

Historia sylikfikacji w piaskowcach kambru z rejonu Wiśniówki w Górach Świętokrzyskich

Magdalena Sikorska*

Kambryjskie piaskowce rejonu Wiśniówki (kwarcyty łysogórskie) budują pasmo główne Łysogór. Są to skały silnie scementowane regeneracyjnym spoiwem kwarcowym. Proces sylikfikacji zachodził prawdopodobnie w dwóch zasadniczych etapach. I generacja cementu kwarcowego powstała we wczesnym etapie diagenety (w kambrze) i następnie uległa częściowemu rozpuszczeniu. II generacja tworzyła się na etapie głębokiego pogrzebienia skał kambru (w sylurze). Proces ten mógł zachodzić na głęb. ok. 1700 m, w temp. ok. 120°C. W strefach zbrekcjonowania piaskowców kambryjskich szczeliny wypełnione są kwarcem żyłowym. Duża rozpiętość temperatur krystalizacji (97,0°C–168,0°C) wskazuje na wieloetapowość tego procesu. Potwierdzają to obserwacje wielu systemów żył w badaniach katodoluminescencyjnych (CL). Przebieg procesu sylikfikacji w piaskowcach z rejonu Wiśniówki jest bardzo podobny do, opisanego wcześniej (Sikorska, 1998), procesu cementacji kwarcowej w piaskowcach kambru z obszaru polskiej części kratonu wschodnioeuropejskiego.

Słowa kluczowe: sylikfikacja, piaskowce, katodoluminescencja, kambry, Góry Świętokrzyskie

Magdalena Sikorska — **Silicification history of Cambrian sandstones in the Wiśniówka area, Holy Cross Mts (Central Poland).** Prz. Geol., 48: 251–258.

Summary. Cambrian sandstones from the Wiśniówka area (the Łysogóry quartzites) constitute the Main Łysogóry Range. These are rocks strongly cemented with authigenic quartz. Silicification process progressed in two phases. The first generation of quartz cement originated during early diagenesis (at Cambrian times) and was subsequently partly dissolved. The second generation of the quartz cement came into being during deep burial of Cambrian rocks (at Silurian times). The process possibly took place at a depth of ca. 1700 m, at a temperature of ca. 120°C. Brecciated zones of the sandstones show fractures filled with vein quartz. Wide range of its crystallization temperature (97°C–168°C) indicates multiphase character of the process. This is confirmed with CL observations made in many vein systems found in the sandstones here discussed. The course of silicification events in the Wiśniówka sandstones closely resembles the silicification process described earlier (Sikorska, 1998) from Cambrian sandstones occurring in the Polish part of the East European Craton.

Key words: silicification, sandstones, cathodoluminescence, Cambrian, Holy Cross Mts

Piaskowce kambryjskie Pasma Łysogórskiego, nazywane kwarcytami, są znane ze swej wyjątkowej twardości i spoiwości. Jest to wynikiem bardzo silnego zsylikfikowania tych skał (Czerwiński, 1959; Skórska, 1959). W niniejszej pracy podjęto próbę określenia warunków, czasu i sposobu krystalizacji cementu kwarcowego z zamiarem porównania tych wyników z rezultatami analogicznych badań przeprowadzonych dla piaskowców kambru z polskiej części platformy wschodnioeuropejskiej (Sikorska, 1998). Badaniem objęto rejon Wiśniówki, tzn. kamieniołomy Wiśniówka Duża, Podwiśniówka oraz drobne odsłonięcia w terenie, we wsiach Marcinkowice, Wąworków oraz Klonówka (ryc. 1).

Zasadniczym miejscem opróbowania był kamieniołom Wiśniówka Duża, a w szczególności jego wschodnia ściana znajdująca się na drugim poziomie eksploatacyjnym (10 próbek). Z Wiśniówki Dużej pochodzą dodatkowo 3 próbki z tzw. przekopu zachodniego, z jego wschodniej i zachodniej ściany. Drugim miejscem badań był kamieniołom Podwiśniówka, a dokładnie jego zachodnia ściana, z której pobrano próbki (8). Z kolejnych odsłoneń pochodziły pojedyncze próbki: z południowego zbocza wzgórza Klonówki, ok. 10 m od jego grani (1); z Marcinkowic w dolinie rzeczki Kochówka (2) oraz ze starego kamieniołomu w Wąworkowie (2). W niniejszych badaniach podjęto próbę pomierzenia współczynnika refleksyjności dla macerałów wityryto-podobnych. Niestety starania te zakończyły się niepowodzeniem, gdyż obecna w skałach rozproszona substancja organiczna nie nadawała się do przeprowadzenia wiarygodnych pomiarów. Strzępy mate-

rii organicznej okazały się albo zbyt małe, albo miały charakter materii redeponowanej (A. Halik, E. Swadowska — inf. ustna), która nie pozwala na poprawną interpretację termicznej historii skały.

Metody badań

Standardowe badania mikroskopowe przeprowadzono na 26 płytkach cienkich wykonanych z próbek reprezentujących wszystkie badane odkrywki. Pomiary planimetryczne składu mineralnego wykonano przy użyciu aparatu do automatycznego zliczania punktów pomiarowych Swift Model „F”.

Badania katodoluminescencyjne (CL) wykonano dla tych samych 26 próbek za pomocą aparatury typu CCL 8200 mk3 współdziałającej z mikroskopem polaryzacyjnym Optiphot 2 (firmy Nikon). Badania prowadzono na odkrytych płytkach cienkich o polerowanej powierzchni.

Mikroskopia elektronowa (SEM) została wykorzystana do zbadania fizjografii ziarn kwarcu z autigenicznymi obwódkami regeneracyjnymi oraz obserwacji innych nowopowstałych faz mineralnych. Przy ich identyfikacji, w szczególnych przypadkach, wykonano punktowe analizy składu chemicznego za pomocą mikroskopy energetycznej (EDS). Badania te wykonano na mikroskopie skaningowym JSM-35 JEOL współpracującym z mikrosondą energetyczną typu Link-ISIS.

Badania mikrotermometryczne przeprowadzono na czterech specjalnie wykonanych preparatach obustronnie polerowanych. Korzystano z urządzenia FLUID INC. SYSTEM współpracującego z mikroskopem optycznym Leitz-Orthoplan. Eksperyment grzewczy polegał na podgrzewaniu inkluzji dwufazowych do momentu homogenizacji. Wszystkie

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

badania przeprowadzono w Zakładzie Petrologii Państwowego Instytutu Geologicznego.

Tło geologiczne

Skały kambryjskie w rejonie Wiśniówki stanowią zachodnią część pasma głównego Gór Świętokrzyskich. Obszar ten w ujęciu tektonicznym (Guterch i in., 1996) wchodzi w skład subregionu radomsko-łysogórskiego znajdującego się w obrębie większej jednostki tektonicznej — bloku małopolskiego. Piaskowce z rejonu Wiśniówki są zaliczane do osadów kambru środkowego i górnego (Czarnecki, 1927, 1929; Tomczykowa, 1968; Orłowski, 1968; Kowalczewski i in., 1986; Szczepanik, 1993, 1996). Według istniejących podziałów litostratygraficznych należą one bądź do formacji piaskowców z Wiśniówki (Orłowski, 1975) bądź do kwarcytów łysogórskich (Kowalczewski, 1995). Również nie ma zgodnych poglądów co do stylu dolnopaleozoicznych deformacji tektonicznych w tym regionie. Zdaniem wielu badaczy (Znosko, 1974, 1984; Kowalczewski & Studencki, 1983; Kowalczewski i in., 1986; Kowalczewski & Dadlez, 1996) deformacje te mają naturę fałdowo-łuskową. Wysunięto także inny pogląd (Mizerski, 1979, 1995; Orłowski & Mizerski, 1995) stwierdzający, że mają one charakter monoklinalny.

