

MÓZG JAKO STRUKTURA DYSSYPATYWNA

WOJCIECH P. GRYGIEL

Wydział Filozoficzny Uniwersytetu Papieskiego Jana Pawła II
w Krakowie

WPROWADZENIE

Wolna wola jest intuicyjnym pojęciem, powszechnie stosowanym w opisie i analizie wielu aspektów ludzkiej aktywności i działań. Pojęcie to na tyle głęboko zakorzenione jest w kulturowej matrycy cywilizacji zachodniej, że trudno sobie wyobrazić funkcjonowanie szeregu systemów teologicznych, prawnych czy też etycznych bez założenia, że człowiek wolną wolę posiada. Łatwo jest więc powiedzieć, że ma się wolną wolę, znacznie trudniej jest jednak ją precyzyjnie zdefiniować. Sytuacja ta przypomina więc znaną odpowiedź św. Augustyna na pytanie o definicję równie intuicyjnego pojęcia, jakim jest czas, w którym stwierdza: „Czymże więc jest czas? Jeśli mnie nikt o to nie pyta, wiem. Jeśli pytającemu usiłuję wytłumaczyć, nie wiem”¹. Pomimo tych wątpliwości, tak definicji czasu, jak i wolnej woli podejmowano się już w starożytnej Grecji. Podstawowym elementem proponowanych

¹ Św. Augustyn, *Wyznania*, Ks. XI, Rozdz. 14.

definicji było wskazanie, że określenie danego czynu jako wolny zakłada, iż ten, kto się tego czynu podejmuje, jest sam w sobie całkowitym początkiem tego działania. Oznacza to, że sprawca czynu staje przed wyborem i mógłby równie dobrze wybrać opcję konkurencyjną w stosunku do tej, którą zrealizował. Już w *Etyce nikomachejskiej* Arystoteles stwierdza wyraźnie: „[...] kiedy początek działania jest w nim, zależy to od niego, czy się tego działania podejmie, czy też nie”².

Pomijając obecnie całą obszerną spuściznę dysput na temat wolnej woli, na potrzeby niniejszego opracowania należy zwrócić uwagę, iż w debatach tych jako przeciwny biegun wolnej woli pojawia się szeroko rozumiany *determinizm*. W zastosowaniu do specyfiki ludzkiego działania oznacza on, że istnieją *uprzednie* do podjętego działania uwarunkowania, które określają, że działający podmiot dokonał takich, a nie innych wyborów. Nie wolno także zapominać, że pojęcie przyczynowości (na tym etapie rozumiane synonimicznie z determinizmem) stanowi również w antycznej Grecji fundamentalne narzędzie opisu rzeczywistości, ponieważ, jak głosił Arystoteles, wyjaśnienie rzeczy następuje w świetle podania ich przyczyn. Napięcie pomiędzy deterministycznie funkcjonującą przyrodą a wolnymi wyborami żyjącego w niej człowieka uwidocznilo się już w filozofii stoickiej. Wobec nieuchronności przebiegu zdarzeń doktryna ta nakazywała przyjęcie postawy wyrachowanej akceptacji i zmierzenia się z doświadczanymi przeciwnościami.

Napięcie pomiędzy wolną wolą a determinizmem prowadzi do wielu rozstrzygnięć, w których rozważa się możliwość ich wzajemnego uniesprzecznienia. W tym kontekście pojawiają się cztery możliwe stanowiska jako kombinacje fizycznego (in)determinizmu z istnieniem bądź nieistnieniem wolnej woli. *Silny determinizm* będzie miał miejsce wówczas, gdy przyjmie się determinizm fizyczny oraz wykluczy się możliwość wolnej woli. *Silny inkompatybilizm* natomiast pojawi się wówczas, gdy założy się, że brak

² Arystoteles, *Etyka nikomachejska*, Ks. III.

determinizmu fizycznego jest sprzeczny z istnieniem wolnej woli. Jeżeli jednak przyjmie się, że determinizm fizyczny nie przekreśla wolnej woli, to takie stanowisko nosi nazwę *kompatybilizmu*. Jako ostatnia opcja może również zdarzyć się tak, że przyjęcie fałszywości fizycznego determinizmu staje się podstawą uzasadnienia wolnej woli, prowadząc do stanowiska określanego jako *metafizyczny libertarianizm*.

