

ELECTRIC PHENOMENON OF BONES AS THE RESULT OF PIEZOELECTRICITY OF HYDROXYAPATITE

Zjawiska elektryczne w kościach jako efekt piezoelektryczności hydroksyapatytu

Maciej Pawlikowski

/ AGH – University Science and Technology, Cath. Mineralogy, Petrography and Geochemistry, al.
Mickiewicza 30, 30-049 Kraków, Poland, e-mail: mpawlik@agh.edu.pl

Abstract

Conducted biomineralogical studies indicate piezoelectric properties of apatite, which is one of the major components of bone. This publication presents hypothetical correlations between piezoelectric properties of bone apatite and the accompanying electromagnetic phenomena in bones and their environment. It notes the correlations between electrical properties of bones and changes in the electromagnetic field around bones, as well as connections between external pressure changes etc. and electrical phenomena in the bones.

Key words: apatite piezoelectricity, bone, electromagnetic phenomena.

Study conducted with the author's own resources.

Streszczenie

Wykonane badania biomineralogiczne wskazują na piezoelektryczne właściwości apatyty, który jest jednym z głównych składników kości. Publikacja prezentuje hipotetyczne zależności między piezoelektrycznymi właściwościami apatyty kostnego i towarzyszącymi zjawiskami elektromagnetycznymi w kościach i ich otoczeniu. Zwraca uwagę na relacje – właściwości elektryczne kości – zmiany pola elektromagnetycznego wokół kości oraz na relacje zewnętrzne zmiany ciśnienia i in. – zjawiska elektryczne w kościach.

Słowa kluczowe: piezoelektryczność apatyty, kość, zjawiska elektromagnetyczne.

Badania realizowane ze środków własnych autora.

Wstęp

Pierwsze wyniki badań dotyczących zjawiska piezoelektryczności były efektem wieloletnich prac braci Curie (Curie J, Curie P. 1880a, b, 1881 a, b, c, d, 1882, a, b, 1883, 1889). Dotyczyły one zjawisk elektrycznych występujących w kryształach kwarcu pod

wpływem mechanicznego nacisku. Badania te poszerzano na inne minerały i syntetyki wykazując w nich obecność podobnych zjawisk.

Szczególnie interesujące okazały się badania zjawisk elektrycznych w kościach o tkankach (Becker, Selden 1998). Wspomniane zjawiska piezoelektryczne wzbudzały od dawna zainteresowanie zarówno pod względem biochemicznym i elektrycznym (Funkada, Yasuda 1957, Basset, Becker 1962, Cerquiglini 1967, Anderson, Eriksson 1968, Korostoff 1979, Johnson et al. 1980, Salzstein et al 1987, Pawlikowski, Niedzwiedzki 2002, Szewczenko 2005, Ahn, Grodzinsky 2009, Pawlikowski 2016a, b) jak i praktycznym, głównie dotyczącym gojenia się i przyspieszania zrostu kostnego (Weigert, Wehahn 1977, Starkebaum et al 1979, Pienkowski, Pollack 1983, Jacobson-Kram et al 1997). Obserwowano także wpływ zjawisk elektrycznych występujących w kościach na funkcjonowanie elementów kości w tym na morfologię komórek kostnych (Yasuda 1953, Williams, Breger, 1974, Weinbaum et al. 1994 i in.)

Badania prowadzone w ostatnich latach wykazały, że piezoelektryczność kości może być związana z piezoelektrycznymi właściwościami hydroksyapatytu kostnego (Pawlikowski, Niedzwiedzki 2002, Pawlikowski 2016 a, b). Stały się one podstawą rozważań prezentowanych w tej publikacji. Ma ona na celu próbę wyjaśnienia relacji między piezoelektrycznością hydroksyapatytu kostnego, a piezoelektrycznością całej kości. Interpretacja opisanych zjawisk została także omówiona w kontekście potencjalnych relacji piezoelektryczności kości w odniesieniu do innych zjawisk.