Warunki sedymentacji

Poglądy o płytkowodnym środowisku sedymentacji w zbiorniku kambryjskim w rejonie Wiśniówki głosili już Samsonowicz (1956) i Czarnecki (1957a, b). Dalsze badania sedymentologiczne potwierdziły ten punkt widzenia i jednocześnie dostarczyły bardziej szczegółowych informacji dotyczących warunków tworzenia się silikoklastycznych osadów kambru (Bielikowski, 1960; Dżułyński & Żak, 1960; Radwański & Roniewicz, 1960, 1963; Studencki, 1988, 1993, 1994). Powstawały one w płytkowodnym środowisku, w którym oddziaływały silne prądy związane z falowaniem i okresowymi intensywnymi sztormami. Studencki (1993) określił to środowisko jako strefę szelfu wewnętrznego, gdzie dominowały osady piaszczyste oraz szelfu zewnętrznego, na którym gromadziły się łupki i heterolity.

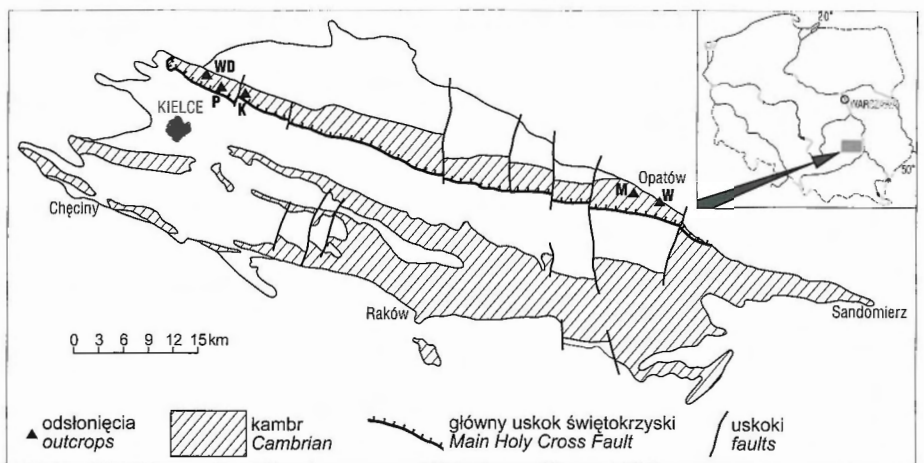
Charakterystyka petrograficzna piaskowców

Badane piaskowce kambryjskie pochodzą z różnych rejonów pasma łysogórskiego (ryc. 1), lecz makroskopowo nie różnią się między sobą. Są to jasnokremowe bądź jasnoszare skały o strukturze zbitej, masywnej. Według klasyfikacji Dotta zmodyfikowanej przez Pettijohna i in., (1972) badane piaskowce należą do arenitów kwarcowych i w przeważającej ilości można je określić mianem ortokwarcytów. Opisywane piaskowce często poprzecinane są żyłkami kwarcowymi, rzadziej żelazistymi, a niekiedy fragmenty piaskowca wchodzi w skład brekcji tektonicznej. Pod mikroskopem wykazują teksturę bardzo drobnoziarnistą, niekiedy z dużym udziałem frakcji

pylastej. Strukturę mają najczęściej bezładną. Piaskowce te należą do skał dojrzałych teksturalnie, na co wskazuje ujawnione w CL dobre obtoczenie, a także wysortowanie materiału okrucowego oraz brak detrytycznego pelitu ilastego (ryc. 2B). Skały te są również bardzo dojrzałe mineralogicznie, gdyż ich szkielet ziarnowy składa się niemal wyłącznie z kwarcu. Obok niego pojawiają się pojedyncze okrucy skał krzemionkowych (głównie czerty, rzadziej pyłowce), minerały akcesoryczne (cyrkon, turmalin) oraz śladowe ilości skaleni. Można przypuszczać, że pierwotnie było nieco więcej skaleni, lecz uległy przeobrażeniu i obecnie pozostały po nich nieliczne pseudomorfozy ilaste. Poza tym minerały ilaste obecne są w niewielkich ilościach w przestrzeniach międzyziarnowych, gdzie także mają charakter diagenetyczny. W elektronowym mikroskopie skaningowym widoczne są skupienia blaszkowatego illitu, który niekiedy przybiera formę zbliżoną do plastra miodu. Sporadycznie obserwowano włóknisty illit tworzący tzw. mostki w przestrzeniach porowych. Obserwuje się niewielką ilość pustych porów, które po części mają naturę pierwotną, a częściowo powstały przez rozpuszczenie pojedynczych ziarn (skaleni?). Badane piaskowce są silnie spojone cementem kwarcowym. Tworzy on regeneracyjne obwódki wokół ziarn kwarcu. W analizowanych próbkach nie stwierdzono obecności cementu węglanowego. Wśród autogenicznych składników występują drobne, rozsiane w skale fosforany (apatyt) (ryc. 3C) oraz widoczne makroskopowo pojedyncze kopolaste skupienia zielonego waryscytu (uwodniony fosforan glinu). W mikroskopie elektronowym można zaobserwować słupowy pokrój kryształów (ryc. 4D). O ostatecznej identyfikacji fosforanu jako waryscytu (nie wawelitu) zadecydowała wykonana analiza rentgenostrukturalna. Sporadycznie występuje anataz, który powstał z przeobrażenia minerałów żelazisto-tytanowych. W formie żyłek obecne są uwodnione tlenki żelaza. Ponadto w obrębie żył kwarcowych spotyka się grubokrystaliczny minerał z grupy kaolinitu.