Rozumienie wolnej woli i jej odniesienia do deterministycznych ontologii przyrody musiało zmierzyć się z nowym wyzwaniem wraz z silnym rozwojem neurobiologii, jaki miał miejsce w ubiegłym stuleciu i trwa do dnia dzisiejszego. W tym kontekście pojawia się fundamentalny problem języka, ponieważ rezultaty nauk przyrodniczych formułowane są przy użyciu pojęć, mających bezpośrednio przełożenie na pomiar (pojęcia operacyjne) i nadających się do włączenia do równań matematycznych jako podstawy opisu realizowanego przez nowoczesną metodę naukową. W świetle tego typu badań ujawniła się również tendencja pokazująca, że tradycyjnie rozumiane procesy decyzyjne będące domeną duchowej sfery człowieka związanej z jego umysłem posiadają swoje znaczące podłoże w materialnym mózgu. Tendencja ta znajduje swój pełny wyraz w powszechnym dziś *funkcjonalizmie*, stanowiącym, że wszelkie zjawiska dotychczas uważane za umysłowe należy traktować jako funkcje mózgu. Istnienie wolnej woli podane zostało na gruncie neurobiologii w istotną wątpliwość jako rezultat słynnego eksperymentu Benjamina Libeta, przeprowadzonego w 1985 r.³ Dziś wielu specjalistów uważa, że akt woli w człowieka następuje jako wypadkowa równoległego działania wielu struktur mózgowych i wbrew postulatом klasycznych podejść filozoficznych nie stanowi odrębnej czynności umysłowej⁴.

Wyjaśniając zjawiska mentalne, współczesna neurobiologia koncentruje się na wskazaniu odpowiadających za te zjawiska

³ B. Libet, *Unconscious cerebral initiative and the role of conscious will in voluntary action*, *The Behavioral and Brain Sciences* 8 (1985), s. 529–566.

⁴ Zob. np. S.A. Spence, *The Actor's Brain: Exploring the Cognitive Neuroscience of Free Will*, Oxford University Press, Oxford 2009.

struktur neuronalnych i zachodzących w nich zmian. Tego typu zmiany śledzone są najczęściej przy użyciu technik neuroobrazowania, takich jak przykładowo PET lub fMRI. Z racji wysokiego stopnia złożoności tych struktur, stany mentalne przez nie generowane posiadają niewątpliwie charakter *emergentny* w stosunku do bardziej fundamentalnego poziomu atomów i pojedynczych cząsteczek. Znaczenie tego poziomu może stanowić szczególnie obszar zainteresowania dla fizyka teoretyka, poszukującego nie teorii fenomenologicznej (efektywnej), ale fundamentalnej teorii mózgu. W tym podejściu spodziewać się można interesujących rezultatów odnośnie pojęcia wolnej woli, zwłaszcza iż fizyka klasyczna jest teorią ściśle deterministyczną. Wydaje się więc, że skoro za zjawiska mentalne odpowiedzialne są struktury o rozmiarach znacząco przewyższających skalę atomową, efekty kwantowe pozostaną tutaj bez znaczenia.

Okazuje się jednak, że mechanika kwantowa oferuje dość kuszącą – i dlatego często proponowaną – drogę ścisłego wprowadzenia indeterminizmu kwantowego jako podstawy uzasadnienia wolnej woli w oparciu o kwantowe modele mózgu⁵. Rzadziej natomiast zaprzęga się do tego celu czysto klasyczne – i dlatego preferowane – modele mózgu, w których traktuje się mózg jako *strukturę dyssypatywną*. W niniejszym opracowaniu przeanalizowane zostaną dotychczasowe badania mózgu przy użyciu teorii chaosu ze szczególnym wskazaniem na ich filozoficzne implikacje dla pojęcia wolnej woli. Podstawowa korzyść, jaka płynie z tego typu podejścia, wynika z możliwości bronienia na jego gruncie stanowiska *kompatybilistycznego*, uniesprzeczniającego wolną wolę z całkowicie deterministycznym fizycznym podłożem mózgu. W ten sposób pojawia się szansa na zharmonizowanie klasycznej struktury pojęciowej etyki z osiągnięciami współczesnej nauki.

⁵ Zob. np. W.P. Grygiel, *Quantum Mechanics and Its Role in Cognitive Sciences: A Critical Survey* [w:] J. Stelmach, B. Brozek, Ł. Kurek (red.), *Philosophy in Neuroscience*, Copernicus Center Press, Kraków 2013, s. 149–171.

