

10.17951/j.2018.31.1.75-95

ANNALES
UNIVERSITATIS MARIAE CURIE-SKŁODOWSKA
LUBLIN – POLONIA

VOL. XXXI, 1

SECTIO J

2018

Uniwersytet Papieski im. Jana Pawła II w Krakowie. Wydział Nauk Społecznych

STANISŁAW RADOŃ

radons@vp.pl

Stany świadomości w świetle neuronauk

The Consciousness States in the Light of Neuroscience

STRESZCZENIE

Mózg ludzki może być rozumiany jako kompleksowa sieć, która na poziomie anatomicznym i funkcjonalnym ma strukturę „małych światów” (optymalna organizacja sieciowa aktywacji różnych elementów struktury mózgowej, która jest powiązana z wysoką szybkością propagacji informacji, niską podatnością na błędy i ataki oraz minimalizacją kosztów aktywacji neurofizjologicznej), ważną rolę odgrywa w niej sieć wzbudzeń podstawowych (jej aktywacja jest utrzymana we wszystkich stanach świadomości). Odchylenia od struktury małych światów znajdują odzwierciedlenie w istotnych zmianach poziomu świadomości, takich jak: 1) stan śpiączki: podwyższona aktywacja przedklinka i tylnej części zakrętu obręczy oraz dominacja aktywacji fal alfa nad delta i theta przy relatywnie niskim ich nasileniu, 2) stan wegetatywny: podwyższona koherencja sieci wzbudzeń podstawowych oraz podwyższone nasilenie aktywacji delta, theta, beta i niskich alfa, 3) stan minimalnej świadomości: spadki aktywacji sieci wzbudzeń podstawowych podczas wykonywania zadań oraz przewaga aktywacji fal alfa nad delta i theta przy relatywnie wysokim ich nasileniu, 4) stan medytacyjny: reorganizacja centralnych elementów sieciowych względem peryferyjnych, istotne zmiany w zakresie ilości, jakości, orientacji połączeń odległych podłużnych i poprzecznych oraz częstotliwości ich aktywacji, wzrost podłużnej integracji i hemisferycznej synchronizacji. Potrzebne są dalsze badania, szczególnie oparte o wyrafinowane narzędzia i metody badawcze, które mogą się istotnie przyczynić do poprawy trafności oraz efektywności diagnostycznej, terapeutycznej i prognostycznej.

Słowa kluczowe: świadomość; śpiączka; stan wegetatywny; stan minimalnej świadomości; stan medytacyjny; sieć wzbudzeń podstawowych; struktura „małych światów”

WPROWADZENIE

Co takiego dzieje się w mózgu, że człowiek widzi świat, słyszy dźwięki, odczuwa zapachy, ucieka lub walczy? Co robi mózg, kiedy człowiek nie jest zaangażowany w wykonywanie kognitywnych zadań, tzn. kiedy umysł znajduje się

w stanie relaksacji? Co się dzieje, gdy znajduje się w stanie śpiączki albo w stanie wegetatywnym, gdy nie wykazuje praktycznie żadnych reakcji? Czy wtedy również coś słyszy, widzi, reaguje? Czy człowiek w ogóle kiedyś „nie myśli”?

Te i inne fascynujące pytania, jak się wydaje, stanowią osnowę najnowszych poszukiwań naukowych i prowadzonych badań w oparciu o wyrafinowane techniki służące do pomiaru aktywacji neuronalnej mózgu. Badania prowadzone są w oparciu zarówno o techniki statyczne neuroobrazowania (tomografia komputerowa, skanowanie magnetyczne MRI), jak i dynamiczne (elektroencefalografia EEG, badanie potencjałów wywołanych ERP, badanie przepływu krwi CBF, funkcjonalny rezonans magnetyczny fMRI) (Pąchalska 2007; Pąchalska, Kaczmarek, Kropotov 2014, 2018).

Ostatnio coraz częściej prowadzi się specyficzne strategie badawcze, stosując równocześnie dwie dynamiczne techniki neuroobrazowania, tj. EEG i fMRI, które umożliwiają zdecydowanie trafniejszą diagnozę stanów świadomości. Wykorzystanie specyficznych zalet tych narzędzi (EEG – dokładność czasowa, fMRI – dokładność przestrzenna) umożliwia bowiem ocenę właściwości całego systemu mózgowego (paradygmat sieci i grafów), a nie tylko podwyższonej aktywacji określonych obszarów mózgu lub częstotliwości (Stam, Reijneveld 2007; Tarapata 2012; Chennu i in. 2014; Xue 2014).

NEURONALNE PODSTAWY ŚWIADOMOŚCI

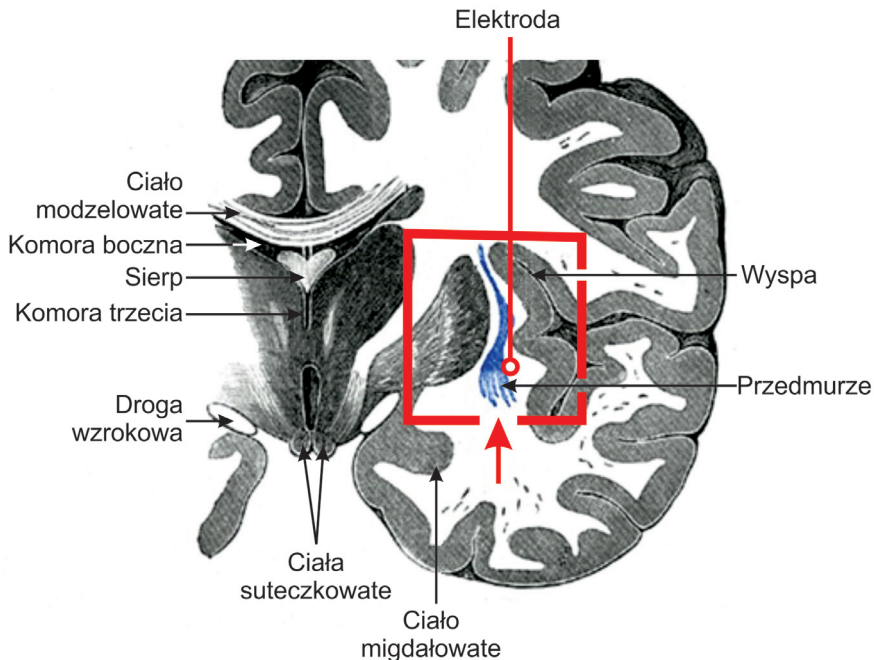
Najnowsze badania w dziedzinie neuronauk pozwalają stwierdzić, że przebieg procesów świadomych i nieświadomych człowieka jest związany z aktywnością elektryczną i chemiczną mózgu (Pąchalska, Kaczmarek, Kropotov 2014) oraz z działaniem człowieka, co w następstwie będzie mieć związek z tworzeniem się nowych połączeń w mózgu (por. ryc. 1). Należą do nich:

- połączenia przednie, tworzące się w przedniej części mózgu (głównie w płatach czołowych i skroniowych), które umożliwiają wgląd, samomonitorowanie, samokontrolę oraz korektę błędów,
- połączenia tylne i podkorowe, w obrębie tylnego obszaru mózgu i struktur podkorowych, które zapewniają funkcjonowanie w zakresie następujących modalności: zmysły (percepcja, głównie wzrokowa i słuchowa), ruch (kinestezja), pamięć oraz język.

Okazuje się, że przerwanie połączeń przednich, w następstwie uszkodzenia mózgu, powoduje poważne zaburzenia samoświadomości, jakie obserwujemy np. u pacjentów z uszkodzeniem płatów czołowych. Z kolei przerwanie połączeń tylnych i podkorowych zaburza funkcjonowanie w zakresie modalności, co ma istotny wpływ na rozpad samoświadomości (Pąchalska, Kaczmarek, Kropotov 2014), w tym świadomego Ja.

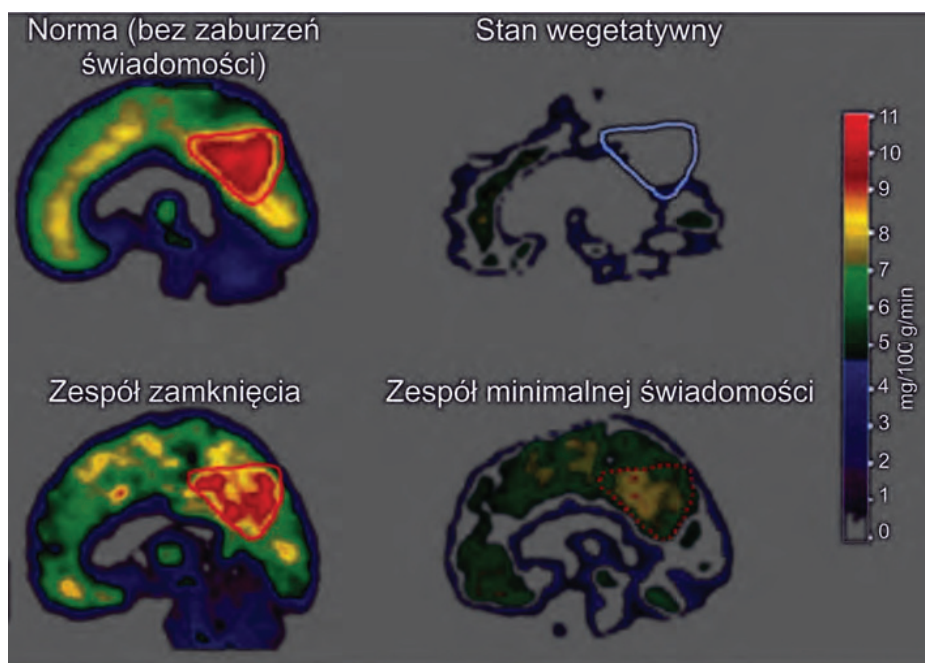
Niektóre wyniki badań (Koubeissi i in. 2014) dowodzą, że ważną częścią sieci, która podtrzymuje świadomość, jest przedmurze (*claustrum*). Jest to bar-

