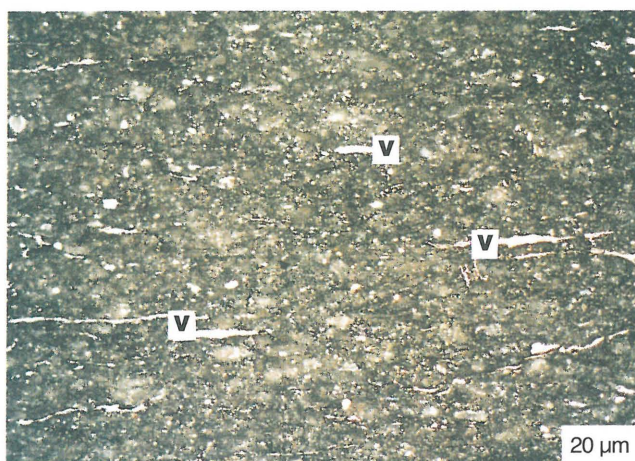
Do mikroskopowych badań rozproszonej materii organicznej wytypowano próbki skał kambryjskich pochodzące z różnych głębokości, z całego obszaru polskiej części platformy wschodnioeuropejskiej (ryc. 1). Materiał badawczy pochodził z następujących otworów wiertniczych: Busówno IG 1, Darżlubie IG 1, Gdańsk IG 1, Gołdap IG 1, Hel IG 1, Kaplonosy IG 1, Kościerzyna IG 1, Łopiennik IG 1, Olsztyn IG 2, Prabuty IG 1, Słupsk IG 1, Terebiń IG 5, Żarnowiec



**Ryc. 3.** Rekonstrukcja historii pogrzebania osadów kambru z otworu wiertniczego Kościerzyna IG 1 (por. Sikorska & Paczeńska, 1997). Linia przerywana — subsydenca interpretowana  
**Fig. 3.** Reconstruction of the burial history of the Cambrian sediments from the Kościerzyna IG 1 borehole (cf. Sikorska & Paczeńska, 1997). Dashed line — the interpreted subsidence



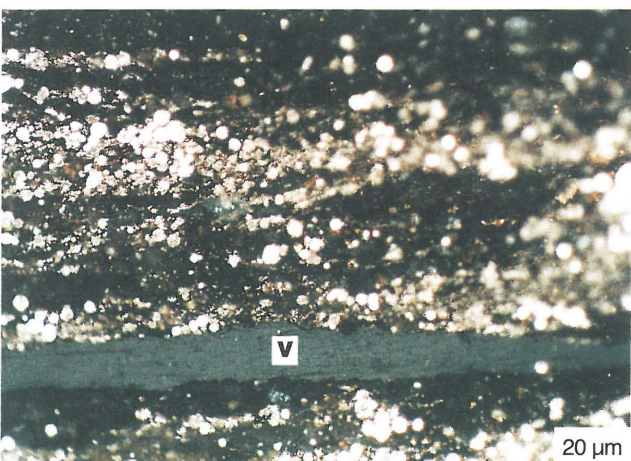
**Ryc. 4.** Rekonstrukcja historii pogrzebania osadów kambru z otworu wiertniczego Bartoszyce IG 1 (por. Sikorska & Paczeńska, 1997). Objasnienia jak na ryc. 3  
**Fig. 4.** Reconstruction of the burial history of the Cambrian sediments from the Bartoszyce IG 1 borehole (cf. Sikorska & Paczeńska, 1997). For explanations see fig. 3



**Ryc. 5.** Soczewki macerałów wityrinitopodobnych (v),  $R_o = 3,71\%$  na tle podstawowej masy typu sapropelowego. Otw. wiern. Słupsk IG 1, gł. 4560,9 m. Światło odbite białe, imersja olejowa  
**Fig. 5.** Vitrinite — like macerals lenticular in shape (v),  $R_o = 3,71\%$  in sapropelic groundmass. The Słupsk IG 1 borehole, depth 4560.9 m. Reflected white light, oil immersion