CHAOS DETERMINISTYCZNY

Podobnie jak wymieniane już powyżej filozoficznie brzemiennie pojęcia czasu oraz wolnej woli, pojęcie chaosu również znane było starożytnym Grekom. Jako chaos rozumiano wówczas sytuację całkowitego niezdeterminowania i bezkształtności. Przykładowo, w platońskim micie o stworzeniu świata Demiurg zobrazowany jest jako architekt, który wpatrując się w odwieczne idee, formuje według nich Wszechświat z bezkształtnej, chaotycznej masy⁶. Innymi słowy, chaos równoznaczny jest z brakiem jakiegokolwiek racjonalności. W perspektywie współczesnych nauk natomiast chaos postrzegany jest przeciwnie, jako przejaw szczególnego rodzaju racjonalności, dzięki której przyroda może przejawiać zachowania kreatywne. W takim też sensie chaos posłuży jako uzasadnienie bronionego w niniejszym opracowaniu stanowiska kompatybilistycznego.

Ścisły determinizm, rozumiany jako jednoznaczność określenia stanów przyszłych badanego układu w oparciu o warunki brzegowe i prawo ewolucji, uzyskał swoją ostateczną postać w mechanice klasycznej jako rozwiązania równań różniczkowych ruchu. W ten sposób wykształcił się również wzorzec przewidywalności, którego ukoronowaniem jest słynny *demon Laplace'a*. Szybko jednak okazało się, że układy klasyczne (niepodlegające kwantowej zasadzie nieoznaczoności Heisenberga) ze swojej natury stawiają istotne bariery tak rozumianej przewidywalności. Nawet tak prosty system jak bilardowe kule przejawia *zachowania chaotyczne*. Oznacza to bowiem, że nieprzewidywalność układu nie zależy od ilości zebranej o nim informacji. Mówiąc krótko, nawet wielka ilość eksperymentów przeprowadzonych na kulach bilardowych nie pozwoliłaby ustalić żadnych widocznych zależności, pomimo że do układu nie zostały wprowadzone z zewnątrz żadne elementy przypadkowości.

⁶ Platon, *Timajos*, 29A.

Aby ściślej scharakteryzować fizyczne podstawy zachowań chaotycznych, należy wprowadzić pojęcie *przestrzeni fazowej*, która stanowi *przestrzeń stanów* właściwą mechanice klasycznej. Każdy stan układu w takiej przestrzeni zadany jest przez podanie dla pojedynczego punktu sześciu współrzędnych: trzech współrzędnych położenia oraz trzech współrzędnych pędu. Historia dynamiki układu reprezentowana jest w przestrzeni fazowej jako pewna trajektoria i posiada w ten sposób przejrzystą reprezentację geometryczną. Jedną z fundamentalnych cech układów chaotycznych jest bardzo silna (eksponencjalna) zależność przebiegu ich trajektorii od warunków początkowych, w efekcie czego nawet bardzo niewielkie fluktuacje tych warunków mogą prowadzić do drastycznie odmiennych zachowań i utraty przewidywalności. Układy spełniające takie warunki noszą miano *układów niestabilnych*. Trajektorie *układów stabilnych* natomiast pozostają blisko siebie, nawet jeżeli podda się je znacznym fluktuacjom w początkowej fazie ich ewolucji.

Niestabilność układów nie jest jednak jedyną cechą układów chaotycznych, istotne różnice pojawiają się w strukturze samej przestrzeni fazowej. Choć zagadnienie to posiada swoje precyzyjne topologiczne uzasadnienie⁷, to dla pogładowego charakteru prezentacji wystarczy odwołać się do sugestywnej analogii mieszenia ciasta. Mieszenie ciasta posiada dwie składowe: (1) rozwałkowanie oraz następnie (2) zawijanie rozwałkowanego placka na siebie. Przestrzeń fazowa układu chaotycznego zachowuje się tak, jak gdyby poddana została identycznym operacjom. Ważnym ich rezultatem jest praktyczne wyeliminowanie informacji o warunkach początkowych i wygenerowanie w jej miejsce informacji nowej, jako swoistego kreatywnego efektu chaosu. „Rozwałkowanie” przestrzeni fazowej powoduje bowiem znaczne wzmocnienie lokalnych fluktuacji wartości wielkości fizycznych, natomiast zaginanie zbliża daleko od siebie położone trajektorie, w efekcie