dzo mały obszar mózgu (ograniczony do kilku milimetrów), znajdujący się z lewej strony mózgowia oraz przednio-grzbietowej części wyspy. Stanowi on tę część sieci mózgowej, która pełni funkcję przełącznika świadomości, integrując ze sobą postrzeganie wewnętrzne z zewnętrznym. Jak się okazuje, stymulacja elektrodą przedmurza powoduje całkowite zatrzymanie wolicjonalnego zachowania, brak reakcji oraz pojawienie się amnezji bez negatywnych objawów motorycznych (drgawek) oraz afazji epileptycznej (Koubeissi i in. 2014). Zakłócenie funkcjonowania świadomości podczas stymulacji przedmurza objawia się wzrostem interakcji w aktywności przypodstawno-ciemiennowych oraz tylnoczołowych połączeń.



Ryc. 1. Przedmurze (*claustrum*): „siedziba” świadomości
Źródło: (Pąchalska, Kaczmarek, Kropotov 2018).

Przeprowadzone badania z użyciem technik neuroobrazowania (Laureys, Owen, Schiff 2004) dowodzą, że głównym obszarem mózgu, związanym ze świadomością, jest przyśrodkowa kora tylnego obszaru, obejmująca przedklinek mózdzku i sąsiadującą z nim korę tylnego zakrętu obręczy. Jego aktywacja jest największa u osób zdrowych, przeciętna – u chorych z zespołem minimalnej świadomości, a najmniejsza – u pacjentów w stanie wegetatywnym (w zespole zamknięcia żaden z obszarów nadnamiotowych nie wykazuje zmniejszenia metabolizmu).



Ryc. 2. Metabolizm mózgowy u osób zdrowych i pacjentów w stanie wegetatywnym, z zespołem zamknięcia i z zespołem minimalnej świadomości (zużycie mg glukozy na 100 g tkanki mózgowej w ciągu minuty)

Źródło: (Pąchalska, Kaczmarek, Kropotov 2014).

Z badań z wykorzystaniem EEG wiadomo, że świadome spostrzeganie nie jest natychmiastowe (Pąchalska, Kaczmarek, Kropotov 2018). Zachodzi ono dopiero wtedy, gdy pojawi się potencjał P3 (trzecia pozytywna fala pojawiająca się po 300 milisekundach jako reakcja na nieoczekiwany bodziec lub jego nagły brak). Umysł kompensuje to opóźnienie, przewidując nadchodzące zdarzenia i tworząc obrazy rzeczywistości w oparciu o istniejące połączenia. Z jednej strony umożliwia to sprawne funkcjonowanie, z drugiej jednak może prowadzić do powstawania iluzji (Dehaene 2014).

TEORIA SIECI I GRAFÓW

Przełomowym momentem w zakresie badań neurologicznych mózgu było opisanie struktur sieci rzeczywistych oraz opracowanie ich modeli. W 1998 r. socjolog D.J. Watts i matematyk S. Strogatz opublikowali pracę, w której przedstawili model „małego świata” (*small world – W-S*), który okazał się idealnie pasować do opisu funkcjonowania mózgu oraz praktycznie wszystkich realnych zjawisk (sieć cytowań naukowych, sieć powiązań autorów, sieć internetowa, zespoły

ludzi, korporacje, sieć autostrad, grupy przestępcze, Facebook itd.). Odkryto, że o optymalnym funkcjonowaniu danej sieci nie decydują struktury deterministyczne, takie jak sieci regularne czy losowe, ponieważ – obok bardzo szybkiego przesyłu informacji – generują one wiele błędów i są podatne na celowe ataki (Stam 2006; Fronczak, Fronczak 2009; Tarapata 2012). Okazało się, że w przypadku sieci rzeczywistych właśnie taka konfiguracja powiązań, jaka występuje w sieciach „małych światów”, tj. silnie zgrupowanych (nadmiar połączeń lokalnych), a równocześnie rzadkich (niedmiar połączeń odległych, oznaczający słabe usieciwienie), umożliwia nie tylko szybki przesył informacji, ale równocześnie zabezpiecza sieć przed błędami i celowymi atakami. Istnienie wielu dalekozasięgowych połączeń (tzw. skrótów) odpowiada bowiem za generowanie dużej liczby błędów oraz umożliwia skuteczne przeprowadzenie ataku na całą sieć (nadmiar połączeń odległych). Obserwacja ta była tak zaskakująca, że sieci te zostały przez badaczy kłopotliwie nazwane sieciami „małych światów”.

Zanim badacze opublikowali swoje wyniki, trudno było zrozumieć, w jaki sposób sieci rzeczywiste mogą być jednocześnie silnie zgrupowane (nadmiar połączeń lokalnych) i rzadkie (niedmiar połączeń odległych). Te cechy zdawały się wzajemnie wykluczać (efekt „małych światów” utożsamiano z dużym współczynnikiem gronowania i nadmiarem połączeń lokalnych, a słabe usieciwienie łączono z ich niedmiarem).

O przewadze sieci „małych światów” nad innymi sieciami (wartość predykcyjna) decyduje stosunkowo wysoka wartość współczynnika grupowania, tj. wysoki współczynnik gronowania (istnienie zwartych grup połączeń w sieci) oraz niewielka średnia odległość między węzłami (szybki przepływ informacji w sieci). Do kluczowych właściwości tak funkcjonującego systemu zdają się należeć: kompleksowość i szybkość propagacji informacji, odporność na błędy i celowe ataki, wrażliwość na minimalne perturbacje oraz niskie zapotrzebowanie na energię (Stam, Reijneveld 2007; Fronczak, Fronczak 2009; Rubinov, Sporns 2010; Seth, Edelman 2010; Luccioli i in. 2014). Odchylenia od struktury „małych światów” wiążą się (i wskazują) z poważnymi zaburzeniami fizjologicznymi, genetycznymi lub psychicznymi, a polegają na hipersynchronizacji (wzrost powiązań między parami węzłów) (por. Stam, Reijneveld 2007) lub spadku nasilenia powiązanych ze sobą procesów dyferencjacji (maksymalne różnicowanie obszarów lokalnych) i integracji (dążenie do włączenia maksymalnie zindywidualizowanych stanów w spójny system) (por. Siegel 2007, 2010).

Istotnym obszarem naukowej penetracji okazuje się być specyficzny obszar mózgu, którym jest tzw. sieć wzbudzeń podstawowych (*Default Mode Network* – DMN) (Shulman i in. 1997; Greicius i in. 2003; Greicius, Menon 2004; Cavanna, Trimble 2006; Cavanna 2007; Raichle, Mintun 2006; Fox, Raichle 2007; Mason i in. 2007; Raichle 2010; Vanhaudenhuyse i in. 2010; Crone i in. 2011). Sieć wzbudzeń podstawowych (fragmenty przyśrodkowej kory przedczołowej,

tylna kora zakrętu obręczy, płat ciemieniowy i hipokamp) (por. Raichle, Mintun 2006; Fox, Raichle 2007; Raichle 2010) jest szczególnie interesująca, ponieważ zachowuje aktywność zarówno podczas odpoczynku, jak i wykonywania zadań. Jej aktywacja jest ponadto zachowana we wszystkich stanach świadomości, tj. również w stanach patologicznych (fizjologiczny sen, indukowana anestezja, epilepsja, schizofrenia, stan śpiączki, stan wegetatywny i stan minimalnej świadomości) (Cavanna 2007; Boly i in. 2008; Buckner i in. 2008). Ponieważ podczas badania aktywacji sieci wzbudzeń podstawowych nie wymaga się wykonywania żadnych zadań mentalnych, dlatego jej obserwacja może być bardzo efektywna w przypadku badań pacjentów znajdujących się w stanach śpiączki, stanach wegetatywnych i stanach minimalnej świadomości.

Tryb spoczynkowy jest interesujący również z tego względu, że na jego aktywację nie wpływa intencjonalna działalność człowieka, tj. zarówno osoby badanej, jak i badacza (Vanhaudenhuyse i in. 2010). Eliminacja tego czynnika wpływa na poprawę rzetelności i trafności badań (np. badacz lub osoba badana może chcieć coś pokazać lub udowodnić podczas badań). Ze względu na to, że osoby badane nie muszą wykonywać żadnych zadań, a jedynie odpoczywać i obserwować swoją aktywność wewnętrzną, ich intencje i motywy nie wpływają na jakość uzyskiwanych rezultatów badawczych.

STAN ŚPIĄCZKI (*COMA STATE*)

Stan śpiączki stanowi przedłużoną w czasie utratę przytomności (Pąchalska 2007, s. 99–101). Związany jest najczęściej z urazem pnia mózgu, który sprawia, że układ nerwowy „wylacza się”, czekając na poprawę swoich funkcji. Przedłużanie się czasu trwania stanu nieprzytomności prowadzi do wielu niekorzystnych procesów neurodegeneracyjnych (apoptoza, objawy otępienne).

