

Rafal Praszczyk, Elżbieta Gajos

Mózg — największa tajemnica ludzkiego ciała

„Żądza wiedzy, wspólna wszystkim ludziom jest chorobą, której nie można uleczyć, ponieważ ciekawość wzrasta wraz z wiedzą”

René Descartes

Zarys historii badań nad mózgiem

Wewnątrz naszych głów znajduje się struktura odpowiedzialna za nasze zachowanie i w niewiadomy dla nas sposób sprawia, że jesteśmy świadomi otaczającego nas świata.

W dużym stopniu do rozwoju badań nad procesami zachodzącymi wewnątrz mózgu przyczynili się: rosyjski uczoney Iwan Piotrowicz Pawłow, włoski lekarz Camillo Golgi, hiszpański lekarz i histolog Santiago Ramón y Cajal, Sir Charles Scott Sherrington, Edgar Douglas Adrian, polski uczoney Jerzy Konorski oraz Donald Hebb. Wymienieni to tylko niewielka część dużej grupy uczonych, których prace przyczyniły się do ugruntowania neuronowej teorii układu nerwowego oraz do zbudowania zrębów teorii wyższych czynności nerwowych.

Iwan Piotrowicz Pawłow stworzył podstawy teorii odruchów oraz wyższych czynności nerwowych. Podał także ogólną koncepcję funkcjonowania mózgu. Camillo Golgi oraz Santiago Ramon y Cajal stworzyli neuronową koncepcję budowy układu nerwowego (nagroda Nobla 1906 r.). Charles Scott Sherrington i Edgar Douglas Adrian opracowali modele funkcji neuronów oraz czynności kory mózgowej (nagroda Nobla 1932 r.). Jerzy Konorski sformułował własną koncepcję procesów pamięciowych i działania mózgu, która miała stanowić pomost pomiędzy odmiennymi podejściami Pawłowa i Sherringtona. Donald Hebb sformułował koncepcję leżącą u podstaw procesów zapamiętywania i uczenia. Były one bliskie podejściu Konorskiego. Prace Hebba wywarły wpływ na dziedzinę znaną jako sztuczne sieci neuronowe [1,2].

Ogólna struktura mózgu

Ludzki mózg jest najbardziej złożonym obiektem we Wszechświecie. Waży około 1100 – 1400 gramów, zawiera on trylion komórek, a 100 miliardów spośród nich stanowią

neurony połączone w sieci, dzięki którym powstają emocje, świadomość, inteligencja, pamięć i zdolności twórcze. Mózg powstaje w rozwoju embrionalnym z trzech czołowych wzgórków cewki nerwowej. Różnicują się one w podmózgowie, tyłomózgowie i śródmózgowie.

Ważnym elementem mózgu są cztery komory. Komora czwarta znajduje się w okolicy rdzenia przedłużonego łączącego mózg z rdzeniem kręgowym. Jest rozszerzeniem kanału centralnego biegnącego w mózgu. Komora trzecia leży w przedniej części śródmózgowia. Jej dno to tzw. podwzgórze. Dwie dalsze komory to rozszerzenia kanału centralnego, w częściach mózgu wysuniętych bardziej ku przodowi. System kanałów i komór pełni bardzo ważną rolę w mózgu. Wypełniony jest płynem mózgowo-rdzeniowym, a ściany komór zawierają komórki produkujące ten płyn. Płyn mózgowo-rdzeniowy odgrywa ważną rolę w immunologii mózgu. Szczegółową rolę fizjologiczną poszczególnych części mózgu zajmuje się neurofizjologia.

Kresomózgowie — jak wiadomo — składa się z dwóch półkul, lewej i prawej. Uczeni od dawna próbują rozgraniczyć dość szczegółowo funkcje obu półkul. Doprowadziło to do mniej lub bardziej precyzyjnego ustalenia ich ról.

Powierzchnia kory mózgowej pokryta jest istotą szarą. Istota szara zbudowana jest z ciał neuronów, natomiast znajdująca się pod nią istota biała to pęk nerwowych włókien połączonych ze sobą wewnątrz kresomózgowia. Istota szara tworzy korę mózgową, która jest charakterystycznie pofalowana. Mózg wykazuje aktywność elektryczną (fale mózgo-we), co wykorzystuje się w badaniu za pomocą elektroencefalografu.

Obecnie medycyna nie jest jeszcze w stanie odpowiedzieć na pytania dotyczące działania mózgu jako całości. Z punktu widzenia medycznego moment śmierci biologicznej przyjmuje się u człowieka, gdy nastąpi śmierć tkanek mózgu [1,3].

