

**ZASTOSOWANIE TECHNIKI fNIRS  
W BADANIACH MECHANIZMÓW NEURONALNYCH  
POZNANIA SPOŁECZNEGO  
PRZEGŁĄD NAJWAŻNIEJSZYCH BADAŃ\***

Joanna Wysocka<sup>1</sup>, Karolina Golec<sup>2</sup>, Agnieszka Pluta<sup>3</sup>

APPLICATION OF fNIRS TECHNIQUE  
IN THE STUDIES OF SOCIAL COGNITION NEURAL MECHANISMS:  
A REVIEW

**Summary.** Near-infrared spectroscopy (fNIRS) is a research method which enables to measure functional activity of the brain. Younger children, newborns and the people who cannot participate in the research using other neuroimaging techniques due to contraindications can be examined with fNIRS. This method is therefore widely applied in the studies of neurodevelopmental mechanisms of social cognition. What is more, using fNIRS increases ecological validity of research, making it possible to measure cortical activity, for instance during face to face interaction. Theoretical background, advantages and limitations of the technique are discussed in the text. Moreover a review of studies with the use of fNIRS is presented to illustrate importance of the technique for the further development of social neuroscience field.

**Key words:** fNIRS, social cognition, social neuroscience, neurodevelopmental disorders

---

\* Przygotowanie niniejszego przeglądu było możliwe dzięki wsparciu Narodowego Centrum Nauki w ramach projektu nr 2017/25/B/HS6/01624.

<sup>1</sup> Wydział Psychologii, Uniwersytet Warszawski (Faculty of Psychology, University of Warsaw), ORCID: 0000-0002-5789-168X.

<sup>2</sup> Wydział Psychologii, Uniwersytet Warszawski (Faculty of Psychology, University of Warsaw), ORCID: 0000-0002-4651-685X.

<sup>3</sup> Wydział Psychologii, Uniwersytet Warszawski (Faculty of Psychology, University of Warsaw), ORCID: 0000-0002-4684-1919.

---

Adres do korespondencji: Joanna Wysocka,  
e-mail: joanna.wysocka@psych.uw.edu.pl

## Wprowadzenie

Większość zachowań człowieka, jako gatunku funkcjonującego w zbiorowościach, ma miejsce w kontekście społecznym, dlatego też zdolność efektywnego uczestnictwa w interakcjach jest warunkiem dobrostanu jednostki (Adolphs, 2009). Terminem „poznanie społeczne” określa się całokształt świadomych i nieświadomych procesów poznawczych umożliwiających zachowanie społeczne (Kennedy, Adolphs, 2012). Chociaż podstawowe funkcje poznawcze, takie jak percepcja, pamięć, uwaga, motywacja czy podejmowanie decyzji, determinują satysfakcjonujące współistnienie jednostek z innymi, to definicję poznania społecznego należy poszerzyć o procesy specyficzne dla kategorii bodźców społecznych, np. przetwarzanie informacji o kierunku wzroku drugiej osoby, percepcję twarzy i ruchu biologicznego, atrybucję stanów mentalnych (celów, intencji, pragnień, przekonań) czy stałych dyspozycji do zachowania się w określony sposób (np. cech osobowości, norm/skryptów grupowych).

Do tej pory wykazano, że u podstaw poznania społecznego leży zespół korowych i podkorowych struktur neuronalnych wyspecjalizowanych w przetwarzaniu informacji o charakterze społecznym, zwany mózgiem społecznym (ang. *social brain*; zob. przegląd w: Adolphs, 2009). Zaburzenia strukturalne oraz funkcjonalne w obrębie mózgu społecznego uznaje się za źródło zaburzeń przetwarzania bodźców o charakterze społecznym. Zaburzenia te są dominującym lub towarzyszącym objawem wielu zaburzeń neurorozwojowych, psychiatrycznych czy neurologicznych, np. zaburzeń ze spektrum autyzmu (ang. *autism spectrum disorder*, ASD), zespołu Williamsa, zaburzeń lękowych, schizofrenii lub chorób otępiennych (Kennedy, Adolphs, 2012).

Wiedzę na temat neuronalnych mechanizmów zachowań społecznych czerpiemy z badań wykorzystujących techniki neuroobrazowania mózgu, głównie metodę funkcjonalnego rezonansu magnetycznego (ang. *functional magnetic resonance imaging*, fMRI). Znaczny dyskomfort towarzyszący badaniu (konieczność przyjęcia pozycji leżenia na wznak, unieruchomienie, przebywanie w ciasnej, ograniczonej przestrzeni, duże natężenie hałasu) ogranicza trafność ekologiczną pomiaru i sprawia, że ta metoda jest rzadko wykorzystywana do badania młodszych populacji (Lloyd-Fox, Blasi, Elwell, 2010). W rezultacie mechanizmy neuropoznawcze leżące u podłoża rozwoju poznania społecznego wciąż pozostają mało poznane.

Co więcej, chociaż neuronauka społeczna w stosunkowo krótkim czasie przyczyniła się do znacznego pogłębienia wiedzy o neuronalnym podłożu zachowań społecznych, jak dotąd nie uwzględniała ona roli interakcji między ludźmi, zyskując nawet miano „nauki o obserwatorach” (Hari i in., 2015). Do niedawna analizie poddawano przede wszystkim aktywność mózgu pojedynczych osób, mierzoną podczas ekspozycji na uprzednio przygotowane bodźce o charakterze społecznym w formie obrazu, dźwięku, wideo czy tekstu. Celem w tym zakresie powinno być zatem stworzenie warunków eksperymentalnych w jak największym stopniu

zbliżonych do naturalnych, pozwalających na dokonanie jednoczesnego pomiaru aktywności neuronalnej u dwóch lub większej liczby osób wchodzących ze sobą w interakcje w czasie rzeczywistym (Scholkmann i in., 2013). Uwzględnianie kontekstu społecznego w całej złożoności w badaniach mechanizmów neuropoznawczych wciąż pozostaje jednak wyzwaniem, ze względu na ograniczenia najczęściej stosowanych metod neuroobrazowania.

Techniką, która pozwala na przezwycięzenie opisanych powyżej trudności, jest metoda funkcjonalnej spektroskopii bliskiej podczerwieni (ang. *functional near-infrared spectroscopy*, fNIRS). Ze względu na nieinwazyjność, mobilność i zadowalającą precyzję pomiaru cieszy się ona rosnącą popularnością w dynamicznie rozwijającej się dziedzinie neuronauki społecznej (Hyde i in., 2018).