Czy pacjent w czasie śpiączki coś odczuwa? Tego dokładnie nie wiadomo. Pojawiają się jednak badania, które dają podstawę twierdzić, że również podczas tych stanów zachowane są pewne zdolności kognitywne. Okazuje się bowiem, że w stanie śpiączki zachowana jest aktywność sieci wzbudzeń podstawowych (głównie przedklinka [*precuneus*] oraz tylnej części zakrętu obręczy [*posterior cingulate cortex* – PCC]) (Cavanna 2007; Vincent i in. 2007; Boly i in. 2008; Buckner i in. 2008; Greicius i in. 2009). Aktywacja tej sieci wskazuje na to, że podczas stanu śpiączki występują nie tylko procesy błądzenia myśli (*mind wandering*) (Mason i in. 2007), ale też jakaś forma samoświadomości (Cavanna, Trimble 2006; Cavanna 2007).

Potwierdzeniem tej tezy są wyniki innych badań (Chennu i in. 2014), które ujawniają, że w śpiączce przeważa aktywacja fal alfa nad delta i theta oraz występuje podwyższona – w stosunku do stanu wegetatywnego i stanu minimalnej świadomości – koherencja fal delta i theta. Podwyższona koherencja fal delta i theta wskazywałaby wprawdzie na to, że w stanach śpiączki główną rolę od-

grywają procesy nieświadome, ale przewaga aktywacji fal alfa nad delta i theta dowodzi, że ich rola nie jest na tyle duża, aby przytłaczała procesy świadome (Chennu i in. 2014). O tym fakcie świadczy dodatkowo duże zróżnicowanie koherencji aktywacji fal delta i theta (Chennu i in. 2014).

W przypadku osób znajdujących się w śpiączce samoświadomość jest więc relatywnie niska. Jak dowodzą inni badacze (Vanhaudenhuyse i in. 2010), charakteryzuje się ona specyficznym stylem odczuwania i myślenia, przypominającym marzenia senne.

Występowanie takich słabych zdolności kognitywnych wskazuje na potrzebę bycia ostrożnym w wyciąganiu wniosków dotyczących jakości stanu świadomości pacjentów znajdujących się w stanie śpiączki. Jest to o tyle ważne, że w warunkach klinicznych istnieje poważne ryzyko niedoszacowania słabych funkcji kognitywnych (Vanhaudenhuyse i in. 2010). Wrażliwa obserwacja integralności tego systemu pozwala z jednej strony ocenić wielkość uszkodzeń (trafność diagnostyczna), a z drugiej trafnie przewidywać rokowania (trafność prognostyczna) oraz kontrolować postęp rehabilitacji (efektywność terapeutyczna).

Wydaje się, że w przypadku pacjentów znajdujących się w stanie śpiączki istnieje potrzeba stosowania wyrafinowanych strategii badawczych, ponieważ obserwacja samej aktywacji elektrycznej mózgu przy pomocy EEG, a nawet fMRI, okazuje się mało wartościowa. Wprawdzie wielkość samej amplitudy fal alfa (por. Fingelkurts i in. 2013) może być trafnym wskaźnikiem dobrego rokowania wychodzenia ze stanu śpiączki, lecz sama obserwacja aktywacji tych fal istotnie zubaża wgląd w funkcjonowanie osoby znajdującej się w stanie śpiączki (Vincent i in. 2007; Greicius i in. 2009; Chennu i in. 2014). Wydaje się, że dopiero ocena globalnej aktywacji sieci mózgowej może być bardziej relewantna (paradygmat sieci i grafów) (por. Cavanna 2007; Vincent i in. 2007; Boly i in. 2008; Buckner i in. 2008; Greicius i in. 2009; Chennu i in. 2014).

STAN WEGETATYWNY (*VEGETATIVE STATE*)

Stan wegetatywny jest definiowany jako brak świadomości własnej osoby i otoczenia. Zachowany jest rytm czuwania i snu, ale nawet w stanie czuwania taka osoba nie ma świadomości siebie i otoczenia. Występuje u niej wprawdzie możliwość samodzielnego wykonywania pewnych ruchów, jednak nie wydają się one być zaplanowane i celowe (spontaniczne otwieranie i zamykanie oczu, ruchy mimiczne oraz ruchy kończyn).

Jak się wydaje, stan wegetatywny – w porównaniu ze stanem śpiączki – o wiele łatwiej zdiagnozować, ponieważ w tym stanie obserwuje się występowanie spontanicznych oscylacji praktycznie w pełnym zakresie częstotliwości (głównie od 1 Hz do 30 Hz) (por. Fingelkurts i in. 2013). Istotnym wskaźnikiem różnicującym stan wegetatywny w stosunku do stanu śpiączki okazuje się być

również globalność występowania aktywacji neurofizjologicznej, która jest relatywnie większa niż w stanie śpiączki (Fingelkurts i in. 2013).

U pacjentów znajdujących się w stanie wegetatywnym (oraz w stanie minimalnej świadomości) obserwuje się ponadto duże różnice w zakresie dynamiki amplitudy oscylacji, zwłaszcza w tylnych częściach mózgu. Ponieważ tylne części mózgu odpowiadają za stan czuwania i zdolność przyjmowania tzw. pierwszej perspektywy, oznacza to, że osoby znajdujące się w stanie wegetatywnym mogą posiadać jakieś poczucie samoświadomości (Fingelkurts i in. 2013).

Pewną wątpliwość wzbudzają wyniki uzyskane podczas dwu badań (Fingelkurts i in. 2012, 2013), w których odkryto, że obserwowane w stanach wegetatywnych wysokie nasilenie fal delta i theta oraz niskich alfa jest relatywnie niższe niż w śpiączce (w stanach wegetatywnych dodatkowo występuje niskie nasilenie wysokich fal alfa). Oznaczałoby to, że stan wegetatywny charakteryzuje się niższym poziomem zdolności kognitywnych. Tymczasem zastosowanie wyrafinowanych strategii matematycznych (skorygowany ważony indeks opóźnienia fazy oraz topograficzny system metryczny zwany rozpiętością modularną) (por. Chennu i in. 2014) odnoszących się do obserwowanej aktywacji elektrycznej mózgu (EEG) prowadzi do odmiennego wniosku. Okazuje się, że w stanie wegetatywnym obserwowana słabsza aktywność fal alfa ujawnia się jedynie w wymiarze globalnym, natomiast jest ona wysoka zarówno w wymiarze lokalnym (koherencja), jak i dystalnym, tj. występuje w odległych od siebie obszarach mózgu (integracja). W stanie wegetatywnym ponadto obserwuje się dużą siłę powiązań pomiędzy poszczególnymi sieciowymi modułami (zróznicowanie). Taka charakterystyka oscylacji wskazuje na pewne podobieństwo aktywacji mózgu osoby znajdującej się w stanie wegetatywnym mózgu do struktury sieci „małych światów” (liczne silne powiązania bliskozakresowe oraz nieliczne, ale również silne, powiązania dalekozakresowe), co dowodzi relatywnie wysokiej sprawności systemu mózgowego (Chennu i in. 2014).

U pacjentów znajdujących się w stanie wegetatywnym obserwuje się też spontaniczne oscylacje w większości obszarów sieci wzbudzeń podstawowych (Vanhaudenhuyse i in. 2010), tj. tylnej części zakrętu obręczy (*posterior cingulate cortex* – PCC), przedlinku (*precuneus*), środkowej korze przedczołowej (*medial prefrontal cortex* – mPC), skrzyżowaniu skroniowo-ciemieniowym (*temporo-parietal junction* – TPJ), korze mózgowej okolic hipokampa (*parahippocampal cortex* – PHC), korze skroniowej (*temporal cortex* – TC), wzgórzu (*thalamus*) oraz pniu mózgu (*brain stem*). Zwiększona w stosunku do stanu śpiączki aktywność tych podsystemów sieci wzbudzeń podstawowych zdaje się dowodzić, że osoby znajdujące się w stanie wegetatywnym posiadają stosunkowo dobrą samoświadomość (Cavanna, Trimble 2006; Cavanna 2007; Mason i in. 2007).

Podsumowując, należy stwierdzić, że osoby znajdujące się w stanie wegetatywnym – w porównaniu do pacjentów będących w stanie śpiączki – charakteryzują się dobrymi zdolnościami kognitywnymi oraz posiadają w niektórych

aspektach relatywnie dobrą samoświadomość (czuwanie, uwaga, występowanie zaawansowanych funkcji kognitywnych, zdolność przyjmowania pierwszej perspektywy, świadomość wykonywania zadań). Neurologicznymi wskaźnikami poziomu świadomości tych osób są: wysoka aktywność większości podsystemów sieci wzbudzeń podstawowych (samoświadomość) (por. Cavanna, Trimble 2006; Cavanna 2007; Mason i in. 2007), duże różnice w zakresie dynamiki amplitudy oscylacji częstotliwości 1–30 Hz, zwłaszcza w tylnych częściach mózgu (świadome czuwanie, zdolność przyjmowania pierwszej perspektywy) (por. Fingelkurts i in. 2013), wysoka koherencja i integracja odległych obszarów mózgu oraz wysokie zróżnicowanie bliskich obszarów mózgu (procesy uwagi i świadomość związana z wykonywaniem zadań) (por. Chennu i in. 2014).