Informacja kodowana jest w mózgu najpierw jako potencjał czynnościowy, a potem jako zbiór, którego elementami są częstotliwość impulsacji, jej czasowy rozkład, wzorzec aktywności zespołu neuronów. Wydaje się, że odpowiedzią na cały ogrom zróżnicowanych bodźców docierających do mózgu jest analogiczne bogactwo receptorów biochemicznych oraz szlaków nerwowych.

W ludzkim mózgu dzięki synapsom neurony nieustannie wymieniają między sobą informacje. Odbywa się to przez uwalnianie do szczeliny synaptycznej chemicznych przekazników, które upakowane są w pęcherzykach znajdujących się w gruszkowatych tworach zwanych kolbkami synaptycznymi.

Każdy neuron ma około 1000 synaps, które dzielą się na dwa główne rodzaje:

- synapsa elektryczna — umożliwia dwukierunkowy przepływ sygnałów między neuronami poprzez specjalne kanały białkowe zbudowane z koneksyn. Synapsy elektryczne są złączami szczelinowymi, opartymi na przepływie jonów i drobnych cząstek różnego rodzaju. Transmisja w tych synapsach odbywa się bez opóźnień.
- synapsa chemiczna — jest to twór o skomplikowanej morfologii, którego działanie polega na pobudzaniu odpowiednich receptorów przez neurotransmitery. Proces transmisji chemicznej sygnału odbywa się w trzech fazach. Uczestniczy w nim transmitter, receptor błonowy oraz jony wapnia. Depolaryzacja błony neuronu przez zmianę potencjału czynnościowego wywołuje pęknięcie tworów, gdzie zmagazynowany jest odpowiedni neurotransmitter. Następuje w ten sposób uwolnienie neurotransmitera, następnie łączy się on z receptorem, co jest istotą przekazywania bodźca. Neurotransmitter po pewnym czasie ulega degradacji. Neuroprzekazniki działają hamująco lub pobudzająco na neuron.

Neurotransmisja chemiczna odkryta została w roku 1921 przez Otta Loewiego. W roku 1936 dostał on nagrodę Nobla za odkrycie zjawisk chemicznych związanych z przekazywaniem impulsów nerwowych.

Wyładowania chemiczne zachodzą jedynie we wnętrzu komórki. Aby przekazać sygnał następnej komórce, neuron zmienia nośnik z elektrycznego na chemiczny. Mózg wykorzystuje w równym stopniu elektryczność i chemię — elektryczność w obrębie każdej komórki mózgowej, chemię w miejscach porozumiewania się komórek. Poznanie zachodzących w mózgu procesów chemicznych pomaga w zrozumieniu wielu zagadek mózgu oraz ludzkiego zachowania [4,5].

Transmitery

Neuroprzekazniki są bardzo ważnymi elementami synapsy, bez nich człowiek nie mógłby normalnie funkcjonować. Wiele substancji będących neurotransmiterami pełni również rolę receptorów w układzie nerwowym. Kluczową częścią składową dla neuronu, dzięki której powstaje łącze informacyjne ze środowiskiem zewnętrznym, są układy synaps ulokowane na dendrytach komórki i jej ciele. Układy synaps przewodzą pobudzające i hamujące zmiany potencjału czynnościowego do neuronu, gdzie następuje ich integracja. Dzięki temu neuron jest elementem pobudliwym i zdolnym do transmisji informacji oraz jej przetwarzania.

Do najważniejszych transmiterów w naszym mózgu należą:

- acetylocholina
- noradrenalina
- adrenalina
- dopamina
- serotonina
- histamina
- glicyna
- kwas gamma-aminomasłowy (aminokwasy GABA)
- kwas asparaginowy i glutaminowy

Acetylocholina — neurohormon produkowany na stykach (synapsach) oraz zakończeniach nerwów układu parasympatycznego (autonomiczny układ nerwowy) i neuronów ruchowych tworzących płytki nerwowo-mięśniowe. Acetylocholina działa pobudzająco na mięśniówkę gładką (tkanka mięśniowa) naczyń krwionośnych (powodując ich rozkurcz, obniża ciśnienie krwi), przewodu pokarmowego (zwiększa perystaltykę) i dróg oddechowych (wywołuje skurcz oskrzeli), a także hamująco na mięsień sercowy (zwalnia czynność serca), pobudza czynność wydzielniczą gruczołów trawiennych i gruczołów dróg oddechowych (zwiększa wydzielanie śluzu). Jest rozkładana przez enzym esterazę acetylocholinową (cholinesterazę). Pochodne acetylocholin mają zastosowanie jako leki.