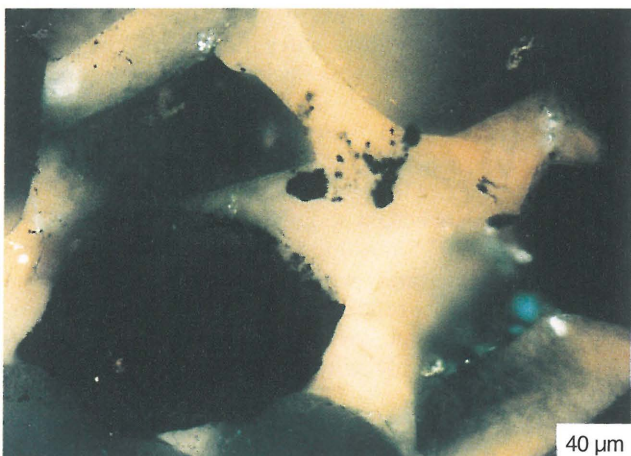
**Ryc. 6.** Soczewka wityrinitopodobna (v) ( $R_o = 1,70\%$ ) w smużystych skupieniach materiału sapropelowego. Otw. wiern. Kościerzyna IG 1, gł. 4504,3 m. Światło odbite białe, imersja olejowa  
**Fig. 6.** Vitrinite — like lense (v) ( $R_o = 1,70\%$ ) inside sapropelic flaser. The Kościerzyna IG 1 borehole, depth 4504.3 m. Reflected white light, oil immersion



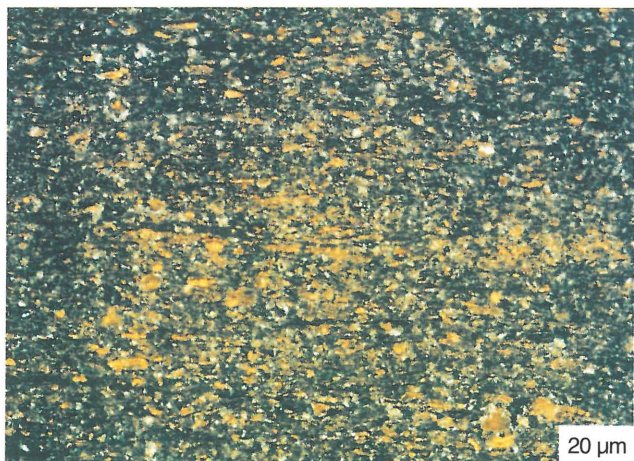
**Ryc. 7.** Lamina wityrinitopodobna (v) ( $R_o = 0,82\%$ ) w masie sapropelowo-ilastej silnie impregnowanej pirytem. Otw. wiern. Żarnowiec IG 1, gł. 2725,6 m. Światło odbite białe, imersja olejowa  
**Fig. 7.** Vitrinite — like lamina (v) ( $R_o = 0,82\%$ ) inside sapropelic — clay matrix strongly impregnated with pyrite. The Żarnowiec IG 1 borehole, depth 2725.6 m. Reflected white light, oil immersion



**Ryc. 8.** Wkładka wapienia impregnowanego epigenetycznymi bitumienami fluoryzującymi w barwach żółtopomarańczowych. Otw. wiern. Hel IG 1, gł. 3044,2 m. Światło odbite niebieskie, imersja olejowa  
**Fig. 8.** Thin limestone interbed impregnated with epigenetic bitumens showing yellow-orange fluorescence. The Hel IG 1 borehole, depth 3044.2 m. Reflected blue light, oil immersion



**Ryc. 9.** Epigenetyczne bituminy tworzące w piaskowcu spoiwo kontaktowo-porowe. Otw. wiern. Darżlubie IG 1, gł. 3015,0 m. Światło odbite niebieskie, imersja olejowa  
**Fig. 9.** Epigenetic bitumens forming contact — pore cement in sandstone. The Darżlubie IG 1 borehole, depth 3015.0 m. Reflected blue light, oil immersion



**Ryc. 10.** Droбноziarnista masa sapropelowo-ilasta z intensywnie fluoryzującym rozproszonym liptodetrynitem. Otw. wiern. Żarnowiec IG 4, gł. 2707,5 m. Światło odbite niebieskie, obiektyw suchy  
**Fig. 10.** Finegrained sapropelic — clay matrix with dispersed liptodetrynite showing intensive fluorescence. The Żarnowiec IG 1 borehole, depth 2707.5 m. Reflected blue light, dry objective

zszym stopniu przeobrażone wykazują (podobnie jak wityrynit) wyraźną anizotropię.