Badania nad piezoelektrycznymi właściwościami kości otwierają nowe perspektywy w zrozumieniu wielu zjawisk biochemicznych w kościach i w innych narządach (Wilson, Dowker 2002).

Wprowadzenie

Rozważając wpływ kości na funkcjonowanie organizmu należy mieć na względzie ich ogromną powierzchnię. Bowiem po przeliczeniu powierzchni wszystkich beleczek kostnych z wszystkich kości człowieka na jedną powierzchnię otrzymuje się wartość 380- 420 000 m² (Pawlikowski, Niedzwiedzki 2002). Na takiej powierzchni kontaktują się elementy kości jak szpik, płyny ustrojowe, komórki i in. z kolagenem kostnym i zawartymi w nich mikrokryształkami hydroksyapatytu. Na tym kontakcie występuje stała równowaga fizykochemiczna pomiędzy „światem biologicznym” i „światem mineralnym” kości. Na tak ogromnej powierzchni przez całe życie w jedną i drugą stronę przekazywane są pierwiastki. W ciągu życia człowieka związku z wieloma procesami ten układ minerały – „biologia” ulega ewolucji.

Na wszystkie procesy biologiczne zachodzące w kościach nakładają się zjawiska elektryczne związane m.in. z piezoelektrycznymi ich właściwościami. Ich istotności wydaje się być trudna do przecenienia.

Badania piezoelektryczności hydroksyapatytu kostnego są na obecnym poziomie aparaturowym niemożliwe. niemożliwe w związku z nano wielkością jego kryształów. W związku z powyższym piezoelektryczność tego minerału badano na dużych kryształach (Photo. 1A), a otrzymane wyniki można transferować na nano kryształy kostne. Podobnie można transferować na nano kryształy występujące w kościach zjawiska elektryczne obserwowane w dużych kryształach apatyty (Photo. 1 B)

Omawiając problematykę piezoelektryczności kości należy zwrócić uwagę na szczegóły dotyczące relacji hydroksyapatyt kostny- kolagen oraz zjawiska elektryczne manifestujące się na zewnątrz kości.

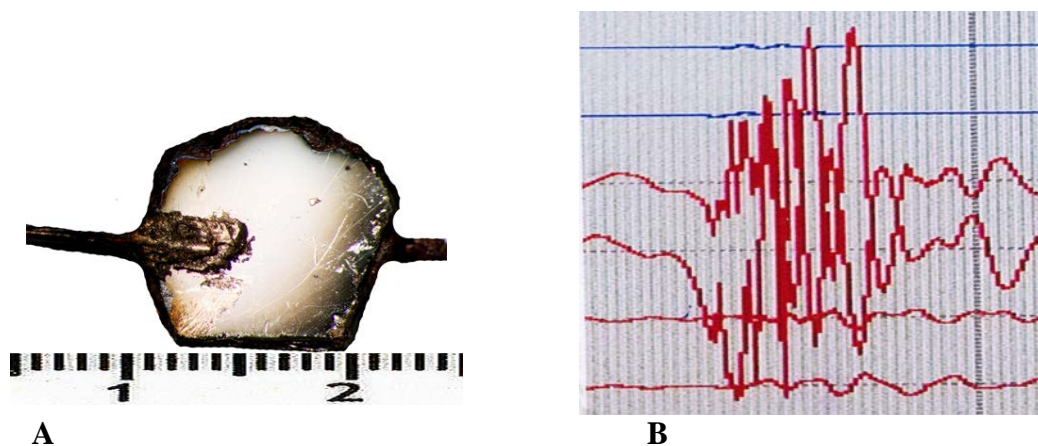


Photo 1. A - example image of a hydroxyapatite plate cut perpendicularly to the optical axis Z after dusting with gold. The dark edge is a paraffin border; after dusting with gold and removal of the border, upper and lower surfaces of the plates were electrically separated. B - example of the currents chart recorded during a hand movement (by M. Pawlikowski 2016a).

