

## Wybrane zagadnienia biomineralogii

Maciej Pawlikowski<sup>1</sup>

**Selected issues of biomineralogy.** Prz. Geol., 70: 834–839.

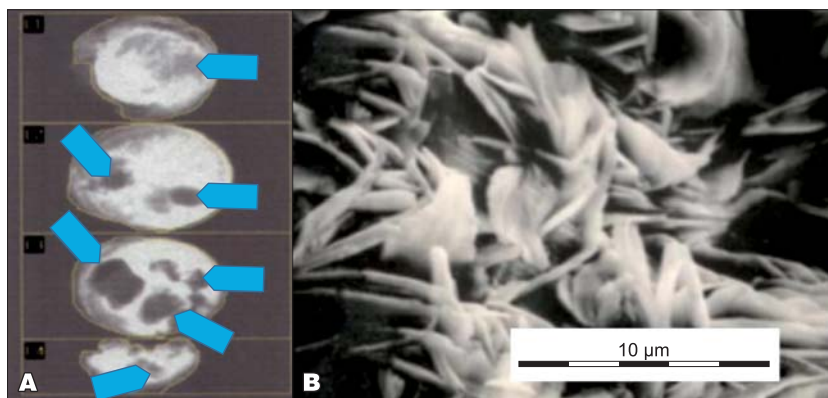
*Abstract.* Biomineralogy is the science between mineralogy, biology, medicine and biochemistry. It is focused on problems concerning mineralization of tissue and organs of human, animals and flora. It concerns interaction between mineral and biological tissue, as well as between biochemical components of living organism. These processes are important for good functioning of organs and human life.

**Keywords:** tissue, crystallization, dissolution, chemical balance, primary and secondary minerals, minerals present in tissue of organisms

Biomineralogia jest nauką o zjawiskach z pogranicza szeroko rozumianej mineralogii, medycyny, biochemii oraz fizjologii ludzi, zwierząt i roślin. Zajmuje się pierwotnymi i wtórnymi substancjami mineralnymi, które krystalizują w ciałach istot żywych, i ich wpływem na poprawne funkcjonowanie tych organizmów. W artykule opisano jedynie niektóre wybrane zagadnienia dotyczące ludzi.

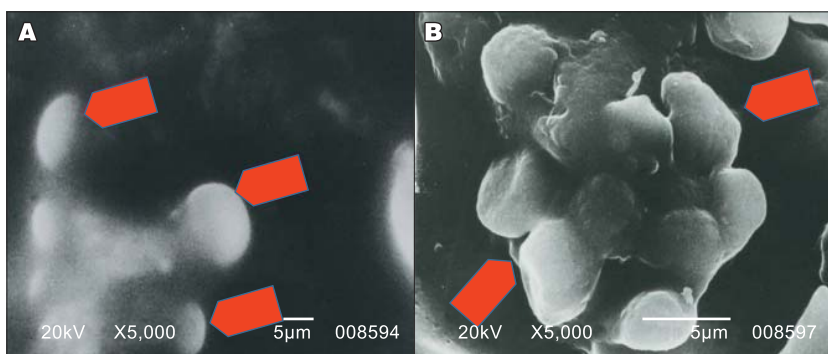
#### BIOMINERALIZACJA I DEMINERALIZACJA KOŚCI (OSTEOPOROZA)

Kości człowieka w przeliczeniu na powierzchnię płaską, wraz ze wszystkimi rowkami, kanalikami i szczelinkami, zajmują od 380 000 do 420 000 m<sup>2</sup>. Na takiej powierzchni następuje kontakt między minerałami znajdującymi się w kościach i otaczającymi je substancjami organicznymi. W strefie kontaktu trwa stała wymiana pierwiastków przenikających z minerałów znajdujących się w kościach do tkanek biologicznych i odwrotnie. Minerale kostne są reprezentowane głównie przez hydroksyapatyt węglanowy, który wytworzył sam organizm (Pawlikowski, Niedźwiedzki, 2002). Krystalizuje on ze związku organicznego nazywanego fosfatazą wapniową, którą syntetyzują mitochondria osteoblastów. Proces ten odbywa się w centrach krystalizacji znajdujących się we włóknach kolagenowych. Centra te zostały zaprogramowane w DNA. Nie są one obsadzone atomami. W miejscu ich występowania są obecne ładunki elektryczne (wolne wiązania jonowe), które



**Ryc. 1.A.** Densytometryczny obraz kolejnych plastrów pociętej głowy kości udowej. Ciemne strefy są objęte osteoporozą. **B.** Zespół mikrokryształków fosforanowych z mikronaczynia tętniczego kości objętej osteoporozą – mikroskop skaningowy (Pawlikowski, 2016b, 2022a)

**Fig. 1.A.** Densitometric image of consecutive slices of the cut femoral head. The dark zones are affected by osteoporosis. **B.** Complex of phosphate microcrystals from the arterial microvasculature of bone affected by osteoporosis – scanning microscope (Pawlikowski, 2016b, 2022a)