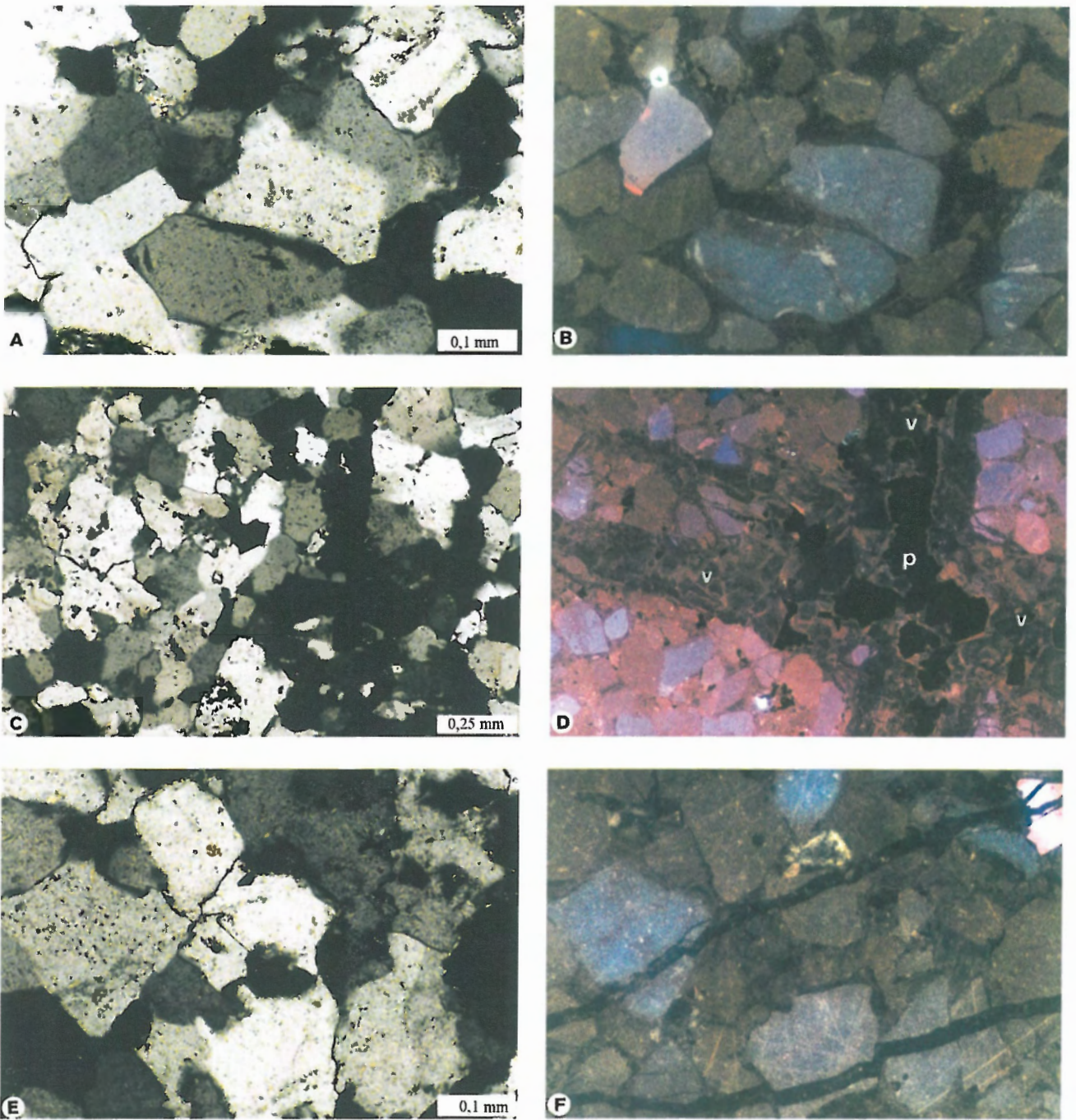
Badania katodoluminescencyjne

Badania katodoluminescencyjne (CL) wzbogaciły obserwacje prowadzone w zwykłym mikroskopie polaryzacyjnym o wiele nowych informacji. Na obrazach CL widoczne są pierwotne cechy osadu, a mianowicie ujawnia się dość luźne upakowanie ziarn kwarcu. W standardowym obrazie mikroskopowym obserwujemy typową dla kwarcytów strukturę zbity, gdzie ziarna kwarcu ściśle stykają



Ryc. 1. Lokalizacja badanych odsłoneń. WD — Wiśniówka Duża, P — Podwiśniówka, K — Klonówka, M — Marcinkowice, W — Wąworków

Fig. 1. The location of studied outcrops

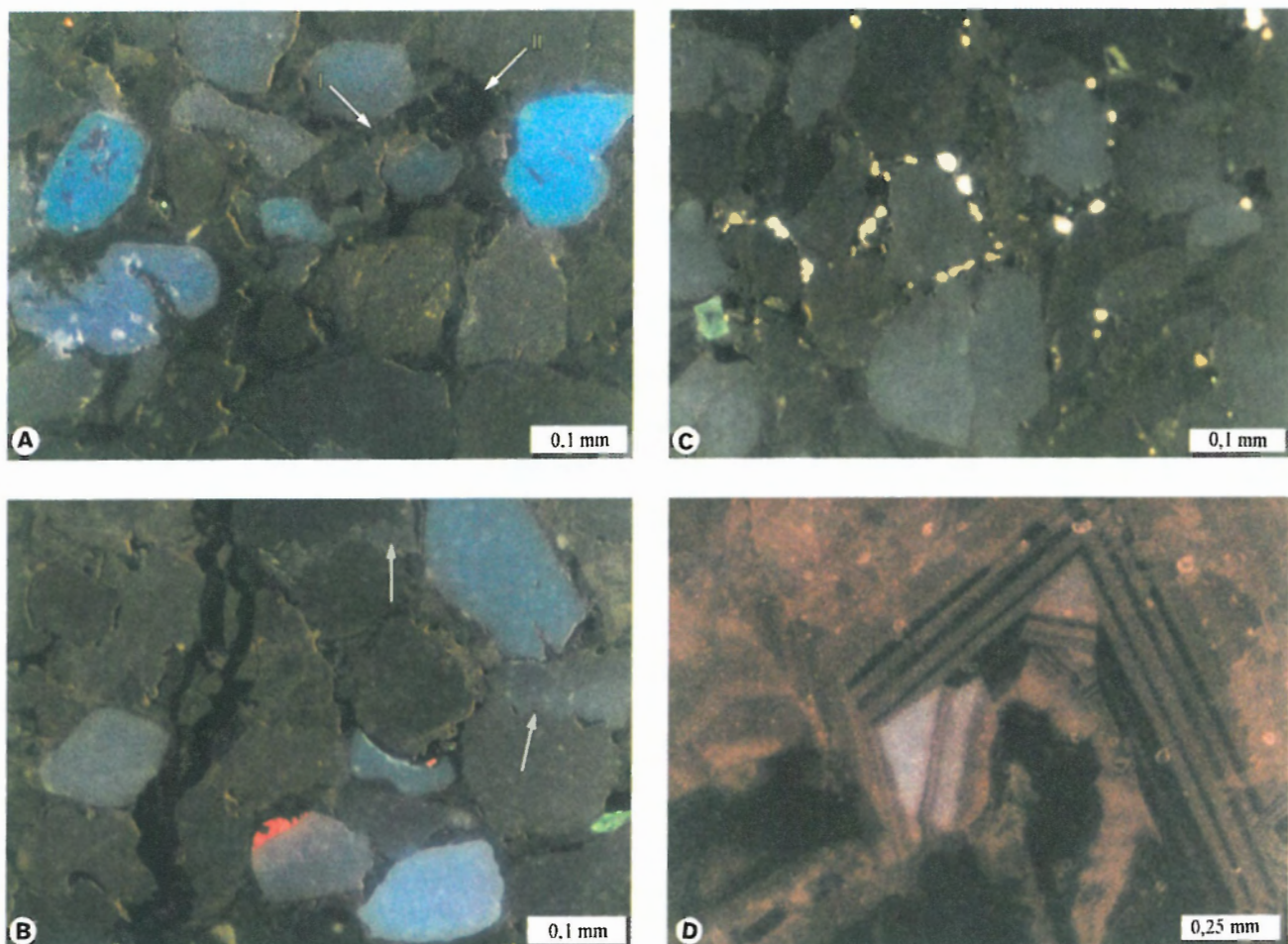


Ryc. 2. Obraz mikroskopowy (XP — nikole skrzyżowane) i katodoluminescencyjny (CL) tych samych fragmentów płytek cienkich. A, B — arenit kwarcowy, Klonówka. XP — ziarna kwarcu o niewidocznych pierwotnych kształtach, kontakty międzyziarnowe podłużne, ząbwiąjące, wklęsło-wypukłe. CL — widoczne pierwotne kształty ziarn, kontakty międzyziarnowe punktowe oraz luźne upakowanie i dobre obtoczenie materiału okruchowego. C, D — arenit kwarcowy ze strefy zbrekcjonowanej, Podwiśniówka. XP — typowa dla kwarcytu tekstura mozaikowa. CL — fragmenty piaskowca zcementowane kwarcem żyłowym (v) oraz pirytem (p). Jasne barwy luminescencyjne okruchów piaskowcowych mogą być wynikiem podgrzania przez gorące roztwory hydrotermalne. E, F — arenit kwarcowy, Wiśniówka Duża. XP — skała silnie zcementowana, brak spękań. CL — widoczne dwa spękania zabliznione autigenicznym kwarcem