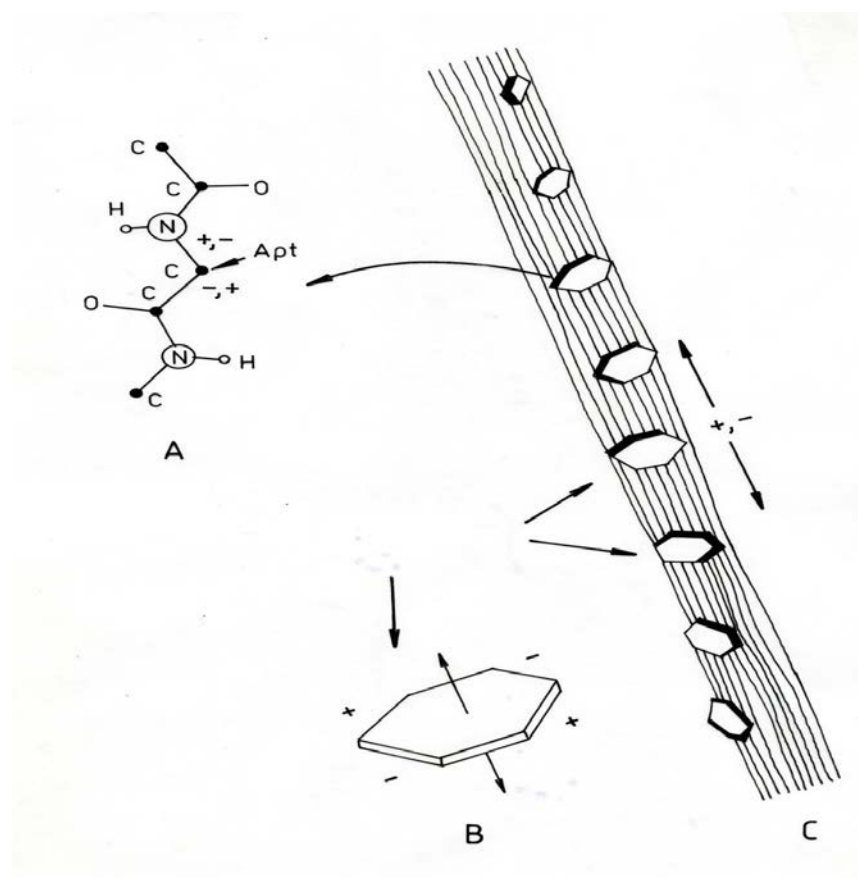


Fig. 1 A – Potencjalne miejsce transferu ładunków elektrycznych z wzbudzonego mechanicznie kryształu apatytowego (Apt) na włókno kolagenowe występujące w miejscu syuku apatytu z kolagenem. B – poglądowy obraz indukcji ładunków elektrycznych w płytkowym, deformowanym mechanicznie kryształach apatytu. C – schemat indukcji

ładunków elektrycznych w deformowanym mechanicznie włóknie kolagenowo - apatytowym (beleczce kostnej)..

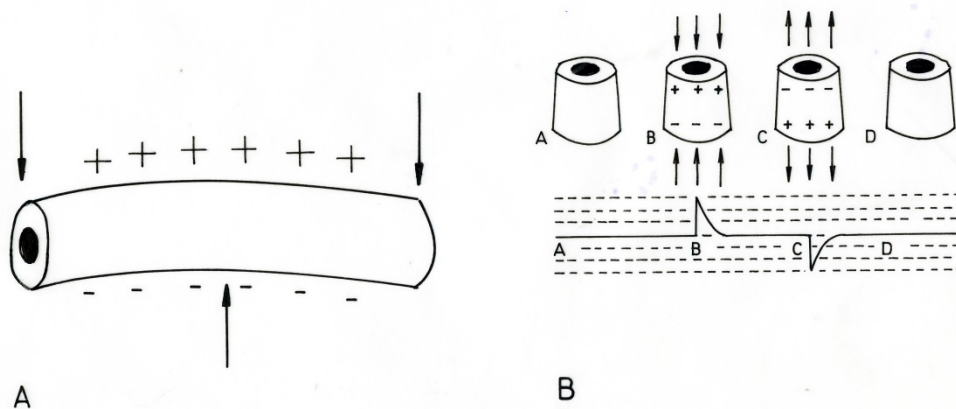


Fig. 2 Rozkłady ładunków elektrycznych w kościach (J. Szewczenko 2005 i in.) A – kość długa zginana, B - kość długa AD – w stanie spoczynku, B- obciążana, D – odciążana.