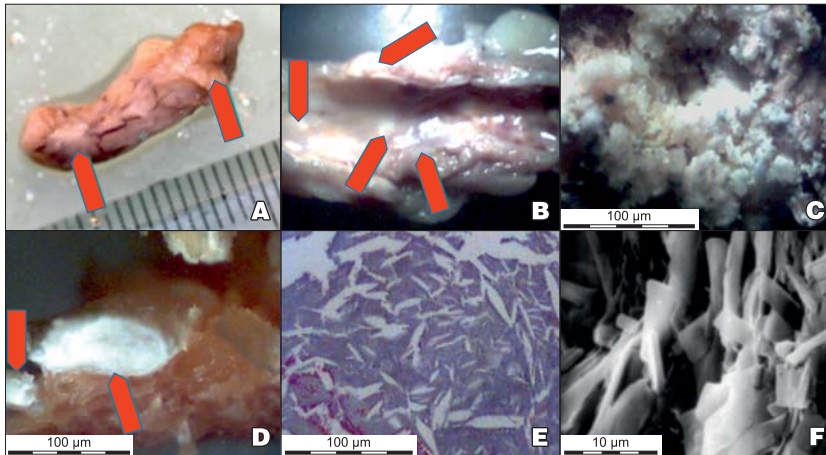
**Ryc. 2.** Przykłady mineralizacji tętnic człowieka fosforanami wapnia: **A** – wczesne stadium krystalizacji fosforanów wapnia w centrum krystalizacji utworzonym w tętnicy na śródbłonku; **B** – agregat mikrokryształów hydroksyapatytu węglanowego na powierzchni tętnicy – mikroskop skaningowy (Pawlikowski, Niedźwiedzki, 2002; Pawlikowski, 2022a)

**Fig. 2.** Examples of calcium phosphate mineralization of human arteries: **A** – early stage of calcium phosphate crystallization in the crystallization centre formed in the artery on the endothelium; **B** – aggregate of carbonate hydroxyapatite microcrystals on the arterial surface – scanning microscope (Pawlikowski, Niedźwiedzki, 2002; Pawlikowski, 2022a)

<sup>1</sup> Wydział Geologii, Geofizyki i Ochrony Środowiska, Akademia Górniczo-Hutnicza, al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków; mpawlik@agh.edu.pl

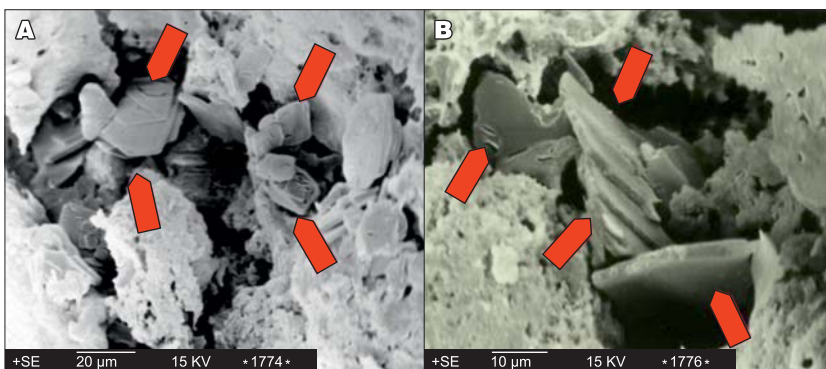
mogą przyciągać jony z fosfaty, powodując krystalizację hydroksyapatytu węglanowego.

Apatyt kostny krystalizuje jako mikroskopijne, sześcioboczne płytki. Mineral ten wykazuje właściwości piezoelektryczne. Pod wpływem nacisku na krawędziach kryształów powstają ładunki elektryczne, które odgrywają istotną, lecz nie do końca poznaną, rolę w procesach biologicznych.



**Ryc. 3.** A. Mineralizacja fosforanowa usztywniająca ściankę tętnicy wieńcowej (strzałki). B. Przekrój tętnicy wieńcowej z koncentracjami mineralizacji organiczno-nieorganicznych (strzałki) – mikroskop skaningowy. C. Koncentracja nieorganiczna (fosforanowa) w chrząstce stawu biodrowego (strzałki). D. Ziarno fosforanowe w ścięgnie. E. Mineralizacja cholesterolowa w postaci łódeczkowatych kryształów w masie mikrokryształicznego cholesterolu – mikroskop polaryzacyjny, preparat barwiony hematoksyliną. F. Mineralizacja nieorganiczna na powierzchni śródbłonna tętnicy podstawy mózgu (mikrokryształy fosforanów) – mikroskop skaningowy (Pawlikowski, 2018a, 2020a; Pawlikowski, Pfitzner, 1999)

**Fig. 3.** A. Phosphate mineralization stiffening the coronary artery wall (arrows). B. Coronary artery cross-section with organic-inorganic mineralization concentrations (arrows) – scanning microscope. C. Inorganic (phosphate) concentration in the hip cartilage (arrows). D. Grains of inorganic phosphate mineralization in tendon. E. Cholesterol mineralization in the form of saphoid crystals in a mass of microcrystalline cholesterol – polarizing microscope, preparation stained with haematoxylin. F. Inorganic mineralization on the endothelial surface of the basilar artery of the brain (phosphate microcrystals) – scanning microscope (Pawlikowski, 2018a, 2020a; Pawlikowski, Pfitzner, 1999)



**Ryc. 4.** Przykłady mineralizacji zastawek serca: A – koncentracja mikrokryształów apatytowych w zniszczonym fragmencie płatką aortalnej zastawki serca; B – kryształy cholesterolu w zniszczonym płatką zastawki serca – mikroskop skaningowy (Pawlikowski, Bożęcki, 2019)

**Fig. 4.** Examples of heart valve mineralization: A – concentration of apatite microcrystals in a damaged section of an aortic heart valve leaflet; B – cholesterol crystals in a damaged heart valve leaflet – scanning microscope (Pawlikowski, Bożęcki, 2019)

