

## Bioelektroniczne inspiracje modelowania minimalnego systemu żywego

### Uwagi wstępne

Biologia syntetyczna<sup>1</sup> wyłoniła się około roku 2000 jako nowa dyscyplina biologiczna i rozwija się niezwykle intensywnie. Ma ona na celu nie tylko lepsze zrozumienie funkcjonowania organizmów, ale przede wszystkim wytworzenie syntetycznej komórki (sztucznego mikroorganizmu), będącej modelem minimalnego systemu żywego. Biologia syntetyczna opiera się głównie na możliwościach, jakie można uzyskać dzięki inżynierii genetycznej. Badane są więc przede wszystkim naturalne i sztuczne struktury, a w szczególności takie ich własności jak: samopowielanie, wzrost, zdolność do elementarnego metabolizmu itp. W zasadzie badania wymienionych własności mieszczą się w tzw. chemiczno-molekularnym paradygmacie badań natury życia. Jednakże fenomen życia jest dużo bogatszy. Wydaje się zatem, że warto sięgnąć po propozycje teoretyczne dotychczas mało eksplorowane poznawczo, do których należy m.in. bioelektroniczny model procesów życiowych. Model ten zakłada, że natura

---

\* Katedra Filozofii Biologii, Instytut Filozofii Przyrody i Nauk Przyrodniczych, Wydział Filozofii, KUL, Al. Raławickie 14, 20-950 Lublin; e-mail: marian.wnuk@kul.pl

<sup>1</sup> Np. M. Gross, *What exactly is synthetic biology?*, "Current Biology" 21 (2011), no. 16, R611-R614; P.L. Luisi, P. Stano (eds.), *The Minimal Cell: The Biophysics of Cell Compartment and the Origin of Cell Functionality*, Dordrecht–Heidelberg: Springer 2011; P. Stano, *Synthetic biology of minimal living cells: primitive cell models and semi-synthetic cells*, "Systems & Synthetic Biology" 4 (2010), no. 3, s. 149-156. L.-Y. Zhang, S.-H.W.J. Chang, *How to make a minimal genome for synthetic minimal cell*, "Protein & Cell" 5 (2010), no. 1, s. 427-434; M. Morange, *A critical perspective on synthetic biology*, "Hyle – International Journal for Philosophy of Chemistry" 15 (2009), no. 1, s. 21-30; P. Schwillie, S. Diez, *Synthetic biology of minimal systems*, "Critical Reviews in Biochemistry and Molecular Biology" 44 (2009), no. 4, s. 223-242; P.L. Luisi, *The Emergence of Life: From Chemical Origins to Synthetic Biology*, Cambridge: Cambridge University Press 2006.

życia polega na elektromagnetycznym sprzęgnięciu procesów chemicznych z procesami elektronicznymi w materiale półprzewodnikowym i piezoelektrycznym. Główne hipotezy bioelektroniczne zaproponowano jeszcze w latach 70. ubiegłego wieku, a więc w czasach, gdy rozwój nanotechnologii i metod badawczych nanonauk nie był tak zaawansowany jak obecnie, a w związku z tym aspekt bioelektroniczny w badaniach protokomórki, jako minimalnego systemu żywego, nie był w ogóle brany pod uwagę. Niniejszy referat ma na celu przedstawienie niektórych możliwych inspiracji wynikających z bioelektroniki dla modelowania minimalnego systemu żywego.

## 1. Niektóre obszary badawcze nanotechnologii i nanonauk<sup>2</sup> a problem minimalnego systemu żywego

Na początku chciałbym zwrócić uwagę na możliwość nowej zmiany paradygmatów naukowych. Jesteśmy bowiem świadkami niezwyklego okresu w historii nauki, w którym dochodzi do konwergencji licznych dyscyplin: fizyki, nanotechnologii, biologii molekularnej i nauk biomedycznych. Zbieżność ta, wyrażająca się m.in. w powstaniu nanobiotechnologii, może zrewolucjonizować wiele obszarów badawczych w XXI wieku, otwierając drzwi do nowych odkryć naukowych i opracowania unikalnych metod. Rozwój i wzrost nanobiotechnologii kształtowany jest teraz przez zbieżność czasową trzech rewolucji rozpoczętych jeszcze w różnych okresach XX wieku: kwantowej, genomowej i technologicznej, których progres, przedstawiany zazwyczaj w postaci krzywych *S*, dąży do osiągnięcia poziomu granic teoretycznych<sup>3</sup>. Mianowicie rewolucja kwantowa rozpoczęła się od stworzenia teorii fotoelektrycznej (1905) i mechaniki kwantowej (1927), rewolucja technologiczna od wynalazku tranzystora (1948) i lasera (1960), a rewolucję genomową zapoczątkowało odkrycie struktury DNA (1953), by znaleźć apogeum w zsekwencjonowaniu całego genomu ludzkiego i manipulowaniu pojedynczymi genami. Zasady mechaniki kwantowej, rządzącej subatomowym światem cząstek i sił jądrowych, stanowią obecnie

---

<sup>2</sup> Przedrostek „nano” pochodzi z języka greckiego, w którym oznaczał karła (*nan(n)os*). Dziś służy do oznaczenia jednej miliardowej jakiejś standardowej miary jednostki fizycznej, np. nanometr to  $10^{-9}$  m, czyli w przybliżeniu rozmiar takiej molekuly jak benzen, oraz do nazywania niedawno stworzonych samodzielnych obszarów nauki i praktyki inżynierskiej, jakimi są właśnie nanonauki i nanotechnologie. Zob. np. A. Mazurkiewicz (red.), *Nanonauki i nanotechnologie – stan i perspektywy rozwoju*, Radom: Instytut Technologii Eksploatacji – Państwowy Instytut Badawczy 2007.