Noradrenalina (wg nomenklatury amerykańskiej norepinefryna) — neurohormon wytwarzany w rdzeniu nadnerczy i zakończeniach nerwów pozazwojowych układu sympatycznego (autonomiczny układ nerwowy). Różni się od adrenaliny obecnością atomu H, zamiast grupy CH_3 , przy atomie azotu. Działa podobnie do adrenaliny, tzn. podwyższa ciśnienie krwi i poziom glukozy we krwi. Stosowana jest w ciężkich stanach niewydolności krążenia.

Adrenalina (w terminologii amerykańskiej epinefryna) — hormon istoty rdzennej nadnerczy oraz tkanki chromochłonnej ciałek przyzwojowych (należących do autonomicznego układu nerwowego), powstający w organizmie w sytuacjach stresowych. Jest niekiedy określana jako hormon 3 x f (z ang. fright, fight and flight), czyli hormon strachu, walki i ucieczki. Adrenalina należy do amin aktywnych, zw. katecholaminami. Jest pochodną aminokwasu feniloalaniny, blisko spokrewnioną z noradrenaliną.

Adrenalina przekształca glikogen w glukozę, przez co podnosi poziom cukru we krwi, powoduje rozkład glikogenu mięśniowego do kwasu mlekowego, mobilizuje tłuszcz tkanki tłuszczowej przez aktywację lipazy, wywołuje skurcz naczyń tętniczych, z wyjątkiem naczyń wieńcowych serca, które rozszerza. Powoduje pobudzenie mięśnia sercowego, zwiększając wyrzut serca (wyrzucanie krwi z komór do tętnic). Wskutek zwężenia tętnic i zwiększenia wyrzutu serca podnosi skurczowe ciśnienie krwi.

Adrenalina hamuje ponadto skurcze mięśni gładkich (tkanka mięśniowa) przewodu pokarmowego, dróg oddechowych oraz dróg moczowych (noradrenalina działa tak samo, z tym że nie wpływa w ogóle na przemianę materii). W układzie nerwowym pośredniczy w przenoszeniu bodźców z włókien nerwowych do tkanek.

Stosowana jest jako lek w astmie, we wstrząsach i ostrych odczynach alergicznych. W laryngologii i stomatologii służy m.in. do zmniejszania krwawienia (silnie zwęża naczynia błon śluzowych). Używa się jej też w zabiegach resuscytacyjnych (reanimacja) przy zatrzymaniu czynności serca. Adrenalina jest pierwszym hormonem, który został otrzymany w stanie czystym, zsyntetyzował ją w 1901 r. J. Takamine (1854 – 1922), chemik japoński pracujący w USA.

Dopamina — neuroprzebiegacz syntezowany i uwalniany przez neurony ośrodkowego układu nerwowego. Odgrywa różną rolę w zależności od miejsca swego działania:

- a) w układzie pozapiramidowym jest odpowiedzialna za napęd ruchowy, koordynację oraz napięcie mięśni. Niedobór dopaminy w tym układzie objawia się chorobą Parkinsona (drżączka porażna), nadmiar zaś płasawicą Huntingtona.
- b) w układzie rąbkowym (limbicznym) jest odpowiedzialna za procesy emocjonalne, wyższe czynności psychiczne oraz w znacznie mniejszym stopniu procesy ruchowe.
- c) w podwzgórzu jest związany głównie z regulacją wydzielania hormonów, a szczególnie prolaktyny i gonadotropin.

Serotonina jest hormonem tkankowym powstającym z tryptofanu, wydzielana przez błonę śluzową jelit. W tkankach obwodowych zwęża naczynia krwionośne i powoduje skurcz mięśni gładkich macicy i przewodu pokarmowego. Metylowe pochodne serotoniny mają działanie halucynogenne. Rozkład serotoniny jest katalizowany przez monoamino-oksydazę.

Serotonina ma wpływ na ośrodkowy i obwodowy układ nerwowy, np. działa przeciwdepresyjnie, jest odpowiedzialna za sen fizjologiczny. Serotonina ma ważny wpływ w zaburzeniach naszego nastroju. Niski jej poziom w płynie mózgowo-rdzeniowym powoduje popadanie w depresję.