⁷ W.J. Wildman, R.J. Russell, *Chaos: A Mathematical Introduction with Philosophical Reflections*, [w:] R.J. Russell, N. Murphy, A.R. Peacocke, *Chaos and Complexity: Scientific Perspectives on Divine Action*, Vatican Observatory Publications, Vatican City State, 1995, s. 49–90.

czego ginie globalna informacja zawarta w systemie. Ostatecznie więc tylko na samym początku układ jest przewidywalny, w momencie jednak, gdy lokalne fluktuacje opanują cały system, nie można dalej przewidywać jego zachowań. Mówiąc krótko, zerwany zostaje związek przyczynowy pomiędzy przeszłością i przyszłością. Za jedną z miar chaotyczności służy pojęcie entropii, wyrażające średnią szybkość „rozwałkowania” i „zaginania” przestrzeni fazowej, na skutek czego produkowana jest informacja.

Tak zarysowany mechanizm nosi miano *chaosu deterministycznego*, ponieważ w swojej naturze poszczególne trajektorie układu w przestrzeni opisane są równaniami ściśle deterministycznymi. Zachowania chaotyczne wynikają natomiast z własności odpowiednich przestrzeni fazowych. Do układu nie jest dostarczana żadna informacja z zewnątrz, nie jest on również poddawany żadnym zewnętrznym chaotycznym wpływom, takim jak przykładowo kąpiele termiczne. Czy istnieją zatem jakiegokolwiek przesłanki, aby oczekiwać, iż zachowania chaotyczne przejawiałby również ludzki mózg?

MÓZG NIEZRÓWNOWAŻONY

Mechanika klasyczna, będąca ucieleśnieniem newtonowskiego ideału teorii deterministycznej i odwracalnej, stanowi wysokiego stopnia idealizację, ponieważ wraz z podjętą w XIX w. analizą przemian cieplnych dostrzeżono ich zdecydowaną jednokierunkowość. Takie układy są układami *dalekimi od stanu równowagi*, gdyż zachodzące w nich przemiany wywoływane są poprzez gradienty odpowiednich potencjałów, skutkujące działaniem sił. Pionierem analizy procesów termodynamicznych dla tego typu układów był, rosyjskiego pochodzenia, belgijski fizykochemik, Ilya Prigogine (1917–2004)⁸. Ujmując rzecz w największym skrócie, układy termodynamiczne w stanie dalekim od równowagi podlegają opi-

⁸ Popularnonaukowe wprowadzenie do tematu z obszernym komentarzem filozoficznym można znaleźć [w:] I. Prigogine, I. Stengers, *Z chaosu ku porządkowi*, Państwowy Instytut Wydawniczy, Warszawa 1990.

sowi przy pomocy nieliniowych równań różniczkowych, których rozwiązania prowadzą do zachowań chaotycznych, o których mowa była powyżej⁹. Z uwagi na fakt, że układy w stanie dalekim od równowagi pobierają bardzo dużą ilość energii i dużą ilość energii rozpraszają, zwane są *układami dyssypatywnymi*. Najprostszym przykładem stabilnej struktury powstającej w takich warunkach jest wir w rzece. Natomiast do standardowych przykładów podręcznikowych z dziedziny chemii należą tak zwane *reakcje Bietusowa-Żabotyńskiego*, pozwalające gołym okiem obserwować wyłaniające się bogactwo struktur, a także podatność ich przemian na lokalne fluktuacje stężenia czy temperatury. O układach dyssypatywnych mówi się też często w biologii, wskazując przykładowo, że powstanie i rozwój organizmów żywych podporządkowane są prawom termodynamiki nierównowagowej¹⁰. Co więcej, wysuwa się również hipotezy, iż powstanie życia na Ziemi, jego globalny rozwój i aktualne istnienie warunkowane są prawami dla układów dalekich od stanu równowagi. Mówi się wręcz krótko, że życie jest strukturą dyssypatywną¹¹. Przytoczone przykłady wyraźnie pokazują więc, że porządek może wyłaniać się z chaosu na szeregu poziomów złożoności w przyrodzie i układy dyssypatywne dysponują własnym potencjałem samoorganizacyjnym.