Omawiając powyższe zjawiska należy się odnieść do kilku problemów, które mogą być z nimi związane. Można tu wymienić:

- mechaniczne obciążanie kości, a osteoporoza,
- wpływ na funkcjonowanie niektórych tkanek i organów
- relacji zewnętrzne ciśnienie, grawitacja i pole elektromagnetyczne – zjawiska elektryczne zachodzące w kościach
- zjawiska mechaniczne zachodzące w kościach – zewnętrzne pole elektromagnetyczne.
- wpływ zjawisk piezoelektrycznych na zrost kostny

Mechaniczne obciążanie kości, a osteoporoza,

Generowane prądy „kostne” mogą mieć także wpływ na sam kolagen kostny, a zwłaszcza na wiązania kolagen – hydroksyapatyt. Wydaje się, że powstające przy naprężeniach (generowane podczas chodzenia) prądy sprzyjają stabilności tych wiązań. Prawdopodobnie brak wspomnianych prądów może powodować to, że wiązania (jonowe –apatyt- kolagen) słabną lub są zrywane. Skutkiem jest rozluźnianie struktury kostnej i jej osłabienie.

Taka sytuacja ma miejsce w nieobciążanej grawitacyjnie kości np. w przestrzeni kosmicznej u astronautów

Badania wskazują, że osteoporoza w warunkach gdzie występuje grawitacja jest skutkiem przytkania mikro tętnic występujących w kościach. Substancje krystalizujące w tych tętnicach to zarówno fosforany jak i cholesterol (Pawlikowski 2016 b).

Indukowane piezoelektrycznie w apatycie kostnym prądy mogą wpływać na różne elementy kości w tym także na tętnice w których komórki śródbłonna mają budowę polarną (Fig. 3).

Zagadnienie to jest złożone i końca nie wyjaśnione i wymaga dalszych badań eksperymentalnych. Wydaje się, że poddanie kości astronautów w przestrzeni kosmicznej oddziaływaniu słabych zmiennych prądów mogłoby prawdopodobnie osłabić proces osteoporozy,.

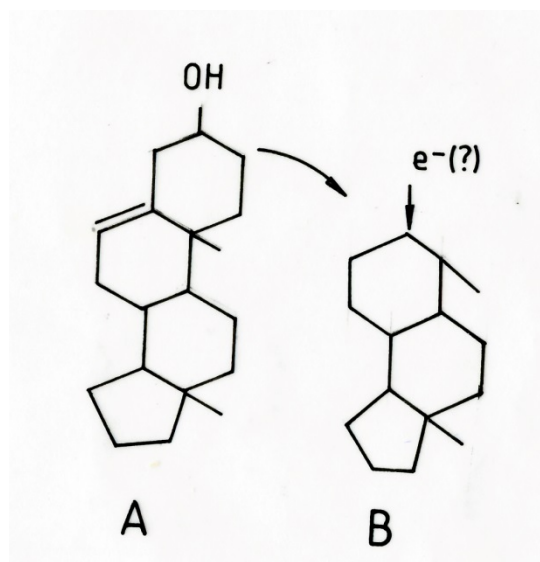


Fig. 3 Szkic teoretycznego, wpływu prądów generowanych w kości na strukturę błony komórkowej komórkowej śródbłonna zniszczonego fosfolipidu. A – struktura fosfolipidu o budowie polarnej. błony komórkowej śródbłonna B - struktura częściowo zniszczonego fosfolipidu (błony komórkowej śródbłonna) np. w wyniku stanu zapalnego występującego w organizmie. Miejsce zniszczenia może zostać pozbawione ładunków elektrycznych przez przepływające prądy „kostne”. Tym sposobem zostanie zredukowana możliwość wykorzystania uszkodzenia jako centrum powstawania np. zwapnień lub krystalizacji cholesterolu.