Rzetelnymi miernikami poziomu świadomości osób znajdujących się w stanie wegetatywnym zdają się być szczególnie stan aktywacji całego systemu mózgowego, mierzony wskaźnikami sieciowymi (skorygowany ważony indeks opóźnienia fazy oraz topograficzny system metryczny zwany rozpiętością modułarną) (por. Chennu i in. 2014), oraz wielkość zmian aktywacji podsystemów sieci wzbudzeń podstawowych (im wyższy poziom synchroniczności, tym wyższy poziom świadomości) (Cavanna, Trimble 2006; Cavanna 2007; Mason i in. 2007). Oznacza to, że w przypadku pacjentów znajdujących się w stanie wegetatywnym – podobnie jak wobec pacjentów będących w śpiączce – stosowanie samych tradycyjnych narzędzi i strategii badawczych może okazać się mało trafne, ponieważ – jak wykazano (Fingelkurts i in. 2012, 2013) – niektóre pomiary mogą wprowadzać w błąd (słaba trafność diagnostyczna i prognostyczna).

STAN MINIMALNEJ ŚWIADOMOŚCI (*MINIMALLY CONSCIOUS STATE*)

W stanach minimalnej świadomości występują okresy powrotu częściowej świadomości, umożliwiającej wykonywanie prostych poleceń, zrozumiałą artykulację oraz demonstrowanie celowych zachowań. Kontakt z otoczeniem dokonuje się w postaci pewnych prostych sygnałów, takich jak drobne ruchy lub gesty, zmiany wyrazu twarzy, dźwięki lub proste formy kontaktu słownego.

Wyniki niektórych badań (Fingelkurts i in. 2013) sugerują, że osoby znajdujące się w stanie minimalnej świadomości charakteryzuje istotnie wyższe – w stosunku do osób znajdujących się w stanie wegetatywnym – nasilenie szybkich fal alfa, a mniejsze wolnych fal alfa oraz delta i theta. Trzeba podkreślić, że taka konfiguracja aktywacji fal – w przeciwieństwie do stanu śpiączki i wegetatywnego – występuje w całym obszarze mózgu. Relatywnie dobrze zachowana aktywność szybkich sieci alfa u osób znajdujących się w stanie minimalnej świadomości świadczy o funkcjonowaniu wyższych funkcji kognitywnych, w których kluczową rolę zdaje się odgrywać zintensyfikowany odbiór rzeczywistości (dominacja wysokich fal alfa nad delta i theta).

Wyniki innych badań potwierdzają te wnioski i dowodzą, że liczba oscylacji szybkich fal alfa koreluje istotnie i pozytywnie z poziomem samoświadomości (Babiloni i in. 2006). Związana jest ona z przechodzeniem ze stanu wegetatywnego w stan minimalnej świadomości (Fingelkurts i in. 2012). Wielkość amplitudy fal alfa wskazuje na lepsze rokowania wychodzenia ze stanu śpiączki (Fingelkurts i in. 2013).

Wyniki badań z wykorzystaniem zaawansowanych strategii obliczeniowych (badania przy wykorzystaniu skorygowanego ważonego indeksu opóźnienia fazy oraz rozpiętości modularnej) (por. Chennu i in. 2014) dowodzą, że u osób znajdujących się w stanie minimalnej świadomości występuje wysokie nasilenie powiązań wewnątrz poszczególnych modułów sieciowych (zróżnicowanie), ale też lokalnych węzłów (koherencja) i odległych (integracja) (por. Chennu i in. 2014). Ponadto w stanach minimalnej świadomości procesy integracji dystalnej przeważają nad lokalnymi procesami różnicującymi (odwrotnie niż ma to miejsce w stanach wegetatywnych).

Sieciowa charakterystyka oscylacji wskazuje na wyraźne podobieństwo – zdecydowanie większe niż w przypadku stanów wegetatywnych – do struktury sieci „małych światów” (liczne silne powiązania bliskozakresowe oraz nieliczne, ale również silne, powiązania dalekozakresowe). Wskazuje to na fakt zdecydowanie lepszego funkcjonowania umysłu podczas stanów minimalnej świadomości niż w stanie wegetatywnym. Wykazana dominacja fal alfa nad delta i theta przy wyraźnie obniżonej aktywacji fal delta i theta oznacza, że w stanach minimalnej świadomości wgląd w procesy nieświadome jest zdecydowanie lepszy niż w stanach wegetatywnych.

Istotne różnice stanu minimalnej świadomości w stosunku do stanu wegetatywnego ujawniono również w sieci wzbudzeń podstawowych, ale w tym przypadku podczas wykonywania zadań (Crone i in. 2011). Wyniki tych badań pokazały, że u osób znajdujących się w stanie minimalnej świadomości podczas wykonywania zadań istotnie spada aktywacja sieci wzbudzeń podstawowych (nie występuje u osób znajdujących się w stanie śpiączki lub wegetatywnym). Spadek tej aktywacji świadczy o zdolności podmiotu do przerywania procesów introspekcyjnych, wolicjonalnym zaangażowaniu się w wykonywanie zadań oraz wysoko koreluje z behawioralnymi wskaźnikami świadomości (por. Crone i in. 2011).

Podsumowując, należy stwierdzić, że w stanie minimalnej świadomości występują nie tylko stany pogłębionej samoświadomości, ale również możliwy jest kontakt osoby znajdującej się w stanie minimalnej świadomości z otoczeniem oraz wykonywanie przez nią celowych zadań. Kluczowymi wskaźnikami poziomu świadomości tych osób oraz ich zdolności wchodzenia w relacje społeczne są: globalna wysoka aktywacja i dominacja fal alfa nad delta i theta (funkcjonowanie wyższych funkcji kognitywnych, w których kluczową rolę zdaje się odgrywać zintensyfikowany odbiór rzeczywistości) (por. Babiloni

i in. 2006; Fingelkurts i in. 2012, 2013), wysokie nasilenie powiązań lokalnych (koherencja), odległych (integracja) oraz wewnątrz poszczególnych modułów sieciowych (zróżnicowanie) (wysoka zdolność wglądu w procesy nieświadome) (por. Chennu i in. 2014), spadek aktywacji sieci wzbudzeń podstawowych podczas wykonywania zadań (wysoka samoświadomość, zdolność podmiotu do przerywania procesów introspekcyjnych, zdolność do wolicjonalnego zaangażowania się w wykonywanie zadań) (por. Crone i in. 2011). Sugeruje to, że w przypadku stanów minimalnej świadomości – jeszcze bardziej niż w przypadku stanów wegetatywnych – stosowanie samych tradycyjnych narzędzi i strategii badawczych jest mało trafne.

STAN MEDYTACYJNY (*MEDITATIVE STATE*)

Wiele wyników badań (Davidson 1976; Davidson i in. 2003; Lutz i in. 2004; Cahn, Polich 2006; Siegel 2007; VanRullen 2009, 2013; Almeida, Idiart, Lisman 2009; Munzert, Lorey, Zentgraf 2009; Miconi, VanRullen 2010; Slagter, Davidson, Lutz 2011; Berkovich-Ohana, Glicksohn, Goldstein 2012; Chakravarthia, VanRullen 2012; Xue i in. 2014) daje podstawy sądzić, że obok patologicznych i normalnych stanów świadomości istnieje specyficzny stan świadomości, tj. stan medytacyjny. O specyfice tego stanu zdają się świadczyć wyniki badań, które ujawniają, że procesy występujące podczas medytacji różnią się od wszelkich innych znanych form aktywności mentalnej, jak np. relaksacja, marzenia sennego, hipnoza, działania celowe, trening sportowy, symulacja komputerowa itd. (Siegel 2007; Slagter, Davidson, Lutz 2011). Są one relatywnie bardziej kompleksowe od innych, tzn. wielopoziomowe (pień mózgu – system limbiczny – kora nowa), zróżnicowane (odmienne aktywacje lokalne i dystalne) i zintegrowane (przewaga aktywacji dystalnych nad lokalnymi).

Specyfika stanów medytacyjnych ujawnia się też w strukturze rozprzestrzenienia się aktywności falowej (np. w jednym obszarze mózgu występuje dominacja fal alfa, w innym fal theta, a jeszcze w innym – gamma) (Siegel 2007; Slagter, Davidson, Lutz 2011). Niektóre wyniki badań (Davidson i in. 2003) wskazują bowiem na to, że podczas procesów medytacji następuje wyłączenie lewej półkuli (spadek częstotliwości fal alfa i theta) oraz aktywacja prawej, zwłaszcza w przednich częściach. Wygląda to tak, jakby lewa półkula przechodziła w stan pasywnej obserwacji tego, co się dzieje w prawej (nieświadomej) części mózgu.

Z przeprowadzonych badań nad osobami medytującymi wynika, że występuje u nich nie tylko odmienna charakterystyka aktywności neuronalnej, ale i ich dynamika (Lutz i in. 2004; Cahn, Polich 2006; Berkovich-Ohana, Glicksohn, Goldstein 2012). Najpierw w mózgu osoby medytującej (pień mózgu i prawa hemisfera) obserwuje się aktywację fal theta (pogłębiony dostęp do podświadomej

mości, stanów emocjonalnych albo treści marzeń sennych) (por. Bagchi, Wenger 1957, 1958). Następnie w korze przedczołowej (Davidson 1976) zaczynają dominować szybkie fale alfa, które zostają zastąpione przez jeszcze szybsze fale gamma (zwykle o częstotliwości 40 Hz). Przy czym należy podkreślić, że zmiany aktywacji fal dokonują się zasadniczo wolicjonalnie (podczas treningów doświadczeni adepci medytacji mogą zmieniać stany aktywacji fal).