Celem niniejszego przeglądu jest przybliżenie polskiemu czytelnikowi możliwości, jakie stwarza wykorzystanie fNIRS w zakresie pogłębienia wiedzy dotyczącej neuronalnych mechanizmów poznania społecznego. W tekście zostaną omówione podstawowe zasady działania fNIRS, jej zalety i wady na tle najpopularniejszych technik obrazowania mózgu oraz korzyści płynące z zastosowania fNIRS w badaniach neuronalnych korelatów poznania społecznego w normie i w patologii, zwłaszcza w kontekście rozwojowym, zilustrowane wynikami wybranych badań (także własnych). Podczas selekcji prac wybranych do omówienia w niniejszym przeglądzie skupiono się przede wszystkim na wykorzystaniu techniki fNIRS w obszarach, w których zdaje się ona mieć szczególne zastosowanie, np. w procedurach dotyczących naturalnych interakcji twarzą w twarz czy w badaniach niemowląt, małych dzieci oraz osób, u których występują przeciwwskazania do wykonania rezonansu magnetycznego.

## **Funkcjonalna spektroskopia bliskiej podczerwieni**

Funkcjonalna spektroskopia bliskiej podczerwieni to metoda pomiaru aktywności korowej mózgu, którego dokonuje się za pomocą optod rozmieszczonych na powierzchni głowy osoby badanej, najczęściej z zastosowaniem czepka lub opaski. Pierwsze badania obrazowania ludzkiego mózgu przy użyciu fNIRS zostały przeprowadzone równolegle na początku lat dziewięćdziesiątych przez cztery niezależne zespoły badawcze (zob. przegląd w: Ferrari, Quaresima, 2012). Od tamtej pory technika znacznie się rozwinęła: od aparatury z pojedynczym kanałem po rozbudowane systemy, umożliwiające badanie aktywności kilku struktur równocześnie.

Kluczowe dla funkcjonowania fNIRS jest zastosowanie bliskiej podczerwieni, czyli światła o specyficznym zakresie długości fal (650–1000 nm), tworzącego okno optyczne, w którym ludzka skóra i kości pozostają względnie transparentne (Ferrari, Mottola, Quaresima, 2004). Na głowie osoby badanej umieszcza się optody: źródła oraz detektory światła. W urządzeniach stosujących system fali ciągłej (ang. *continuous wave*, CW) źródło emituje światło o kilku (najczęściej dwóch) długościach fal, które przenika skórę, czaszkę i tkankę mózgową, ulegając przy tym absorpcji

i rozproszeniu. Osłabienie sygnału (ang. *light attenuation*), rozumiane jako stosunek wejściowego poziomu światła do poziomu wyjściowego, jest zależne od zmian hemodynamicznych zachodzących na odcinku tkanki pomiędzy źródłem a detektorem (Pinti i in., 2018). Chromofory hemoglobiny utlenowanej (ang. *Oxygenated Haemoglobin*, OxyHb) i nieutlenowanej (ang. *Deoxygenated Haemoglobin*, DeoxyHb) cechują różne współczynniki absorpcji światła bliskiej podczerwieni, co po odpowiednich obliczeniach pozwala na oszacowanie zmian w koncentracji utlenowania krwi w obrębie badanej tkanki (Lloyd-Fox, Blasi, Elwell, 2010). W strukturach neuronalnych aktywnych podczas wykonywania zadania angażującego określone procesy poznawcze obserwuje się wzmożone zapotrzebowanie na tlen, które skutkuje zwiększonym lokalnym przepływem krwi (ang. *local cerebral blood flow*, CBF). Świadczy to o wystąpieniu sprzężenia nerwowo-naczyniowego (ang. *neurovascular coupling*). Początkowo w aktywnych obszarach mózgu następuje krótkotrwały spadek poziomu utlenowania krwi (ang. *initial dip*), który zostaje szybko wyrównany (Zaidi i in., 2018). Całkowita ilość tlenu transportowana do danej struktury mózgu przewyższa możliwości jego metabolizmu w neuronach, co powoduje lokalny wzrost ilości krwi utlenowanej i spadek ilości krwi odtlenowanej (Ferrari, Quaresima, 2012). FNIRS umożliwia zatem zaobserwowanie odpowiedzi hemodynamicznej mózgu po pojawieniu się bodźca. Jest ona rozumiana jako wzrost koncentracji OxyHb i towarzyszący mu, stosunkowo mniejszy, spadek DeoxyHb (Lloyd-Fox, Blasi, Elwell, 2010).

## FNIRS a fMRI

Za wspólną cechę badań metodą fNIRS i fMRI można uznać cel pomiaru aktywności mózgu: zaobserwowanie zmian odpowiedzi hemodynamicznej pojawiającej się w odpowiedzi na prezentowane bodźce. Chociaż badania przy jednoczesnym użyciu obydwu metod wskazują na to, że uzyskiwane miary są porównywalne, wciąż ostatecznie nie rozstrzygnięto, który wskaźnik, OxyHb czy DeoxyHb, najmocniej koreluje z sygnałem BOLD (ang. *blood-oxygen-level-dependent*), mierzonym w fMRI (Strangman i in., 2002; Huppert i in., 2006). Mimo to OxyHb pozostaje najczęściej stosowanym wskaźnikiem zmian aktywności hemodynamicznej w badaniach korelatów neuronalnych procesów poznawczych z zastosowaniem fNIRS (Bonetti i in., 2019).

Mimo opisywanych powyżej podobieństw, pomiary przy użyciu fMRI i fNIRS znacznie różnią się pod względem warunków badawczych. Niewątpliwą zaletą fNIRS jest większa odporność na artefakty ruchowe i w konsekwencji możliwość przeprowadzenia badania bez konieczności unieruchomienia osoby badanej. Dzięki tej właściwości fNIRS możliwe stało się szersze wykorzystanie metod funkcjonalnego obrazowania mózgu u niemowląt i małych dzieci (na rysunku 1 zaprezentowano przykładowe badanie dziecka w wieku przedszkolnym z wykorzystaniem techniki fNIRS). Ponadto bezprzewodowa wersja aparatury fNIRS jest z powodze-

niem stosowana w badaniach wymagających aktywności motorycznej (Holper i in., 2010), umożliwiając również pomiar poza laboratorium (Pinti i in., 2015).

Urządzenie nie wydaje dźwięku, jest stosunkowo łatwe w obsłudze, a jego eksploatacja nie wymaga wysokich nakładów finansowych. Warto także podkreślić, że w badaniu przy użyciu fNIRS mogą uczestniczyć osoby, u których występują przeciwwskazania do wykonania funkcjonalnego rezonansu magnetycznego, np. użytkownicy implantów ślimakowych (ang. *cochlear implant*, CI; Olds i in., 2016).