<sup>3</sup> T. Vo-Dinh, *The new paradigm shift at the convergence of nanotechnology, molecular biology, and biomedical sciences*, „NanoBiotechnology” 1 (2005), no. 1, s. 3-6.

podstawy teoretyczne opisu procesów na poziomie nanoskalowym, takich jak emisja światła z „kropek kwantowych”, transport elektronów w „drutach kwantowych” czy kwantowe tunelowanie w molekułach DNA. Z kolei miniaturyzacja mikroprocesorów i systemów magazynowania danych oraz wzrost mocy komputerów doprowadziły do gwałtownego postępu technologii informacyjnych, a w konsekwencji do zmian w wielu aspektach życia społecznego, określanych jako „rewolucja informacyjna”.

W minionym półwieczu sekwencja czasowa rozwoju nauk technologicznych przebiegała w takim kierunku, że obecnie nanotechnologia pozwala już na manipulowanie materią w nanoskali, czyli na procesy oddzielania, konsolidacji i odształcania materiałów nawet tylko o jeden atom lub jedną molekułę<sup>4</sup>. Jednym z wariantów tego kierunku badań jest podejście biomimetyczne, w którym wykorzystuje się biosystemy jako wzorce do stwarzania nanostruktur niebiologicznych o podobnych lub całkiem nowych funkcjach. W centrum zainteresowań nanonauk i nanotechnologii są badania procesów katalitycznych i enzymów, a to w celu osiągnięcia 100-procentowej selektywności i wysokich szybkości reakcji<sup>5</sup>. Nie tylko enzymy, ale również inne biomakromolekuły czy struktury subkomórkowe są już przedmiotem zainteresowań nanobiotechnologii. Można więc oczekiwać, że nanonauki i nanobiotechnologie zwrócą się także ku badaniom sztucznych i naturalnych systemów stanowiących pomost między tzw. materią żywą a nieżywą, takich jak protokomórki<sup>6</sup> lub syntetyczne minimalne komórki<sup>7</sup>, z racji właśnie ich rozmiarów nanoskalowych.

„Minimalny system żywy” to pojęcie teoretyczne mające różne znaczenia, w zależności od przyjętej definicji życia lub organizmu. W odniesieniu do komórkowych form życia systemem tym będzie minimalna komórka. W konsekwencji przyjmuje się, że komórka żywa nie powinna mieć średnicy mniejszej niż ok. 0,2  $\mu\text{m}$ , przy czym komórki już o średnicy 0,2  $\mu\text{m}$  lub nawet odrobinę mniejszej powinny być o kształ-

---

<sup>4</sup> Zob. M. Hove, *From surface science to nanotechnology*, „Catalysis Today” 113 (2006), no. 3-4, s. 133-140; L. Zheng, J.P. Brody, P.J. Burke, *Electronic manipulation of DNA, proteins, and nanoparticles for potential circuit assembly*, „Biosensors & Bioelectronics” 20 (2004), no. 3, s. 606-619; W.H. Suh, K.S. Suslick, G.L. Stucky, Y.-H. Suh, *Nanotechnology, nanotoxicology, and neuroscience*, „Progress in Neurobiology” 87 (2009), no., s. 133-170.

<sup>5</sup> J. Grunes, A. Zhu, G.A. Somorjai, *Catalysis and nanoscience*, „Chemical Communications” 18 (2003), s. 2257-2260.

<sup>6</sup> S. Rasmussen, M.A. Bedau, L. Chen i in. (eds.), *Protocells: Bridging Nonliving and Living Matter*, Cambridge, Mass. – London, England: MIT Press 2008; M.A. Bedau, E.C. Parke, *The Ethics of Protocells: Moral and Social Implications of Creating Life in the Laboratory*, Cambridge, Mass.: MIT Press.

<sup>7</sup> P.L. Luisi, P. Stano (eds.), *The Minimal Cell*; P. Stano, *Synthetic biology of minimal living cells: primitive cell models and semi-synthetic cells*, „Systems & Synthetic Biology” 4 (2010), no. 3, s. 149-156. P.L. Luisi, F. Ferri, P. Stano, *Approaches to semi-synthetic minimal cells: a review*, „Naturwissenschaften” 93 (2006), no. 1, s. 1-13; A.C. Forster, G.M. Church, *Towards synthesis of a minimal cell*, „Molecular Systems Biology” 2 (2006), no. 1, msb4100090-E1-E10; P.L. Luisi, *Toward the engineering of minimal living cells*, „Anatomical Record” 268 (2002), no. 3, s. 208-214.

cie pałeczek, a nie kulistym<sup>8</sup>. Otóż z punktu widzenia paradygmatu biochemicznego obiekt owalny o średnicy 0,2  $\mu\text{m}$  zawiera zaledwie ok. 100 mln atomów i trudno byłoby sobie wyobrazić, w jaki sposób tak mała ich liczba mogłaby być zarówno nośnikiem informacji genetycznej, jak i uczestnikiem licznych ścieżek metabolicznych, procesów montażu makromolekuł, replikacji oraz innych elementów potrzebnych do istnienia systemu żywego. Typowa komórka prokariotyczna o średnicy ok. 1  $\mu\text{m}$  zawiera bowiem, w przybliżeniu: do 1% DNA, 5% rybosomów, 16% białek, 70% wody i 8% całkowitej objętości innych substancji. W porównaniu z nią hipotetyczne minimalne rozmiary komórki (o składzie: 10% DNA, 10% rybosomów, 20% białek, 50% wody i 10% innych komponentów) powinny wynosić: 172 nm w wypadku minimalnej zdolności biosyntetycznej (250 genów) oraz 250 nm w wypadku maksymalnej zdolności biosyntetycznej (750 genów)<sup>9</sup>.