Histamina — zasadowy związek heterocykliczny o bardzo silnym i różnokierunkowym działaniu w organizmie, zmagazynowany w formie nieczynnej w komórkach tucznych. Histamina wpływa m.in. na: sekrecję i perystaltykę przewodu pokarmowego, ciśnienie krwi (powoduje rozkurcz naczyń krwionośnych), wzrost przepuszczalności naczyń krwionośnych (powoduje obrzęki alergiczne i bąble pokrzywkowe), wzrost wydzielania śluzu i skurcz drzewa oskrzelowego.

Histamina jest jednym z głównych mediatorów, jakie wyzwalają się w ustroju pod wpływem reakcji antygeny z przeciwciałem, w przebiegu alergii wczesnej. Uwolnienie histaminy doprowadza m.in. do: wstrząsu anafilaktycznego, astmy, pokrzywki, kataru siennego.

Glicyna (kwas aminooctowy, glikokol) — aminokwas, substancja krystaliczna, rozpuszczalna w wodzie, nierozpuszczalna w eterze, temperatura topnienia 232°C. Glicyna jest składnikiem większości białek. Glicynę otrzymuje się z kwasu chlorooctowego i amoniaku.

Asparaginowy kwas — aminokwas endogenny występujący głównie w białkach roślinnych. W mikroorganizmach i roślinach kwas asparaginowy uczestniczy w syntezie aminokwasów egzogennych dla zwierząt: metioniny, treoniny, ilizyny, ponadto argininy, puryn i pirymidyn.

Kwas glutaminowy — aminokwas endogenny, występujący w większości białek. Stosowany jako lek przeciwko przemęczeniu umysłowemu.

Kwas gamma-aminomasłowy (aminokwasy GABA) — jest głównym i najlepiej poznany neuroprzekaznikiem o właściwościach inhibitorowych w ośrodkowym układzie nerwowym. Aminokwas GABA, uwalniany podczas impulsu fizjologicznego, oddziałuje na swoiste struktury receptorowe neuronów, powoduje ich hiperpolaryzację oraz spadek aktywności bioelektrycznej [4,6].

Techniki obrazowania mózgu

Ostatnie kilkanaście lat spowodowały nadzwyczajny postęp, jeśli chodzi o techniki wizualizacji mózgu. Dzięki nim możemy oglądać mózg bez używania noża chirurgicznego. Można wyróżnić następujące techniki obrazowania mózgu:

- PET (emisyjna tomografia pozytronowa);
- NMR (tomografia spinu jądrowego);
- MEG (magnetoencefalografia).

PET pokazuje, jak podczas wykonywania określonych zadań zmienia się aktywacja poszczególnych rejonów mózgu i przedstawia, jak one pracują. Przed wykonaniem badania pacjentowi wstrzykuje się w płynie infuzyjnym słabo radioaktywną substancję, która naczyniami krwionośnymi przedostaje się do mózgu. Poprzez rozpad promieniotwórczy uwalniane są pozytrony, które zderzają się z elektronami. Promieniowanie, które powstało, rejestrowane jest przez dwie głowice przystawione z obu stron do głowy badanego. Głowice te stanowią detektor, którego sygnały są przetwarzane przez komputer na kolorowe obrazy przekrojów horyzontalnych, ukazując kolejne warstwy mózgu.

NMR umożliwia obrazowanie funkcjonowania mózgu, a przede wszystkim przepływu krwi przez struktury aktywne podczas wykonywania określonych zadań.

MEG jest metodą diagnostyczną, pozwalającą stwierdzić, gdzie w danej chwili występują w mózgu aktywności neuronalne. Wykorzystuje się ją zwłaszcza do badania powierzchni mózgu.

Naukowcy mają nadzieję, że w niedalekiej przyszłości będzie możliwe wykorzystanie kombinacji wszystkich trzech metod obrazowania mózgu, co pozwoli dowiedzieć się więcej na temat jego funkcjonowania [4].

Mózg a komputer

Amerykański uczone Norbert Wiener, profesor Massachusetts Institute of Technology, twórca podstaw cybernetyki, przyrównywał komputer do „elektronicznego mózgu”. Zakładał on bowiem, że neurony i przełączniki w lampowym komputerze, stosowane w tamtych czasach, działają według zasady „wszystko albo nic”; w dokładnym kontekście znaczy to, że bądź przewodzą potencjały czynnościowe czy prąd elektryczny w swoich układach, bądź nie. Komputer i mózg są więc — patrząc od tej strony — urządzeniami cyfrowymi, działają w stanach dyskretnych. Z kolei John von Neumann, współtwórca pierwszej amerykańskiej elektronicznej maszyny matematycznej, pokazał jednak, że mózg i cały centralny układ nerwowy ma w istocie rzeczy charakter cyfrowo-analogowy. Jest tak już na poziomie komórki nerwowej, gdzie wzbudzony potencjał czynnościowy rozchodzi się wzdłuż ciała komórki i jej aksonów w sposób nieciągły, a więc taki, który można wymodelować cyfrowo. Przy przejściu między komórkami, w synapsach, nabiera on jednak charakteru ciągłego, jest więc natury analogowej.