Materię organiczną epigenetyczną stanowią głównie migrujące bituminy. Są one słabo widoczne w świetle białym, natomiast łatwo rozpoznawalne przy wzbudzeniu światłem niebieskim, w którym fluoryzują z różną intensywnością w kolorze żółtopomarańczowym. Bituminy infiltrują skałę wypełniając częściowo pory lub mikrospekana, a niekiedy tworzą spoiwo kontaktowo-porowe (ryc. 8, 9).

W kilku próbkach występuje redeponowana materia organiczna w postaci drobnych okruchów, bezładnie rozmieszczonych w masie skalnej. Redeponowane okruchy charakteryzują się wyższą zdolnością odbicia światła niż współwystępujące z nimi macerały wityrynitopodobne *in situ*.

### Zróznicowanie dojrzałości termicznej materii organicznej

Badany materiał charakteryzuje się dużą zmiennością wskaźnika refleksyjności  $R_0$ . W próbkach z otworu wiertniczego Słupsk IG 1, położonym na zachodnim krańcu syneklizy perybałtyckiej, stwierdzono najwyższe wartości refleksyjności macerałów wityrynitopodobnych. Średnie wielkości wskaźnika  $R_0$  w skałach z tego otworu zmieniają się od 3,71% (gł. 4560,9 m) do 4,53% (gł. 4732,7 m). Pomiarów wykonano dla różnych typów skał: od bogatych w syngenetyczną materię organiczną iłowców, przez mułowce do piaskowców zawierających materię organiczną *in situ* w śladowej ilości, obecną w spoiwie skał. W próbce mułowca z głębokości 4703,5 m (Słupsk IG 1) stwierdzono jedynie redeponowane macerały wityrynitopodobne charakteryzujące się wskaźnikiem refleksyjności  $R_0$  równym 4,37%. We wszystkich badanych próbkach z otworu wiertniczego Słupsk IG 1 macerały wityrynitopodobne wykazują silną anizotropię.

Wysoką zdolność odbicia światła, choć nieco niższą niż w Słupsku IG 1, stwierdzono także w próbkach iłowców ubogich w materię organiczną *in situ* z otworu wiertniczego Łopiennik IG 1, położonego w południowej części Lubelszczyzny. Pomiarów refleksyjności wykonane na nielicznych macerałach wityrynitopodobnych silnie anizotropowych, wykazały wysoką wartość wskaźnika  $R_0$ , zmieniającą się od 2,90% (gł. 4768,4 m) do 3,84% (gł. 5160,3 m).

W pozostałych otworach wiertniczych nie stwierdzono tak ekstremalnie wysokich wartości refleksyjności macerałów wityrynitopodobnych jak w profilach Słupska IG 1 i Łopiennika IG 1. Można natomiast wyróżnić grupę otworów wiertniczych, w których odnotowano średnie (choć nadal znaczne) wielkości wskaźnika refleksyjności  $R_0$ . Należą tu otwory z obszaru syneklizy perybałtyckiej: Kościerzyna IG 1 — średnia wartość  $R_0 = 1,70\%$  (w interwale głębokości 4425,0–4751,2 m) i Prabuty IG 1 — wartości  $R_0$  w zakresie 1,38–1,49% (gł. 3414,5–3591,4 m) oraz z lubelskiego skłonu platformy: Busówno IG 1 — średnia wartość  $R_0 = 1,98\%$  (gł. 3400,4 m) i Terebiń IG 5 — średnia wartość  $R_0 = 1,17\%$  (gł. 3231,5 m). Badane w tej grupie próbki są reprezentatywne głównie przez skały ilaste i częściowo mułowce ubogie w materię organiczną silnie zdyspergowaną. Niekiedy zbyt małe rozmiary macerałów (5  $\mu\text{m}$ ) uniemożliwiały wykonanie pomiarów refleksyjności. Materia organiczna występująca *in situ* jest skąpa. Tworzy zazwyczaj smużyste skupienia typu sapropelowego, w których obserwuje się fragmenty macerałów wityrynitopodobnych (ryc. 6). W iłowcu z otworu wiertniczego Busówno IG 1 (gł. 3400,4 m), w mikrospekana-

niach skały, stwierdzono obecność epigenetycznych bituminów charakteryzujących się fluorescencją w barwach żółtopomarańczowych. W niektórych próbkach odnotowano występowanie okruchów redeponowanej materii organicznej odznaczających się wysoką refleksyjnością, dochodzącą do 3,38%.