Fig. 2. Microscope (XP — crossed polars) and cathodoluminescence (CL) images of the same portions of thin section. A, B — quartz arenite, Klonówka. XP — original grain outlines are not visible, intergranular contacts long, sutured and concavo-convex. CL — visible primary shape of grains, point intergranular contacts, detrital material loosely packed and well rounded. C, D — quartz arenite from brecciated zone, Podwiśniówka. XP — typical for quartzite mosaic texture. CL — sandstone fragments cemented by vein quartz (v) and pyrite (p). Light luminescence colours of sandstone fragments are due to heating by hydrothermal solutions. E, F — quartz arenite, Wiśniówka Duża. XP — hardly cemented rock without visible fractures. CL — visible two fractures healed with authigenic quartz

się ze sobą, a nawet wzajemnie ząbwiąją się. Granice między ziarnami są nieregularne, pozornie dominują kontakty ząbwiąjące (suturowe), wklęsło-wypukłe lub rzadko proste, a nigdy punktowe. Obserwujemy tu granice

między obwódkami regeneracyjnymi wokół poszczególnych ziarn kwarcu, natomiast na obrazach CL widać kontakty pomiędzy pierwotnymi powierzchniami tych ziarn. Okazuje się, że w rzeczywistości dominują kontakty



Ryc. 3. Mikrofotografie płytek cienkich w katodoluminescencji (CL). A — cement kwarcowy I generacji (brązowa barwa luminescencji) ze śladami rozpuszczania oraz cement II generacji (barwa czarna — brak luminescencji). Podwiśniówka. B — zaawansowane rozpuszczanie ziarn kwarcu pod ciśnieniem — liczne kontakty suturowe (strzałki). W skale nieregularne spękania zablżnione autigenicznym kwarcem. Wiśniówka Duża. C — rozsiiane w skale drobne kryształki diagenetycznego apatytu (mlecznobiała barwa luminescencji). Wąworków. D — fragment żyły kwarcowej. Widoczna budowa pasowa i sektorowa wewnątrz kryształu kwarcu żyłowego. Wiśniówka Duża

Fig. 3. Cathodoluminescence photomicrographs of thin sections. A — the first generation of quartz cement (brown luminescence colour) with traces of dissolution and the second generation of quartz cement (black colour — no luminescence). Podwiśniówka. B — advanced pressure-solution process — sutured contacts (arrows) between quartz grains. Irregular fractures healed with authigenic quartz. Wiśniówka Duża. C — disseminated minute crystals of diagenetic apatite (milky-white luminescence colour). Wąworków. D — quartz vein fragment. Note zoning and sector structure within quartz crystal. Wiśniówka Duża

międzyziarnowe proste i punktowe (ryc. 2A, B), bardzo rzadko zaś występują kontakty wklęsło-wypukłe lub suturowe. Te ostatnie mają znaczny udział w próbce z kamieniołomu Wiśniówka Duża. Widać, że w tym przypadku proces rozpuszczania kwarcu pod wpływem ciśnienia był bardzo zaawansowany (ryc. 3B). Na obrazach CL detrytyczne ziarna kwarcu mają barwy typowe dla skał magmowych i metamorficznych, tzn. niebiesko-fioletowe i brązowo-brunatne (Zinkernagel, 1978). Cement kwarcowy na ogół nie wykazuje luminescencji (na obrazie CL barwa czarna), a tylko miejscami widoczne są fragmenty cementu o jasnobrązowej luminescencji (ryc. 2B; ryc. 3A). Prawdopodobnie jest on wcześniejszy od „czarnego” cementu, a jego nieregularne, postrzępione formy mogą świadczyć o jego częściowym rozpuszczeniu (ryc. 3A). Najmłodsza generacja kwarcu pochodzenia diagenetycznego wypełnia liczne spękania przecinające skały (ryc. 2E, F; ryc. 3B). W badanych piaskowcach kambryjskich występują strefy silnie zbrekcjonowane (Wiśniówka Duża, Podwiśniówka), w których spękania są wypełnione kwarcem prawdopodobnie pochodzenia hydrotermalnego (Sal-

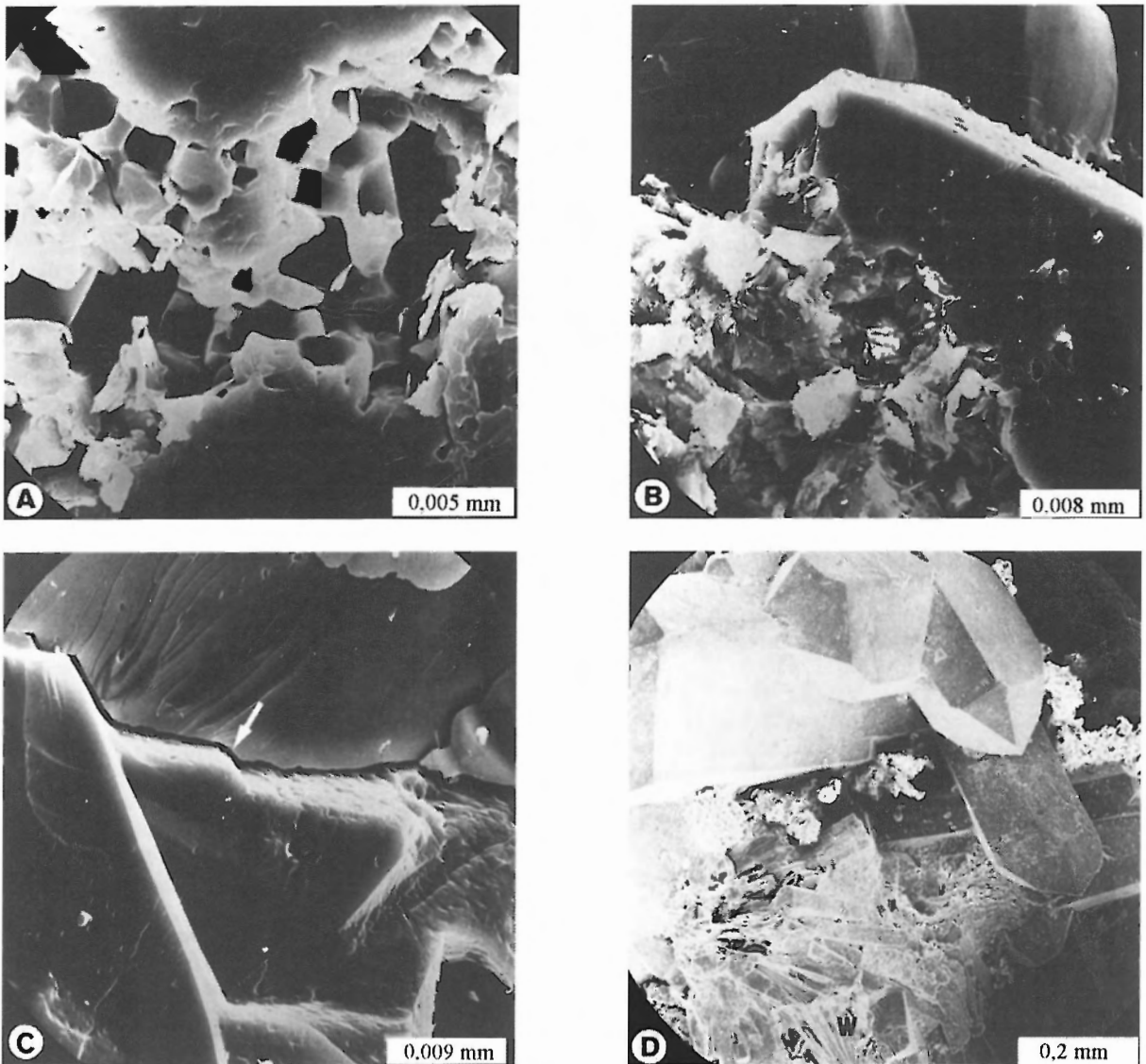
wa, 1997). W CL ma on barwy w odcieniach brązowych i lekko różowych oraz charakteryzuje się mniej lub bardziej wyraźną budową pasową, a niekiedy sektorową (ryc. 3D). Żyłom kwarcowym towarzyszą: piryt (ryc. 2C), markasyt, uwodnione tlenki żelaza oraz minerał z grupy kaolinitu. Wszystkie one są fazami młodszymi od kwarcu. Minerale te wypełniają centralne części żył kwarcowych lub izolowane próżnie w kwarcu żyłowym. W próbkach ze stref zbrekcjonowanych na obrazach CL można zidentyfikować poszczególne fragmenty skalne oraz określić ich genezę. Występują tu obok siebie okruchy piaskowca, który uległ zbrekcjonowaniu, drobne fragmenty kwarcu żyłowego starszej generacji oraz pojedyncze detrytyczne ziarna kwarcowe, a wszystko razem spojone jest kwarcem żyłowym. Drobne okruchy piaskowców kambryjskich, które znalazły się wewnątrz zbrekcjonowanej strefy, wykazują odmienne barwy luminescencyjne cementu kwarcowego (ryc. 2D), niż piaskowce niezbrekcjonowane. Okruchy te dostały się w środowisko gorących roztworów i pod wpływem oddziaływania podwyższonej temperatury wykazują obecnie luminescencję w znacznie jaśniejszych