Oszacowano, że teoretyczny genom minimalny, konieczny do życia najmniejszej komórki, może mieć zaledwie od 100 do 150 genów<sup>10</sup>. Bliska tej granicy jest na przykład endosymbiotyczna bakteria *Carsonella ruddi*<sup>11</sup>, której genom o wielkości 159 662 par zasad zawiera 182 geny kodujące białka<sup>12</sup>. Jeszcze mniejsze są tzw. nanobakterie – kontrowersyjne twory mineralno-organiczne<sup>13</sup>.

„Stworzeniem” organizmu, a chociażby „minimalnej komórki żywej”, zainteresowana jest nie tylko inżynieria genetyczna, ale także protobiologia – interdyscyplinarna dziedzina dotycząca kwestii powstania życia. Ambitny cel, jakim jest zsyntetyzowanie komórkowej formy życia, nie jest jeszcze osiągnięty, ale przecież nawet najprostsza komórka jest systemem tak skomplikowanym, że nawet za pomocą superkomputerów nie można z odpowiednią precyzją modelować procesów w niej przebiegających. Niemniej trwają intensywne badania nad minimalną komórką syntetyczną. Próbuje się konstruować systemy samoreplikujące się<sup>14</sup> i w tym względzie

<sup>8</sup> B. Velimirov, *Nanobacteria, ultramicrobacteria and starvation forms: a search for the smallest metabolizing bacterium*, „Microbes & Environments” 16 (2001), no. 2, s. 67-77.

<sup>9</sup> W.A. Lancaster, M.M. Adams, *The influence of environment and metabolic capacity on the size of a microorganism*, w: P.L. Luisi, P. Stano (eds.), *The Minimal Cell*, s. 93-103.

<sup>10</sup> G. Murtas, *Question 7: Construction of a semi-synthetic minimal cell: A model for early living cells*, „Origins of Life and Evolution of Biospheres” 37 (2011), no. 4-5, s. 419-422.

<sup>11</sup> Bakteria ta żyje wewnątrz komórek owadów *Pachypsylla venusta* (*Psyllina* – miodówki).

<sup>12</sup> A. Nakabachi, A. Yamashita, H. Toh i in., *The 160-kilobase genome of the bacterial endosymbiont 'Carsonella'*, „Science” 314 (2006), no. 5797, s. 267-268; R. Maheshwari, *Which is the smallest champion?*, „Indian Journal of Microbiology” 47 (2007), no. 1, s. 1-2.

<sup>13</sup> Np. A.G. Kutikhin, E.B. Brusina, A.E. Yuzhalin, *The role of calcifying nanoparticles in biology and medicine*, „International Journal of Nanomedicine” 7 (2012), s. 339-350; J.D. Young, J. Martel, *The rise and fall of nanobacteria*, „Scientific American” 302 (2010), no. 1, s. 52-59.

<sup>14</sup> Np. R.A. Freitas (Jr.), R.C. Merkle, *Kinematic Self-Replicating Machines*, Georgetown, TX: Landes Bioscience 2004; P.L. Luisi, *The Emergence of Life*; H. Bersini, *Software replica of minimal living processes*, „Origins of Life and Evolution of Biospheres” 40 (2010), no. 2, s. 121-130; T. Matsuura,

obowiązuje ta sama logika reprodukującej się maszyny, mianowicie komponenty replikującego się automatu Johna von Neumanna (1966)<sup>15</sup> są analogiczne do składników komórek żywych<sup>16</sup>. „Minimalna komórka” jest terminem opisowym, który nie identyfikuje jakiejś jednej, konkretnej struktury, ale raczej większy zbiór pokrewnych struktur komórkopodobnych, zdolnych do samopodtrzymania, reprodukcji rozwoju<sup>17</sup>. Różne więc są konkretne modele minimalnej komórki<sup>18</sup>, w zależności od dwóch głównych kierunków badań: „odgórnego” – idącego od współczesnej komórki żywej w kierunku redukcji złożoności w celu osiągnięcia minimalnej komórki (czyli minimalnego życia) – oraz „oddolnego”, idącego od prostych molekuł w kierunku zwiększania złożoności do tego samego celu, podobnie jak mogło to przebiegać podczas zakładanej prebiotycznej ewolucji molekularnej<sup>19</sup>.

W odpowiedzi na pytanie, czym jest najprostsza możliwa struktura uchodząca jeszcze za jednostkę żywą, proponowano różne koncepcje. Najbardziej może znana jest koncepcja „jednostki autopoietycznej”<sup>20</sup>. Jednostka ta, będąc minimalną i wystarczającą formą organizacji z atrybutem życia, zdefiniowana jest jako przestrzennie ograniczony system chemiczny, który jest zdolny do samotrzymywania spowodowanego siecią oddziaływań przebiegających w obrębie jego granic. W koncepcji tej zatem podstawowe procesy życiowe są ujmowane jako złożone systemy reakcji chemicznych. Podobne założenia, racjonalne i usprawiedliwione empirycznie, dotyczą

---

N. Ichihashi, T. Sunami i in., *Evolvability and self-replication of genetic information in liposomes*, w: P.L. Luisi, P. Stano (eds.), *The Minimal Cell*, s. 275-287.

<sup>15</sup> Np. instrukcje, duplikator, konstruktor, kontroler, nowy automat.

<sup>16</sup> R.V. Solé, A. Munteanu, C. Rodriguez-Caso, J. Macía, *Synthetic protocell biology: from reproduction to computation*, „Philosophical Transactions of the Royal Society of London Ser. B – Biological Sciences” 362 (2007), s. 1727–1739.

<sup>17</sup> P.L. Luisi, F. Ferri, P. Stano, *Approaches to semi-synthetic*, s. 1-13.