Wpływ na funkcjonowanie niektórych tkanek i organów

Występujący w kości układ: beleczyki kostne- szpik i inne elementy (naczynia, nerwy itd.) jest układem równowagi fizyko-chemicznej. Zmienia się on wraz z wiekiem człowieka od młodości do starości. Jego funkcjonowanie polega na przekazywaniu pierwiastków z „części biologicznej” do „części mineralnej” i odwrotnie (Pawlikowski, Niedźwiedzki 2002). Dotychczas nie zbadane są zjawiska elektryczne generowane w kości na „część biologiczną”

Ich wpływ wydaje się niewątpliwy jako, że zdecydowana większość procesów chemicznych zachodzących w kościach w tym w ich „części biologicznej” ma charakter jonowy.

Prawdopodobnym jest także, że tworzące się w kości mikroprądy stymulują syntezę generowanych w kości składników krwi.

Relacje zewnętrzne ciśnienie, grawitacja, pole elektromagnetyczne – zjawiska elektryczne zachodzące w kościach.

Uginane mechanicznie płytki apatytowe generują na końcach kryształów różnice potencjałów (Pawlikowski 2016a)

Bez wątpienia nie obejmują one wszystkich problemów, które mogą być związane ze zjawiskami piezo obserwowanymi w kościach. Zatem chodzenie powodujące obciążanie kości (nóg) i mikrokryształów hydroksyapatytu w beleczykach kostnych powoduje powstawanie prądów (Basset, Becker, 1962). Są to prądy zmienne generalnie o kierunku przepływu góra-dół –góra-dół (Fukada, Yasuda 1957, Szewczenko 2005).

Należy przypuszczać, że generowanie prądów w kościach może następować także w wyniku zmian zewnętrznego ciśnienia atmosferycznego jak i zmian siły grawitacji (np. u kosmonautów). Nie można wykluczyć, że także zmiany pola elektromagnetycznego powodują mikrowibracje kryształów apatytu kostnego i generowanie prądów (Fig. 4). Istotność tych teoretycznie omawianych zjawisk jest trudna do przecenienia.

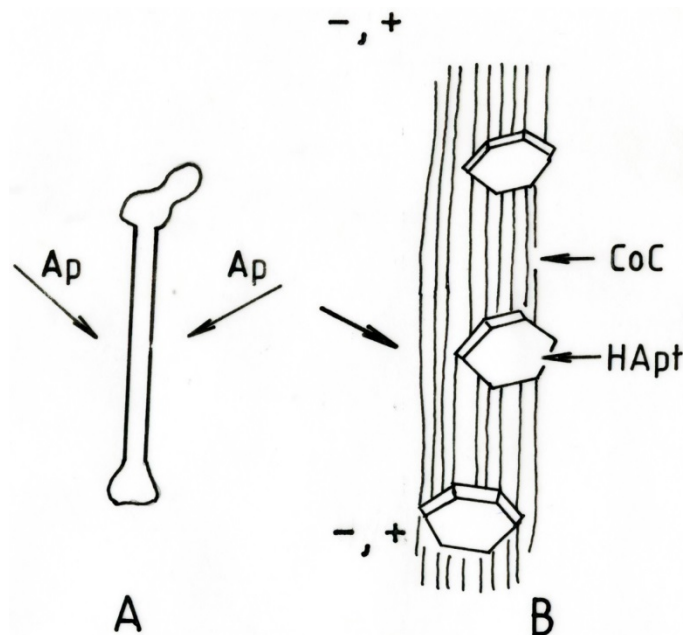


Fig. 4 Schemat wpływu zmian zewnętrznego ciśnienia, grawitacji na zjawiska elektryczne w kościach. A- przykład zmian ciśnienia (A_p) na kość udową człowieka. B – schemat generowania prądów zmiennych we włóknie kolagenowym przez kryształy hydroksyapatytu poddawane naciskom sił zewnętrznych CoC –kolagen, $HApt$ - hydroksyapatyt

Zjawiska mechaniczne zachodzące w kościach – zewnętrzne pole elektromagnetyczne.