barwach. Podobne zjawisko zmiany barw luminescencji cementu kwarcowego opisano w zbrekjonowanych piaskowcach kambryjskich z obszaru platformowego w otworze wiertniczym Prabuty IG 1 (Sikorska, 1998). W płytkach cienkich reprezentujących próbki z różnych odkrywek (Wiśniówka Duża, Podwiśniówka, Klonówka) obserwuje się w badaniach CL liczne mikroszczeliny wypełnione autigenicznym kwarcem (ryc. 2E, F; ryc. 3B). Na granicy ze skałą przybiera on identyczną orientację optyczną jak detrytyczne ziarna, które przecina, wobec czego na zwykłym obrazie mikroskopowym te mikrospeknięcia pozostają najczęściej niezauważone. Obserwacje w CL ułatwiają dostrzeżenie i zidentyfikowanie bardzo drobnych kryształów apatytu występujących w przestrzeniach międzyziarnowych, a niekiedy otaczających ziarna kwarcu (Wąworków). Dzięki mlecznobiałej barwie luminescencji

kryształy o wielkości nawet 5 μm są doskonale widoczne (ryc. 3C).

Badania inkluzji fluidalnych

Do przeprowadzenia badań w próbkach piaskowców kambryjskich wytypowano inkluzje dwufazowe (ciekło-gazowe), w których widoczny był pęcherzyk gazowy. Podgrzewając próbkę doprowadzono do homogenizacji gazu w ciecz i zarejestrowano temperaturę, w której ten proces przebiegał (T_H). Aby obserwacje takie można było łatwo przeprowadzić inkluzje muszą mieć odpowiednią wielkość, najlepiej powyżej 5 μm . Niestety cementy kwarcowe w ogóle zawierają niewiele inkluzji, więc szczególnie trudno jest znaleźć tak duże osobniki. Ze względu na małe rozmiary inkluzji nie przeprowadzono procesu ich



Ryc. 4. Zdjęcia z mikroskopu elektronowego (SEM). A — ślady rozpuszczania cementu kwarcowego prawdopodobnie I generacji. Wiśniówka Duża. B — regeneracyjna obwódka kwarcowa częściowo rozpuszczona i zastąpiona przez minerały ilaste (illit). Wiśniówka Duża. C — kompromisowe granice pomiędzy narastającymi naprzeciw siebie kwarcowymi obwódkami regeneracyjnymi. Wiśniówka Duża. D — fragment żyły kwarcowej ze skupieniem promieniście ułożonych kryształów waryscytu (W). Podwiśniówka

Fig. 4. Scanning electron photomicrographs (SEM). A — traces of dissolution of the first generation quartz cement. Wiśniówka Duża. B — quartz overgrowth partly dissolved and replaced by clay minerals (illite). Wiśniówka Duża. C — compromise boundary between opposite quartz overgrowths. Wiśniówka Duża. D — quartz vein fragment with radially arranged crystals of variscite (w). Podwiśniówka

wymrażania, dla zbadania stopnia zasolenia roztworu wewnątrz inkluzji. Otrzymane w trakcie badań temperatury homogenizacji inkluzji, z pewnym przybliżeniem, odpowiadają temperaturom krystalizacji macierzystego kryształu, w tym przypadku cementu kwarcowego. Ze względu na zbyt małą ilość pomiarów (ograniczoną naturalnymi cechami materiału badawczego) otrzymane wyniki należy traktować bardzo ostrożnie. Spośród czterech badanych próbek, tylko w jednej (Wiśniówka Duża) udało się pomierzyć T_H inkluzji pierwotnych. Otrzymano wyniki wahające się w zakresie 106,4 do 126,4°C (śr. 119,5°C). Znacznie łatwiejszym zadaniem jest znalezienie odpowiednio dużych (ok. 5µm) inkluzji dwufazowych w kwarcu żyłowym, dzięki czemu wykonano wiele pomiarów. Wybierano inkluzje, które nie tworzyły populacji o liniowym ułożeniu, aby w miarę możliwości, wyeliminować z badań inkluzje wtórne (Podwiśniówka). Otrzymano wyniki o znacznej rozpiętości temperatur homogenizacji, od 97,1 do 168,0°C (śr. 127,2°C). Dodatkowo wykonano dwa pomiary dla inkluzji cieplno-gazowych ułożonych wzdłuż wyraźnej linii i otrzymano temperatury homogenizacji 76,1°C i 84,0°C. Badany materiał nie pozwolił na wykonanie większej liczby pomiarów, ale z otrzymanych wyników można wyciągnąć ostrożne wnioski. Cementacja kwarcowa, czyli tworzenie się syntaksjalnych obwódek wokół ziarn kwarcu, zachodziło w temperaturze ok. 120°C. Jest to wartość doskonale mieszcząca się w zakresie temperatur krystalizacji cementu kwarcowego podawanych przez większość autorów (Ehrenberg, 1990; Walderhaug, 1990; Morad i in., 1991; Bjørlykke i in., 1992; Gluyas i in., 1993). Są to temperatury charakterystyczne dla późnej diagenety zachodzącej w czasie głębokiego pogrzebienia. Duża rozpiętość T_H dla pierwotnych inkluzji w kwarcu żyłowym wynika z istnienia wielu generacji żył kwarcowych. Ich obecność została udokumentowana w niniejszej pracy na obrazach CL. Dane temperaturowe otrzymane dla kwarcu żyłowego dotyczą jednej próbki (Podwiśniówka). Najniższe z pomierzonych temperatur ok. 97–99°C pochodzą z najmłodszej generacji kwarcu w badanej szczelinie, w której kwarc narasta od brzegów ku pustemu jeszcze wnętrzu spękania. Pozostałe wyniki pomiarów przekraczają temperaturę 100°C i maksymalnie dochodzą do 168,0°C. Otrzymane dane temperaturowe układają się w trzy odrębne populacje: ok. 100, 120 i 150°C. Aby odpowiedzieć na pytanie, czy populacje te odpowiadają trzem generacjom żył kwarcowych, należy wykonać większą liczbę pomiarów na kilku próbkach. Obserwacje w CL (można je prowadzić dopiero po wykonaniu pomiarów T_H , gdyż wysoka temperatura, powstająca w trakcie badań CL, mogłaby zaszkodzić inkluzjom) nie rozstrzygnęły tego problemu. Zdecydowanie niższe temperatury homogenizacji pomierzono w inkluzjach wtórnych (ok. 80°C), które powstały wzdłuż mikrospeków w kryształach kwarcu żyłowego. Są zdecydowanie młodsze od niego i utworzyły się z roztworów o znacznie niższej temperaturze.