<sup>18</sup> Np. A.C. Forster, G.M. Church, *Towards synthesis*; P.L. Luisi, *Toward the engineering*, s. 208-214; P.A. Monnard, D.W. Deamer, *Membrane self-assembly processes: Steps toward the first cellular life*, w: P.L. Luisi, P. Stano (eds.), *The Minimal Cell*, s. 123-151; Y. Kuruma, *Liposomes mediated synthesis of membrane proteins*, tamże, s. 217-229; F. Mavelli, *Theoretical approaches to ribocell modeling*, tamże, s. 255-273.

<sup>19</sup> P.L. Luisi, *Toward the engineering*, s. 208-214; T. Matsuura, N. Ichihashi, T. Sunami i in., *Evolvability*, s. 275-287.

<sup>20</sup> Np. F.J. Varela, H.R. Maturana, R. Uribe, *Autopoiesis. The organization of living systems, its characterisation and a model*, „BioSystems” 5 (1974), s. 187-195; P.L. Luisi, F.J. Varela, *Self-replicating micelles – A chemical version of a minimal autopoietic system*, „Origins Life & Evol. Biosphere” 19 (1989), no. 6, s. 633-644; P.L. Luisi, *The chemical implementation of autopoiesis*, w: G.R. Fleischaker, S. Colonna, P.L. Luisi (eds.), *Self-Production of Supramolecular Structures. From Synthetic Structures to Models of Minimal Living Systems*, Dordrecht–Boston: Kluwer Academic Publishers 1994, s. 179-197; P.L. Luisi, *Autopoiesis: A review and a reappraisal*, „Naturwissenschaften” 90 (2003), no. 2, s. 49-59; L. Damiano, P.L. Luisi, *Towards an autopoietic redefinition of life*, „Origins Life & Evol. Biospheres” 40 (2010), no. 2, s. 145-149.

koncepcji chemotonu<sup>21</sup>. Ujmuje ona organizm jako tzw. automat miękki, funkcjonujący dzięki cyklicznym procesom chemicznym, do których wyjaśnienia wystarcza chemia fizyczna, a w szczególności kataliza i kinetyka chemiczna. Chemoton jest właśnie tego rodzaju automatem – chemiczną elementarną jednostką życia. Po dodaniu do niego regulacji enzymatycznej przekształca się w bioton – poprzednik komórek żywych.

Uogólniając, można uważać system fizyczny za żywy wówczas, gdy może on przekształcać zewnętrzną materię lub energię w wewnętrznym procesie podtrzymywania się i samogeneracji<sup>22</sup>. Jeśli to założenie jest zasadne, można oczekiwać zsyntetyzowania trzech potencjalnych klas syntetycznych komórek: (a) system samozachowujący się (ale się nie replikujący), (b) system replikujący się (ale nie ewoluujący) i (c) system w pełni ewoluujący<sup>23</sup>. Można oczekiwać, że nanotechnologia (nanobiotechnologia<sup>24</sup> lub bionanotechnologia<sup>25</sup>) dostarczy nowych możliwości badawczych w syntetyzowaniu sztucznych komórek. Czy jednak taki model komórki, zredukowany w gruncie rzeczy do złożonego systemu chemicznego, będzie adekwatnym modelem naturalnej komórki żywej, czy tylko jakąś formą replikującego się systemu, któremu przypisać można sztuczne życie?

## 2. Bioelektroniczny model organizmu

Postęp nauk o życiu innych niż biochemia czy biologia molekularna zdaje się potwierdzać powyższą wątpliwość. Na przykład nanobiologia<sup>26</sup> jest bionauką z de-

---

<sup>21</sup> T. Gánti, *Chemoton Theory*, vol. 1: *Theoretical Foundations of Fluid Machineries*, New York – Boston: Kluwer Academic, Plenum Publishers 2003; tenże, *Chemoton Theory*, vol. 2: *Theory of Living Systems*, New York – Boston: Kluwer Academic, Plenum Publishers 2003; J. Griesemer, E. Szathmáry, *Gánti's chemoton model and life criteria*, w: S. Rasmussen, M.A. Bedau, L. Chen i in. (eds.), *Protocells*, s. 481-512.

<sup>22</sup> P.L. Luisi, *The Emergence of Life*, s. 26.

<sup>23</sup> R.V. Solé i in., *Synthetic protocell biology*, s. 1727-1739.

<sup>24</sup> M. Soloviev, *Nanobiotechnology today: focus on nanoparticles*, "Journal of Nanobiotechnology" 5 (2007), no. 1, s. 11 (3 pp.); V.I. Shvets, A.P. Kaplun, Y.M. Krasnopol'skii i in., *From liposomes of the 1970s to 21st Century nanobiotechnology*, "Nanotechnologies in Russia" 3 (2008), no. 11-12, s. 643-655; R.J. Koopmans, A. Aggeli, *Nanobiotechnology – quo vadis?*, "Current Opinion in Microbiology" 13 (2010), no. 3, s. 327-334.

<sup>25</sup> Np. H. Yang, Y. Xia, *Bionanotechnology: Enabling biomedical research with nanomaterials*, "Advanced Materials" 19 (2007), no. 20, s. 3085-3087; B. Bensaude-Vincent, *Boundary issues in bionanotechnology: Editorial introduction*, "Hyle" 15 (2009), no. 1, s. 1-4. Editorial (2010) *Chemical Biology: Fundamental Problems of Bionanotechnology Conference*, "Applied Biochemistry and Microbiology" 46 (2010), no. 1, s. 114-115.