Rysunek 1. Czepek fNIRS stosowany w badaniach własnych, prowadzonych na Wydziale Psychologii Uniwersytetu Warszawskiego pod kierunkiem dr Agnieszki Pluty

FMRI cechuje wysoka rozdzielczość przestrzenna (anatomiczna dokładność pomiaru), wynosząca ~2–3 mm (Glover, 2011) i możliwość uzyskania precyzyjnych pomiarów odpowiedzi neuronalnej zarówno z korowych, jak i podkorowych obszarów mózgu. Technika fNIRS nie pozwala na pomiar zmian hemodynamicznych w obrębie głęboko położonych struktur, jest jednak skutecznym narzędziem monitorowania aktywności korowej. Jej rozdzielczość przestrzenna jest niższa: wynosi ~1 cm (Steinbrink i in., 2006) i zależy od czynników, takich jak rozmieszczenie względem siebie źródeł i detektorów (wraz ze wzrostem dystansu pomiędzy źródłem i detektorem światła rośnie głębokość penetracji korowej), właściwości optyczne tkanki czy poziom intensywności emitowanego światła (Fukui, Ajichi, Osada, 2003). W celu dokładniejszego określania lokalizacji zaobserwowanej aktywności badacze stosujący fNIRS starają się łączyć metody neuroobrazowania mózgu, m.in. mierząc położenie optod względem punktów referencyjnych bezpośrednio na głowie osoby badanej, a następnie dokonując rzutowania na wystandaryzowane skany strukturalne MRI (Aasted i in., 2015).

## FNIRS a EEG

Warunki badawcze charakterystyczne dla fNIRS zbliżają ją do techniki elektroencefalografii (ang. *electroencephalography*, EEG). Zarówno elektrody EEG, jak i optody fNIRS są rozmieszczane na powierzchni głowy osoby badanej, najczęściej przy użyciu czepka. W badaniach z wykorzystaniem EEG i fNIRS bodźce prezentuje się badanym bez konieczności zachowywania przez nich pozycji leżącej i trwania w bezruchu (jak w fMRI), co decyduje o użyteczności obu metod m.in. w badaniach dzieci. EEG i fNIRS operują jednak na innych wskaźnikach aktywności neuronalnej: EEG umożliwia pomiar czynności bioelektrycznej mózgu, podczas gdy fNIRS dostarcza informacji na temat zmian hemodynamicznych zachodzących w aktywnych obszarach. Metodę fNIRS cechuje wyższa niż w przypadku elektroencefalografii, choć wciąż nie w pełni satysfakcjonująca (jak omówiono w powyższym podrozdziale), rozdzielczość przestrzenna. Jeśli chodzi o rozdzielczość czasową (częstotliwość dokonywania pomiaru), EEG pozwala na pomiar ponad 1000 próbek sygnału na sekundę (1000 Hz), a w przypadku fNIRS wartość ta osiąga zazwyczaj do 10 próbek sygnału na sekundę (10 Hz). Wciąż jest ona jednak wyższa niż w fMRI i umożliwia dokładniejsze śledzenie przebiegu zmian hemodynamicznych w trakcie ekspozycji na konkretny bodziec (Pinti i in., 2018).

## Zastosowanie fNIRS w neuronauce społecznej – przegląd badań

### Niemowlęta i dzieci typowo rozwijające się

Podstawowym mechanizmem neurorozwojowym poznania społecznego jest rosnąca wraz z wiekiem specjalizacja funkcjonalna struktur mózgu społecznego, czyli wzrost wybiórczości odpowiedzi neuronalnej na bodźce z określonej kategorii (Richardson i in., 2018). Wciąż nie rozstrzygnięto jednak, jak wcześnie w rozwoju dziecka zachodzi ten proces i jak przebiega w przypadku poszczególnych zdolności, np. rozpoznawania twarzy, rozpoznawania intencji czy tworzenia atrybucji stanów mentalnych innych osób. Badanie populacji, w których nie występują przeciwwskazania do badania w rezonansie magnetycznym prowadzone jest najczęściej z zastosowaniem metody fMRI, dostarczającej m.in. względnie dokładnych informacji o korelatach neuronalnych poszczególnych procesów poznawczych. Jednakże stworzenie komfortowej dla dziecka sytuacji badawczej w skanerze rezonansu magnetycznego jest utrudnione, jak opisano wyżej. Nowych możliwości w tym zakresie dostarcza technika fNIRS, coraz częściej stosowana w badaniach rozwoju społecznego niemowląt dotyczących m.in. teorii umysłu czy przetwarzania bodźców istotnych społecznie, takich jak ludzka twarz, dotyk, głos czy ruch biologiczny.

**Percepcja wskazówek społecznych w różnych modalnościach.** Lloyd-Fox i współpracownicy wykorzystali fNIRS do badania zmian funkcjonalnych w zakresie przetwarzania informacji społecznych w obrębie kory mózgowej. W badaniu



wzięły udział noworodki i niemowlęta do 24. miesiąca życia z Wielkiej Brytanii i Gambii (Lloyd-Fox i in., 2017). Uczestnikom prezentowano bodźce społeczne w modalności wzrokowej (np. film przedstawiający osobę dorosłą bawiącą się w „a kuku”) lub słuchowej (odgłos śmiechu, płaczu, chrząkania, ziewania). W warunku kontrolnym prezentowano analogiczne bodźce słuchowe lub wzrokowe, które były pozbawione komponenty społecznej (np. obrazki zabawek i przedmiotów codziennego użytku, odgłosy płynącej wody, dźwięk grzechotki). Uzyskane wyniki sugerują, że w ciągu pierwszych 24 miesięcy życia mózg człowieka zaczyna specjalizować się w przetwarzaniu wskazówek społecznych. Oznacza to, że początkowo obszary tzw. mózgu społecznego reagują nieselektywnie zarówno na bodźce społeczne, jak i bodźce z innych kategorii. Wraz z upływem czasu reaktywność tych struktur na wskazówki społeczne wzrasta, obniża się natomiast dla bodźców niespołecznych. Badacze wykazali, że istotny wzrost koncentracji hemoglobiny utlenowanej mierzonej za pomocą fNIRS w odpowiedzi na bodźce społeczne, w porównaniu do reakcji na bodźce kontrolne, obserwuje się szczególnie dla górnej bruzdy skroniowej (ang. *superior temporal sulcus*, STS). Pełni ona funkcję centralnego węzła (ang. *hub*) w sieci obszarów mózgu społecznego, jak sugerują wcześniejsze badania osób dorosłych (Deen i in., 2015). Zastosowanie fNIRS w omawianym przykładzie umożliwiło ponadto określenie cech charakterystycznych dla specjalizacji neuronalnej mózgu społecznego: odpowiedź hemodynamiczna na bodźce społeczne z czasem zachodzi bardziej gwałtownie i szybciej osiąga maksimum (ang. *peak*).