Nawiązując obecnie do tematyki niniejszego opracowania, należy postawić pytanie, czy za nierównowagową strukturę dyssypatywną można uznać mózg. Odpowiedź na to pytanie wydaje się na pierwszy rzut oka oczywista, ponieważ skoro życie w globalnym ujęciu kwalifikuje się jako strukturę dyssypatywną, to na pewno prawom tym podlegał będzie również i mózg. Co więcej, istnieje szereg dodatkowych czynników, które na taki stan rzeczy wskazują. Niektóre z tych czynników mają charakter poglądowy

⁹ Zob. np. K. Gumiński, *Termodynamika procesów nieodwracalnych*, Państwowe Wydawnictwo Naukowe, Warszawa 1996, s. 162–172.

¹⁰ Zob. np. ibidem, s. 173–180.

¹¹ M. Heller, J. Życiński, *Dylematy ewolucji*, Polskie Towarzystwo Teologiczne, Kraków 1990, s. 104–110; M. Heller, *Filozofia przypadku*, Copernicus Center Press, Kraków 2012, s. 273–292.

i łatwo je zidentyfikować nawet w potocznej refleksji. Inne natomiast potwierdzone są specjalistycznymi badaniami neurobiologicznymi.

W obszarze potocznej refleksji zauważyć wprawdzie należy, że dziś mózg powszechnie uważa się za strukturę o najwyższej złożoności, jaka powstała w wyniku działania mechanizmów ewolucyjnych. Musiała zatem istnieć w przyrodzie siła, która uwarunkowała osiągnięcie tak wysokiego stopnia samoorganizacji. Konsekwencją takiej złożoności jest przede wszystkim obawa, czy sformułowanie uogólnionej teorii mózgu jest w ogóle możliwe. Nie dyskwalifikuje to jednak uzasadnionego przypuszczenia, iż równania takiej teorii opisujące dynamikę mózgu posiadają silnie nieliniowy charakter, w efekcie czego spodziewać się należy, że może on przejawiać zachowania chaotyczne.

W kolejności nasuwa się typowo fenomenologiczna obserwacja zużycowania energii na prowadzenie działalności intelektualnej. Nikogo nie trzeba przekonywać, że wysiłek intelektualny wymaga znacznego nakładu energetycznego i nieuchronnie prowadzi do zmęczenia całego organizmu. Pochłaniając więc i rozpraszając energię, mózg działa jako struktura dyssypatywna. Ostatecznie też do listy omawianych czynników zaliczyć należy fundamentalną cechę umysłu, jaką jest jego kreatywność. Jeśli przyjmie się stanowisko fizykalistyczne w kwestii relacji umysł – ciało, to słusznie oczekiwać należy, że kreatywność intelektualna wiązać się musi z kreatywnością na poziomie biologicznym, czemu zadość uczynić mogą zachodzące w mózgu procesy nierównowagowe. Jako szczególnie rodzaj kreatywnego działania mózgu z pewnością potraktować należy czynności wolitywne, ponieważ, zgodnie z uwagami podanymi wcześniej, przejawiający je podmiot musi być ich początkiem.

NEUROCHAOS

Historia badań zjawisk chaotycznych w układach nerwowych datuje się na początek lat 80. ubiegłego stulecia. Badaniom poddano wówczas króliki, podając im środki zapachowe, co w wyni-

kach EEG ujawniło oscylacje w wysokim przedziale częstotliwości 20–80 Hz. Wyniki te pozwoliły stwierdzić, że aktywność opuszki węchowej jest chaotyczna i może w każdej chwili znaleźć się w dowolnym stanie węchowej percepcji¹². Nie wchodząc obecnie w szczegóły techniczne, wypada na potrzeby niniejszego opracowania jedynie nadmienić, że istnieją precyzyjne kryteria oceny, czy w otrzymanyach wyników pomiarów mają udział efekty chaotyczne¹³. Zaliczają się do nich między innymi *wyznaczniki Lapunowa*, *entropia* oraz *funkcje korelacji*. Ważnym wnioskiem z przeprowadzonych dotychczas prac jest stwierdzenie, że chaos zauważany jest praktycznie na wszystkich poziomach struktur neuronalnych, począwszy od pojedynczych neuronów, poprzez różnego rozmiaru sieci neuronalne, a na czynnościach całego mózgu skończywszy¹⁴. Warto więc obecnie bliżej zapoznać się z poszczególnymi osiągnięciami w tej materii, aby dostrzec, że hipoteza mózgu jako struktury dyssypatywnej zyskuje swoje potwierdzenie empiryczne.