<sup>26</sup> Np. S. Santoli, *Nanobiological principles and the origin of life*, "Nanobiology" 2 (1993), s. 201-214; R. Nussinov, C. Alemán, *Nanobiology: from physics and engineering to biology*, "Physical Biology"

finicji poświęconą badaniom nanoskalowych systemów żywych, zwłaszcza fundamentalnych mechanizmów procesów samoorganizacji, intra- i interkomunikacji w materii ożywionej, w szczególności nanorozmiarowych struktur dyssypatywnych. Inną z takich nauk jest bioelektronika, która traktuje organizm i biosystemy jako urządzenia i systemy elektroniczne. Pionierami bioelektroniki byli A. Szent-Györgyi<sup>27</sup> i W. Sedlak<sup>28</sup>. Drugi z nich, na podstawie heurystycznych analogii strukturalno-substratowo-funkcjonalnych pomiędzy urządzeniami elektronicznymi a systemami biologicznymi, zaproponował bioelektroniczny model organizmu. Bioelektronika<sup>29</sup> jest dziedziną (biologii teoretycznej lub biofizyki), która obejmuje badania właściwości elektronicznych właściwości biosystemów, biomateriałów i biomimetyków oraz relacji pomiędzy tymi właściwościami biostruktur a procesami biologicznymi. W ramach bioelektroniki bada się także, czy w organizmach żywych realizują się rozwiązania analogiczne do rozwiązań znanych w elektronice technicznej i technice elektronowej oraz czy można zastosować w tych dziedzinach rozwiązania wzorowane na przyrodzie żywej. Bioelektronika również postuluje kwantowo-polowy<sup>30</sup> opis organizacji biosystemów i procesów bioinformacyjnych (włącznie z psychicznymi<sup>31</sup>). Do ww. własności elektronicznych, które były ignorowane w ramach paradygmatu chemicz-

---

3 (2006), 2 pp.; P.C. Wang, R.P. Blumenthal, Y. Zhao i in., *Building scientific progress without borders: Nanobiology and nanomedicine in China and the U.S.*, "Cancer Research" 69 (2009), no. 1, s. 5294-5295; A. Kroll, *Nanobiology – convergence of disciplines inspires great applications*, "Cellular and Molecular Life Sciences" 69(3), s. 335-336; V.I. Maron, M.D. Nussinov, S. Santoli, *Nanotechnology and nanobiology – breakthroughs to new concepts in physics, chemistry and biology*, "Nanobiology" 2 (1993), s. 189-199; S. Mann, *Life as a nanoscale phenomenon*, "Angewandte Chemie International Edition" 47 (2008), s. 5306-5320.

<sup>27</sup> Np. A. Szent-Györgyi, *Bioelectronics. A Study in Cellular Regulations, Defense, and Cancer*, New York – London: Academic Press 1968; J. Ladik, *Solid state physics of biological macromolecules: the legacy of Albert Szent-Györgyi*, "Journal of Molecular Structure (Theochem)" 2003, no. 1-3 (666-667), s. 1-9.

<sup>28</sup> Np. W. Sedlak, *Bioelektronika – nowsze ujęcie ożywionej materii*, „Folia Soc. Sci. Lublinensis” 21 (1979), z. 2 (Biol.), s. 71-80; tenże, *Wprowadzenie w bioelektronikę*, Wrocław-Warszawa: Zakład Narodowy im. Ossolińskich 1988.

<sup>29</sup> Np. B. Lipinski (red.), *Electronic Conduction and Mechano-electrical Transduction in Biological Materials*, New York: M. Dekker 1982; W. Sedlak, J. Zon, M. Wnuk (red.), *Bioelektronika. Materiały VI Sympozjum*; S. Bone, B. Zaba, *Bioelectronics*, Chichester – New York: John Wiley & Sons 1992; W. Göpel, *Bioelectronics and nanotechnologies*, "Biosensors & Bioelectronics" 13 (1998), no. 6, s. 723-728; M. Berggren, A. Richter-Dahlfors, *Organic bioelectronics*, "Advanced Materials" 19 (2007), no. 20, s. 3201-3213; K. Svennersten i in., *Organic bioelectronics in nanomedicine*, "Biochimica et Biophysica Acta" 18 (2011), no. 10, s. 276-285.

<sup>30</sup> Np. M. Bischof, *Field concepts and the emergence of a holistic biophysics*, w: L.V. Belousov i in. (red.), *Biophotonics and Coherent Systems*, Moscow: Moscow University Press 2000, s. 1-25.

<sup>31</sup> Np. A. Szelmanowski, *Idea świadomości spintronicznej jako rozwinięcie bioelektronicznej koncepcji ks. prof. Włodzimierza Sedlaka*, w: A. Kryszczuk (red.), *Nauka – etyka – wiara*, Warszawa: Arka 2007, s. 338-356.

no-molekularnego w biologii, zalicza się: półprzewodnictwo elektronowe (np. białek, błon, barwników biologicznych), piezoelektryczność (np. białek, mięśni, tkanek roślinnych), piroelektryczność (np. kolagenu) oraz wiele innych własności fizycznych: (ciekłokrystaliczność błon biologicznych, ultrasłaba bioluminescencja, rezonansowe skutki oddziaływań pól elektromagnetycznych na biosystemy etc.). Uwzględnienie tych właściwości, jako istotnych dla procesów życiowych, pozwala ujmować organizm jako „[...] układ białkowy piezoelektrycznych półprzewodników o sprzężonych funkcjach chemicznych i elektronicznych z falową koordynacją wewnętrzną [...]”<sup>32</sup>, będący elektronicznym oscylatorem elektromagnetycznym. Spośród propozycji teoretycznych bioelektroniki chciałbym zwrócić uwagę na dwie najważniejsze, tj. koncepcję bioplazmy<sup>33</sup> i koncepcję elektromagnetycznej natury życia<sup>34</sup>, które mogą mieć heurystyczną wartość właśnie w odniesieniu do problemu minimalnego systemu żywego. Konfirmacja empiryczna tych koncepcji może być inspiracją i wyzwaniem również dla nanotechnologii i nanonauk.