Najbardziej specyficzna dla stanów medytacyjnych – jak się okazuje (Lutz i in. 2004) – jest dominacja najszybszych fal gamma (powyżej 32 Hz, zwłaszcza 40 Hz). Dominacja tych fal występuje podczas stanów maksymalnej czujności i koncentracji (obrazy mentalne przewijają się jeszcze szybciej niż klatki filmowe, tj. 24 Hz, które postrzegamy jak ruchomą scenę). Są wprawdzie dane wskazujące na to, że do łączenia różnych obrazów w jedno doświadczenie wystarcza szybkość na poziomie 8 Hz (poniżej 8 Hz człowiek staje się śpiący lub nieświadomy), jednak do doświadczania tzw. wyższych stanów świadomości (wola, koncentracja, przeżycia mistyczne, doświadczenie jedni, poczucie Ja) potrzebna jest zdecydowanie wyższa szybkość skanowania, tj. 40 Hz (Lutz i in. 2004). Przy czym równocześnie ewolucyjnie najstarsza część mózgu musi przenieść swoją aktywność z lewej półkuli do prawej oraz operować na niskich częstotliwościach (prawdopodobnie nawet poniżej 8 Hz).

Specyfika czwartego stanu świadomości – jak dowodzą wyniki wielu badań (Achard i in. 2012; Xue i in. 2014; Hauswald i in. 2015; Jao i in. 2016) – ujawnia się szczególnie w wymiarze sieciowym. Jak się okazuje, podczas stanów medytacyjnych dochodzi do bardzo intensywnej reorganizacji węzłów i ich powiązań (funkcjonalne połączenia). Reorganizacja ta polega na zaburzeniu struktury centralnych elementów sieciowych oraz częściowym jej odwróceniu: centralne elementy sieciowe stają się peryferyjnymi (pierwotna kora motoryczna, optyczna i słuchowa) i odwrotnie: peryferyjne stają się centralnymi (sieć uwagowa i sieć wzbudzeń podstawowych) (por. Xue i in. 2014; Jao i in. 2016). Obserwowane podczas stanów medytacyjnych istotne zmiany dotyczą też ilości, jakości, orientacji połączeń odległych podłużnych i poprzecznych oraz częstotliwości ich aktywacji (por. Xue i in. 2014; Hauswald i in. 2015; Jao i in. 2016). W stanach medytacyjnych dochodzi bowiem do nasilenia głównie procesów podłużnej integracji (reorganizacja poprzecznych powiązań w podłużne) oraz – nieco słabiej – hemisferycznej synchronizacji (wzrost połączeń poprzecznych, przewaga połączeń podłużnych nad poprzecznymi) (por. Jao i in. 2016). Wskazywałoby to na fakt, że warunkiem wystąpienia wyższych stanów świadomości jest występowanie specyficznego poziomu integracji odległych obszarów (zanizone poziomy cechują stany śpiączki, wegetatywne oraz minimalnej świadomości, a zawyżone pojawiają się m.in. w epilepsji, depresji, dysocjacyjnym zaburzeniu tożsamości, ostrej postaci schizofrenii, zaburzeniu schizoafektywnym i chorobie afektywnej dwubiegunowej) (por. Stam, Reijneveld 2007).

Co bardzo zaskakujące – jak sugerują niektóre wyniki badań (Achard i in. 2012; Jao i in. 2016) – w różnych stanach świadomości (relaksacja, stany wegetatywne, śpiączka, stany minimalnej świadomości) nie zmienia się globalna topologia sieciowa, która zasadniczo jest zachowana podczas stanów medytacyjnych. Dotyczy to takich cech, jak: właściwości „małych światów” (średnia arytmetyczna podczas stanu relaksacji = 3,1; średnia arytmetyczna podczas stanu medytacji = 3,0; $t(17)=0,38$; $p=0,71$); usieciowienie (średnia arytmetyczna podczas stanu relaksacji = 0,58; średnia arytmetyczna podczas stanu medytacji = 0,57; $t(17)=1,95$; $p=0,07$); maksymalna modularność (średnia arytmetyczna podczas stanu relaksacji = 0,50; średnia arytmetyczna podczas stanu medytacji = 0,49; $t(17)=0,72$; $p=0,48$); globalna efektywność (średnia arytmetyczna podczas stanu relaksacji = 0,32; średnia arytmetyczna podczas stanu medytacji = 0,33; $t(17)=1,57$; $p=0,14$); globalne zapotrzebowanie na energię (średnia arytmetyczna podczas stanu relaksacji = 56,1 mm; średnia arytmetyczna podczas stanu medytacji = 54,6 mm, $t(17)=1,94$; $p=0,07$) (Jao i in. 2016). Oznacza to, że umysł, znajdując się w najniższym stanie świadomości, posiada niektóre właściwości, które nie różnią go od stanu najwyższej świadomości.

Podsumowując, należy stwierdzić, że osiągnięcie stanu relatywnie najwyższego – w stosunku do znanych stanów świadomości – poziomu świadomości, jaki ujawnia się podczas stanów medytacyjnych, wymaga intensywnej reorganizacji sieciowej funkcjonowania mózgu. Dotyczy to szczególnie konieczności zaburzenia oraz częściowego odwrócenia aktywacji centralnych elementów sieciowych względem elementów peryferyjnych (por. Xue i in. 2014; Jao i in. 2016), a także istotnej zmiany ilości, jakości, orientacji połączeń odległych podłużnych i poprzecznych oraz częstotliwości ich aktywacji (por. Xue i in. 2014; Hauswald i in. 2015; Jao i in. 2016). Taka reorganizacja sieciowa mózgu umożliwia najlepsze wykorzystanie struktury „małych światów”: kompleksowość i szybkość przekazu informacji, wrażliwość na minimalne perturbacje, odporność na błędy i celowy atak oraz niskie zapotrzebowanie na energię (Stam, Reijneveld 2007; Fronczak, Fronczak 2009; Rubinov, Sporns 2010; Seth, Edelman 2010; Luccioli i in. 2014).

Wyniki badań dotyczące stanów medytacyjnych ujawniają szczególnie, że podczas oceny poziomu świadomości człowieka konieczne jest stosowanie wyrafinowanych narzędzi i strategii badawczych. Należy tu podkreślić, że nawet stosowanie takich wyrafinowanych technik nie gwarantuje sukcesu. Okazuje się bowiem, że niektóre właściwości sieciowe (globalna topologia sieciowa) są bardzo podobne we wszystkich znanych stanach świadomości (por. Achard i in. 2012; Xue i in. 2014; Hauswald i in. 2015; Jao i in. 2016), potrzeba więc stosować odpowiednio dobrane strategie, gdyż bez tego trafność diagnostyczna i prognostyczna stoi pod dużym znakiem zapytania.

ZAKOŃCZENIE

Generalny wniosek, jaki można wysnuć na podstawie zaprezentowanych wyników badań, to teza, że stany świadomości różnią się istotnie między sobą pod wieloma względami:

- stan śpiączki charakteryzuje relatywnie niska świadomość (specyficzny styl odczuwania i myślenia przypominający marzenia senne) (por. Vanhaudenhuyse i in. 2010), o którym świadczy podwyższona aktywacja dwóch obszarów sieci wzbudzeń podstawowych, tj. przedklinka i tylnej części zakrętu obręczy (por. Vincent i in. 2007; Greicius i in. 2009), oraz ograniczona zdolność do wglądu w procesy nieświadome, której dowodzi dominacja aktywacji fal alfa nad delta i theta oraz duże zróżnicowanie koherencji fal delta i theta (por. Chennu i in. 2014),
- stan wegetatywny charakteryzuje się relatywnie dobrym poziomem świadomości w trzech aspektach: czuwanie i zdolność przyjmowania pierwszej perspektywy (duża dynamika zmian amplitudy oscylacji częstotliwości 1–30 Hz, zwłaszcza w tylnych częściach mózgu) (por. Fingelkurts i in. 2013) oraz samoświadomość (zwiększona aktywność sieci wzbudzeń podstawowych) (por. Cavanna, Trimble 2006; Cavanna 2007; Mason i in. 2007), co jest związane z relatywnie dobrą sprawnością systemu mózgowego (podobieństwo do sieci „małych światów”) (por. Chennu i in. 2014),
- w stanie minimalnej świadomości występuje wysoka sprawność systemu mózgowego (sieć „małych światów”) (por. Chennu i in. 2014), która umożliwia podmiotowi uruchamianie wyższych funkcji kognitywnych (globalna wysoka aktywacja fal alfa i ich dominacja nad delta i theta) (por. Babiloni i in. 2006; Fingelkurts i in. 2012, 2013) oraz podejmowanie przez niego celowych działań (podwyższona aktywacja sieci wzbudzeń podstawowych oraz pojawianie się jej spadków podczas wykonywania zadań) (por. Crone i in. 2011),
- stan medytacyjny to stan najwyższej świadomości, w którym system mózgowy charakteryzuje się wyrafinowanymi właściwościami sieciowymi (reorganizacja centralnych elementów sieciowych względem peryferyjnych, istotne zmiany w zakresie jakości i orientacji odległych połączeń podłużnych i poprzecznych oraz częstotliwości ich aktywacji, wzrost podłużnej integracji i hemisferycznej synchronizacji), umożliwiającymi optymalne wykorzystanie właściwości sieci „małych światów”: kompleksowość i szybkość przekazu informacji, wrażliwość na minimalne perturbacje, odporność na błędy i celowy atak oraz niskie zapotrzebowanie na energię (Stam, Reijneveld 2007; Fronczak, Fronczak 2009; Rubinov, Sporns 2010; Seth, Edelman 2010; Luccioli i in. 2014).