Pozostałe otwory wiertnicze (Darżlubie IG 1, Żarnowiec IG 1, Żarnowiec IG 4, Hel IG 1, Gdańsk IG 1, Olsztyn IG 2, Gołdap IG 1), z uwagi na zbliżone wyniki pomiarów zdolności odbicia światła, można zaliczyć do wspólnej grupy, charakteryzującej się najniższymi wartościami wskaźnika refleksyjności komponentów wityrynitopodobnych (ryc. 7). Wspomniane wyżej profile wiertnicze są położone na obszarze syneklizy perybałtyckiej, głównie w jej centralnej części. Średnie wielkości refleksyjności są tu na ogół zbliżone i zmieniają się od 0,63% dla Olsztyna IG 2 (gł. 2488,8 m) do 0,97% dla Gdańska IG 1 (gł. 3301,0 m). W tej grupie profili wiertniczych wyróżnia się otwór Gołdap IG 1, położony we wschodniej części syneklizy perybałtyckiej, w której osady kambru znajdują się na małej głębokości, a mimo to stwierdzono tu dość wysokie średnie wartości wskaźnika refleksyjności  $R_0 = 0,91\%$  (gł. 1486,4 m).

W wymienionych wyżej otworach wiertniczych syneklizy perybałtyckiej, obok próbek iłowców, mułowców i piaskowców zbadano także wapienie. Te ostatnie zawierają głównie epigenetyczną materię organiczną utworzoną z migrujących bituminów (exudatynitu). Stwierdzono je w próbkach z otworów wiertniczych Hel IG 1 i Żarnowiec IG 4, gdzie wypełniają wolne przestrzenie pomiędzy kryształami kalcytu, a niekiedy je impregnują. Bituminy fluoryzują z różną intensywnością w barwach żółtopomarańczowych (ryc. 8).

Również w jednej z próbek piaskowca (Darżlubie IG 1, gł. 3015,0 m) odnotowano obecność epigenetycznych bituminów silnie fluoryzujących w świetle niebieskim, w kolorze żółtym. Impregnują one skałę tworząc lokalnie spoiwo typu kontaktowo-porowego (ryc. 9).

W próbkach iłowców i mułowców zachodniej części syneklizy perybałtyckiej występuje na ogół skąpa substancja organiczna *in situ*, a jedynie w próbkach górnokambrskich z Darżlubia IG 1 (gł. 3015,0 m), Żarnowca IG 1 (gł. 2725,6 m) i Żarnowca IG 4 (gł. 2707,5 m) odnotowano bogatą syngenetyczną materię organiczną.

### Interpretacja wyników

Przedstawione wyżej wyniki pomiarów zdolności odbicia światła na macerałach wityrynitopodobnych wykazują generalny wzrost wartości wskaźnika  $R_0$  wraz z głębokością pogrzebania osadów zarówno w poszczególnych profilach wiertniczych, jak i regionalnie z NE na SW.

Taki sam kierunek regionalnych zmian refleksyjności materii organicznej stwierdzono w nadległych osadach ordowiku na obszarze polskiej części platformy wschodnioeuropejskiej (Nehring-Lefeld i in., 1997).

Termiczna dojrzałość materii organicznej, której wyrazem jest wielkość wskaźnika refleksyjności wityrynit, zależy od dwóch czynników: czasu geologicznego i temperatur jakim zostają poddane skały, przy czym ten drugi element jest znacznie ważniejszy (van Gijssel, 1990). Ponieważ wartość  $R_0$  wzrasta wraz z temperaturą jakiej poddane były skały, to w badanych profilach należy się spodziewać wyższej refleksyjności w próbkach pochodzących z większych głębokości. Znajduje to potwierdzenie w prezentowanych w niniejszej pracy wynikach badań.