### 3. Natura życia w nanoskali: biofotony i bioplazma

Z punktu widzenia bioelektroniki poznanie natury życia w nanoskali jest bogatsze o nowe aspekty. Bioelektronika bowiem „łączy” dwie kategorie poziomów funkcjonalnych w organizmie, mianowicie chemiczny (metaboliczny) z elektronicznym. Czynnikiem łączącym są autogenne fotony, które sprzęgają procesy biochemiczne z elektronicznymi. „Życie więc jest elektromagnetycznie skoordynowaną całością [...]”<sup>35</sup> lub „[...] przenoszącą się falą elektromagnetyczną w molekularnej sieci produkowanej metabolicznie i wstrząsanej ustawicznie falą kwantowo-akustyczną”<sup>36</sup>. Organizm jest systemem, którego przestrzeń jest wypełniona bioplazmą i zamknięta elektrostatą. Bioplazma jest stanem materii znamionym dla organizmów żywych,

<sup>32</sup> W. Sedlak, *Bioelektronika*, Warszawa: IW PAX 1979, s. 485.

<sup>33</sup> Np. W. Sedlak (red.), *Bioplazma. Materiały z I Konferencji poświęconej bioplazmie. 9 maja 1973 r. Katolicki Uniwersytet Lubelski*, Lublin: RW KUL 1976; J. Zon, *Bioplazma oraz plazma fizyczna w układach żywych. Studium przyrodnicze i filozoficzne*, Lublin: RW KUL 2000.

<sup>34</sup> Np. W. Sedlak, *ABC elektromagnetycznej teorii życia*, „Kosmos, Ser. A: Biol.” 18 (1969), nr 2, s. 165-174; M. Wnuk, *Istota procesów życiowych w świetle koncepcji elektromagnetycznej natury życia: Bioelektromagnetyczny model katalizy enzymatycznej wobec problematyki biosystemogenezy*, Lublin: RW KUL 1996.

<sup>35</sup> W. Sedlak, *Bioelektronika*, s. 484.

<sup>36</sup> Tamże, s. 483.



analogicznym do plazmy fizycznej w ciałach stałych, ale jest taką plazmą, która jest sprzęgnięta z biochemicznymi reakcjami metabolizmu. Elektrostaза zaś jest barierą pełniącą funkcję homeostazy elektrycznej i przekaźnika bodźców (informacji) elektromagnetycznych między środowiskiem a układem biologicznym; ekranuje ona organizm przed destrukcyjnym oddziaływaniem środowiska elektromagnetycznego.

Biosystemy są zorganizowane w hierarchię poziomów informacyjnych, w których zachodzi nieustanne przetwarzanie informacji. W ogólnym znaczeniu, informacją jest wszelka różnica wykryta i zarejestrowana przez dany układ, która jest istotna dla funkcjonowania organizmu. Nawet mikroskopijna komórka żywa jest w każdym momencie terenem ogromnej liczby różnorodnych procesów komunikacyjnych. Otóż bioelektroniczny model organizmu zwraca uwagę na istotną rolę innych torów komunikacji wewnątrz systemu żywego niż za pośrednictwem jonów, rodników lub molekuł. Akcentuje mianowicie znaczenie procesów informacyjnych z udziałem fotonów, swobodnych elektronów, solitonów, fononów i innych kwazicząstek<sup>37</sup>. Na przykład elektromagnetyczna komunikacja wewnątrzkomórkowa mogłaby się dokonywać na podłożu tzw. harf wodorowych (oscylacje protonów rzędu  $10^{10}$ - $10^{11}$  Hz), oscylacje plazmowe elektronów swobodnych etc. Przede wszystkim to pole elektromagnetyczne o wewnętrznym porządku czasoprzestrzennym stanowi czynnik kreujący powstawanie i rozwój nadmolekularnych systemów odtwarzających się i samosterujących, o ile spójność i koherentność tego pola odpowiada przypisywanej życiu harmonii lub łaadowi. Istnieje cyrkulacja fotonów w biosystemach. Jako nośniki zarówno energii, jak i informacji, fotony mogłyby nawet uchodzić za jednostki *natury* bardziej „szlachetne” niż atomy. Biofotony<sup>38</sup> są zatem *substantia prima*<sup>39</sup>, a informacja elektromagnetyczna odgrywa zasadniczą rolę w istnieniu organizmu żywego jako zintegrowanej całości. Promieniowanie elektromagnetyczne jest niejako predestynowane do tego celu. Może być w nim zakodowana olbrzymia ilość informacji, poprzez modulację częstotliwości-

---

<sup>37</sup> Np. L. Brizhik, E. Del Giudice, F.-A. Popp i in., *On the dynamics of self-organization in living organisms*, „Electromagnetic Biology & Medicine” 28 (2009), no. 1, s. 28-40; G.J. Hyland, *Bio-electromagnetism*, w: F.A. Popp, L. Belousov (eds.), *Integrative Biophysics: Biophotonics*, Dordrecht: Kluwer Academic Publishers 2003, s. 117-148; S. Ji, *Free energy and information contents of Conformons in proteins and DNA*, „BioSystems” 54 (2000), no. 3, s. 107-130; F.A. Popp, G. Becker, H.L. König i in. (eds.), *Electromagnetic Bio-Information*, München: Urban & Schwarzenberg 1979.

<sup>38</sup> Np. E. Lozaneanu, M. Sanduloviciu, *Physical basis of biophoton emission and intercellular communication*, „Romanian Reports in Physics” 60 (2008), no. 3, s. 885-898; F. Grass, H. Klima, S. Kasper, *Biophotons, microtubules and CNS, is our brain a “Holographic computer”?*, „Medical Hypotheses” 62 (2004), no. 2, s. 169-172; H.J. Niggli, L.A. Applegate, *Biophotons: Ultraweak photons in cells*, w: F.A. Popp, L. Belousov (eds.), *Integrative Biophysics*, s. 361-385; F.A. Popp, *Biophotons – Background, experimental results, theoretical approach and applications*, tamże, s. 387-438.