Poczynając od struktur neuronalnych o najmniejszym stopniu złożoności, należy wpięrw zwrócić uwagę na zachowanie pojedynczych komórek neuronalnych, a także ich elementów składowych. Okazuje się bowiem, że już na takim poziomie obserwuje się zachowania chaotyczne w prostych wewnątrzkomórkowych pomiarach elektrofizjologicznych, przeprowadzonych dla potencjałów czynnościowych pojedynczych neuronów. Badania takie przeprowadzono dla aksonów neuronów izolowanych z nerwowych tkanek kałamarnicy olbrzymiej¹⁵. Na podstawie tego podejrzewa

¹² S.L. Bessler, W.J. Freeman, *Frequency analysis of olfactory system EEG in cat, rabbit and rat*, EEG Clin. Neurophysiol 50 (1980), s. 9–24.

¹³ Zob. np. P. Faure, H. Corn, *Is there chaos in the brain? I. Concepts of nonlinear dynamics and methods of investigation*, C. R. Acad. Sci. Paris. Ser. III 324 (2001), s. 773–793.

¹⁴ Zob. np. H. Corn, P. Faure, *Is there chaos in the brain? II. Experimental evidence and related models*, C. R. Biologies 326 (2003), s. 787–840.

¹⁵ K. Aihara, G. Matsumoto, *Temporally coherent organization and instabilities in squid giant axons*, J. Theor. Biol. 95 (1982), s. 697–720; K. Aihara, G. Matsumoto, *Chaotic oscillations and bifurcations in squid giant axons*, [w:] A.V. Holden (red.), *Chaos*, Princeton University Press, Princeton 1986, s. 257–269.

się, że nieliniowe oscylatory neuronalne połączone elektrycznymi bądź chemicznymi synapsami mogą generować makroskopowe fluktuacje wyładowań neuronalnych mózgu. Zachowania chaotyczne prezentują również całe neurony, jak np. stwierdzono to w przypadku ślimaka morskiego¹⁶. W takiej sytuacji istnieje podstawa, aby twierdzić, że wyładowania neuronalne mogą być nośnikiem informacji w systemach nerwowych¹⁷.

Przechodząc na wyższy stopień złożoności, prowadzone analizy dotyczą par neuronów oraz małych sieci neuronalnych. Korn i Faure wyraźnie stwierdzają, że neurobiolodzy zgodni są w obserwacji, że zespoły komórek generują zsynchronizowane potencjały czynnościowe. Co więcej, przy odpowiednich geometriach połączeń oraz dobranych własnościach połączeń synaptycznych da się stwierdzić obecność nisko wymiarowego chaosu. Przykładowo, jednych z najbardziej przekonujących dowodów w tej materii dostarczyły prace Makarenki i Llinasa, w których badali oni neurony pochodzące z dolnej części oliwki u świnki gwinejskiej¹⁸. Na podstawie otrzymanych danych wyznaczyli oni wymiar chaosu jako w przybliżeniu równy 2.85 i stwierdzili synchronizację chaotycznej fazy pomiędzy sąsiadującymi komórkami. Podejmując się szerszego oglądu zagadnienia, Rabinovich wraz ze współpracownikami postawili pytanie o to, na ile tego typu chaotyczne efekty w strukturach neuronalnych służyć mogą realizacji określonych celów w przyrodzie¹⁹. Ich zdaniem niestabilność wywołana tymi efektami pomaga systemowi nerwowemu przystosować się do szybkich zmian w otoczeniu.

¹⁶ G.J. Mpistos, R.M. Burton, H.C. Creech, O.S. Seppo, *Evidence for chaos in spike trains of neurons that generate rhythmic motor patterns*, Brain Res. Bull. 21 (1988), s. 529–538.

¹⁷ D. Perkel, *Spike trains as carriers of information*, [w:] F. Schmidt, The Neurosciences Second Study Program, The Rockefeller University Press, 1970, pp. 587–596; L. Andrey, *Analytical proof of chaos in single neurons and consequences*, [w:] K. Lehnerz, J. Arnold, P. Grassberger, C. Elger (red.), *Chaos in brain?*, World Scientific 1999, s. 247–250.

¹⁸ V. Makarenko, R.R. Llinas, *Experimentally determined chaotic phase synchronization in a neuronal system*, Proc. Natl. Acad. Sci. USA 95 (1998), s. 15747–15752.

¹⁹ M.I. Rabinovich, H.D.I. Abarbanel, *The role of chaos in neural systems*, Neuroscience 87 (1998), s. 5–14.