Osteoporoza rozwija się w kościach dlatego, że znajdujące się w nich mikronaczynka krwionośne ulegają blokadzie (ryc. 1). Powoduje to lokalny wzrost stężenia  $\text{CO}_2$ . Jego skutkiem jest spadek pH poniżej 7, w wyniku czego powstają warunki fizykochemiczne, w których apatyt kostny jest nietrwały i ulega rozpuszczaniu. Pierwiastki, które w wyniku osteoporozy zostały uwolnione z kości, wędrują z krwią po całym organizmie. W centrach krystalizacji znajdujących się w różnych tkankach mogą tworzyć skupienia mineralne, a nawet kryształy utrudniające lub nawet uniemożliwiające funkcjonowanie tkanek i narządów. Osteoporoza jest zatem nie tylko „cichym złodziejem kości”, ale także mechanizmem powodującym biomineralizację tkanek i prowadzącym do samozałgady organizmu (ryc. 2).

### BIOMINERALIZACJA (TZW. ZWAPNIENIA) TĘTNIC I SERCA

Wapnienie tętnic, zastawek serca i innych narządów zawierających sieć naczyń krwionośnych rozwija się na ściankach tętnic, ale także w ich wnętrzu (ryc. 3 i 4). Centrami krystalizacji najczęściej są miejsca uszkodzenia tętnic, spowodowane na przykład przez uraz mechaniczny, powstałe z przyczyn chorobowych, genetycznych lub innych. Pierwsza faza mineralizacji jest ukryta. W jej trakcie elementy serca i tętnic makroskopowo wyglądają normalnie, jednak wyniki ich analiz chemicznych (np. płatków zastawek serca) wykazują już wyraźne podwyższenie stężenia różnych pierwiastków. Proces ukrytej mineralizacji postępuje i z czasem przekształca się w mineralizację jawną, widoczną w formie ziaren mineralnych lub pełnopostaciowych kryształów.

Substancjami najczęściej krystalizującymi w tętnicach i elementach serca są cholesterol oraz hydroksyapatyt. Biomineralizacja systemu krwionośnego obejmuje część serca i naczynia transportujące krew utlenowaną. Decyduje zatem o zawałach, zatorach i wylewach krwi, a więc bezpośrednio o życiu.

Biomineralizacja zastawek serca (ryc. 4) obejmuje zarówno lewą zastawkę aortalną, jak i mitralną. Rozwija się w miejscach ich uszkodzeń spowodowanych różnymi czynnikami. Prowadzi do usztywnienia zastawek, co może skutkować ich niedomykalnością, powodującą rozliczne, poważne kłopoty zdrowotne. Mineralizacji ulegają także zastawki przeszczepione, a nawet przeszczepione serca. Stwierdzono także mineralizację elektrod rozruszników serca i transfor-

macje mięśnia sercowego w miejscu wszczęcia elektrod w tkankę łączną, która nie przewodzi prądu elektrycznego z rozrusznika do serca.

Biominieralizacja tętnic i serca może być cholesterolowo-tłuszczowa lub też hydroksyapatytowa. Każdy z tych rodzajów biominieralizacji powinien być leczony innymi metodami. Jednak najczęściej występuje u ludzi biominieralizacja mieszana – organiczno-nieorganiczna – w wyniku której powstają tzw. blaszki miażdżycowe o różnych proporcjach obu składników.

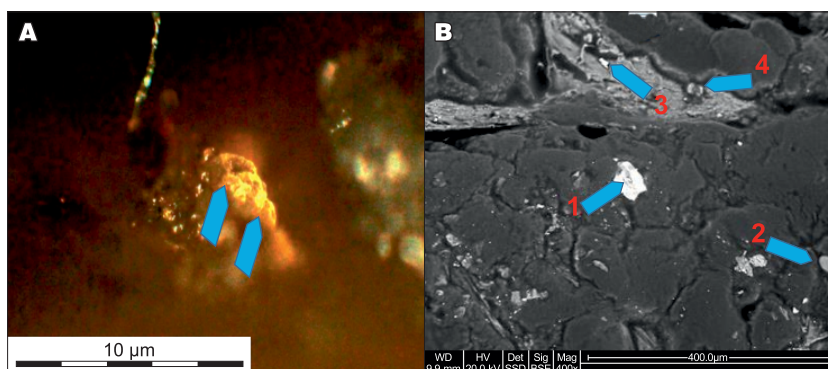
### BIOMINERALIZACJA MIĘŚNI I ŚCIĘGIEN

Substancjami krystalizującymi w mięśniach (w tym także w mięśniu sercowym) i ścięgnach (szczególnie w pobliżu stawów), a nawet w tkance łącznej towarzyszącej innym tkankom, są fosforany o różnym stopniu uwodnienia i krystaliczności, a rzadziej węglany lub szczawiany. Wytrącają się one głównie w miejscach uszkodzeń mięśni i ścięgien, (ryc. 5). Szczawiany często tworzą się w płynie stawowym w przebiegu chorób układu moczowego. Ich krystalizacja w stawach utrudnia, a niekiedy nawet uniemożliwia funkcjonowanie ścięgien i mięśni, powodując często ich unieruchomienie. Następstwem tego procesu może być utrata ruchomości kończyn.