Przebieg procesu sylikacji w piaskowcach

Proces sylikacji, rozumiany szeroko, obejmuje, według definicji autorów *Słownika Petrograficznego* (Ryka & Maliszewska, 1991), różne formy wzbogacania skały w krzemionkę: zarówno tworzenie się cementu kwarcowego wypełniającego przestrzeń międzyziarnową, jak i wypełnianie szczelin kwarcem. W badanych piaskowcach kambryjskich oba te procesy zachodziły bardzo intensywnie. Cement kwarcowy ma charakter regeneracyjnych obwódek wokół detrytycznych ziarn. Wzrastają one w zgodności optycznej z ziarnami kwarcu nadając im nowy

kształt. W zwykłym obrazie mikroskopowym trudno jest zaobserwować granicę pomiędzy ziarnem, a obwódką regeneracyjną. Niekiedy bywa ona zaznaczona przez obecne na powierzchni ziarna, bardzo cienkie otoczki (ang. *dust rims*). Najczęściej jednak mamy do czynienia z typową mozaiką kwarcytową, w której nie można odróżnić cementu kwarcowego od ziarn. Możliwość tę daje obraz CL, na którym ziarna różnią się od cementu barwą luminescencji. Formy narastania autigenicznego kwarcu można obserwować w mikroskopie skaningowym. Widać wówczas, że proces tworzenia się obwódek regeneracyjnych polega na wroście bardzo drobnych (kilkumikronowych) autigenicznych kryształów kwarcu, które w miarę narastania tworzą idiomorficzne ściany na detrytycznych ziarnach kwarcowych (ryc. 4B). Często z braku wolnej przestrzeni nowopowstałe ściany mają nieregularne kształty i tworzą się kompromisowe granice (ang. *compromise boundaries*) pomiędzy stykającymi się obwódkami sąsiednich ziarn (ryc. 4C) — ich kształty dopasowują się do siebie. Na niektórych obwódkach kwarcowych widoczna jest budowa schodkowa, świadcząca o stopniowym procesie ich narastania. O tym czy krystalizacja regeneracyjnego kwarcu nastąpiła w jednym, czy w kilku etapach można wnioskować na podstawie badań katodoluminescencyjnych. Jak wspomniano wcześniej, na obrazach CL wyróżniają się dwie generacje cementu kwarcowego (ryc. 3A). Pierwsza, starsza, jest bardzo słabo widoczna i tylko na niektórych zdjęciach (Podwiśniówka; Wiśniówka Duża; Klonówka). Prawdopodobnie ten wczesny cement kwarcowy uległ częściowemu rozpuszczeniu. Potwierdzają to obserwacje w skaningowym mikroskopie elektronowym, gdzie widoczne są ślady rozpuszczania obwódek regeneracyjnych (ryc. 4A). Ponadto obserwuje się korozję i zastępowanie autigenicznego kwarcu przez blaszki illitu (ryc. 4B). Trudno jest określić czas krystalizacji cementu kwarcowego. Można przyjąć, że pierwsza generacja regeneracyjnego kwarcu to cement wczesnodiagenetyczny, analogicznie do modelu procesu sylikacji piaskowców kambryjskich na platformie wschodnioeuropejskiej (Sikorska, 1998). Przyjmuje się, że źródłem krzemionki w takich przypadkach są wody meteoryczne oraz roztwory porowe wyciskane ze skał mułowcowo-iłastych w czasie kompaktacji mechanicznej (Williams i in., 1997). Natomiast druga, młodsza generacja cementu kwarcowego, łączyłaby się z późniejszym etapem diagenety, zachodzącym przy znacznie głębszym pogrzebaniu osadu. W tych warunkach krzemionka pochodzi z przeobrażeń minerałów ilastych (smektytu w illit) w obrębie przeławień skał mułowcowo-iłastych oraz częściowo jest wynikiem rozpuszczania kwarcu pod wpływem ciśnienia nadkładu. Wynikiem, tego drugiego z wymienionych procesów, są widoczne w CL wkłęsło-wypukłe (Marcinkowice), a w szczególności ząbujące kontakty (Wąworków, Wiśniówka Duża — ryc. 3B) pomiędzy detrytycznymi powierzchniami ziarn kwarcu. Strzetelski (1979) górną granicę stylolityzacji dla piaskowców kambryjskich w syneklizie perybałtyckiej wyznaczył na głębokości ok. 1700 m. Zwykle przyjmuje się, że proces rozpuszczania pod wpływem ciśnienia (pojawienie się mikrostylolitów) zachodzi od głębokości pogrzebienia ok. 1500 m. Dodatkowym elementem sprzyjającym procesowi rozpuszczania kwarcu jest obecność niewielkiej ilości substancji ilastej pomiędzy ziarnami, która działa katalizująco (Oelkers i in., 1996). Również tworzenie się szwów stylolitycznych związane jest z cienkimi laminami ilastymi. W badanych próbkach piaskowców nie obserwowano występowania szwów stylolitycznych, a i suturowe kontakty międzyziarnowe stwierdzono tylko w kilku płytkach cienkich. Wydaje się, że ma to ścisły związek z brakiem cien-

kich lamin ilastych i pierwotnego spoiwa ilastego w badanych piaskowcach. Pozostaje zatem najważniejsze pytanie o warunki i czas, w którym zachodziła cementacja kwarcowa. Jej pierwsza, początkowa faza, określona jako wczesnodiagenetyczna, mogła mieć miejsce w kambrze. Natomiast druga faza krystalizacji regeneracyjnego kwarcu zachodziła w warunkach znacznego pogrzebania, w temperaturze ok. 120°C, na co wskazały badania inkluzji fluidalnych. Ze wstępnych modelowych badań Poprawy (inf. ustna) nad problemem subsydencji w Łysogórach wynika, iż na koniec trwania syluru można przyjąć, że strop kambru był na głębokości ok. 1700 m, a temperatury w badanych piaskowcach kambru sięgały 110–120°C. Opierając się na możliwych obecnie do uzyskania przesłankach, można sądzić, że druga faza krystalizacji cementu kwarcowego miała miejsce w sylurze. Nie znamy dokładnie dalszej ewolucji termicznej badanych osadów, związanej z późniejszą ich historią geologiczną. Możliwe są jeszcze wyższe temperatury jakim poddane były później skały kambryjskie. Wskazują na to badania Szczepanika (1997) prowadzone na akrytach. Wartości wskaźnika TAI dla próbek z rejonu łysogórskiego są bardzo wysokie i wskazują na maksymalne temperatury ok. 150–300°C. Oddzielnie problem stanowi powstawanie żył kwarcowych, szczególnie licznych w strefach zbrekjonowania piaskowców. Salwa (1997) wyróżnił 9 etapów tworzenia się żył kwarcowych, które jego zdaniem najprawdopodobniej są pochodzenia hydrotermalnego. Niniejsze badania potwierdzają wieloetapowość mineralizacji kwarcowej, o której świadczą zmienne temperatury homogenizacji inkluzji fluidalnych w kwarcu żyłowym oraz obserwacje w CL. Widoczne są systemy przecinających się wzajemnie żył kwarcowych. Zróżnicowane barwy luminescencyjne kwarcu, widoczne na zdjęciach CL (jasnobrązowe, brunatne z odcieniem fioletowym, ciemnoróżowe, czarne), świadczą o obecności wielu generacji żył.