Kolejnym obszarem badawczym, w którym identyfikuje się znaczącą rolę efektów chaotycznych, jest *szum synaptyczny*. Przejawia się on w postaci wahań potencjału błonowego komórki nerwowej, jako wynik stałego bombardowania sygnałami z komórek presynaptycznych, połączonego z niedokładnością przewodzenia synaptycznego. Zjawiska te przykładowo wykryto w przypadku komórek Mauthnera ryb doskonałokostnych, które stanowią neurony bezpośrednio odpowiedzialne za odruch ucieczki tych ryb²⁰. Istnieją również pewne przypuszczenia, że chaos obecny w centralnym systemie nerwowym może stanowić składową tak zwanego *kodu neuronowego*, czyli sposobu, w jaki wewnątrz układu nerwowego przenoszona jest informacja. Okazuje się bowiem, że fluktuacje pojawiające się w synapsach sprzyjają przenoszeniu aktywności neuronalnej do obszaru postsynaptycznego²¹.

Posuwając się dalej w analizie zjawisk chaotycznych w strukturach neuronalnych o wyższym stopniu złożoności, zatrzymać się obecnie wypada nad poszukiwaniami tego typu zjawisk w aktywności kory mózgowej. Jak podkreślają Korn i Faure, pomimo podjęcia licznych wysiłków badawczych, nie odnotowano w tej materii przełomowych osiągnięć. Zgodnie z uwagą poczynioną na początku do pionierskich badań zaliczyć należy testowanie sygnałów EEG u królików podczas rozpoznawania zapachów i uczenia się. Do tego jednak dochodzą dalsze rezultaty, otrzymane w wyniku badań ludzkiego EEG podczas snu, rokujące nadzieję na możliwość określenia dynamiki mózgu, co nie jest możliwe przy pomocy klasycznych metod spektralnych²². W bardziej współczesnych podejściach znaczącą rolę odgrywa natomiast analiza sygnałów mózgowych pod kątem chaosu przy pomocy metody niestabilnych orbit periodycznych. Przykładowo, w ten

²⁰ P. Faure, H. Korn, *A nonrandom dynamic component in the synaptic noise of a central neuron*, Proc. Natl. Acad. Sci. USA 94 (1997), s. 6506–6511.

²¹ P. Faure, D. Kaplan, H. Korn, *Probabilistic release and the transmission of complex firing patterns between neurons*, J. Neurophysiol., 84 (2000), s. 3010–3025.

²² A. Babloyantz, J.M. Salazar, G. Nicolis, *Evidence of chaotic dynamics of brain activity during the sleep cycle*, Phys. Lett. A 111 (1985), s. 152–156.

sposób chaos zidentyfikowano w wyładowaniach receptora ogonowego u raków²³. Pewne korzyści osiąga się również w metodach badania i przewidywania padaczki²⁴.

Pomimo podkreślonej niejednokrotnie niepewności wyników dotyczących istnienia efektów chaotycznych w strukturach neuronalnych, wysuwane są hipotezy co do ich istotnej roli w wyższych funkcjach mózgowych, takich jak przetwarzanie informacji, postrzeganie, funkcje ruchowe, pamięć oraz władze poznawcze²⁵. Na tym tle zarysowuje się wyraźna polemika dotycząca struktury pamięci z bardziej typowymi ujęciami, opartymi na reprezentacjach i głoszonymi przez zwolenników koncepcji *koneksjonistycznych*²⁶. Warto w tym miejscu przypomnieć, iż koncepcje takie opierają się na założeniu, że przetwarzanie informacji w umyśle to działalność dużej liczby małych jednostek funkcjonalnych tworzących wzajemnie połączone sieci na wzór komórek nerwowych połączonych w funkcjonalne sieci w tkance nerwowej. Przekonanie niemałej grupy badaczy co do istotności procesów chaotycznych dla wyjaśniania czynności mózgu na praktycznie wszystkich poziomach jego organizacji prowadzi do zasugerowania ogólniejszego pojęcia, jakim jest *neurochaos*²⁷. Przyjęcie hipotezy o dynamicznym charakterze mózgu jako struktury dyssypatywnej pozwala również odnieść się polemicznie do koncepcji mózgu formułowanych w paradygmacie obliczeniowym, mającym swoje źródło w rozumieniu mózgu jako komputera o olbrzymiej mocy obliczeniowej. Mówiąc krótko, *neurochaos* pozwala wskazać istotną jakościową różnicę pomiędzy mózgiem a komputerem.