Choć prądy generowane w jednym mikrokryształe hydroksyapatytu kostnego są znikome to połączenie generowanych prądów przez wilgotne włókna kolagenowe mogą się prawdopodobnie sumować (Anderson, Eriksson 1968). Skutkiem tego zjawiska mogą być silniejsze prądy i większe napięcia na końcach włókien kolagenowych, w całych beleczkach kostnych, a nawet na powierzchni kości (Yasuda 1953).

Ponieważ obciążanie i odciążanie kości prowadzi do powstawania zmiennych prądów to chodzenie powodują takie same przepływy prądów (Williams, Breger 1974, Szewczenko 2005). Tak generowane prądy bez wątpienia wpływają na powstawanie słabego, zmiennego pola elektromagnetycznego wokół kości generującej te prądy. Jest to także zmienne pole, a jego wartość zależy nie tylko od wielkości generowanych prądów lecz także od ogromnej powierzchni powierzchni kości (suma powierzchni wszystkich beleczek generujących prądy). Może zbyt śmiałym jest stwierdzenie, że kość generującą zmienne prądy można traktować jak wielką antenę nadawczo-odbiorczą ale rzeczywiście może ona pełnić taka funkcję.

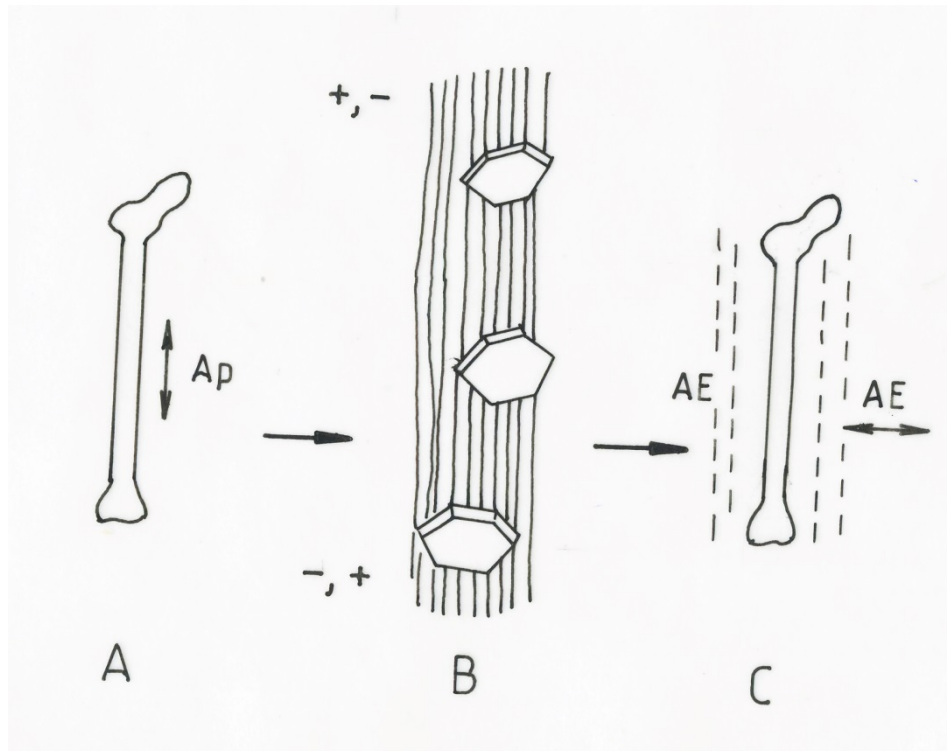


Fig. 5 Schemat mechanizmu generowania zmiennego pola elektromagnetycznego przez kość udową obciążaną w trakcie chodzenia A - kość udowa poddawana zmiennemu naciskowi (A_p) w trakcie chodzenia. B - obraz włókna kolagenowego generującego zmiennie prądy przez deformowane kryształy hydroksyapatytu. C - hipotetyczny obraz zmian pola elektromagnetycznego (AE) wokół jęści udowej pod wpływem zmiennych prądów generowanych w kości podczas chodzenia.

