

# Plastyczność układu nerwowego w nauce i odtwarzaniu kontroli ruchowej

*Jeffrey A. Kleim*

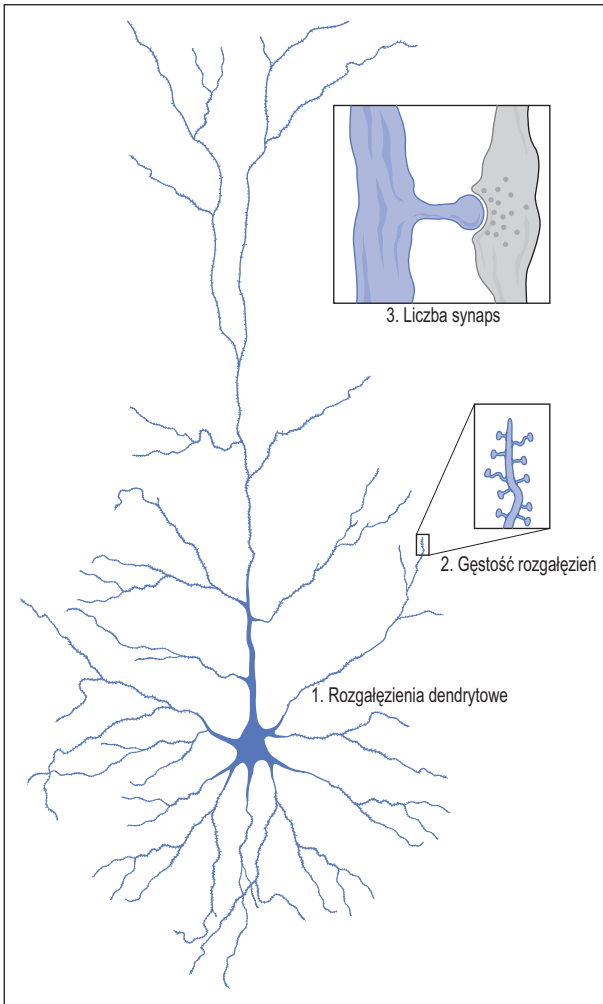
## WPROWADZENIE

Praktycznie każde dojrzałe zachowanie opiera się na nabytych możliwościach ruchowych, zatem znaczna część ośrodkowego układu nerwowego (OUN) zajęta jest kontrolowaniem ruchów wyuczonych (rozdz. 4). Naukę motoryczną definiuje się jako stałe zmiany zachowań ruchowych w wyniku nabywania praktyki czy procesu nauki (Schmidt, 2000), praktyka zaś, sprzężenie zwrotne i nabywanie wprawy to zasadnicze elementy koncepcji nauczania motorycznego (Carr i Shepherd, 1998; Gilmore i Spaulding, 2001). Zdolność do wykonywania wyuczonych, płynnych ruchów osiąga się dzięki intensywnym ćwiczeniom i utrzymuje się w sytuacji zaprzestania treningu, co może wskazywać na to, że umiejętności motoryczne są kodowane w procesie zmian neurobiologicznych (plastyczność nerwowa) w obszarach ruchowych OUN. Obecnie dostępne są liczne dowody empiryczne potwierdzające, że nabywanie umiejętności motorycznych jest wspierane plastycznością układu nerwowego w obrębie różnych ośrodków ruchowych OUN (Adkins i wsp., 2006).

Poprawę jakości wykonania czynności ruchowej po uszkodzeniu mózgu osiąganą w wyniku rehabilitacji można postrzegać jako proces powtórnej nauki ruchu, w którym przywraca się utracone wzorce ruchowe oraz nabywa nowe, kompensacyjne, pozwalające na odtworzenie możliwości ruchowych. Co więcej, powtórna nauka ruchu następująca po uszkodzeniu mózgu wydaje się wspomagana plastycznością w obrębie pozostałych rejonów mózgowia, co przypomina mechanizm występujący w trakcie nauki ruchu w przypadku nieuszkodzonego układu nerwowego (Nudo, 2003). Zrozumienie podstawowych zasad rządzących plastycznością układu nerwowego pomaga w tworzeniu nowych programów postępowania rehabilitacyjnego i zwiększaniu skuteczności już istniejących. Dzieje się tak dzięki przyspieszeniu procesu zdrowienia ruchowego po uszkodzeniu mózgu (Kleim i Jones, 2008).