### PROCESY KRYSTALIZACJI KAMIENI NERKOWYCH, TRZUSTKOWYCH, ŻÓLCIOWYCH I IN.

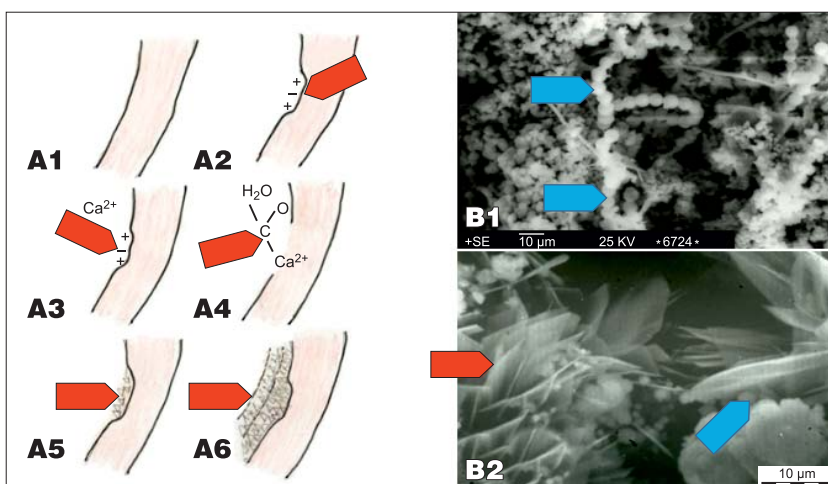
Kamienie nerkowe (które mogą być szczawianowe, wapniowe, fosforanowe lub moczanowe) krystalizują z moczu przepływającego przez nefrony, miedniczki nerkowe i przewody moczowe, najczęściej w miejscach uszkodzeń ich powierzchni (ryc. 6).

Szczegółowych informacji o składzie mineralnym kamieni nerkowych, pęcherzowych, żółciowych, trzustkowych i śliniankowych dostarczają mineralogiczne obserwacje pod mikroskopem polaryzacyjnym (ryc. 7), na podstawie których można dokładnie ustalić skład mineralny, cykle krystalizacji i wewnętrzną strukturę tych kamieni. Wiedza ta może ułatwiać diagnozę przyczyn kamicy, a zatem umożliwia wybranie odpowiednich metod profilaktyki i leczenia (ryc. 8).



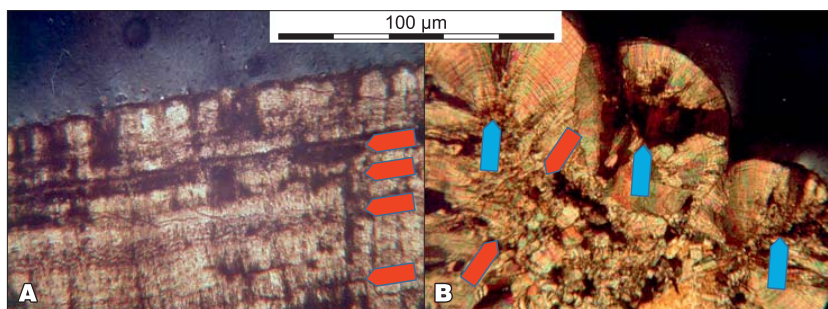
**Ryc. 5.** Mineralizacja ścięgien: **A** – ziarno apatytowe (strzałki) krystalizujące w miejscu uszkodzenia ścięgna – mikroskop polaryzacyjny, polaroidy częściowo skrzyżowane; **B** – ziarna fosforanowe w ścięgnie w pobliżu połączenia z mięśniem (strzałki) – mikroskop skaningowy (Pawlikowski, 2019)

**Fig. 5.** Tendon mineralization: **A** – apatite grains (arrows) crystallizing at the site of tendon injury – polarizing microscope, polaroids partially crossed; **B** – phosphate grains in the tendon near the tendon-muscle junction (arrows) – scanning microscope (Pawlikowski, 2019)



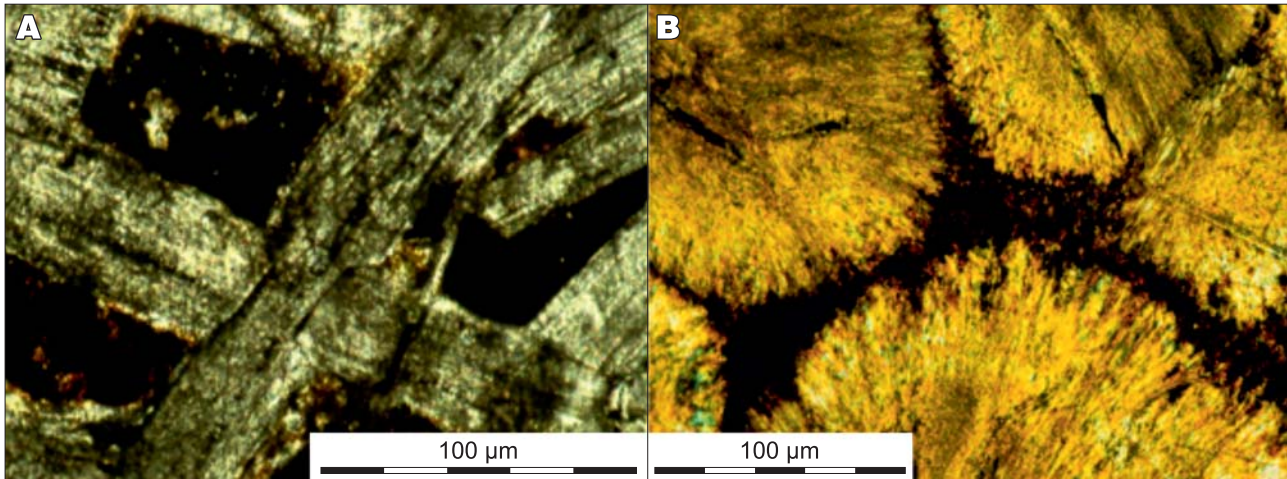
**Ryc. 6.** Powstawanie kamieni nerkowych w miedniczce nerkowej: **A1–A6** – fazy wzrostu kamienia w miejscu uszkodzenia miedniczki nerkowej (centrum krystalizacji); **B1** – szczawianowy kamień nerkowy (weddelitowo-wewelitowy) ze spiralną kolonią zmineralizowanych bakterii (strzałki) – mikroskop skaningowy; **B2** – płytkowe kryształki szczawianów wapnia (o krawędziach ostrzejszych od brzojki) z pojedynczymi bakteriami – mikroskop skaningowy (Pawlikowski, 2022b)