Ilustrację zależności zdolności odbicia światła od głębokości z jakiej pochodzi dana próbka stanowi wykres przedstawiony na ryc. 2. Niemal wszystkie punkty projekcyjne układają się zgodnie z kierunkiem, w którym jednocześnie wzrasta refleksyjność i głębokość próbki. Od tej prawidłowości wyraźnie odbiega próbka z otworu wiertniczego Gołdap IG 1, charakteryzująca się wysoką średnią wartością wskaźnika refleksyjności macerałów wityrynitopodobnych  $R_o = 0,91\%$  przy niewielkiej głębokości (1486,4 m). Ponieważ wynik ten dotyczy jednej próbki należy traktować go bardzo ostrożnie. Jednak można też szukać przyczyny podwyższonej refleksyjności w lokalnym przegrzaniu. W danym przypadku jego źródłem mogła być strefa uskokowa, przy której usytuowano otwór wiertniczy Gołdap IG 1. Wzdłuż płaszczyzn uskokowych odbywa się przepływ gorących roztworów z głębi ziemi, a ponadto — na skutek ruchu mas skalnych i wywołanego tarcia wytwarza się dodatkowe ciepło.

Fang i Jianyu (1992) prezentują pogląd, że źródłem anomalnych wielkości współczynnika refleksyjności wityrynitów mogą być także warunki sedymentacji. Materia organiczna osadzona w strefach o różnym potencjale oksydacyjno-redukcyjnym, a zatem o różnej początkowej zawartości wodoru i tlenu, może osiągnąć różny stopień dojrzałości w tych samych warunkach termicznych. Podwyższone wartości współczynnika refleksyjności wityrynitów wspomniani autorzy (Fang & Jianyu, 1992) łączą z bardziej utleniającymi warunkami sedymentacji. W przypadku opisywanego wcześniej otworu wiertniczego Gołdap IG 1, anomalnie wysoką refleksyjność można dodatkowo wytłumaczyć wysokim potencjałem oksydacyjno-redukcyjnym środowiska sedymentacji w tym rejonie.

Bardzo wysokie wartości wskaźnika refleksyjności w porównaniu z pozostałymi wynikami, otrzymano dla macerałów wityrynitopodobnych z otworu wiertniczego Słupsk IG 1. Na głębokości 4560,9 m i 4732,7 m średnia refleksyjność wynosi odpowiednio: 3,71 i 4,53%. Fakt ten był już wcześniej zauważony przez Witkowskiego (1989), który podał jeszcze wyższe wartości wskaźnika refleksyjności ( $R_o = 5,4 - 5,6\%$ ), a powodu tak silnego przegrzania upatruje w ewentualnym ekstremalnie głębokim pogrzebaniu osadów kambryjskich w czasie subsydencji dolnopaleozoicznej. Jednak pogląd ten wydaje się mało prawdopodobny, jeśli pograżenie skał wyznaczone na krzywej subsydencji ogólnej dla spągu kambru dolnego (Sikorska & Paczeńska, 1997) sięgało ok. 5500 m. Przyczyną tak wysokich temperatur panujących w osadach kambryjskich może być usytuowanie otworu wiertniczego Słupsk IG 1 w sąsiedztwie strefy Teisseyre'a-Tornquista (T-T), z którą wiąże się obecność głębokich rozłamów tektonicznych. W samym profilu stratygraficznym Słupsk IG 1 brak jest części kambru środkowego oraz kambru górnego na skutek ich ścięcia w strefie uskokowej. Podobnie wysokie wartości wskaźnika refleksyjności dla macerałów wityrynitopodobnych, dochodzące nawet do 5,0%, odnotowano w kambryjsko-ordowickich łupkach alunowych w Skandynawii w rejonie Oslo (Buchardt i in., 1986; Buchardt & Lewan, 1990). Autorzy wspomnianych badań wiążą to zjawisko z intensywną subsydencją sylursko-dewońską w brzeżnej części tarczy bałtyckiej, w pobliżu skandynawskiego frontu deformacji kaledońskich oraz dodatkowo wpływem późniejszej, permskiej działalności wulkanicznej.