## PLASTYCZNOŚĆ UKŁADU NERWOWEGO

Plastyczność neuronalną bardzo swobodnie definiuje się jako długotrwałe zmiany w strukturze lub funkcji komórek nerwowych. Można ją zaobserwować na poziomie pojedynczych neuronów w postaci zmian w pobudzeniu neuronalnym, aktywności pojedynczej jednostki, zwiększeniu ilości i gęstości rozgałęzień dendrytowych oraz liczby synaps (ryc. 5.1). Modyfikacje te wskazują na powstawanie zmian w zespołach neuronalnych w poszczególnych obszarach mózgu. Plastyczność można też zaobserwować w postaci zmian aktywności mózgu czy zmiany organizacji reprezentacji czuciowej lub ruchowej. Plastyczność neuronalna pojawia się w reakcji na różne działania we-



### Rycina 5.1

Przykłady mierzalnych cech plastyczności układu nerwowego obserwowanej na poziomie pojedynczych neuronów. Zmiany w morfologii komórki nerwowej dotyczą: (1) zwiększenia ilości rozgałęzień dendrytowych; (2) zwiększenia gęstości rozgałęzień dendrytowych; (3) zwiększenia liczby synaps. Wszystkie trzy pomiary stanowią wskaźnik zmian spójności neurologicznej i zmian funkcjonalnych w danym rejonie mózgu.

wewnętrzne i zewnętrzne, w tym trening behawioralny (Adkins i wsp., 2006), urazy (Nudo, 2003), leczenie farmakologiczne (Meintzschel i Ziemann, 2006), stymulację centralną (Kleim i wsp., 2003; Teskey i wsp., 2003) i obwodową (Wu i wsp., 2005), jednak w tym miejscu skoncentrowano się na zjawisku plastyczności zdrowego i uszkodzonego mózgu pod wpływem treningu motorycznego.

## **Dowody na plastyczność układu nerwowego w wyniku nauczania ruchu w nieuszkodzonym mózgu**

Chociaż w proces nauczania ruchu angażuje się wiele struktur układu nerwowego, znaleźć można liczne dowody świadczące o plastyczności pierwotnej kory ruchowej w wyniku nauki ruchu (Adkins i wsp., 2006; Monfils i wsp., 2005). Trening umiejętności ruchowych prowadzony zarówno u małp (Nudo i wsp., 1996a), jak i u szczurów (Kleim i wsp., 2004), wywołuje proces reorganizacji reprezentacji ruchowej w rejonie kory ruchowej. W korze mózgowej coraz to większy obszar kontroluje ćwiczone czynności ruchowe w porównaniu z obszarami analizującymi czynności nietrenowane. Uważa się, że taka reorganizacja ruchowa zachodzi dzięki zmianie połączeń synaptycznych pomiędzy neuronami korowymi (Monfils i wsp., 2005). Rzeczywiście dzieje się tak, że te rejonny korowe, które ukazują reorganizację planów motorycznych, cechuje również zwiększenie liczby połączeń synaptycznych (Kleim i wsp., 2004).

Stosowane u ludzi sposoby neuroobrazowania i stymulacji korowej wykazały podobne efekty. Eksperymenty z wykorzystaniem funkcjonalnego rezonansu magnetycznego ukazały stały wzrost aktywności kory ruchowej w czasie trwania procesu nauczania ruchowego (Karni i wsp., 1995). Badania z wykorzystaniem przeczaszkowej stymulacji magnetycznej dowodzą reorganizacji sygnałów wyjściowych w rejonie korowo-rdzeniowym połączonych z poprawą jakości wykonywania czynności ruchowych (Pearce i wsp., 2000; Tyc i wsp., 2005). Wyniki przytoczonych powyżej eksperymentów przeprowadzonych na zwierzętach i ludziach udowadniają, że nabywanie i osiąganie wprawy w czynnościach ruchowych wiąże się z plastycznością neuronalną w rejonie kory ruchowej.