**Percepcja ruchu biologicznego.** Odczytywanie istotnych społecznie informacji na podstawie obserwacji ruchu biologicznego jest niezwykle istotnym aspektem poznania społecznego, związanym m.in. z rozumieniem i interpretacją intencji, emocji czy pragnień innych osób. Noworodki już w pierwszych dniach życia wykazują preferencję względem bodźców przedstawiających ruch biologiczny (Simion, Regolin, Bulf, 2008). W badaniach tego rodzaju często stosuje się filmy przedstawiające ruch punktów świetlnych (ang. *point light displays*, PLD), w których widoczność postaci ograniczona jest do kilkunastu punktów rozmieszczonych na głowie, kończynach oraz głównych stawach ciała aktorów. Gdy dzieciom w wieku przedszkolnym prezentowano filmy z poruszającą się ludzką postacią, skupiały na nich uwagę w większym stopniu niż w przypadku podobnych animacji, w których punkty poruszały się w sposób nieuporządkowany (ang. *scrambled motion*) lub odzwierciedlały ruch mechaniczny wirującego przedmiotu (Annaz i in., 2012). Wciąż brakuje pełnych informacji na temat mechanizmów rozwojowych postrzegania ruchu biologicznego, a w dotychczasowych pracach dotyczących korelatów neuronalnych tej zdolności stosowano głównie metodę EEG, co zawęża możliwość wnioskowania na temat lokalizacji przestrzennej i specjalizacji neuronalnej zachodzącej w obrębie poszczególnych struktur (Reid, Hoehl, Striano, 2006).

Dzięki zastosowaniu fNIRS Lloyd-Fox ze swoim zespołem zbadała aktywność mózgu pięciomiesięcznych niemowląt w odpowiedzi na prezentację ruchu biologicznego i mechanicznego (Lloyd-Fox i in., 2011). Analiza wyników pozwoliła

na wyróżnienie obszarów znajdujących się w obrębie kory czołowej i skroniowej, wykazujących wzmożoną aktywność hemodynamiczną podczas prezentacji bodźców przedstawiających ruch biologiczny, w porównaniu do ruchu mechanicznego. Ponadto zaobserwowano odmienne wzorce aktywności korowej w zależności od rodzaju ruchu (ruch ust, dłoni, oczu). Percepcja ruchu dłoni i oczu związana była z obustronną aktywacją dolnego zakrętu czołowego, natomiast w odpowiedzi na bodźce prezentujące ruch ust zaobserwowano wyższą aktywność w obszarze odpowiadającym lokalizacji STS. Podobne rezultaty uzyskano dotychczas w badaniach osób dorosłych. W związku z tym wskazanie analogicznego wzorca aktywności neuronalnej u dzieci wspiera hipotezę dotyczącą wczesnej specjalizacji struktur korowych zaangażowanych w percepcję ruchu biologicznego.

**Reakcja na dotyk.** Wczesne doświadczenie dotyku oraz bliskości fizycznej z opiekunem jest silnie związane z prawidłowym rozwojem dziecka. Konsekwencje wczesnej deprywacji w tym zakresie obejmują m.in. utrzymujące się pogorszenie funkcjonowania poznawczego (MacLean, 2003). Badanie neuronalnych mechanizmów związanych z przetwarzaniem dotyku może poszerzyć wiedzę dotyczącą możliwych czynników wyjaśniających dysfunkcje w przetwarzaniu tego typu bodźców, pojawiające się m.in. u osób z diagnozą ASD. Dotychczas dowiedziono, że specyficzne obszary skóry człowieka (np. przedramię, plecy) wyposażone są w wyspecjalizowane włókna CT (ang. *C-tactile*), które odgrywają kluczową rolę w percepcji tzw. dotyku afektywnego: delikatnego, powolnego, typowego dla interakcji społecznych. Wyniki badań neuroobrazowych przeprowadzanych wśród osób dorosłych i dzieci (najmłodsi badani w wieku 10 miesięcy) wykazały, że pobudzenie wspomnianych włókien selektywnie aktywuje sieć struktur mózgowych zaangażowanych w przetwarzanie tego rodzaju dotyku, obejmującą m.in. struktury skroniowe i przedczołowe wchodzące w skład mózgu społecznego (Gordon i in., 2013). Do niedawna brakowało jednak danych sugerujących, jak wczesnie w rozwoju przebiega specjalizacja tych struktur. Miguel i współpracownicy przy użyciu fNIRS zmierzili aktywność mózgu siedmiomiesięcznych niemowląt w odpowiedzi na dwa rodzaje dotyku: afektywny i dyskryminatywny (umożliwiający szybkie wykrycie, identyfikację i rozróżnienie działających w tym samym czasie bodźców dotykowych; Miguel i in., 2017). Analizy wskazały na wzmożoną aktywność kory somatosensorycznej w odpowiedzi zarówno na dotyk afektywny, jak i dyskryminatywny. Ponadto nie zaobserwowano istotnej aktywności w odpowiedzi na bodźce dotykowe w obszarach skroniowych. Powyższe rezultaty sugerują, że specjalizacja sieci percepcji dotyku afektywnego nie zachodzi przed upływem siódmego miesiąca życia.

**Teoria umysłu.** Technika fNIRS znalazła również zastosowanie w badaniach dotyczących rozwoju teorii umysłu (ang. *theory of mind*, ToM), czyli zdolności wnioskowania o stanach mentalnych innych osób. Według Dennetta (1978), aby badać teorię umysłu, należy skonstruować zadanie, w którym do przewidzenia zachowania innej osoby niezbędne jest odniesienie się do jej stanu mentalnego.



Założenia te spełnia test fałszywych przekonań (ang. *false belief task*, FBT). W jednej z wersji FBT, dotyczącej zmiany lokalizacji, osobom badanym prezentowana jest scenka lub historyjka, w której główny bohater umieszcza przedmiot w miejscu A, po czym wychodzi z pomieszczenia. Pod jego nieobecność inna postać zmienia lokalizację przedmiotu na miejsce B. Uczestnicy proszeni są o wskazanie, gdzie główny bohater, po powrocie do pomieszczenia, będzie szukał przedmiotu. Test fałszywych przekonań w formie opisanej powyżej wymaga od osób badanych zrozumienia pytania i udzielenia odpowiedzi, a uzyskiwane w nim wyniki są związane z poziomem rozwoju językowego i poznawczego (Kielar-Turska, Białecka-Pikul, Skórska, 2006). W związku z powyższym uznaje się, iż mierzy on tzw. jawną teorię umysłu (ang. *explicit ToM*).