Geneza sieci neuronowych sięga badań neurofizjologicznych i biocybernetycznych. Pierwszy prototyp sieci neuronowej zbudowany został w 1957 r. przez Arturo Rosenblutha i Charlesa Wightmana. Inspiracją do tego przedsięwzięcia był matematyczny opis komórki nerwowej podany w 1943 r. przez Warrena McCullocha i Waltera H. Pittsa.

Perceptron, bo tak nazywano pierwszy prototyp sieci neuronowej, był urządzeniem w pewnej części elektromechanicznym, które miało za zadanie rozpoznawanie znaków alfanumerycznych. Zastosowany system nie był efektywny w przypadku analizy bardziej złożonych znaków, ale co najważniejsze, zachowywał jednak poprawność działania nawet po uszkodzeniu pewnej części jego elementów. Bardzo ważną zaletą Perceptronu było to, że po zadaniu mu tylko pierwszej części danych wejściowych „uczył” się dalszego rozpoznawania. Kolejne konstruktorskie osiągnięcia przypadły na 1960 r., kiedy to zbudowano sieć o nazwie Madalin¹. Na początku lat 70. Marvin Minsky wraz ze swoim współpracownikiem zastopowali badania nad sieciami, krytycznie oceniając ich jednowarstwowość. Dopiero w drugiej połowie lat 80. zaczęto projektować i budować nieliniowe sieci wielowarstwowe o wyłącznie już elektronicznym podłożu. Sieć neuronowa jest połączeniem w sieć elementów zwanych neuronami, które tworzą co najmniej trzy warstwy:

- wejściową;
- ukrytą (może być ich wiele);
- wyjściową.

Przetwarzanie informacji przez neurony sieci zachodzi dzięki temu, że ich połączeniom nadaje się parametry, zwane wagami, które modyfikuje się podczas działania. To modyfikowane działanie nazywane jest procesem „uczenia” sieci. Proces uczenia sieci polega więc na tym, by tak dobrać wagi, żeby wszystkie neurony wykonywały dokładnie takie czynności, jakich się od nich wymaga [7,8].

Transplantacje głowy

Do niedawna nikt nie zdawał sobie sprawy, że próby przeszczepu głowy zaczęły się na początku XX wieku. Historia Frankenstein, napisana w 1818 r. przez Marry Schelley,

¹ Zbudował ją Bernard Widrow. Miała zastosowanie w radarach, sonarach, liniach telefonicznych.

traktowana była jako science fiction. Główny bohater tej powieści złożony został z części ciał różnych ludzi, jeszcze do dziś dla wielu z nas jest to po prostu fikcja literacka.

Obecnie w dziedzinie transplantacji nastąpił znaczny postęp. Można już przeszczepiać wątrobę, płuca, serce, nerki i od niedawna także ręce. Pomysł przeszczepiania głowy zawsze fascynował chirurgów doświadczalnych. W 1908r. amerykański fizjolog i farmakolog Charles C. Gutrie przeszczepił głowę małego kundla do szyi większego psa, jego własną pozostawiając na miejscu. Również w latach 50. rosyjski uczony Władimir P. Demichow dokonał transplantacji przedniej części ciała wraz z kończynami szczeniaka mieszańca, łącząc jego żyły i tętnice z naczyniami szyjnymi większego psa. Jeden ze sławnych „dwugłowych psów” Demichowa przeżył po operacji 29 dni.

Głowa ssaka po raz pierwszy pomyślnie została przeszczepiona do bezgłowego korpusu dopiero w 1970 r. Dokonał tego wraz ze swoimi kolegami Robert J. White, a obiektem doświadczenia był rezus². Po narkozie małpa odzyskała w pełni świadomość i funkcje nerwów czaszkowych. Dało się to stwierdzić, obserwując jej zachowanie; była czujna, agresywna, przyjmowała pokarm i wodziła oczami za poruszającymi się w pomieszczeniu ludźmi. Rezus żył tylko osiem dni. Znaczna poprawa technik chirurgicznych i postępowania pooperacyjnego, która zaszła od tamtych czasów, umożliwiła według Roberta J. White'a przeszczepienie głowy człowieka. Jego zespół chirurgiczny poczynił już pierwsze kroki w kierunku przeszczepiania ludzkiej głowy. Technika umożliwiająca przeprowadzenie takiego zabiegu została już opracowana.