**Fig. 6.** Renal stone formation in the renal pelvis: **A1–A6** – phases of stone growth at the site of renal pelvis injury (crystallization centre); **B1** – oxalate weddellite-whewellite renal stone with a spiral colony of mineralised bacteria (arrows) – scanning microscope; **B2** – lamellar calcium oxalate crystals (with razor-sharp edges) with single bacteria – scanning microscope (Pawlikowski, 2022b)



**Ryc. 7.** Struktury wewnętrzne szczawianowych kamieni nerkowych, dowodzące różnego sposobu krystalizacji szczawianów z moczu (strzałki) – mikroskop polaryzacyjny, polaroidy skrzyżowane (Pawlikowski, 2022b)

**Fig. 7.** Internal structures of oxalate kidney stones, demonstrating different modes of crystallization of oxalate from urine (arrows) – polarizing microscope, crossed polaroids (Pawlikowski, 2022b)



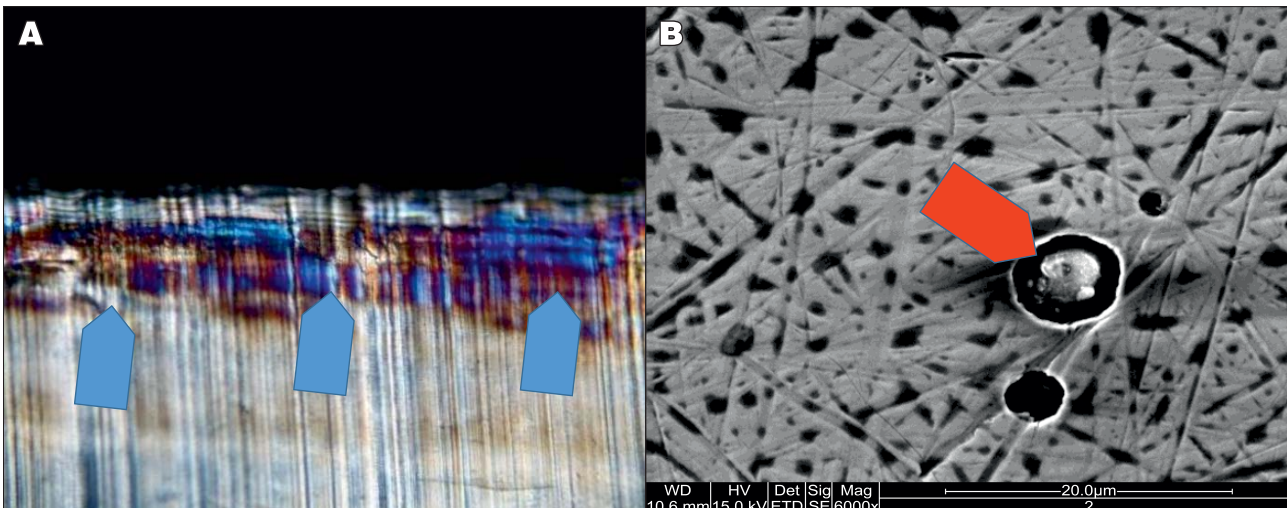
**Ryc. 8.** Cholesterolowe kamienie żółciowe z widocznymi centrami, w których została zainicjowana ich krystalizacja: **A** – wolno krystalizujący kamień żółciowy. Centrum kamienia składa się z dużych, listewkowych kryształów cholesterolu. Wolne przestrzenie pomiędzy tymi kryształami wypełnia niemal czarna żółć; **B** – szybko krystalizujący kamień żółciowy. Centrum kamienia żółciowego składa się z kulistych, żółtych mikroagregatów cholesterolu, połączonych czarną żółcią – mikroskop polaryzacyjny, polaroidy skrzyżowane (Pawlikowski, 1993, 2016c)

**Fig. 8.** Cholesterol gallstones with visible centres of initial crystallization: **A** – slowly crystallizing gallstone. The centre of the stone consists of large slaty cholesterol crystals. The free spaces between these crystals are filled with almost black bile; **B** – fast crystallizing gallstone. The centre of the gallstone consists of spherical, yellow cholesterol microaggregates connected by black bile – polarising microscope, crossed polaroids (Pawlikowski, 1993, 2016c)