Patrząc syntetycznie na wyniki referowanych badań, należy zauważyć, że o poziomie świadomości decyduje optymalność funkcjonowania systemu mózgowego (sieć „małych światów”), która zależy głównie od dynamiki procesów różnicowania (maksymalne różnicowanie obszarów lokalnych) i integracji (dążenie do włączenia maksymalnie zindywidualizowanych stanów w spójny system) (Siegel 2007, 2010). Dynamika procesów różnicowania i integracji wpływa na poziom kompleksowości propagacji informacji (VanRullen 2009, 2013; Almeida, Idiart, Lisman 2009; Miconi, VanRullen 2010; Chakravarthia, VanRullen 2012; King i in. 2013), na którą składają się takie czynniki, jak: szybkość przekazu informacji, wrażliwość na minimalne perturbacje, wzrost odporności na błędy i celowe ataki oraz spadek zapotrzebowania na energię (Stam, Reijneveld 2007; Fronczak, Fronczak 2009; Rubinov, Sporns 2010; Seth, Edelman 2010; Luccioli i in. 2014). Kompleksowość propagacji informacji jest najsłabsza podczas śpiączki (minimalne oznaki funkcjonowania sieci „małych światów”, ograniczone tylko do aktywacji fal delta i theta), nieco lepsza jest w stanach wegetatywnych (dotyczą aktywacji prawie całego zakresu fal 1–30 Hz), jeszcze lepsza jest w stanie minimalnej świadomości (przewaga procesów integracji dystalnej nad lokalnymi procesami różnicującymi), a najlepsza jest w stanie medytacyjnym (specyficzna typologia oraz dynamika procesów integracji i różnicowania).

Wyniki wielu badań dowodzą ponadto, że większe odchylenia od optymalności procesów integracji i różnicowania wiążą się z poważnymi zaburzeniami fizjologicznymi, genetycznymi lub psychicznymi. Odchylenia te polegają z jednej strony na spadku nasilenia procesów dyferencjacji i integracji (por. Siegel 2007, 2010), a z drugiej na hipersynchronizacji (zbyt duża liczba powiązań pomiędzy parami węzłów) (por. Stam, Reijneveld 2007). Spadek nasilenia procesów dyferencjacji i integracji obserwuje się w przypadku stanów śpiączki fizjologicznej lub farmakologicznej, stanów wegetatywnych oraz minimalnej świadomości (Crone i in. 2011; Fingelkurts i in. 2013; King i in. 2013; Chennu i in. 2014), których kluczowym mechanizmem jest osłabiona globalność przekazu informacji (Siegel 2007, 2010). Hipersynchronizacja zaś występuje m.in. w przypadku depresji (por. Zeng i in. 2012; Bohr i in. 2013), epilepsji (Bartolomei i in. 2013), choroby Alzheimera (Stam i in. 2009), schizofrenii (Liu i in. 2008) i wylewów do mózgu (Bartolomei i in. 2006).

Wygląda na to, że korelaty świadomości generowane są dopiero wtedy (por. Almeida, Idiart, Lisman 2009; Munzert, Lorey, Zentgraf 2009; Miconi, VanRullen 2010; Slagter, Davidson, Lutz 2011), gdy w wielu odległych obszarach mózgu następuje optymalny (tj. szybki oraz mało podatny na błędy i celowe ataki) przepływ energii elektrycznej i chemicznej oraz związanej z nimi informacji (Stam, Reijneveld 2007; Fronczak, Fronczak 2009; Rubinov, Sporns 2010; Seth, Edelman 2010; Luccioli i in. 2014). Osiągnięcie wysokiego stopnia świadomości wymaga istotnej reorganizacji sieciowej mózgu (globalna topologia zasadniczo się nie

zmienia): zaburzenie (a nawet odwrócenie) struktury centralnych i peryferyjnych elementów sieciowych (Xue i in. 2014; Jao i in. 2016), zmiana ilości, jakości, orientacji połączeń odległych podłużnych i poprzecznych oraz częstotliwości ich aktywacji (Xue i in. 2014; Hauswald i in. 2015; Jao i in. 2016), wzrost nasilenia podłużnej integracji oraz hemisferycznej synchronizacji (por. Jao i in. 2016).

Jak się okazuje, ważnym elementem decydującym o poziomie świadomości jest stan aktywacji sieci wzbudzeń podstawowych (Shulman i in. 1997; Greicius i in. 2003; Greicius, Menon 2004; Raichle, Mintun 2006; Fox, Raichle 2007; Raichle 2010; Crone i in. 2011). Poziom jej aktywacji jest minimalny w śpiączce (podwyższona aktywacja tylko dwóch obszarów tej sieci) oraz relatywnie wyższy w stanie wegetatywnym (podwyższona aktywacja większości obszarów tej sieci). Począwszy od stanu minimalnej świadomości, charakterystyka jego aktywacji osiąga odpowiedni poziom, który umożliwia podmiotowi wykonywanie celowych działań (terminalne wyłączanie podczas wykonywania zadań) (Shulman i in. 1997; Greicius, Menon 2004), aż w stanie medytacyjnym nabiera charakteru cechy (wykonywanie zadań nie wymaga wyłączania aktywacji sieci wzbudzeń podstawowych, ponieważ jest ona stabilnie obniżona) (Crone i in. 2011).

Występujące w różnych stanach świadomości zmiany w aktywacji sieci wzbudzeń podstawowych wyrażają się również zmianami poziomu metabolizmu korykalnego. Jak się okazuje, w najniższych stanach świadomości jest on o 40–50% niższy (Schiff i in. 2002) od tego występującego w wysokich stanach (Raichle, Mintun 2006; Fox, Raichle 2007; Raichle 2010). W niższych stanach świadomości bowiem nie ma potrzeby takiego wydatkowania energetycznego, aby utrzymać funkcjonowanie i aktywność neuronów.

Kolejnym istotnym mechanizmem decydującym o poziomie świadomości jest zdolność do wglądu i kontroli nad procesami podświadomymi, która wyraża się przewagą aktywacji fal alfa nad delta i theta (Davidson 1976, 2010; Cahn, Polich 2006; Lutz i in. 2004; Slagter i in. 2009; Slagter, Davidson, Lutz 2011; Berkovich-Ohana, Glicksohn, Goldstein 2012). Dominacja ta stanowi neurologiczny wskaźnik przewagi procesów przetwarzania dowolnego (*top-down*) nad mimowolnym (*bottom-up*). Przewaga aktywacji fal alfa nad delta i theta wzrasta wraz z poziomem świadomości: w śpiączce – brak podwyższonej aktywacji fal alfa, w stanie wegetatywnym – wysokie nasilenie niskich fal alfa (równocześnie wysokie nasilenie fal delta i theta) oraz niskie nasilenie wysokich fal alfa, w stanie minimalnej świadomości – wysokie nasilenie szybkich fal alfa, a mniejsze wolnych fal alfa (równocześnie niskie nasilenie fal delta i theta w całym obszarze mózgu), a w stanie medytacyjnym – wysoka aktywacja najszybszych fal gamma (najszybsza z możliwych propagacja informacji) oraz dominacja fal alfa, ograniczona tylko do przednich części mózgu.

Na koniec należy dodać, że pomimo znaczącego rozwoju neurologii, osoby z poważnymi zaburzeniami świadomości stanowią ogromny kliniczny problem

w sensie diagnostycznym, prognostycznym i terapeutycznym. Wyniki zaprezentowanych badań ujawniają, że postęp w zakresie doskonalenia narzędzi służących do pomiaru aktywności neurofizjologicznej mózgu (poprawa rozdzielczości skanowania i szybkości), wspierany nowymi strategiami obliczeniowymi (Crone i in. 2011; Fingelkurts i in. 2013; King i in. 2013; Chennu i in. 2014), umożliwia coraz bardziej precyzyjną diagnozę różnych stanów „nieświadomości”. Może też poprawiać trafność diagnostyczną w takich newralgicznych sytuacjach, jak podejmowanie decyzji dotyczących pobrania organów albo decyzji dotyczącej zakończenia sztucznego podtrzymywania życia (Fingelkurts i in. 2013). Opieranie się w diagnostyce głównie o kliniczne obserwacje subiektywnie interpretowanych odpowiedzi behawioralnych może okazać się bowiem mylne (wskaźnik błędnych diagnoz od 15 lat utrzymuje się na podobnym poziomie) (por. Schnakers i in. 2009), ponieważ świadome doświadczenia pojawiają się często pomimo braku behawioralnych znaków (Fingelkurts i in. 2013).