Bardzo wysokie wartości refleksyjności materii organicznej świadczą o warunkach anchimetamorficznych, które wydają się jak najbardziej prawdopodobne w rejonie Słu-

pska IG 1, w świetle badań krystaliczności illitu (Schleicher, 1994). Obliczone z dyfraktogramów próbek z otworu Słupsk IG 1 wartości wskaźnika krystaliczności Kublera poniżej  $0,375^\circ$  (2), wskazują na wysokie paleotemperature, odpowiadające zakresowi anchimetamorfozy.

Wysokie wartości wskaźnika refleksyjności dla macerałów wityrynitopodobnych w otworze wiertniczym Łopiennik IG 1 ( $R_o = 4,23\%$ ) można również tłumaczyć, obok dużej głębokości pogrzebania (5160,3 m), usytuowaniem tego profilu w sąsiedztwie strefy T-T. Wśród badanych próbek celowo umieszczono kilka pochodzących z otworu wiertniczego Narol PIG 2, który znajduje się poza granicą platformy wschodnioeuropejskiej, w obrębie bloku małopolskiego. Tak jak się spodziewano, uzyskane wartości wskaźnika refleksyjności są tu wyższe, w porównaniu z próbkami pochodzącymi z analogicznych głębokości w profilach na platformie wschodnioeuropejskiej. Potwierdza się ogólnie przyjęty pogląd, że na obszarze o niestabilnym charakterze tektonicznym możliwy jest dopływ większych ilości ciepła.

W pracach dotyczących materii organicznej można spotkać kilka (niewiele różniących się między sobą) schematów określających jej stopień dojrzałości w zależności od wielkości wskaźnika refleksyjności wityrynitów (Vassojevicz i in., 1976; Bostick, 1979; Price, 1983; Batten & Gaupp, 1985; Barker, 1988; van Gijssel, 1990; Corrado, 1995). Według kryteriów Battena i Gauppa (1985) spośród badanych próbek stadium dojrzałe ( $R_o$  od 0,5 do 1,35%) osiągnęła materia organiczna z otworów wiertniczych: Darżlubie IG 1, Żarnowiec IG 1, Żarnowiec IG 4, Gdańsk IG 1, Gołdap IG 1, Hel IG 1, Olsztyn IG 2, Terebiń IG 5. W przedziale przejściowym od materii dojrzałej termicznie do zmetamorfizowanej ( $R_o$  od 1,35 do 2,00%) znalazły się próbki z otworów wiertniczych: Kościerzyna IG 1, Prabuty IG 1, Busówno IG 1, Narol IG 2. Stadium zmetamorfizowane ( $R_o$  2,00%) osiągnęła materia organiczna z otworów wiertniczych Słupsk IG 1 i Łopiennik IG 1.

Przedstawione wyżej wyniki badań materii organicznej pozwalają wydzielić fragmenty profili wiertniczych, w których skały spełniają kryteria macierzystości dla generowania węglowodorów. Należą do nich skały ilaste górnego kambru z otworów Darżlubie IG 1, Hel IG 1, Żarnowiec IG 1 i Żarnowiec IG 4 zawierające bogatą i dojrzałą materię organiczną ( $R_o$  od 0,81 do 0,86%) typu sapropelowego. Wygenerowana z nich ropa została częściowo zatrzymana w grubokrystalicznych wapieniach górnokambryjskich towarzyszących iłowcom.

Omówiony wcześniej wykres (ryc. 2) zależności wskaźnika refleksyjności od głębokości można wykorzystać do oszacowania wielkości paleogradientu termicznego dla kambru. W tym celu poszczególnym wartościom  $R_o$  przypisano odpowiadające im paleotemperature (według schematu Battena & Gauppa, 1985). Punkty projekcyjne wyznaczyły prostą, która z pewnym przybliżeniem, pozwala określić wielkość paleogradientu. Z wykresu wynika, że jest on bardzo wysoki — ok.  $40^\circ\text{C}/\text{km}$  i odpowiada wielkości paleogradientu termicznego proponowanego przez Brangulisa i in., (1993). Należy podkreślić, że punkty projekcyjne, wyznaczające prostą, reprezentują otwory wiertnicze usytuowane w zachodniej, brzeżnej części badanego obszaru, biegnącej równoległe do strefy T-T. Na obszarze NE Polski gradient termiczny jest obecnie najniższy, ok.  $15^\circ\text{C}/\text{km}$  (Majorowicz, 1982), a anomalnie niski stwierdzono w otworze Kętrzyn IG 1, gdzie wynosi  $10,1^\circ\text{C}/\text{km}$  (Plewa, 1991). W tym rejonie należy przyjąć także znacznie niższe paleogradienty termiczne niż na pozostałym obszarze badań.