## **Dowody na plastyczność układu nerwowego w wyniku rehabilitacji ruchowej w przypadku uszkodzenia mózgu**

Zaburzenia motoryczne po uszkodzeniu mózgu wynikają nie tylko z utraty funkcji zniszczonych obszarów motorycznych mózgu, ale również z braku zdolności pozostałych części mózgu do utrzymania czynności ruchowych bez udziału uszkodzonych rejonów. Na przykład ruch po udarze wiąże się z nieprawidłowymi wzorcami pobudzenia w ośrodkowym układzie nerwowym, które odzwierciedlają próbę dopasowania się mózgu do utraty tkanki nerwowej (Ward i wsp., 2006). Z tego względu odtwarzanie możliwości ruchowych występujące w czasie rehabilitacji bazuje na dwóch podstawowych procesach, które można osiągnąć dzięki kilku różnym mechanizmom (ramka 5.1).

Wyniki przytoczonych powyżej eksperymentów przeprowadzonych na zwierzętach i ludziach udowadniają, że rehabilitacja ruchowa po udarze powoduje przywrócenie i reorganizację funkcji w rejonie kory ruchowej (tab. 5.1).

## **ZASADY WYKORZYSTANIA PLASTYCZNOŚCI UKŁADU NERWOWEGO W REHABILITACJI**

Wprawdzie powyższe badania pokazują, że plastyczność pojawia się podczas rehabilitacji ruchowej, to jednak samo jej wystąpienie nie pomoże terapeutom w prowadzeniu skuteczniejszego postępowania (ramka 5.2).

Po rozpoznaniu podstawowych zasad rządzących plastycznością zależną od doświadczeń powinno się w nowy sposób spojrzeć na to, jak stosować terapię. W tabeli 5.2 wymieniono 10 zasad plastyczności, określonych dzięki prowadzonym dziesiątki lat badaniom podstawowym w zakresie

## Ramka 5.1

**Procesy zdrowienia:**

- **Pełne zdrowienie:** odtworzenie utraconych sekwencji ruchowych
- **Kompensacja:** w celu wykonania starych zadań ruchowych tworzy się nowe sekwencje ruchowe

**Mechanizmy zdrowienia:**

- Odtworzenie funkcji w obrębie kory mózgowej uszkodzonej półkuli. Zaburzona funkcja w rejonie przetrwałej tkanki korowej zostaje odtworzona w wyniku procesu rehabilitacji
- Reorganizacja funkcji motorycznej w obrębie kory mózgowej uszkodzonej półkuli. Rehabilitacja może wspomóc reorganizację przetrwałej tkanki nerwowej w celu kompensacji utraconej funkcji
- Aktywizacja funkcji ruchowej w obrębie nieuszkodzonej (przeciwej) półkuli mózgowej. Jeżeli zachowany potencjał rehabilitacyjny uszkodzonej półkuli mózgowej jest zbyt mały, rekrutacji podlega kora ruchowa półkuli przeciwej

Tabela 5.1 Plastyczność układu nerwowego związana z rehabilitacją ruchową

Rehabilitacja	Plastyczność	Źródło
Trening akrobatyczny (szczury)	Zwiększenie liczby synaps Zwiększenie ilości rozgałęzień dendrytowych	Voorhies i Jones, 2002 Chu i Jones, 2000
Trening sięgania (szczury)	Zwiększenie liczby synaps Reorganizacja map ruchowych	Kleim i wsp., 2003 Allred i Jones, 2004
Tablice do ćwiczeń manipulacyjnych ręki (małpy)	Reorganizacja map ruchowych Rozrost aksonalny	Nudo i wsp., 1996b Dancause i wsp., 2005
Terapia ruchu wymuszonego koniecznością (ludzie)	Zwiększona amplituda motorycznych potencjałów wywołanych Reorganizacja pól ruchowych Zmiany w aktywności obserwowanej dzięki funkcjonalnemu rezonansowi magnetycznemu	Wittenberg i wsp., 2003 Koski i wsp., 2004 Forrester i wsp., 2006 Ro i wsp., 2006
Stymulacja korowa (szczury)	Zwiększenie siły synaptycznej Reorganizacja pól ruchowych	Teskey i wsp., 2003 Kleim i wsp., 2003

neurologii. Zasady te wydają się szczególnie istotne dla procesu rehabilitacji po uszkodzeniu mózgu (Kleim i Jones, 2008).

### WNIOSKI: ZROZUMIENIE, JAK PLASTYCZNOŚĆ MOŻE WSPOMAGAĆ PROCES REHABILITACJI

Główne wiadomości kliniczne przedstawiono w ramce 5.3. Zadanie terapeuty – mające na celu zwiększenie efektywności rehabilitacji ruchowej – polega teraz na wykorzystaniu sposobu rozumie-