Liczne badania przeprowadzone w ciągu ostatnich 35 lat wykazały, że typowo rozwijające się dzieci zaczynają przechodzić poprawnie werbalne testy fałszywych przekonań około czwartego roku życia (Wellman, Cross, Watson, 2001). Jednakże badania z użyciem metod okulograficznych sugerują, że uwzględnianie przekonań innych osób jest obecne znacznie wcześniej w toku rozwoju. W badaniach Onishi i Baillargeon (2005) wykazano, iż dzieci w 15. miesiącu życia oczekiwały, że bohater prezentowanej im scenki zachowa się zgodnie ze swoim przekonaniem i patrzyłby dłużej, gdy tego nie robił. Paradygmaty stosowane w tego rodzaju badaniach uznaje się za miarę niewerbalnej, automatycznej ToM (ang. *implicit ToM*) i używa się ich w celu zaobserwowania spontanicznej reakcji (wzrokowej, neuronalnej) osób badanych na prezentowane bodźce.

Debata naukowa dotycząca natury zależności pomiędzy *implicit* a *explicit* ToM pozostaje nierozstrzygnięta (Grosse Wiesmann i in., 2017). Na poziomie badań *stricte* behawioralnych niemożliwe jest m.in. ustalenie, czy ToM *implicit* funkcjonuje od pierwszych miesięcy życia jako zdolność odrębna od później nabywanej ToM *explicit* (Apperly, Butterfill, 2009), czy raczej w toku rozwoju przekształca się w zdolność do mentalizacji *explicit* (Baillargeon, Scott, He, 2010). Niezbędnych informacji może dostarczyć badanie korelatów neuronalnych tych zdolności z wykorzystaniem fNIRS.

Jedno z pierwszych badań w tym zakresie przeprowadzili Hyde z zespołem (2018), korzystając z dostosowanych do specyfiki badań fNIRS nagrań wideo opartych na testach fałszywych przekonań, używanych w badaniach okulograficznych niemowląt (Onishi, Baillargeon, 2005). Siedmiomiesięcznym badanym prezentowano uprzednio nagraną scenę, w której bohater posiada prawdziwe lub fałszywe przekonanie dotyczące lokalizacji zabawki. W warunku kontrolnym zarówno dziecko, jak i bohater scenki cały czas widzieli zabawkę, ponieważ była umieszczona w przezroczystym pudełku. Optody rozmieszczono na obszarach skroniowych, ciemieniowych i przedczołowych. Analizy wykazały wzmożoną aktywność w obszarze prawego styku skroniowo-ciemieniowego (ang. *right temporo-parietal junction*, rTPJ) w warunkach atrybucji przekonań (prawdziwych i fałszywych), ale nie w warunku kontrolnym. Ponadto istotną różnicę w poziomie OxyHb pomiędzy

prawdziwym a fałszywym przekonaniem zaobserwowano w momencie zmiany lokalizacji zabawki. W warunku fałszywego przekonania ma to miejsce pod nieobecność bohatera, co, zdaniem autorów, odpowiada początkowej fazie kształtowania się przekonania. Wyższa aktywność hemodynamiczną rTPJ, obserwowana już około siódmego miesiąca życia dziecka podczas śledzenia przekonań innych osób, świadczy o selektywności funkcjonalnej tej struktury. Ponadto rezultaty powyższego badania świadczą o istnieniu podobnych mechanizmów neuronalnych leżących u podłoża zarówno *implicit*, jak i *explicit* ToM (Hyde, Aparicio Betancourt, Simon, 2015). Do podobnych wniosków prowadzi analiza wstępnych wyników badań z użyciem fNIRS w grupie typowo rozwijających się dzieci w wieku przedszkolnym w prowadzonym na Wydziale Psychologii Uniwersytetu Warszawskiego projekcie pt. „Mechanizmy neuropoznawcze rozwoju teorii umysłu u dzieci typowo rozwijających się, z podwyższonym ryzykiem wystąpienia zaburzeń ze spektrum autyzmu oraz głuchych używających implantów ślimakowych. Badania z wykorzystaniem metod neuroobrazowania mózgu” (grant Narodowego Centrum Nauki nr 2017/25/B/HS6/01624; Haman, 2018). Zbliżone wyniki uzyskiwano dotychczas głównie z zastosowaniem fMRI, w większości przypadków wyłączając z badań młodsze dzieci (m.in.: Gweon i in., 2013; Bardi i in., 2017).

## Wykorzystanie techniki fNIRS do badania populacji atypowych

**Badania zaburzeń ze spektrum autyzmu.** Deficyty w zakresie funkcjonowania społecznego są charakterystyczne dla większości zaburzeń psychicznych. Nasilenie tych deficytów jest szczególnie duże w przypadku osób z diagnozą ASD. Według klasyfikacji DSM V (American Psychiatric Association, 2013) do rozpoznania zaburzeń ze spektrum autyzmu, obok ograniczonych, powtarzalnych wzorców zachowań, zainteresowań i aktywności, konieczne jest wystąpienie nieprawidłowości w zakresie komunikacji społecznej i interakcji. Wskazane powyżej cechy ASD współwystępują ze zmianami w obrębie struktury i funkcji mózgu społecznego (Kennedy, Adolphs, 2012).

Chociaż widoczne w zachowaniu objawy ASD pojawiają się w ciągu pierwszych lat życia, diagnozę stawia się przeciętnie po trzecim roku życia, co utrudnia wczesną interwencję (Steiner i in., 2012). W związku z tym przedmiotem wielu badań są aktualnie objawy prodromalne i potencjalna możliwość zastosowania ich jako predyktorów wystąpienia symptomów ASD (Rybakowski i in., 2014). Badanie funkcji mózgu na wczesnym etapie rozwoju, możliwe dzięki zastosowaniu fNIRS, ma szansę przyczynić się do zidentyfikowania neurofizjologicznych predyktorów późniejszej diagnozy (Johnson, Haan, 2018). Ze względu na fakt, że zaburzenia rozwoju występują często u wielu członków tej samej rodziny, a ryzyko wystąpienia autyzmu jest wyższe u rodzeństwa dzieci posiadających diagnozę ASD, w tego typu badaniach uczestniczą także dzieci z grupy wysokiego rodzinnego ryzyka ASD (Risch i in., 2014).