Pomimo występowania ogromnych różnic między różnymi stanami świadomości okazuje się, że pod pewnymi względami stany świadomości (relaksacja, śpiączka, stan wegetatywny, stan minimalnej świadomości, stan uważności) wcale nie różnią się od siebie. Podobna jest w tych stanach globalna typologia (struktura „małych światów”, usieciowienie, maksymalna modularność, globalna efektywność, globalne zapotrzebowanie na energię) (Achard i in. 2012; Jao i in. 2016). Występowanie typologicznego podobieństwa pomiędzy różnymi stanami świadomości sugeruje potrzebę ostrożności w wyciąganiu wniosków. Okazuje się, że zastosowanie aktualnie najlepszych narzędzi i strategii może być niewystarczające, tj. równoczesne stosowanie EEG (wysoka dokładność czasowa) i fMRI (wysoka dokładność przestrzenna) oraz opracowanie uzyskanych danych neurologicznych w paradygmacie sieci i grafów (ważony symboliczny dwustronny przekaz informacji, skorygowany ważony indeks opóźnienia fazy, topograficzny system metryczny zwany rozpiętością modularną) (Crone i in. 2011; Fingelkurts i in. 2013; King i in. 2013; Chennu i in. 2014).

Występowanie typologicznego podobieństwa pomiędzy różnymi stanami świadomości sugeruje, że znajdując się nawet w najniższym stanie świadomości, system mózgowy posiada takie potencjały rozwojowe, które mogą mu pozwolić uzyskać stan najwyższej świadomości. Pojawiają się pytania: jak to zrobić? jak te potencjały wykorzystać? jakie techniki rehabilitacyjne byłyby najbardziej trafne? jakie narzędzia byłyby do tego potrzebne?

Ponieważ stosowanie zaawansowanych technik i strategii jest bardzo kosztowne – poza tym w Polsce jest rzadko dostępne ze względu na brak odpowiednich urządzeń – rodzi się postulat opracowania mniej kosztownych technik pomiaru, opartych o mniej wyrafinowane urządzenia. Zaprezentowane analizy dają podstawę twierdzić, że jest to możliwe, ponieważ znane są obszary krytyczne dla pomiaru stanu świadomości. Dlatego można istotnie ograniczyć zakres obserwowanych czyn-

ników. Opracowanie i praktyczne wykorzystanie takich uproszczonych urządzeń w istotnym stopniu wspomogłoby diagnozę i terapię osób znajdujących się w zaburzonych stanach świadomości. Pozwoliłoby to w sposób efektywny sprawdzać skutki oddziaływania różnych metod (np. „nieprofesjonalnych”, jak czytanie poezji, śpiewanie, słuchanie muzyki itd.) oraz kontrolować przebieg terapii dzięki obserwacji *in vivo* zmian w aktywacji mózgu. Zastosowanie takich narzędzi umożliwi kontrolowanie – a być może w przyszłości również podtrzymywanie – optymalnego funkcjonowania szczególnie pacjentów znajdujących się w stanie śpiączki oraz oczekujących na poprawę funkcjonowania swojego systemu nerwowego.

Na koniec trzeba dodać, że istotnym ograniczeniem przeprowadzonych analiz jest fakt, że są one oparte o wyniki badań, w których wyrafinowane techniki i strategie stosowano jedynie w odniesieniu do stanów medytacyjnych. Nie robiono tego w stosunku do osób znajdujących się w śpiączce, w stanie wegetatywnym oraz minimalnej świadomości. Należy więc postulować konieczność prowadzenia dalszych badań nad tymi stanami, z wykorzystaniem zaawansowanych technologii i strategii badawczych, w stosunku do pacjentów w śpiączce, w stanie wegetatywnym oraz minimalnej świadomości.

BIBLIOGRAFIA

- Achard S., Delon-Martin C., Vértes P.E., Renard F., Schenck M., Schneider F., Heinrich C., Kremer S., Bullmore E.T. (2012), *Hubs of brain functional networks are radically reorganized in comatose patients*, "Proceedings of the National Academy of Sciences", Vol. 109(50).
- Almeida L. de, Idiart M., Lisman J.E. (2009), *A second function of gamma frequency oscillations: An E%-max winner-take-all mechanism selects which cells fire*, "Journal of Neuroscience", Vol. 29(23), DOI: <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.6044-08.2009>.
- Babiloni C., Vecchio F., Miriello M., Romani G.L., Rossini P.M. (2006), *Visuo-spatial consciousness and parieto-occipital areas: A high-resolution EEG study*, "Cerebral Cortex", No. 16.
- Bagchi B.K., Wenger M.A. (1957), *Electrophysiological correlates of some yogi exercises*, "Electroencephalography and Clinical Neurophysiology", No. 7.
- Bagchi B.K., Wenger M.A. (1958), *Simultaneous EEG and other recordings during some yogic practices*, "Electroencephalography and Clinical Neurophysiology", No. 10.
- Bartolomei F., Bettus G., Stam C.J., Guye M. (2013), *Interictal network properties in mesial temporal lobe epilepsy: A graph theoretical study from intracerebral recordings*, "Clinical Neurophysiology", No. 124.
- Bartolomei F., Bosma I., Klein M., Baayen J.C., Reijneveld J.C., Postma T.J., Heimans J.J., Dijk B.W. van, Munck J.C. de, Jongh A. de, Cover K.S., Stam C.J. (2006), *Disturbed functional connectivity in brain tumour patients: evaluation by graph analysis of synchronization matrices*, "Clinical Neurophysiology", No. 117.
- Berkovich-Ohana A., Glicksohn J., Goldstein A. (2012), *Mindfulness-induced changes in gamma band activity – implications for the default mode network, self-reference and attention*, "Clinical Neurophysiology", No. 123.
- Bohr I.J., Kenny E., Blamire A., O'Brien J.T., Thomas A.J., Richardson J., Kaiser M. (2013), *Resting-state functional connectivity in late-life depression: Higher global connectivity and more long distance connections*, "Frontiers in Psychiatry", Vol. 3(116), DOI: <https://doi.org/10.3389/fpsyt.2012.00116>.

- Boly M., Phillips C., Tshibanda L., Vanhaudenhuyse A., Schabus M., Dang-Vu T.T., Moonen G., Hustinx R., Maquet P., Laureys S. (2008), *Intrinsic brain activity in altered states of consciousness: How conscious is the default mode of brain function?*, "Annals of the New York Academy of Sciences", No. 1129, DOI: <https://doi.org/10.1196/annals.1417.015>.
- Buckner R.L., Andrews-Hanna J.R., Schacter D.L. (2008), *The brain's default network: Anatomy, function, and relevance to disease*, "Annals of the New York Academy of Sciences", No. 1124, DOI: <https://doi.org/10.1196/annals.1440.011>.
- Cahn B.R., Polich J. (2006), *Meditation states and traits: EEG, ERP, and neuroimaging*, "Psychological Bulletin", Vol. 132(2), DOI: <https://doi.org/10.1037/0033-2909.132.2.180>.
- Cavanna A.E. (2007), *The precuneus and consciousness*, "CNS Spectrums", No. 12.
- Cavanna A.E., Trimble M.R. (2006), *The precuneus: A review of its functional anatomy and behavioural correlates*, "Brain", Vol. 129(3), DOI: <https://doi.org/10.1093/brain/awl004>.
- Chakravarthi R., VanRullen R. (2012), *Conscious updating is a rhythmic process*, "Proceedings of the National Academy of Sciences", Vol. 109(26), DOI: <https://doi.org/10.1073/pnas.1121622109>.
- Chennu S., Finoia P., Kamau E., Allanson J., Williams G.B., Monti M.M., Noreika V., Arnatkeviciute A. (2014), *Spectral Signatures of Reorganized Brain Networks in Disorders of Consciousness*, "PloSOne", Vol. 10(10).
- Crone J., Ladurner G., Höller Y., Golaszewski S., Trinka E., Kronbichler M. (2011), *Deactivation of the default mode network as a marker of impaired consciousness: An fMRI study*, "PloSOne", Vol. 6(10), DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0026373>.
- Davidson R.J. (1976), *The physiology of meditation and other states of consciousness*, "Perspectives in Biology and Medicine", No. 19.
- Davidson R.J. (2010), *Empirical Explorations of Mindfulness: Conceptual and Methodological Conundrums*, "Emotions", Vol. 10(1).
- Davidson R.J., Kabat-Zinn J., Schumacher J., Rosenkranz M., Muller D., Santorelli S.F. (2003), *Alterations in brain and immune function produced by mindfulness meditation*, "Psychosomatic Medicine", No. 65.
- Dehaene S. (2014), *Consciousness and the brain: Deciphering how the brain codes our thoughts*, New York: Penguin Publishing Group.
- Fingelkurts A.A., Fingelkurts A.A., Bagnato S., Boccagni C., Galardi G. (2012), *EEG oscillatory states as neurophenomenology of consciousness as revealed from patients in vegetative and minimally conscious states*, "Conscience and Cognition", No. 21.
- Fingelkurts A.A., Fingelkurts A.A., Bagnato S., Boccagni C., Galardi G. (2013), *The value of spontaneous EEG oscillations in distinguishing patients in vegetative and minimally conscious states*, "Supplements to Clinical Neurophysiology", No. 62.
- Fox M.D., Raichle M.E. (2007), *Spontaneous fluctuations in brain activity observed with functional magnetic resonance imaging*, "Nature Reviews Neuroscience", No. 8.
- Fronczak A., Fronczak P. (2009), *Świat sieci złożonych: Od fizyki do Internetu*, Warszawa: Wydawnictwo naukowe PWN.
- Greicius M.D., Krasnow B., Reiss A.L., Menon V. (2003), *Functional connectivity in the resting brain: A network analysis of the default mode hypothesis*, "Proceedings of the National Academy of Sciences USA", No. 100, DOI: <https://doi.org/10.1073/pnas.0135058100>.
- Greicius M.D., Menon V. (2004), *Default-mode activity during a passive sensory task: Uncoupled from deactivation but impacting activation*, "Journal of Cognitive Neuroscience", No. 16.
- Greicius M.D., Supekar K., Menon V., Dougherty R.F. (2009), *Resting-state functional connectivity reflects structural connectivity in the default mode network*, "Cerebral Cortex", No. 19.
- Hauswald A., Übelacker T., Leske S., Weisz N. (2015), *What it means to be Zen: Marked modulations of local and interareal 2 synchronization during open monitoring meditation*, "NeuroImage", No. 108, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2014.12.065>.