Bardzo istotne w czasie wszystkich etapów przeszczepiania głowy ludzkiej będzie utrzymanie wystarczającego, nieprzerwanego przepływu krwi przez mózg, ponieważ w odróżnieniu od innych narządów litych jest on bardzo wrażliwy na brak ukrwienia i nie może przeżyć odłączony od krążenia. Podczas transplantacji chirurg będzie musiał monitorować aktywność bioelektryczną mózgu za pomocą usytuowanych na skórze głowy elektrod elektroencefalograficznych. Głowa każdego pacjenta powinna być umieszczona w okrężnym uchwycie pozwalającym — w zależności od potrzeby — na jej uruchomienie lub przemieszczenie.

Przeszczep głowy będzie kiedyś szansą dla ludzi sparaliżowanych od szyi w dół. Na pewno to oni będą pierwszymi kandydatami, którzy skorzystają z możliwości przeszczepu. W obecnym stanie technik operacyjnych nie ma żadnych gwarancji, że po przeniesieniu głowy sparaliżowanego pacjenta do innego ciała, pacjent będzie mógł się poruszać. Mamy nadzieję, że XXI wiek przyniesie sposób na pełne zintegrowanie transplantowanego fragmentu rdzenia kręgowego z nowym organizmem. Ciała będą pochodziły od pacjentów, u których rozpoznano śmierć mózgu [9].

Podsumowanie

W artykule tym przedstawiliśmy tylko ogólną budowę i działanie mózgu oraz chcieliśmy podkreślić fakt, że jest on nadal największą zagadką, z którą borykają się naukowcy. Nie wolno nam zapominać, że człowiek jest istotą psychofizyczną i pomiędzy ciałem a duszą istnieje ściśle, bynajmniej nie oparte na magii, związki.

² *Macaca mulatta*, południowoazjatycka małpa wąskonosą z grupy koczokodanów, cenne zwierzę laboratoryjne.

Naukowcy będą musieli odpowiedzieć sobie na wiele pytań, gdy będą wprowadzać w życie to, co Marry Shelley, autorka Frankenstein, stworzyła jedynie w wyobraźni. Nie wiadomo przecież, jak przyjmujemy fakt, że przeszczepienie ludzkiego mózgu może pociągnąć za sobą przeniesienie intelektu i charakteru. Nie wiadomo również, czy narząd ten nie jest siedliskiem fizycznym duszy, na którą ta operacja może jakoś wpłynąć.

Mamy nadzieję, że postęp cywilizacyjny nie obróci się przeciwko ludzkości i człowiek jako istota myśląca będzie umiał zapanować nad tym wszystkim. Naszym zdaniem musimy odpowiedzieć sobie na pytanie, czy człowiek w swych dążeniach — jak wiemy klonuje już zwierzęta, a nie wiadomo, czy nie ma już klonu człowieka — nie dąży do samounieszczenia?

Literatura

- [1] Górka T. (red.), *Mózg a zachowanie*, PWN, Warszawa 1997.
- [2] Penrose R., *Nowy umysł cesarza*, PWN, Warszawa 1996.
- [3] Fischbach G.D., *Psychika a mózg*, „Świat Nauki, Science American” nr 11(15) 1992.
- [4] Pöppel E., Edingshaus A.L., *Mózg — tajemniczy kosmos*, PIW, Warszawa 1998.
- [5] Ingram J., *Płonący dom. Odkrywając tajemnicę mózgu*, Prószyński i S-ka, Warszawa 1996.
- [6] Miętkowski E., *Kurs wykładów fizjologii człowieka*, PZWL, Warszawa 1969.
- [7] Hetmański M., *Sieci neuropodobne*, „ComputerWorld” nr 11/99.
- [8] Tadeusiewicz R., *Elementarne wprowadzenie do techniki sieci neuronowych z przykładowymi programami*, Akademicka Oficyna Wydawnicza PLJ, Warszawa 1998.
- [9] White R.J., *Przeszczepianie głowy*, „Świat Nauki, Science American” nr 12(100) 1999.