<sup>39</sup> J. Slawinski, *Photon emission from perturbed and dying organisms – The concept of photon cycling in biological systems*, w: F.A. Popp, L. Belousov (eds.), *Integrative Biophysics*, s. 307-329.

ści, amplitudy, fazy i innych jego parametrów. Co więcej, w przeciwieństwie do elektronów, protonów lub jonów, których liczba w danej objętości jest ograniczona zgodnie z zakazem Pauliego, fotony mają zdolność do nieograniczonego zagęszczania się w bardzo małej przestrzeni, co daje im olbrzymi potencjał aktywności (np. jonizacji materii, rozrywania wiązań chemicznych), tworząc „kondensat” fotonów koherentnych, np. DNA może funkcjonować jako „zbiornik światła” (wymrażarka fotonów), w którym możliwy czas przebywania fotonu oszacowano na tysiące lat<sup>40</sup>.

Chociaż nie zidentyfikowano jeszcze wszystkich typów generatorów, nośników i odbiorników sygnałów elektromagnetycznych w obrębie komórki żywej, to jednak uwzględnienie tego istotnego aspektu natury życia w badaniach nad minimalnym systemem żywym nie powinno być pomijane. Niewykluczone, że inspirująca może być hipoteza zaproponowana przez W. Sedlaka, by za wyjściowy substrat protoorganizmów uznać rozpowszechnione w środowisku prebiotycznym glinokrzemiany o własnościach półprzewodnikowych, a za model „minimum życia” przyjąć glinokrzemianowy koloid amfoteryczny<sup>41</sup>, w którym układ „cząstka koloidalna – woda” należałoby traktować jako tzw. złączne  $p-n$  znane z elektroniki. Powstające życie bowiem powinno się oprzeć na systemie umożliwiającym subtelny odbiór minimalnych bodźców polowych i optymalny odbiór informacji, czyli na układzie półprzewodnikowym<sup>42</sup>. Cząstki koloidalne półprzewodników wykazują bowiem niezwykle własności i są rozpatrywane jako pewien nowy fizykochemiczny wymiar pomiędzy molekułami a materiałami masowymi. Ich stosunek powierzchni do objętości jest ekstremalnie olbrzymi. Stąd badania takich cząstek należą do nauk o ciałach stałych i nauk o powierzchniach. Od rozmiaru cząstek zależą właściwości tych cząstek (np. absorpcja światła, fluorescencja, aktywność katalityczna)<sup>43</sup>. Gdyby jako zasadną przyjąć tezę bioelektroniki, że początek życia był równoznaczny z zaistnieniem pod wpływem fotonów sprzężenia chemiczno-elektronicznego w półprzewodnikach glinokrzemianowych, wówczas badania nad minimalnym systemem żywym byłyby wzbogacone o nowe ważne kierunki. Takim kierunkiem może być na przykład otrzymanie samopodtrzymującego się oscylatora kwantowego na bazie glinokrzemianowej.

Inną inspiracją płynącą z bioelektroniki dla badań nad minimalnym systemem żywym może być koncepcja bioplazmy, która implikuje tezę, że w organizmach żywych istnieje plazma fizyczna sprzężona z metabolizmem. Plazma fizyczna jest układem różnego rodzaju cząstek o ładunkach dodatnich i ujemnych, z których przynajmniej

<sup>40</sup> F.A. Popp, *Biologia światła*, Warszawa: Wiedza Powszechna 1992, s. 101.

<sup>41</sup> W. Sedlak, *Wstęp do elektromagnetycznej teorii życia*, „Roczniki Filozoficzne” 18 (1970), z. 3, s. 101-126.

<sup>42</sup> W. Sedlak, *ABC elektromagnetycznej teorii życia*, s. 165-174.

<sup>43</sup> A. Henglein, *Electronics of colloidal nanometer particles*, „Berichte der Bunsengesellschaft für physikalische Chemie” 99 (1995), no. 7, s. 903-913.

jeden rodzaj stanowią cząstki poruszające się (np. zdelokalizowane elektrony w metalach lub półprzewodnikach). Plazma fizyczna różni się zwykłego zbioru cząstek istnieniem w niej silnych (tzw. kolektywnych) oddziaływań pomiędzy cząstkami sprawiających, że pomiędzy położeniami cząstek w danej objętości zachodzi korelacja. Sprzężenie z metabolizmem nadaje jej nową jakość. Koncepcję bioplazmy oraz fizykę i chemię plazmy fizycznej wykorzystuje się już w protobiologii – dziedzinie mającej na celu rekonstrukcję procesów powstawania życia. W badaniach nad syntezą życia, czyli przede wszystkim nad syntezą minimalnego systemu żywego, teorie stanów plazmowych również mogą dać interesujący wkład, zarówno od strony teoretycznej, jak i eksperymentalnej.

Teoretyczne warunki istnienia plazmowego stanu pewnego zbioru cząstek są opisane nierównościami:

$$n_0^{-1/3} \ll \lambda_D \ll L \quad (\text{w wypadku plazmy klasycznej}),$$

$$n_0^{-1/3} \ll \lambda_{\text{FT}} \ll L \quad (\text{w wypadku plazmy kwantowej}),$$

gdzie:  $n_0^{-1/3}$  – średnia odległość między cząstkami,  $L$  – rozmiar liniowy plazmy,  $\lambda_D$  – długość (promień) Debye'a,  $\lambda_{\text{FT}}$  – długość (promień) Thomasa-Fermiego.