#### SYNTEZA TWORZYW BIOMINERALNYCH DO WSZCZEPIANIA

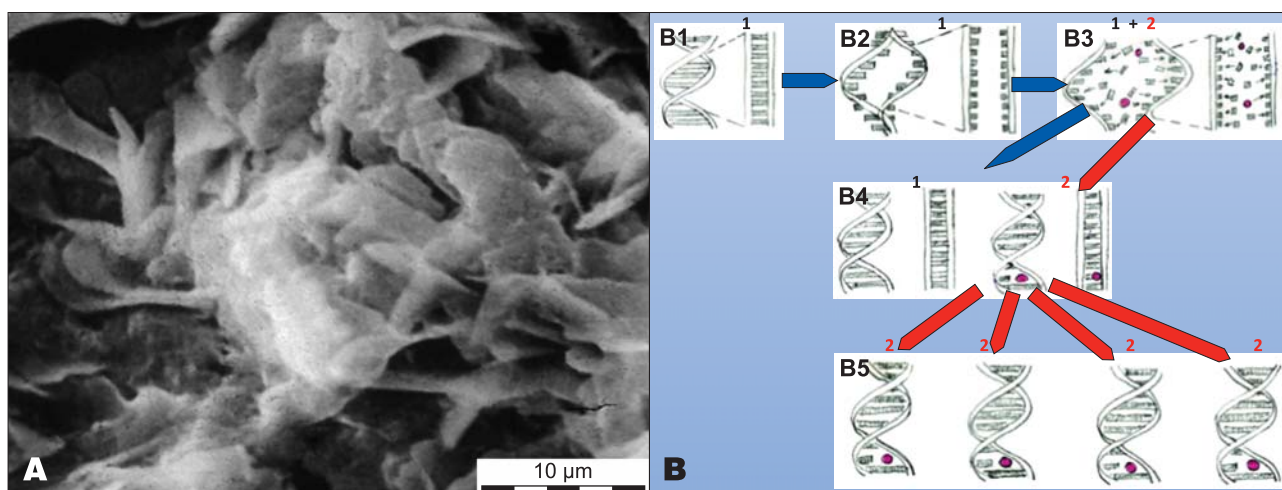
W leczeniu operacyjnym wykorzystuje się wiele urządzeń wytworzonych z nieorganicznych i organicznych materiałów syntetyzowanych. Wiele zastosowań znalazły m.in. polimery syntetyczne: np. silikon w chi-

rurgii plastycznej i rekonstrukcyjnej, politetrafluoroetylen do produkcji protez naczyniowych i nici chirurgicznych, poliuretany do wykonywania elementów sztucznego serca, a polietylen w chirurgii plastycznej i do produkcji główek oraz panewek endoprotez stawowych. Ułatwiają one funkcjonowanie, a niekiedy wręcz ratują ludzkie życie (ryc. 9).



**Ryc. 9.** Mikroskopowe obrazy materiałów używanych do operacyjnego wszczepiania: **A** – przekrój poliuretanowej panewki stawu biodrowego, zużytej przez obciążenie i pracę stawu, co spowodowało modyfikację struktury atomowej polimeru, widoczną pod mikroskopem polaryzacyjnym jako zmiana barw interferencyjnych „pracującej” powierzchni panewki (strzałki) – mikroskop polaryzacyjny, polaroidy skrzyżowane, powiększenie 200 x; **B** – powierzchnia stalowej głowy endoprotezy stawu biodrowego mocno powiększona w mikroskopie skaningowym. Obserwowana makroskopowo ma lustrzaną powierzchnię, a pod mikroskopem widać krystaliczność stali oraz ziarno krzemionkowego żużla o wielkości ok. 3 µm (strzałka). Żużel ten podczas pracy endoprotezy rysuje lustrzaną powierzchnię stali i niszczy poliuretanową panewkę, powodując konieczność chirurgicznej wymiany endoprotezy – mikroskop skaningowy (Pawlikowski, 2018b)

**Fig. 9.** Microscopic images of materials used for surgical implantation: **A** – cross-section of a polyurethane hip joint acetabulum worn down by the load and work of the joint, resulting in a modification of the atomic structure of the polymer, visible under a polarizing microscope as a change in the interference colours of the “working” surface of the acetabulum (arrows) – polarizing microscope, crossed polaroids, magnification 200 x; **B** – surface of the steel head of a hip endoprosthesis strongly magnified under a scanning microscope. Observed macroscopically, it has a mirror-like surface, and under the microscope the crystallinity of the steel and a silica slag grain of approximately 3 µm (arrow) can be seen. This slag scratches the mirror-like surface of the steel during operation of the endoprosthesis and destroys the polyurethane acetabulum, necessitating surgical replacement of the endoprosthesis – scanning microscope (Pawlikowski, 2018b)



**Ryc. 10.A.** Agregat fosforanowy z nowotworu płuc – SEM. **B.** Schemat rozwoju komórki nowotworowej w środowisku o nadmiernej mineralizacji płynów ustrojowych: **B1** – fragment DNA o prawidłowej strukturze w normalnej komórce, odpowiedzialny za jej rozmnażanie; **B2** – początek podziału DNA; **B3** – faza powstawania dwóch DNA z DNA komórki macierzystej. Ciemnoszara kropka pokazuje kancerogen (np. jon lub cząsteczkę) wbudowujący się w strukturę nowopowstającego DNA – w odcinku odpowiedzialnym za mnożenie się komórki; **B4** – schemat DNA nowych komórek. Lewa – z normalnym DNA, prawa – ze zmodyfikowanym DNA w odcinku odpowiedzialnym za mnożenie się komórki; **B5** – nowopowstające komórki nowotworowe o zmodyfikowanym odcinku DNA odpowiedzialnym za mnożenie się komórek. Tworzenie się guza nowotworowego zbudowanego z ogromnej liczby zmodyfikowanych komórek (Pawlikowski, 2020b)