Przedmiotem badań Fox i współpracowników były zmiany w zakresie odpowiedzi hemodynamicznej mózgu w reakcji na znane i nieznanie twarze różniące się ekspresją emocjonalną (Fox i in., 2013). Nadrzędnym celem badaczy było wskazanie wzorców aktywności neuronalnej towarzyszącej przetwarzaniu bodźców społecznych w grupie siedmiomiesięcznych niemowląt posiadających rodzeństwo z diagnozą ASD i w odpowiednio dobranej grupie kontrolnej, w której ryzyko wystąpienia ASD oceniono na niskie. Analiza przebiegu sygnału wykazała, że grupy różnią się wielkością, rozkładem przestrzennym i czasowym odpowiedzi hemodynamicznej związanej z przetwarzaniem informacji o twarzach. W porównaniu do grupy kontrolnej w grupie ryzyka zaobserwowano niższą koncentrację OxyHb w obszarach skroniowych oraz większą koncentrację DeoxyHb w obszarze kory oczodołowo-czołowej (ang. *orbitofrontal cortex*, OFC) w odpowiedzi na prezentację twarzy wyrażających emocje (w odniesieniu do twarzy o neutralnym wyrazie). Ponadto w grupie kontrolnej w obrębie OFC odpowiedź neuronalna na prezentowaną twarz matki wyrażającą pozytywne emocje była silniejsza niż w przypadku ekspozycji na twarz uśmiechającej się nieznanej osoby. Takiej zależności nie zaobserwowano natomiast w grupie ryzyka ASD. Wyniki wskazują na obniżoną selektywność uwagi na bodźce społeczne u dzieci z grupy ryzyka ASD. Badacze podkreślają, że dalsze badania podłużne dostarczą informacji pozwalających na pełniejszą interpretację uzyskanych wyników i rozstrzygnięcie, czy zaobserwowane zmiany w zakresie funkcji mózgu mogą być wczesnym predyktorem ASD.

**Wykorzystanie techniki fNIRS do badania połączeń funkcjonalnych (ang. *functional connectivity*).** Łączność funkcjonalna (ang. *functional connectivity*, FC) polega na synchronizacji aktywności różnych obszarów mózgu w czasie. Synchronizacja ta dotyczy struktur niekiedy oddalonych od siebie (np. korowych i podkorowych), ale wspólnie zaangażowanych w wykonywanie określonych zadań poznawczych, a zatem posiadających zbliżone właściwości funkcjonalne (Biswal, Van Kylen, Hyde, 1997; Zhang, Roeyers, 2019). Zakłócenia na poziomie FC są przyczyną obniżonej efektywności wymiany informacji między nimi (Biswal, Van Kylen, Hyde, 1997). Znacząca ilość badań dotyczących neuronalnych korelatów objawów autyzmu wskazuje, że cechą charakterystyczną ASD są nie tylko zmiany w obrębie aktywności poszczególnych struktur zaangażowanych w przetwarzanie bodźców społecznych, ale także w zakresie FC. Niektórzy badacze mówią nawet o rozwojowym zespole dyskoneksji jako cesze ASD (ang. *developmental disconnection syndrome*; Geschwind, Levitt, 2007).

Techniką najczęściej stosowaną do badań tego typu jest fMRI, umożliwiającą ocenę łączności funkcjonalnej u osób badanych, poprzez wykorzystanie sekwencji *resting state* (rsfMRI; Noonan i in., 2018). RsfMRI pozwala na obserwację spontanicznych zmian sygnału BOLD w czasie, kiedy uczestnik badania nie wykonuje żadnego zadania (Biswal, 2012). Do badania FC może zostać wykorzystana także technika fNIRS, umożliwiająca poszerzenie grona potencjalnych uczestników badania o kolejne populacje, jak wykazano powyżej. Opracowanie biomarkerów

i predyktorów późniejszej diagnozy ASD wymaga bowiem badań z udziałem jak najmłodszych dzieci.

Kikuchi i współpracownicy porównali swobodne fluktuacje BOLD w grupie dzieci w wieku od trzech do siedmiu lat z diagnozą ASD i dobranej pod względem płci i wieku grupie kontrolnej (Kikuchi i in., 2013). Uwagę uczestników badania podtrzymywano, prezentując im na ekranie historyjkę obrazkową, jednak zmienną zależną była spójność zmian niskoczęstotliwościowego sygnału w zakresie ,01–10 Hz w czasie, w którym na ekranie nie był prezentowany żaden bodziec (sześć stusekundowych odcinków czasu pomiędzy kolejnymi etapami historyjki). Analiza wykazała podwyższoną FC pomiędzy prawą i lewą częścią przedniej kory przedczołowej w porównaniu do grupy kontrolnej. Zmiany w zakresie FC u uczestników z grupy klinicznej pozytywnie korelowały z nasileniem objawów ASD mierzonych za pomocą protokołu obserwacji do diagnozowania zaburzeń ze spektrum autyzmu (ang. *autism diagnostic observation schedule*, ADOS-2), mogą być zatem uznane za neurofizjologiczny marker cech ASD. Podsumowując, monitorowanie zmian w zakresie FC może stać się istotnym elementem procesu wczesnej diagnozy ASD.

**Badania użytkowników implantów ślimakowych.** Badania pokazują, że pewne trudności w zakresie poznania społecznego mogą przejawiać niesłyszące od urodzenia dzieci słyszących rodziców (Enns, Herman, 2011). Ich doświadczenia językowe, szczególnie na bardzo wczesnym etapie rozwoju, są ograniczone, jeśli rodzice nie posługują się biegle językiem migowym (Richardson i in., 2018). Nasilenie tych trudności wydaje się zależeć (w przypadku dzieci głuchych od urodzenia i bez dodatkowych chorób neurorozwojowych) od długości okresu deprywacji językowej. W przypadku dzieci leczonych z zastosowaniem implantu ślimakowego (ang. *cochlear implant*, CI) oznacza to czas poprzedzający zabieg jego wszczepienia (Sundqvist i in., 2014). Do tej pory wykazano, że, obok opóźnionego rozwoju językowego, u użytkowników CI występują również trudności w zakresie przetwarzania informacji społecznych (Ludlow, Heaton, Deruelle, 2013). Ponadto dzieci z CI uzyskują niższe w stosunku do dzieci słyszących wyniki w testach badających ToM (Peterson, 2004), mają też trudność w nawiązywaniu satysfakcjonującej relacji z rówieśnikami (De Giacomo i in., 2013). Badanie użytkowników CI z wykorzystaniem fMRI jest niemożliwe z powodu obecności magnesu w konstrukcji implantu. Trudności te mogą być przezwyciężone dzięki zastosowaniu techniki fNIRS. Badania tego rodzaju są niezwykle istotne, ponieważ pozwoliłyby poszerzyć wiedzę na temat wpływu wczesnej deprywacji językowej na przebieg rozwoju poznania społecznego.