Biorąc pod uwagę powyższe rozważania, przyjęto, że ogólnie paleogradient w skałach kambru był o ok.  $10^{\circ}\text{C}/\text{km}$  wyższy niż obecnie. Opierając się na tym założeniu można skonstruować skalę paleotemperaturową dla danego profilu wiertniczego i odnieść ją do krzywej pogrzebania. Krzywa ta ilustruje historię osadów kambru tzn. przebieg subsyduencji ogólnej od kambru do chwili obecnej (Sikorska & Paczeńska, 1997). Z wykresu tego można odczytać przybliżone paleotemperatury jakim poddane były skały kambryjskie w poszczególnych okresach geologicznych. Oczywiście przebieg krzywych pogrzebania będzie zróżnicowany w poszczególnych regionach, które w różnym stopniu podlegały subsyduencji.

Na ryc. 3 przedstawiono krzywą pogrzebania dla otworu wiertniczego Kościerzyna IG 1 usytuowanego w pobliżu strefy T–T, a na ryc. 4 dla otworu Bartoszyce IG 1 położonego we wschodniej części badanego obszaru. Z ich porównania widać, jak różną „historię termiczną” miały osady kambryjskie pochodzące z tych profili wiertniczych. W rejonie Kościerzyny maksymalne paleotemperatury jakim poddane były skały w czasie subsyduencji sylursko-dewońskiej sięgały ok.  $150^{\circ}\text{C}$ , natomiast w rejonie Bartoszyce ok.  $25^{\circ}\text{C}$ . Fakt ten znajduje swoje odbicie w zróżnicowanym przebiegu procesów diagenetycznych na tych obszarach (Sikorska, 1996; Sikorska & Paczeńska, 1997), gdyż są one ściśle uwarunkowane zakresem temperatur w jakich przebiegały. Wykresy te można wykorzystać także do określenia czasu geologicznego, w którym zachodziły procesy w znanym nam zakresie temperatur.

Generowanie węglowodorów rozpoczyna się w temperaturze ok.  $65^{\circ}\text{C}$ , a zatem na podstawie przedstawionej krzywej pogrzebania (ryc. 3), w przypadku skał kambru z otworu wiertniczego Kościerzyna IG 1, proces ten miał swój początek w sylurze. Natomiast w otworze Bartoszyce IG 1 osady kambru nie znalazły się w zakresie tak wysokich temperatur i nie doszło tam do generowania węglowodorów (ryc. 4).

W badaniach procesu sylikacji w opisywanych skałach kambru, dzięki wykorzystaniu przedstawionych w niniejszej pracy danych paleotemperaturowych, udało się określić czas krystalizacji cementu kwarcowego (Sikorska & Paczeńska, 1987).

### Wnioski

1. Refleksyjność macerałów witynitopodobnych wzrasta wraz z głębokością pogrzebania zarówno w poszczególnych profilach wiertniczych jak i regionalnie z NE na SW. Lokalnie podwyższony stopień dojrzałości materii organicznej można wiązać ze strefami o wzmożonej aktywności tektonicznej.

2. Wyznaczone maksymalne paleotemperatury dla obszarów o odmiennej historii pogrzebania wykazują dużą rozpiętość: od ok.  $150^{\circ}\text{C}$  w rejonie Kościerzyny do ok.  $25^{\circ}\text{C}$  w rejonie Bartoszyce.

3. Pomiary refleksyjności macerałów witynitopodobnych pozwoliły przyjąć, że generalnie paleogradient geoter-

miczny w osadach kambru na badanym obszarze był o ok.  $10^{\circ}\text{C}/\text{km}$  wyższy niż obecnie.

4. Wykonane badania potwierdzają poglądy, zgodnie z którymi proces generacji ropy z osadów kambru rozpoczął się w sylurze.