**Fig. 10.A.** Phosphate aggregate from a lung tumour – SEM. **B.** Schematic development of a cancer cell in an environment with excessive mineralization of body fluids; **B1** – DNA fragment with normal structure in a normal cell, responsible for its reproduction; **B2** – onset of DNA division; **B3** – phase of formation of two DNAs from the DNA of the parent cell. The dark grey dot shows a carcinogen (e.g., an ion or molecule) building into the structure of the newly formed DNA – in the section responsible for cell multiplication; **B4** – DNA diagram of the new cells. Left – with normal DNA, right – with modified DNA in the section responsible for cell proliferation; **B5** – newly formed cancer cells with modified DNA section responsible for cell proliferation. The formation of a cancerous tumour made up of a huge number of modified cells (Pawlikowski, 2020b)

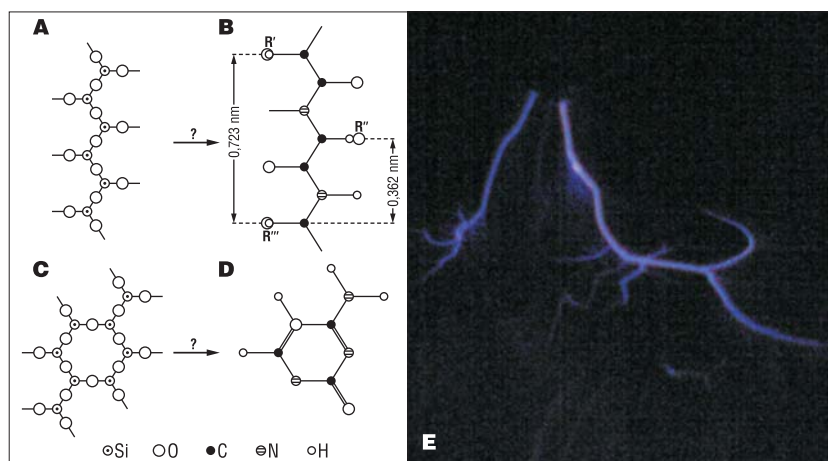
### BIOMINERALIZACJA NOWOTWORÓW

Szczególnym obiektem badań jest biomineralizacja nowotworów i rozpoznanie relacji między szeroko pojętą mineralizacją płynów ustrojowych człowieka, a procesami nowotworowymi. Wykonane badania nowotworów (piersi, nerek, tkanek łącznych, skóry, płuc i in.) wskazują, że w tkankach nowotworowych występuje podwyższona mineralizacja lokalnych płynów, a nawet obserwuje się ziarna mineralne (głównie fosforanowe).

W przypadku biomineralizacji nowotworów podstawowym zagadnieniem jest odpowiedź na dwa pytania:

- ❑ Czy proces nowotworowy sprzyja lokalnej mineralizacji zarówno płynów ustrojowych, jak i samych tkanek (ryc. 10A)?
- ❑ Czy lokalnie podwyższona mineralizacja płynów ustrojowych może się przyczynić do zainicjowania procesu nowotworowego (ryc. 10B)?

Wyniki badań wskazują, że w nowotworach zachodzą oba procesy, przy czym mineralizacja płynów ustrojowych postępuje w fazie poprzedzającej powstanie defektów w DNA na odcinku odpowiedzialnym



**Ryc. 11.** Podobieństwo struktur mineralnych i biologicznych: **A** – struktura łańcucha krzemianowego (Bolewski, 1965); **B** – struktura łańcucha peptydowego (Lasek, 1978); **C** – struktura warstwy krzemianowej (Bolewski, 1965); **D** – struktura cytozyny, jednego z ważniejszych komponentów DNA (Jerzmanowski, 1994); **E** – sztuczne wyładowania elektryczne w eksperymentach interakcji wzbudzonego kwarcu piezoelektrycznego z aminokwasami w rozwiązywaniu problematyki początków życia na Ziemi (Pawlikowski, 2005)

**Fig. 11.** Similarity of mineral and biological structures: **A** – structure of a silicate chain (Bolewski, 1965); **B** – structure of a peptide chain (Lasek, 1978); **C** – structure of a silicate layer (Bolewski, 1965); **D** – structure of cytosine, one of the most important components of DNA (Jerzmanowski, 1994); **E** – artificial electrical discharges used in experiments on the interaction of excited piezoelectric quartz – amino acids in solving the problem of the origin of life on Earth (Pawlikowski, 2005)

za mnożenie się komórek. Zatem mineralizacja ta jest bardzo istotna, powoduje bowiem defekt w DNA komórki, która szybko i nieprawidłowo mnoży się, tworząc tkanki

nowotworowe. Wspomniany odcinek DNA jest dosyć długi, więc istnieje możliwość uszkodzenia go w różnych miejscach. Elementów kancerogennych także jest dużo. Generuje to ogromną liczbę kombinacji modyfikacji DNA. Stąd ogromna liczba różnego rodzaju nowotworów.

Zmutowane komórki nowotworowe, wytwarzając w toku własnych procesów życiowych lokalną mineralizację, zarówno płynów, jak i tkanek, mogą sprzyjać dalszej modyfikacji DNA w procesach podziałów mitotycznych jądra i DNA. Opisane problemy są istotne zarówno z punktu widzenia profilaktyki nowotworów, jak i sposobów walki z nimi, dlatego badania nad biomineralizacją tkanek nowotworowych, a w szczególności nad ich zwalczaniem, są sprawą trudną do przecenienia.