Wpływ zjawisk piezoelektrycznych na wzrost kostny

Złożoność procesu wzrostu kostnego jest oczywista. Wśród jej elementów można wymienić generowanie kolagenu z centrami krystalizacji apatytu, zjawisk angiogenezy (Pawlikowski-Biomineralogia angiogenezy – w druku), ponowne uruchomienie syntezy fosfatazy alkalicznej i in.

Po złamaniu kości zniszczone zostają różne jej składniki w tym zmineralizowane apatytem włókna kolagenowe w zniszczonych beleczkach kostnych. Z tego powodu jak i poprzez stabilizację złamania (fiksacja gipsem, płytkami AO i in) zostają zniszczone i zaburzone układy elektryczne występujące z nie złamanej, obciążanej kości.

Stąd stosowanie sztucznego – zewnętrznego zmiennego pola elektromagnetycznego może stymulować wzrost kostny poprzez zbliżenie „elektrycznych warunków”, panujących w kości do warunków naturalnych.

Prawdopodobnie to zmienne pole może także stymulować angiogenezę i inne procesy. Choć niektóre publikacje sugerują toksyczność zmiennego pola elektromagnetycznego wykorzystywanego do przyspieszenia wzrostu kostnego (Jacobson-Kram et al. 1997). Wydaje się w tym wypadku bardzo istotnym dopasowanie generowanego pola do pola wytwarzanego przez kość naturalną. Wymaga to dalszych badań i na obecnym etapie poznania jest to jednak przypuszczenie czysto teoretyczne.

Podsumowanie

Pomimo to, że prądy występujące w kościach, są bardzo słabe (podobnie jak występujące w mózgu), mają jednak charakter absolutnie elementarny. Ich nie w pełni poznana rola dla funkcjonowania całego organizmu jest trudna do przecenienia.