### Literatura

- ALPERN B. 1978 — Petrographie du kerogene (praca nie publikowana).  
 BARKER C.E. 1988 — Geothermics of petroleum systems: implications of the stabilization of kerogen thermal maturation after a geologically brief heating duration at peak temperature. [In:] Magoon L.B., ed., Petroleum systems of the United States. U.S. Geol. Surv. Bull., 1870.  
 BATTEN D.J. & GAUPP R. 1985 — Maturation of organic matter in Cretaceous strata of the Northern Calcareous Alps. N. Jb. Geol. Paläont. Mh., 3: 157–175.  
 BOSTICK N.H. 1979 — Microscopic measurement of the level of catagenesis of solid organic matter in sedimentary rock to aid exploration for petroleum and to determine former burial temperatures — A review. [In:] Scholle P.A., Schluger P.R., eds., Aspects of diagenesis. Tulsa. Soc. Ec. Paleont. Mineral. Spec. Publ., 26: 17–43.  
 BRANGULIS A.P., KANEV S.V., MARGULIS L.S. & POMERANTSEVA R.A. 1993 — Geology and hydrocarbon prospects of the Paleozoic in the Baltic region. Petrol. Geol. '86 Ltd. The Geol. Soc. London: 651–654.  
 BUCHARDT B., CLAUSEN J. & THOMSEN E. 1986 — Carbon isotope composition of Lower Palaeozoic kerogen: Effects of maturation. Org. Geochem., 10: 127–134.  
 BUCHARDT B. & LEWAN M.D. 1990 — Reflectance of vitrinite-like macerals as a Thermal Maturity Index for Cambrian-Ordovician Alum Shale, Southern Scandinavia. AAPG Bull., 74: 394–406.  
 CORRADO S. 1995 — Optical parameters of maturity of organic matter dispersed in sediments: first results from the Central Apennines (Italy). Terra Nova, 7: 7.  
 FANG H. & JIANYU C. 1992 — The cause and mechanism of vitrinite reflectance anomalies. J. Petrol. Geol., 15: 419–434.  
 MAJOROWICZ J. 1982 — Wieloznaczność tektonicznej interpretacji rozkładu pola geotermicznego na obszarach platformowych Polski. Prz. Geol., 30: 86–94.  
 MODLIŃSKI Z. & ŻELICHOWSKI A.M., 1990 — Mapa strukturalna stropu kambru (niepubl.)  
 NEHRING-LEFELD M., MODLIŃSKI Z. & SWADOWSKA E. 1997 — Thermal evolution of the Ordovician in the western margin of the East-European Platform: CAI and Ro data. Geol. Quart., 41: 129–137.  
 PLEWA M. 1991 — The heat flow on the Polish territory. Z. Nauk. AGH. Geofizyka Stosowana, z. 8. Kraków: 141–151.  
 PRICE L.C. 1983 — Geologic time as a parameter in organic metamorphism and vitrinite reflectance as an absolute paleogeothermometer. J. Petrol. Geol., 6: 6.  
 SCHLEICHER M. 1994 — Sedimentologie, Diagenese und Muttergesteinsbewertung der kambrischen Siliziklastika in Nord- und Südostpolen. Clausthaler Geowiss. Diss., 43:  
 SIKORSKA M. 1996 — Rola procesów diagenetycznych w kształtowaniu własności kolektorskich skał kambru na obszarze polskiej części platformy prekambryjskiej. CAG, 464/97.  
 SIKORSKA M. & PACZEŃSKA J. 1997 — Quartz cementation in Cambrian sandstones on the background of their burial history (Polish part of the East European Craton). Geol. Quart., 41: 265–272.  
 VAN GIJZEL P. 1990 — Transmittance Colour Index (TCI) of amorphous organic matter: a new thermal maturity indicator for hydrocarbon source rocks, and its correlation with mean vitrinite reflectance and Thermal Alteration Index (TAI). Int. Symp. Organic Petrology. Proc. Zeist -The Netherlands: 49–64.  
 VASSOJEVICZ I.B., NIERUCZEV S.G. & ŁOPATIN N.W. 1976 — O szkale katageneza w swjazi z neftegazoobrazowaniem. Izd. Nauka.  
 WITKOWSKI A. 1989 — Paleodynamika i ropo- gazoność starszego paleozoiku Pomorza i Bałtyku Południowego. Z. Nauk. AGH. Geologia, 43: 1–128. Kraków.