### KREACJA ŻYCIA NA ZIEMI

Niezwykle interesującym i ważnym zagadnieniem badań biomineralogicznych jest potencjalny wpływ minerałów na kreację życia na Ziemi (Pawlikowski, 2012). Czy energia niezbędna do kreacji najwcześniejszych form życia mogła zostać przekazana prostym białkom przez minerały? Wyniki badań interakcji między wzbudzonym kwarcem piezoelektrycznym a aminokwasami wskazują, że istnieje taka możliwość. Interesujące są także analogie niektórych struktur mineralnych i prostych związków organicznych (ryc. 11). Osobnym problemem związanym zarówno z początkami życia, jak też z jego transformacjami, szeroko obecnie badanym, są katalityczne zdolności niektórych minerałów, w tym minerałów ilastych.

### PODSUMOWANIE

Problematyka zaprezentowana w artykule nie wyczerpuje wszystkich obszarów badań biomineralogicznych. W pracy tej nie poruszono np. istotnych zagadnień z zakresu wpływu na funkcjonowanie narządów i tkanek człowieka minerałów drobnodispersyjnych, takich jak np.: azbesty (azbestoza), kwarc (silikoza), węgiel (pylica), minerały ilaste i inne. Mimo tego jednoznacznie dowiedziono, że metody mineralogiczne są przydatne do badania człowieka, a także innych organizmów żywych (zwierząt i roślin). Wyniki prowadzonych współcześnie badań biomineralogicznych ujawniają wiele nieznanych faktów z zakresu funkcjonowania organizmów. Literatura światowa

bez przerwy dostarcza opracowań o nowych kierunkach wykorzystania szeroko rozumianych nauk mineralogicznych i geologicznych zarówno w badaniu wpływu Ziemi na organizmy, jak też szeroko rozumianego wpływu organizmów na skały i minerały.

Dziękuję Recenzentom za konstruktywne uwagi i sugestie.

### LITERATURA

- BOLEWSKI A. 1965 – Mineralogia szczegółowa. Wyd. Geol., Warszawa.
- JERZMANOWSKI A. 1994 – Geny i ludzie. Wyd. Szkolne i Pedagogiczne, Warszawa.
- LASEK W. 1978 – Kolagen – chemia i wykorzystanie. Wyd. Nauk.-Techn., Warszawa.
- PAWLIKOWSKI M. 1993 – Kryształy w organizmie człowieka. Wyd. Secesja: 132.
- PAWLIKOWSKI M. 2005 – Quartz and origin of life. [W:] Abstracts of 229 ACS National Meeting. San Diego, CA, March 13–17 2005: 11.
- PAWLIKOWSKI M. 2012 – Atomic structural templates of the earliest life on Earth: vibration and lightnings experiments with quartz and aminoacids. [W:] Seckbach J. (red.), Genesis in the beginning. Springer: 173–177.
- PAWLIKOWSKI M. 2016a – Biomineralogical investigation of apatite piezoelectricity. Traumatology and Orthopedics of Russia, 2 (80): 1–6.
- PAWLIKOWSKI M. 2016b – Biomineralogy of Osteoporosis. Academia J. Biotechnol., 4 (4): 138–144.
- PAWLIKOWSKI M. 2016c – Biomineralogia kamieni nerkowych i żółciowych. Wyd. Nauk. Akapit, Kraków.
- PAWLIKOWSKI M. 2018a – Biomineralogical Phenomenon of Mineralization (Calcification) of Arteries. Int. J. Cardiac and Pulmonary Rehabilitation, 2018 (1): 1–8; doi: 10.29011/IJCPR-102/100002
- PAWLIKOWSKI M. 2018b – Biomineralogical Phenomena in Hip Endoprostheses. Int. J. Transplant. & Plastic Surg., 2 (3): 1–8; doi: 10.23880/ijtps-16000124
- PAWLIKOWSKI M. 2019 – Biomineralization of Heart Valves. J. Clin. Rev. Case. Rep., 4 (1.2): 1–6.
- PAWLIKOWSKI M. 2020a – Artery biomineralization and its dissolution. ES J. Cardiol., 1 (1): 1006.
- PAWLIKOWSKI M. 2020b – Tissue Biomineralization as a Mechanism Leading to Cancer Development. J. Carcinog. Mutagen, 11 (347): 1–6.
- PAWLIKOWSKI M. 2022a – Osteoporosis as a Process Conducive to Tissue Biomineralization. Cardiol. Res. and Reports, 4 (4): 1–7.
- PAWLIKOWSKI M. 2022b – Biomineralogy of Kidney Stones Crystallization. International J. Biomed. Res., 2 (3): 1–8.
- PAWLIKOWSKI M., BOŻĘCKI P. 2019 – Tendon Biomineralization. Glob J. Ortho. Res., 1 (3): 2–19.
- PAWLIKOWSKI M., NIEDŹWIEDZKI T. 2002 – Mineralogia kości. Wyd. PAN, Kraków.
- PAWLIKOWSKI M., PFITZNER R. 1999 – Mineralizacja serca i dużych naczyń. Wyd. IGSMiE PAN, Kraków.

Praca wpłynęła do redakcji 29.06.2022 r.  
Akceptowano do druku 11.09.2022 r.