## **Badania w interakcji społecznej**

Coraz częściej podejmowane są próby analizy aktywności mózgu dwóch lub więcej osób pozostających w interakcji (ang. *hyperscanning*; Minagawa, Xu, Morimoto, 2018). Poszukuje się wówczas współzależności pomiędzy zmianami sygnału

rejestrowanymi u różnych osób badanych jednocześnie w celu wskazania mechanizmów neuronalnych leżących u podstaw zdolności do wchodzenia w interakcję. Do tego celu wykorzystywany jest także fNIRS (Hari i in., 2015).

Hirsch i współpracownicy za przedmiot swoich badań uznali kontakt wzrokowy w diadzie osób dorosłych, stanowiący jedno z podstawowych źródeł niewerbalnych wskazówek społecznych (Hirsch i in., 2017). W trakcie pomiaru badani siedzieli naprzeciwko siebie przy stole. W zależności od rodzaju sygnału dźwiękowego poprzedzającego próbę ich zadaniem było patrzeć na czy sobie nawzajem (warunek *wzrok-wzrok*) lub przyglądać się fotografii twarzy nieznanej sobie osoby (warunek *wzrok-zdjęcie*). Wyniki sugerują, że utrzymywaniu kontaktu wzrokowego towarzyszy synchronizacja zmian aktywności neuronalnej w obszarach skroniowo-ciemieniowych i czołowych. Taki efekt zaobserwowano tylko w warunku *wzrok-wzrok*, a zatem w czasie rzeczywistym społecznej wymiany.

W innym badaniu, prowadzonym przez zespół Jiang, osoby dobrane w pary proszono o przeprowadzenie dialogu lub monologu (Jiang i in., 2012). W każdej z tych opcji zastosowano dwa warianty: badani byli zwrócenii do siebie przodem lub odwrócenii. Wyniki analiz danych fNIRS wykazały, że w warunku dialogu prowadzonego twarzą w twarz wystąpiła zwiększona synchronizacja neuronalna w obszarze lewej dolnej kory czołowej. Nie zaobserwowano podobnego zjawiska w przypadku monologu lub dialogu prowadzonego bez nawiązania kontaktu wzrokowego.

## Podsumowanie

Jak wskazuje powyższy przegląd, wykorzystanie najpopularniejszych dotychczas metod obrazowania aktywności mózgu, takich jak fMRI i EEG, dostarcza wielu cennych, ale jednocześnie niepełnych informacji na temat rozwoju poznania społecznego człowieka. Pokonanie tych ograniczeń umożliwia technika fNIRS, wiążąca zadowalającą rozdzielczość czasową i przestrzenną z nieinwazyjnością i łatwością aplikacji w badaniach wielorakich populacji pediatrycznych i klinicznych. Dzięki fNIRS możliwe jest badanie zjawiska specjalizacji neuronalnej, stanowiącej prawdopodobnie podstawowy mechanizm neurorozwojowy poznania społecznego u niemowląt i dzieci zarówno w rozwoju typowym, jak i atypowym. Przedmiotem badań fNIRS może być nie tylko przetwarzanie podstawowych wskazówek społecznych, ale także funkcjonowanie mózgu społecznego w interakcji. Dzięki wygodzie i bezpieczeństwu stosowania fNIRS od okresu niemowlęcego w populacjach atypowych możliwe jest opracowanie zestawu biomarkerów z zakresu funkcji i łączności funkcjonalnej struktur mózgu, ułatwiających wczesną diagnozę, a w dalszej perspektywie także interwencję służącą poprawie jakości życia. Co więcej, zastosowanie fNIRS daje także unikalną szansę na badanie wpływu języka na mechanizmy neurorozwojowe poznania społecznego u grupy osób z implantami ślimakowymi, które doświadczają wczesnej deprywacji językowej.



Metoda fNIRS zyskuje na popularności wśród badaczy i jest nieustannie doskonalona. Powstają m.in. zautomatyzowane programy umożliwiające precyzyjne dostosowanie rozkładu optod na powierzchni głowy do anatomicznego położenia obszarów zainteresowania (ang. *regions of interest*, ROI; Brigadoi i in., 2018). Ponadto ulepszana jest sama technologia pomiaru. Na rynek wprowadzane są m.in. bezprzewodowe urządzenia pozbawione światłowodów, o wysokim pokryciu powierzchni głowy. Ich zastosowanie istotnie zwiększy trafność ekologiczną pomiarów (Gowerlabs, 2019).

Podsumowując, fNIRS uznać można za obiecującą metodę badania neuronalnych korelatów społecznego funkcjonowania człowieka i zaburzeń w tym zakresie. Wraz z udoskonaleniami aparatury badawczej oraz sposobów analizy i interpretacji danych fNIRS staje się jednym z najistotniejszych narzędzi wpływających na postęp w dziedzinie neuronauki rozwojowej.

## Literatura cytowana

- Aasted, C.M., Yücel, M.A., Cooper, R.J., Dubb, J., Tsuzuki, D., Becerra, L., ..., Boas, D.A. (2015). Anatomical guidance for functional near-infrared spectroscopy: AtlasViewer tutorial. *Neurophotonics*, 2(2), 020801.
- Adolphs, R. (2009). The social brain: Neural basis of social knowledge. *Annual Review of Psychology*, 60, 693–716.
- American Psychiatric Association. (2013). *Diagnostic and statistical manual of mental disorders* (5th ed.). Washington, D.C.: American Psychiatric Publishing.
- Annaz, D., Campbell, R., Coleman, M., Milne, E., Swettenham, J. (2012). Young children with autism spectrum disorder do not preferentially attend to biological motion. *Journal of Autism and Developmental Disorders*, 42(3), 401–408.
- Apperly, I.A., Butterfill, S.A. (2009). Do humans have two systems to track beliefs and belief-like states? *Psychological Review*, 116(4), 953–970.
- Baillargeon, R., Scott, R.M., He, Z. (2010). False-belief understanding in infants. *Trends in Cognitive Sciences*, 14, 110–118.
- Bardi, L., Desmet, C., Nijhof, A., Wiersema, J.R., Brass, M. (2017). Brain activation for spontaneous and explicit false belief tasks overlaps: New fMRI evidence on belief processing and violation of expectation. *Social Cognitive and Affective Neuroscience*, 12(3), 391–400.
- Biswal, B.B. (2012). Resting state fMRI: A personal history. *Neuroimage*, 62(2), 938–944.
- Biswal, B.B., Van Kylen, J., Hyde, J.S. (1997). Simultaneous assessment of flow and BOLD signals in resting-state functional connectivity maps. *NMR in Biomedicine*, 10(4–5), 165–170.
- Bonetti, L.V., Hassan, S.A., Lau, S.T., Melo, L.T., Tanaka, T., Patterson, K.K., Reid, W.D. (2019). Oxyhemoglobin changes in the prefrontal cortex in response to cognitive tasks: a systematic review. *The International Journal of Neuroscience*, 129(2), 195–203.