Z warunków tych wynika ogólnie, że gęstość nośników ładunku w plazmie powinna być coraz większa w miarę zmniejszania się jej rozmiarów (np. typowe gęstości plazmy elektronowej w półprzewodnikach są rzędu  $10^{23}$  elektronów/ $\text{m}^3$ , a w metalach rzędu  $10^{28}$  elektronów/ $\text{m}^3$ ). Z modelowych oszacowań dotyczących kwantowej plazmy elektronowej o entropii zbliżonej do zera<sup>44</sup> wynika, że rozmiar liniowy takiej plazmy lub biosystemu zawierającego taką plazmę powinien być dużo większy od wartości 3,88 nm. W konsekwencji oznaczałoby to, że układy zawierające zdelokalizowane elektrony o rozmiarach rzędu kilkudziesięciu nanometrów już spełniałyby warunek istnienia stanu plazmowego i byłyby minimalnymi systemami żywymi. Warunek „ $L \gg 3,88 \text{ nm}$ ” spełniają zatem z dużym zapasem typowe komórki, np. bakteria *Staphylococcus aureus* (600 nm), ale również jedna z najmniejszych znanych form życia *Mycoplasma* (200 nm), a nawet kontrowersyjne nanobakterie wykryte w ludzkiej krwi (50 nm) czy najmniejsze wirusy – parwowirusy (23 nm). Warunek powyższy dotyczy zatem plazmy elektronowej w ciele stałym i jest ekstrapolowany na biologiczne ciało stałe. Niewykluczone, że kryterium to może być inne po uwzględnieniu innych rodzajów plazm (np. jonowej, dipolowej) w komórce żywej.

Jeżeli chodzi o aspekt eksperymentalny, to warto odnotować, że już od dawna prowadzono badania nad abiotyczną syntezą istotnych dla życia związków chemicz-

<sup>44</sup> M. Wnuk, *Rola układów porfirynowych w ewolucji życia*, Warszawa: ATK 1987, s. 190-220.

nych w warunkach plazmy fizycznej<sup>45</sup>. Jednakże o wiele bardziej interesujące są badania nad procesami samoorganizacji struktur w tej plazmie. Na przykład udało się stworzyć mikrostruktury kuliste podobne do pioruna kulistego, które mogą rosnąć, replikować się i komunikować między sobą<sup>46</sup>. Spełniają tym samym niektóre tradycyjne kryteria bycia komórkami żywymi, aczkolwiek nie można ich uznać za żywe w zwykłym znaczeniu, gdyż nie mają chociażby materiału dziedzicznego.

### Uwagi końcowe

Poznanie świata żywego w nanoskali jest coraz bardziej pasjonującym obszarem badań naukowych i dociekań filozoficznych. Rozwój nanonauk i nanotechnologii, badających naturalne i wytwarzających sztuczne struktury o tzw. rozmiarach nanometrowych (tj. rzędu od 1 do 100 nm), umożliwia poznanie natury procesów życiowych przebiegających na bardzo podstawowych poziomach ich organizacji: molekularnym i submolekularnym. Wypracowane przez te dziedziny nowe metody doświadczalne zyskały już duże znaczenie, także w badaniach ekstremalnie małych biostruktur, sytuowanych na pograniczu „żywe–nieożywione”, oraz w próbach wytwarzania sztucznych struktur, zbliżonych własnościami do naturalnej komórki żywej. Badanie biofotonów i bioplazmy może przybliżyć poznanie natury życia w jego nanoskali.

---

<sup>45</sup> Np. C.I. Simionescu, M.I. Totolin, F. Denes, *Abiotic synthesis of some polysaccharide-like and polypeptide-like structures in cold plasma*, "BioSystems" 8 (1976), no. 3, s. 153-158; I. Pollo, *Powstawanie w plazmach systemów molekularnych o wysokim poziomie energii swobodnej*, w: W. Sedlak, J. Zon, M. Wnuk (red.), *Bioelektronika. Materiały VI Sympozjum*, s. 115-125; S. Miyakawa i in., *Abiotic synthesis of guanine with high-temperature plasma*, "Origins of Life & Evolution of Biospheres" 30 (2000), no. 6, s. 557-566; G. Managadze, *A new universal mechanism of organic compounds synthesis during prebiotic evolution*, "Planetary & Space Science" 55 (2007), no. 15, s. 134-140; M. Janda i in., *Study of plasma induced chemistry by DC discharges in CO<sub>2</sub>/N<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>O mixtures above a water surface*, "Origins of Life & Evolution of Biospheres" 38 (2008), no. 1, s. 23-35.

<sup>46</sup> E. Lozneau, M. Sanduloviciu, *Minimal-cell system created in laboratory by self-organization*, "Chaos, Solitons & Fractals" 18 (2003), no. 2, s. 335-343; M. Sanduloviciu, D.G. Dimitriu, L.M. Ivan i in., *Self-organization scenario relevant for nanoscale science and technology*, "Journal of Optoelectronics & Advanced Materials" 7 (2005), no. 2, s. 845-851; E. Lozneau, M. Sanduloviciu, *Self-organization scenario acting as physical basis of intelligent complex systems created in laboratory*, "Chaos, Solitons & Fractals" 30 (2006), no. 1, s. 125-132; tychże, *Cell-like space charge configurations formed by self-organization in laboratory*, w: A.A. Minai, Y. Bar-Yam (eds.), *Unifying Themes in Complex Systems*, vol. IV: *Proc. Fourth Int. Conf. on Complex Systems*, part 2, Berlin–Heidelberg: Springer 2008, s. 31-38.

## Bioelectrical inspirations of the modelling of a minimal living system

### Abstract

The problem of the modelling of a minimal living system is presented from the point of view of bioelectronics. Special attention is paid to: (i) relation between synthetic biology and nanosciences and nanotechnologies, (ii) bioelectronic model of organism, (iii) the nanoscale phenomena of life, especially: biophotons as the carrier of biological information, and bioplasma as the new state of matter. It is suggested that biophotons and bioplasma would be taken into account in the researches on the minimal living systems. The significant works concerning above problems have been reviewed.

Keywords: bioelectronics, minimal life system, modeling, synthetic biology, nanobiotechnology, nanobiology