Porównanie z obszarem platformowym

Problem sylikacji piaskowców kambryjskich z obszaru polskiej części platformy wschodnioeuropejskiej został zbadany w ramach szczegółowej analizy procesów diagenetycznych w tych skałach (Sikorska, 1998). Cementacja kwarcowa w przypadku piaskowców kambru stanowi istotny problem w ocenie ich własności kolektorskich. Przeprowadzone badania petrologiczne piaskowców pozwoliły autorce na wyróżnienie dwóch faz sylikacji: I — wczesnodiagenetycznej i II — późniejszej, zachodzącej w warunkach głębokiego pogrzebania. Dzięki wykonanym, z dużym powodzeniem, badaniom rozproszonej materii organicznej (Swadowska & Sikorska, 1998) oraz krzywym subsydencji ogólnej (Sikorska & Pacześna, 1997) udało się, z pewnym przybliżeniem, odtworzyć historię termiczną osadów kambru na platformie. Dało to możliwość dalszej interpretacji, zgodnie z którą II etap sylikacji miał miejsce w przedziale czasowym sylur–karbon, w zakresie temperatur 90–150°C, co odpowiadało pogrzebaniu na głębokość ok. 2,5–3,5 km. W przypadku piaskowców kambryjskich z rejonu Wiśniówki interpretacja jest znacznie trudniejsza, ze względu na skomplikowaną i nie do końca wyjaśnioną, historię termiczną tych osadów. Przedstawione w niniejszej pracy przypuszczenia co do przebiegu sylikacji wydają się być bardzo zbliżone do wspomnianej interpretacji dla kambru platformowego. W obu przypadkach widoczna jest dwuetapowość cementacji kwarcowej zachodzącej w podobnych zakresach temperatur. Ponadto można przyjąć, że warunki diagenetyczne charakterystyczne dla głębokiego pogrzebania pojawiły się

w sylurze. Dalszy przebieg historii pograżania się osadów kambru w Łysogórach nie jest jasny. A zatem o podobieństwie przebiegu procesu sylikacji między tym rejonem, a obszarem platformowym można mówić jedynie w odniesieniu do okresu kambr–sylur. Cechą wspólną w obu porównywanych obszarach, choć przy znacznej różnicy w intensywności zjawiska, jest działalność hydrotermalna. W kwarcytach łysogórskich są to systemy żył kwarcowych, a nawet strefy zbrekjonowanych piaskowców zcementowanych kwarcem hydrotermalnym (Salwa, 1997). W piaskowcach z obszaru platformowego, w kambrze środkowym stwierdzono natomiast, jak dotąd jedynie w otworze wiertniczym Prabuty IG 1, cienką (ok. 30 cm miąższości) strefę zbrekjonowanego piaskowca. W badaniach katodoluminescencyjnych był widoczny cement kwarcowy o, zmienionej pod wpływem wysokiej temperatury, jasnobrązowej barwie luminescencji oraz późniejsze czarne żyłki kwarcowe (brak luminescencji) przecinające skałę (Sikorska, 1998). W piaskowcach tych były szczeliny wypełnione minerałami węglanowymi (kalcytem lub ankeritem), których obecności nie stwierdzono w badanych próbkach z Gór Świętokrzyskich. Ogólnie rzecz biorąc przebieg procesu sylikacji w piaskowcach z rejonu Wiśniówki jest bardzo podobny do, opisanego wcześniej (Sikorska, 1998), procesu cementacji kwarcowej w piaskowcach kambru z obszaru polskiej części platformy wschodnioeuropejskiej.

Autorka składa serdeczne podziękowania mgr M. Studenciemu za wprowadzenie w problemy budowy geologicznej Gór Świętokrzyskich i zagadnienia sedymentologiczne dotyczące kambru rejonu Wiśniówki.

Dziękuję za współpracę w przeprowadzonych pracach analitycznych: dr K. Jarmołowicz-Szulc w zakresie badań inkluzji fluidalnych, L. Giro w dziedzinie mikroskopii elektronowej i analizach mikrosondowych oraz mgr. A. Halik i dr E. Swadowskiej w badaniach refleksyjności materii organicznej.

Literatura

- BIELIKOWSKI K. 1960 — Typy warstwowań w kambrze Pasma Głównego Gór Świętokrzyskich. *Acta Geol. Pol.*, 10: 355–370.
- BJØRLYKKE K., NEDKVITNE T., RAMM M. & SAIGAL G.C., 1992 — Diagenetic processes in the Brent Group (Middle Jurassic) reservoirs of the North Sea: an overview. [In:] *Geology of the Brent Group*. Geol. Soc. Spec. Publ., 61: 263–287.
- CZARNOCKI J. 1927 — Kambr i jego fauna w środkowej części Gór Świętokrzyskich. *Sprawozd. Państw. Inst. Geol.*, 4: 189–207.
- CZARNOCKI J. 1929 — Sprawozdanie z badań wykonanych w r. 1928 w okolicach Kajetanowa. *Posiedz. Nauk. Państw. Inst. Geol.*, 24:38–42.
- CZARNOCKI J. 1957a — Geologia regionu łysogórskiego. *Pr. Inst. Geol.*, 18, t. 2, z. 1.
- CZARNOCKI J. 1957b — Stratygrafia i tektonika Gór Świętokrzyskich. *Pr. Inst. Geol.*, 18, t. 2, z. 3.
- CZERMINSKI J. 1959 — Petrografia piaskowców kwarcytowych środkowego kambru z Dużej Wiśniówki koło Kielc. *Kwart. Geol.*, 3: 677–688.
- DŻUŁYŃSKI S & ŻAK C. 1960 — Środowisko sedymentacji piaskowców kambryjskich z Wiśniówki i ich stosunek do facji fliszowej. *Roczn. Pol. Tow. Geol.*, 30: 213–241.
- EHRENBERG S.N. 1990 — Relationship between diagenesis and reservoir quality in sandstones of the Garn Formation, Haltenbanken, Mid-Norwegian continental shelf. *AAPG Bull.*, 74: 1538–1558.
- GLUYAS J.G., GRANT S.M. & ROBINSON A.G. 1993 — Geochemical evidence for a temporal control on sandstone cementation. [In:] *Diagenesis and basin development*. AAPG Studies in Geology, 36: 23–33.
- GUTERCH A., LEWANDOWSKI M., DADLEZ R., POKORSKI J., WYBRANIEC S., ŻYTKO K., GRAD M., KUTEK J., SZULCZEWSKI M. & ŻELAŻNIEWICZ A. 1996 — Podstawowe problemy głębokich badań geofizycznych i geologicznych obszaru Polski. *Publ. Inst. Geoph. Pol. Ac. Sc.*, M-20 (294).
- KOWALCZEWSKI Z. 1995 — Fundamental stratigraphic problem of the Cambrian in the Holy Cross Mts. *Kwart. Geol.*, 39: 449–470.