Literatura

- Ahn A. C., Grodzinsky, A.J., 2009 Relevance of collagen piezoelectricity to “Wolf’s law: a critical review. *Med. Eng. Phys.*, 31, 733–741.
- Anderson J.C., Eriksson C.. 1968 Electrical properties of wet collagen. *Nature*. 21, 166–168.
- Aschero G., Gizdulich P., Mango F., Romano S. M., 1996 Converse piezoelectric effect detected in fresh cow femur bone. *J. Biomech.*, 29, 1169-74.
- Basset C. A. , Becker O. R., 1962 Generation of electric potentials by bone in response to mechanical stress. *Science*. 1962 Sep 28, 137, 1063-4.
- Becker R.O., Selden G., 1998, *The body electric*, Harper, 368
- Cerquiglini S., Cignitti M., Salleo A., 1967 On the origin of electrical effects produced by stress in the hard tissues of living organisms. *Life Science*, 15, 6 (24), 2651-60.
- Curie J, Curie P. 1880a Développement, par pression, de l’électricité polaire dans les cristaux hémihèdre à faces inclinées. Présentée par M. Friedel. *Comptes rendus de l’Académie des sciences*, 91, 294-5.
- Curie J, Curie P. 1880b Sur l’électricité polaire dans les cristaux hémihèdre à faces inclinées. Présentée par M. Desains. *Comptes rendus de l’Académie des sciences*, 91, 383-6.
- Curie J, Curie P. 1881a Lois du dégagement de l’électricité par pression, dans la tourmaline. Présentée par M. Friedel. *Comptes rendus de l’Académie des sciences*, 92, 186-8.
- Curie J, Curie P. 1881b Les cristaux hémihèdre à faces inclinées, comme sources constants d’électricité. Présentée par M. Desains. *Comptes rendus de l’Académie des sciences*, 93, 204-7.
- Curie J, Curie P. 1881c Sur les phénomènes électriques de la tourmaline et des cristaux hémihèdre à faces inclinées. Présentée par M. Friedel. *Comptes rendus de l’Académie des sciences*, 92, 350-3.
- Curie J, Curie P. 1881d Contractions et dilatations produites par des tensions électriques dans les cristaux hémihèdres à faces inclinées, Présentée par M. Friedel. *Comptes rendus de l’Académie des sciences*, 93, 1137-40.
- Curie J, Curie P. 1882a Déformations électriques du quartz. Présentée par M. Desains. *Comptes rendus de l’Académie des sciences*, 95, 914-7.
- Curie J, Curie P. 1882b Phénomènes électriques des cristaux hémihèdre à faces inclinées. *J. de Physique 2nd series*, 1, 245-51.
- Curie J, Curie P. 1883 Quartz piézo-électrique, *Phil Mag*, 36, 340-2.
- Curie J, Curie P. 1889 Dilatation électrique du quartz, *J. de Physique*, 2nd series, 8, 149-70.
- Fukada E., Yasuda I., 1957 On the piezoelectric effect of bone. *J. Phys. Soc. Jpn.* V 12, no 10, 1158-1162.
- Jacobson-Kram D., Tepper J., Kuo P., i in., 1997 Evaluation of potential genotoxicity of pulsed electric and electromagnetic fields used for bone growth stimulation, *Mutation Research*, 388, 45-57.
- Johnson M. W., Chakkalakal D.A., Harper R. A., Katz J.L., 1980 Johnson M.W., Chakkalakal D.A., Harper R.A., Katz J. L., 1980, Comparison of the electromechanical effects in wet and dry bone, *J. Biomechanics*, 13, 437-442.
- Korostoff E., 1979 A Linear piezoelectric model for characterizing stress generated potentials in bone, *J. Biomech.*, 12, 335-347.

- Pawlikowski M., Niedźwiedzki T., 2002 Mineralogia kości (Mineralogy of bones). Polish Acad. Sci. Kraków, 111.
- Pawlikowski M., 2016a Biomineralogical investigation of apatite piezoelectricity. *Traumatologija i ortopedija Rossji*. T. 22, no 2, p. 57-62.
- Pawlikowski M., 2016b Biomineralogy of osteoporosis. *Acad. Jour. Biotechnology* 4(4): 138-144.
- Pienkowski D, Pollack SR. 1983 The origin of stress-generated potentials in fluid-saturated bone. *J. Orthop. Res.*1, 30–41.
- Salzstein R. A., Pllack S. R., Mak A. F. T., Petrov N., 1987 Electromechanical potentials in cortical bone , 20(3): 261–270 *J. Biomech.*, 20, 3, 261
- Starkebaum W., Pollack S. R., Korostoff E., J. 1979 Microelectrode studies of stress-generated potentials in four-point bending of bone, *J Biomed Mater Res.* ,13(5), 729-51.
- Szewczenko J., 2005 Zjawiska elektryczne w kościach długich. *Przeł. Elektrotechn.* R. 81, no 12, 94-97.
- Weinbaum S., Cowin S. C., Zeng Yu.: 1994 A model for the excitation of osteocytes by mechanical loading-induced bone fluid shear stresses, *J. Biomech.* 27, 339–360
- Weigert M., Wehahn C., 1977 The influence of electric potentials on plated bones. *Clin. Orthop.*, 5, 124, 20.
- Williams, W.S., Breger, L. 1974 Analysis of stress distribution and piezoelectric response in cantilever bending of bone and tendon. *Ann. N.Y. Acad. Sci.*, 238, 121–130.
- Wilson E.R.M., Dowker S.E.P., 2002 Apatite structure. *Advances in X-ray Analysis*, v, 45, 172-181
- Yasuda I., 1953 Fundamental aspects of fracture treatment *J. Kyoto Med. Soc.*, 4, 395-406.