- Jao T., Li C.W., Vértes P.E., Wu C.W., Achard S., Hsieh C.H., Liou C.H., Chen J.H., Bullmore E.T. (2016), *Large-scale functional brain network reorganization during Taoist meditation*, "Brain Connectivity", Vol. 6(1), DOI: <https://doi.org/10.1089/brain.2014.0318>.
- King J.R., Sitt J.D., Faugeras F., Rohaut B., El Karoui I., Cohen L., Naccache L., Dehaene S. (2013), *Information sharing in the brain indexes consciousness in noncommunicative patients*, "Current Biology", Vol. 23(19), DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cub.2013.07.075>.
- Koubeissi M.Z., Bartolomei F., Beltagy A., Picard F. (2014), *Electrical stimulation of a small brain area reversibly disrupts consciousness*, "Epilepsy and Behavior", No. 37.
- Laureys S., Owen A.M., Schiff N.D. (2004), *Brain function in coma, vegetative state, and related disorders*, "Lancet Neurology", Vol. 3(9), DOI: [https://doi.org/10.1016/S1474-4422\(04\)00852-X](https://doi.org/10.1016/S1474-4422(04)00852-X).
- Liu Y., Liang M., Zhou Y., He Y., Hao Y. (2008), *Disrupted small-world networks in schizophrenia*, "Brain", No. 131.
- Luccioli S., Ben-Jacob E., Barzilai A., Bonifazi P., Torcini A. (2014), *Clique of functional hubs orchestrates population bursts in developmentally regulated neural networks*, "PLoS Computational Biology", Vol. 10(9), DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pcbi.1003823>.
- Lutz A., Greischer L.L., Rawlings N.B., Ricard M., Davidson R.J. (2004), *Long-term meditators self-induce high amplitude gamma synchrony during mental practice*, "Proceedings of the National Academy of Science", No. 101, DOI: <https://doi.org/10.1073/pnas.0407401101>.
- Mason M.F., Norton M.I., Van Horn J.D., Wegner D.M., Grafton S.T., Macrae C.N. (2007), *Wandering minds: The default network and stimulus-independent thought*, "Science", No. 315, DOI: <https://doi.org/10.1126/science.1131295>.
- Miconi T., VanRullen R. (2010), *The gamma slideshow: Object-based perceptual cycles in a model of the visual cortex*, "Frontiers in Human Neuroscience", Vol. 4(205), DOI: <https://doi.org/10.3389/fnhum.2010.00205>.
- Munzert J., Lorey B., Zentgraf K. (2009), *Cognitive motor processes: The role of motor imagery in the study of motor representations*, "Brain Resources Review", No. 60.
- Pąchalska M. (2007), *Neuropsychologia kliniczna. Urazy mózgu*, Warszawa: PWN.
- Pąchalska M., Kaczmarek B., Kropotov J.D. (2014), *Neuropsychologia kliniczna: od teorii do praktyki*, Warszawa: PWN.
- Pąchalska M., Kaczmarek B., Kropotov J.D. (2018), *Neuropsychologia tożsamości: Ja utracone i odzyskane*, Warszawa: Wydawnictwo Naukowe PWN.
- Raichle M.E. (2010), *Ciemna strona mózgu*, „Świat Nauki”, nr 4(224).
- Raichle M.E., Mintun M.A. (2006), *Brain work and brain imaging*, "Annual Review of Neuroscience", No. 29.
- Rubinov M., Sporns O. (2010), *Complex network measures of brain connectivity: Uses and interpretations*, "NeuroImage", No. 52.
- Schiff N.D., Ribary U., Moreno D.R., Beattie B., Kronberg E. (2002), *Residual cerebral activity and behavioural fragments can remain in the persistently vegetative brain*, "Brain", No. 125, DOI: <https://doi.org/10.1093/brain/awf131>.
- Schnakers C., Vanhaudenhuyse A., Giacino J., Ventura M., Boly M., Majerus S., Moonen G., Laureys S. (2009), *Diagnostic accuracy of the vegetative and minimally conscious state: Clinical consensus versus standardized neurobehavioral assessment*, "BMC Neurology", No. 9.
- Seth A.K., Edelman G.M. (2010), *Consciousness and complexity*, [w:] B. Meyer (ed.), *Encyclopedia of Complexity and Systems Science*, Vol. 2, Berlin: Springer-Verlag.
- Shulman G.L., Fiez J.A., Corbetta M., Buckner R.L., Miezin F.M. (1997), *Common blood flow changes across visual tasks: II. Decreases in cerebral cortex*, "Journal of Cognitive Neuroscience", No. 9.
- Siegel D.J. (2007), *The Mindful Brain: Reflection and Attunement in the Cultivation of Wellbeing*, New York: Norton.
- Siegel D.J. (2010), *Mindsight: The new science of personal transformation*, New York: Bantam.

- Slagter H.A., Davidson R.J., Lutz A. (2011), *Mental training as a tool in the neuroscientific study of brain and cognitive plasticity*, "Frontiers in Human Neuroscience", Vol. 5(17), DOI: <https://doi.org/10.3389/fnhum.2011.00017>.
- Slagter H.A., Lutz A., Greischar L.L., Nieuwenhuis S., Davidson R.J. (2009), *Theta phase synchrony and conscious target perception: Impact of intensive mental training*, "Journal of Cognitive Neuroscience", Vol. 21(8), DOI: <https://doi.org/10.1162/jocn.2009.21125>.
- Stam C.J. (2006), *Nonlinear Brain Dynamics*, New York: Nova Science Publishers.
- Stam C.J., Haan W. de, Daffertshofer A., Jones B.F., Manshanden I. (2009), *Graph theoretical analysis of magnetoencephalographic functional connectivity in Alzheimer's disease*, "Brain", No. 132.
- Stam C.J., Reijneveld J.C. (2007), *Graph theoretical analysis of complex networks in the brain*, "Nonlinear Biomedical Physics", Vol. 1:3, DOI: <https://doi.org/10.1186/1753-4631-1-3>.
- Tarapata Z. (2012), *Czy sieci rządzą światem? Od Eulera do Barabasięgo*, „Biuletyn Instytutu Systemów Informatycznych”, nr 10.
- Vanhaudenhuyse A., Noirhomme Q., Tshibanda L.J., Bruno M.A., Boveroux P. (2010), *Default network connectivity reflects the level of consciousness in non-communicative brain-damaged patients*, "Brain", No. 133, DOI: <https://doi.org/10.1093/brain/awp313>.
- VanRullen R. (2009), *Binding hardwired vs. on-demand feature conjunctions*, "Visual Cognition", Vol. 17(1–2).
- VanRullen R. (2013), *Visual attention: a rhythmic process?*, "Current Biology", Vol. 23(24), DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cub.2013.11.006>.
- Vincent J.L., Patel G.H., Fox M.D., Snyder A.Z., Baker J.T., Van Essen D.C. (2007), *Intrinsic functional architecture in the anaesthetized monkey brain*, "Nature", No. 447.
- Xue S., Tang Y.Y., Tang R., Posner M.I. (2014), *Short-term meditation induces changes in brain resting EEG theta networks*, "Brain and Cognition", No. 87.
- Zeng L.L., Shen H., Liu L., Wang L., Li B., Fang P., Zhou Z., Li Y., Hu D. (2012), *Identifying major depression using whole-brain functional connectivity: A multivariate pattern analysis*, "Brain", No. 135, DOI: <https://doi.org/10.1093/brain/aws059>.

SUMMARY

The human brain can be modelled as a complex network, and may have a small-world structure both at the level of anatomical as well as functional connectivity (optimal organization of different brain network associated with rapid information propagation, minimal wiring costs, as well as a balance between local processing and global integration) in which activity of Default Mode Network play important role in different states of consciousness. The small-world structure deviation reflects genuine changes in levels of consciousness: 1) coma state: increased activity of precuneus and posterior cingulate cortex and domination alpha band over theta and delta band connected with low activity of alpha, theta, and delta band, 2) vegetative state: increased connectivity in Default Mode Network and increased power in delta, theta, beta, and low alpha band, 3) state of minimal consciousness: decreased activation of the Default Mode Network during tasks, domination alpha band over theta and delta band connected with high activity of alpha, theta, and delta band, 4) meditation state: reorganization of central and peripheral elements of the brain network, changes in quantity, quality, orientation of longitudinal (antero-posterior) and transverse (right-left) edges, and its frequency of activity, increased longitudinal integration and hemispherical synchronization. Future neuroimaging investigations are needed. Especially the new sophisticated spectral metrics could be potentially effective in clinical setting and have diagnostic, therapeutic and prognostic relevance.

Keywords: consciousness; coma state; vegetative state; state of minimal consciousness; mindfulness state; Default Network Mode, small-world structure