- KOWALCZEWSKI Z & DADLEZ R. 1996 — Tectonics of the Cambrian in the Wiśniówka area (Holy Cross Mts., Central Poland). *Kwart. Geol.*, 40: 23–46.
- KOWALCZEWSKI Z., KULETA M., LISIK R & MOCZYDŁOWSKA M. 1986 — Nowe dane o skałach kambru dolnego i ordowiku z okolic Wiśniówki w Górach Świętokrzyskich. *Kwart. Geol.*, 30: 201–228.
- KOWALCZEWSKI Z & STUDENCKI M. 1983 — Budowa geologiczna góry Krzemionki koło Kielc. *Kwart. Geol.*, 27: 695–708.
- MIZERSKI W. 1979 — Tectonics of the Lysogóry Unit in the Holy Cross Mts. *Acta Geol. Pol.*, 29: 3–37.
- MIZERSKI W. 1995 — Geotectonic evolution of the Holy Cross Mts. *Biul. Państw. Inst. Geol.*, 372.
- MORAD S., BHATTACHARYYA A., AL-AASM I.S. & RAMSEYER K. 1991 — Diagenesis of quartz in the Upper Proterozoic Kaimur Sandstones, Son Valley, central India. *Sed. Geol.*, 73: 209–225.
- OELKERS E.H., BJORKUM P.A. & MURPHY W.M. 1996 — A petrographic and computational investigation of quartz cementation and porosity reduction in North Sea sandstones. *Amer. J. Sc.*, 296: 420–452.
- ORŁOWSKI S. 1968 — Kambr antykliny łysogórskiej Gór Świętokrzyskich. *Biul. Geol. Wydz. Geol. UW*, 10: 153–219.
- ORŁOWSKI S. 1975 — Cambrian and Upper Precambrian lithostratigraphic units in the Holy Cross Mts (in Polish with English summary). *Acta Geol. Pol.*, 25: 431–448.
- ORŁOWSKI S. & MIZERSKI W. 1995 — Once more about geology of the Góra Wiśniówka outcrops (Holy Cross Mts., Central Poland). *Prz. Geol.*, 43: 11–14.
- PETTIJOHN F.J., POTTER P.E. & SIEVER R. 1972 — Sand and sandstone. Springer-Verlag.
- RADWAŃSKI A. & RONIEWICZ P. 1960 — Struktury na powierzchniach warstw w górnym kambrze Wielkiej Wiśniówki pod Kielcami. *Acta Geol. Pol.*, 10: 371–400.
- RADWAŃSKI A. & RONIEWICZ P. 1963 — Upper Cambrian trilobite ichnocoenosis from Wielka Wiśniówka (Holy Cross Mountains, Poland). *Acta Palaeont. Pol.*, 8: 259–280.
- RYKA W. & MALISZEWSKA A. 1991 — Słownik petrograficzny. Wyd. Geol.
- SALWA S. 1997 — Żyły kwarcowe w zachodniej części jednostki łysogórskiej. *Posiedz. Nauk. Państw. Inst. Geol.*, 53: 110–111.
- SAMSONOWICZ J. 1956 — Cambrian Paleogeography and the Base of the Cambrian System in Poland. *XX Int. Geol. Congr.*, 1.
- SIKORSKA M. 1998 — Rola diagenety w kształtowaniu przestrzeni porowej piaskowców kambru z polskiej części platformy wschodnioeuropejskiej. *Pr. Państw. Inst. Geol.*, 164.
- SIKORSKA M. & PACZEŚNA 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.
- SKORSKA A. 1959 — O strukturze środkowokambryjskich kwarcytów z Wiśniówki. *Rocz. Pol. Tow. Geol.*, 28: 261–284.
- STRZETELSKI W. 1979 — Litofacje i szczelinowatość roponośnych utworów kambru w synekliizie perybałtyckiej. *Pr. Geol. Komis. Nauk Geol. PAN*, 116.
- STUDENCKI M. 1988 — Warunki sedymentacji formacji dolnokambryjskich piaskowców z Ociesek i łupków z Kamieńca w Górach Świętokrzyskich. *Kwart. Geol.*, 32: 533–540.
- STUDENCKI M. 1993 — Środowisko sedymentacji piaskowców z Wiśniówki w Górach Świętokrzyskich. *Arch. Państw. Inst. Geol. Kielce*.
- STUDENCKI M. 1994 — Wiśniówka Duża quarry, stop 4. EUROPROBE — Excursion Guidebook, the Holy Cross Mts.:51–57.
- SWADOWSKA E. & SIKORSKA M. 1998 — Historia pogrzebania skał kambru na podstawie refleksyjności macerałów wtrinitopodobnych w polskiej części platformy wschodnioeuropejskiej. *Prz. Geol.*, 46: 699–706.
- SZCZEPANIK Z. 1993 — Acritarcha kambru Gór Świętokrzyskich i obszarów przyległych. *Arch. Państw. Inst. Geol. Kielce*.
- SZCZEPANIK Z. 1996 — Badania wieku najstarszych skał kambryjskich w jednostce łysogórskiej i ich tektoniki oraz badania wieku najmłodszych warstw kambryjskich w jednostce kieleckiej. *Arch. Państw. Inst. Geol. Kielce*.
- SZCZEPANIK Z. 1997 — Preliminary results of thermal alteration investigations of the Cambrian acritarchs in the Holy Cross Mts. *Kwart. Geol.*, 41: 257–264.
- TOMCZYKOWA E. 1968 — Stratygrafia osadów najwyższego kambru w Górach Świętokrzyskich. *Pr. Inst. Geol.*, 54.
- WALDERHAUG O. 1990 — A fluid inclusion study of quartz cemented sandstones from offshore Mid-Norway — possible evidence for continued quartz cementation during oil emplacement. *J. Sed. Petrol.*, 60: 203–210.
- WILLIAMS L.B., HERVIGG R.L. & BJØRLYKKE K. 1997 — New evidence for the origin of quartz cements in hydrocarbon reservoirs revealed by oxygen isotope microanalyses. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 61: 2529–2538.
- ZINKERNAGEL U. 1978 — Cathodoluminescence of quartz and its application to sandstone petrology. *Contr. Sedimentology*, 8.
- ZNOSKO J. 1974 — Outline of the tectonics of Poland and the problems of the Vistulicum and Variscicum against the tectonics of Europe. *Biul. Inst. Geol.*, 274:7–48.
- ZNOSKO J. 1984 — Tectonics of southern part of Middle Poland (beyond the Carpathians). *Z. Deutsch. Geol. Ges.*, 135.

UWAGA! ZASADY PRENUMERATY:

Prenumeratę krajową przyjmują jednostki kolportażowe RUCH, właściwe dla miejsca zamieszkania lub siedziby prenumeratora. Prenumeratę ze zleceniem wysyłki za granicę przyjmuje RUCH S.A., ul. Towarowa 28, 00-958 Warszawa, konto PBK, XIII Oddział Warszawa 370044-1195-139-11. Dostawa odbywa się pocztą zwykłą w ramach opłaconej prenumeraty, z wyjątkiem zlecenia dostawą pocztą lotniczą, której koszt w pełni pokrywa zamawiający. Zlecenia na prenumeratę dewizową, przyjmowane od osób zamieszkałych za granicą, są realizowane od dowolnego numeru w danym roku kalendarzowym. Informacje o warunkach prenumeraty i sposobie zamawiania udziela RUCH S.A., tel. 620-10-39, 620-10-19, 620-12-71 wew. 2442, 2366.

Wpłaty na prenumeratę są przyjmowane wyłącznie na okresy kwartalne, a terminy przyjmowania wpłat — na teren kraju i za granicę — są następujące: do 20.11 — na I kwartał następnego roku, do 20.02 — na II kwartał danego roku, do 20.05 — na III kwartał, do 20.08 — na IV kwartał. Cena prenumeraty wynosi 21 zł kwartalnie, a za granicę jest o 100% wyższa.

Dostawa zamówionej prasy następuje:

Przez jednostki kolportażowe RUCH — w sposób uzgodniony z zamawiającym.

Ponadto istnieje możliwość indywidualnej i zbiorowej prenumeraty *Przeglądu Geologicznego* — bezpośrednio w Państwowym Instytucie Geologicznym.

Prenumeratę można zamawiać, wnosząc opłatę z góry, przy czym przez cały czas prenumeraty będzie obowiązywała cena z dnia jej rozpoczęcia.

Zgłoszenia na prenumeratę przyjmuje w Państwowym Instytucie Geologicznym Sekcja Dystrybucji i Publikacji, gmach A, pokój 1 (parter), tel. 849-53-51 wew. 403 lub 229. Prenumeratę można też zgłaszać listownie na adres: Państwowy Instytut Geologiczny, Sekcja Dystrybucji, ul. Rakowiecka 4, 00-975 Warszawa.

Podstawą przyjęcia prenumeraty będzie nadesłanie na nasz adres zamówienia oraz kopii dowodu wpłaty, dokonanej na konto Państwowego Instytutu Geologicznego w PBK III O/W-wa nr 370015-3724.