²³ X. Pei, F. Moss, *Characterization of low-dimensional dynamics in the Crayfish caudal photoreceptor*, *Nature* 379 (1996), s. 618–621.

²⁴ Zob. np. K. Lehnertz, C.E. Elger, *Can epileptic seizures be predicted? Evidence from non-linear time series analysis of brain electrical activity*, *Phys. Rev. Lett.* 80 (1998), s. 5019–5022.

²⁵ Zob. np. Y. Yao, W.J. Freeman, *Model of biological patterns recognition with spatially chaotic dynamics*, *Neural Networks* 3 (1990), s. 153–170.

²⁶ Zob. np. W. Bechtel, A. Abrahamsen, *Connectionism and the Mind: An Introduction to Parallel Processing in Networks*, Blackwell, Cambridge 1990.

²⁷ K. Kanenکو, I. Tsuda, *Complex Systems: Chaos and Beyond: A Constructive Approach with Applications in Life Sciences*, Springer 2001.

UWAGI PODSUMOWUJĄCE

Przechodząc obecnie do podsumowania prezentacji i analiz badań nad zasadnością opisu funkcji mózgu przy pomocy efektów chaotycznych, wypada się obecnie skupić nad tym, jaką perspektywę wyniki te stwarzają dla lepszego zrozumienia pojęcia wolnej woli w kontekście współczesnych neuronauk. W pierwszym rzędzie należy zauważyć, iż neurochaos stanowi liczącą się alternatywę dla kwantowych modeli umysłu, gdzie istnienie wolnej woli próbowano tłumaczyć z gruntu indeterministycznego charakteru zjawisk kwantowych. W takich podejściach jednak milcząc pomija się fakt, że mechanika kwantowa wraz z centralnym dla niej opisem dynamiki przy pomocy równania Schrödingera jest teorią całkowicie deterministyczną. Indeterminizm pojawia się dopiero w momencie dokonania pomiaru na badanym układzie. Jeżeli więc stany mózgu, odpowiedzialne za jego wyższe funkcje, miałyby być reprezentowane przy pomocy stanów kwantowych, obejmujących większe jego obszary, to ich ewolucja zgodnie z prawami mechaniki kwantowej byłaby całkowicie deterministyczna. Dodatkowo także rozmiar struktur neuronalnych i stopień ich złożoności czyni stabilność takich stanów kwantowych niezwykle mało prawdopodobną ze względu na silne oddziaływania z otoczeniem i natychmiastowe wygaszanie interferencji kwantowych na skutek efektu *dekoherencji*. Neurochaos pozwala zatem na czysto klasyczne potraktowanie dynamiki mózgu, eliminując w ten sposób słusznie podnoszone zarzuty adekwatności opisu kwantowego.

Problematyka kwantowego opisu dynamiki mózgu prowadzi do kluczowego aspektu zagadnienia wolnej woli, jakim jest wskazanie na istnienie początku działania podmiotu, aby takie działanie można było uznać za uprzednio niezdeteterminowane żadnymi czynnikami. W przeciwieństwie do mechaniki kwantowej, układy chaotyczne posiadają zdolność do „wyłaniania porządku z chaosu”, co ściślej rozumie się jako możliwość kreatywnego wyłaniania struktur w wyniku konstruktywnego global-

nego wzmocnienia fluktuacji. Jak jednak wskazywano w dyskusji formalnych aspektów układów chaotycznych, wiąże się to również z eliminacją pamięci układu o jego przeszłości, czyli – ściśle mówiąc – zerwaniem deterministycznego charakteru dynamiki. W takim kontekście istnieje realna możliwość osadzenia pojęcia wolnej woli w kontekście fundamentalnie deterministycznej teorii. Wolna wola, jak też i wiele innych funkcji mózgowych, może być wręcz postrzegana jako przejaw kreatywności, co dobrze wpisuje się w preferowany współcześnie pogląd o *emergentnym* charakterze własności układów złożonych. Nawet więc – jak sugerowałby to osławiony eksperyment Libeta – jeśli istnieje funkcja mózgu poprzedzająca świadomość danego działania, to nie jest wcale koniecznym, aby była ona przyczynowo zależna od nieświadomych procesów, które są w stosunku do niej uprzednie na skali czasowej. Neurochaos stwarza więc stosowną platformę do obrony stanowiska *kompatybilistycznego*, wedle którego istnienie wolnej woli można pogodzić z całkowicie deterministycznie funkcjonującym mózgiem na poziomie fizycznym.