- Brigadoi, S., Salvagnin, D., Fischetti, M., Cooper, R.J. (2018). Array Designer: automated optimized array design for functional near-infrared spectroscopy. *Neurophotonics*, 5(3), 035010.
- Deen, B., Koldewyn, K., Kanwisher, N., Saxe, R. (2015). Functional organization of social perception and cognition in the superior temporal sulcus. *Cerebral Cortex*, 25(11), 4596–4609.
- De Giacomo, A., Craig, F., D’Elia, A., Giagnotti, F., Matera, E., Quaranta, N. (2013). Children with cochlear implants: cognitive skills, adaptive behaviors, social and emotional skills. *International Journal of Pediatric Otorhinolaryngology*, 77(12), 1975–1979.
- Dennett, D.C. (1978). *Brainstorms: Philosophical essays on mind and psychology*. Cambridge, MA: MIT Press.
- Enns, C.J., Herman, R.C. (2011). Adapting the Assessing British Sign Language Development: Receptive Skills Test into American sign language. *Journal of Deaf Studies and Deaf Education*, 16(3), 362–374.
- Ferrari, M., Mottola, L., Quaresima, V. (2004). Principles, techniques, and limitations of near infrared spectroscopy. *Canadian Journal of Applied Physiology = Revue Canadienne de Physiologie Appliquée*, 29(4), 463–487.
- Ferrari, M., Quaresima, V. (2012). A brief review on the history of human functional near-infrared spectroscopy (fNIRS) development and fields of application. *Neuroimage*, 63(2), 921–935.
- Fox, S.E., Wagner, J.B., Shrock, C.L., Tager-Flusberg, H., Nelson, C.A. (2013). Neural processing of facial identity and emotion in infants at high-risk for autism spectrum disorders. *Frontiers in Human Neuroscience*, 7, 89.
- Fukui, Y., Ajichi, Y., Okada, E. (2003). Monte Carlo prediction of near-infrared light propagation in realistic adult and neonatal head models. *Applied Optics*, 42(16), 2881–2887.
- Geschwind, D.H., Levitt, P. (2007). Autism spectrum disorders: Developmental disconnection syndromes. *Current Opinion in Neurobiology*, 17(1), 103–111.
- Glover, G.H. (2011). Overview of functional magnetic resonance imaging. *Neurosurgery Clinics of North America*, 22(2), 133–139, vii.
- Gordon, I., Voos, A.C., Bennett, R.H., Bolling, D.Z., Pelphrey, K.A., Kaiser, M.D. (2013). Brain mechanisms for processing affective touch. *Human Brain Mapping*, 34(4), 914–922.
- Gowerlabs. (2019). *Lumo. fNIRS neuroimaging ecosystem*. Pobrane z: <https://www.gowerlabs.co.uk/lumo> (dostęp: 4.06.2019).
- Grosse Wiesmann, C., Friederici, A.D., Singer, T., Steinbeis, N. (2017). Implicit and explicit false belief development in preschool children. *Developmental Science*, 20(5).
- Gweon, H., Dodell-Feder, D., Bedny, M., Saxe, R. (2012). Theory of mind performance in children correlates with functional specialization of a brain region for thinking about thoughts. *Child Development*, 83(6), 1853–1868.

- Haman, M. (2018, styczeń). *Neural substrates of false belief processing at the transitional stage (3–5-year olds): fNIRS study*. Plakat zaprezentowany na sesji posterowej podczas "Budapest CEU Conference on Cognitive Development". Budapeszt: Uniwersytet Środkowoeuropejski.
- Hari, R., Henriksson, L., Malinen, S., Parkkonen, L. (2015). Centrality of social interaction in human brain function. *Neuron*, 88(1), 181–193.
- Hirsch, J., Zhang, X., Noah, J.A., Ono, Y. (2017). Frontal temporal and parietal systems synchronize within and across brains during live eye-to-eye contact. *Neuroimage*, 157, 314–330.
- Holper, L., Muehlemann, T., Scholkmann, F., Eng, K., Kiper, D., Wolf, M. (2010). Testing the potential of a virtual reality neurorehabilitation system during performance of observation, imagery and imitation of motor actions recorded by wireless functional near-infrared spectroscopy (fNIRS). *Journal of Neuroengineering and Rehabilitation*, 7, 57.
- Huppert, T.J., Hoge, R.D., Diamond, S.G., Franceschini, M.A., Boas, D.A. (2006). A temporal comparison of BOLD, ASL, and NIRS hemodynamic responses to motor stimuli in adult humans. *Neuroimage*, 29(2), 368–382.
- Hyde, D.C., Aparicio Betancourt, M., Simon, C.E. (2015). Human temporal-parietal junction spontaneously tracks others' beliefs: A functional near-infrared spectroscopy study. *Human Brain Mapping*, 36(12), 4831–4846.
- Hyde, D.C., Simon, C.E., Ting, F., Nikolaeva, J.I. (2018). Functional Organization of the Temporal-Parietal Junction for Theory of Mind in Preverbal Infants: A Near-Infrared Spectroscopy Study. *The Journal of Neuroscience*, 38(18), 4264–4274.
- Jiang, J., Dai, B., Peng, D., Zhu, C., Liu, L., Lu, C. (2012). Neural synchronization during face-to-face communication. *The Journal of Neuroscience*, 32(45), 16064–16069.
- Johnson, M.H., de Haan, M. (2018). *Neurokognitywistyka rozwoju*. Gdańsk: Wydawnictwo Harmonia.
- Keehn, B., Wagner, J.B., Tager-Flusberg, H., Nelson, C.A. (2013). Functional connectivity in the first year of life in infants at-risk for autism: A preliminary near-infrared spectroscopy study. *Frontiers in Human Neuroscience*, 7, 444.
- Kennedy, D.P., Adolphs, R. (2012). The social brain in psychiatric and neurological disorders. *Trends in Cognitive Sciences*, 16(11), 559–572.
- Kielar-Turska, M., Białecka-Pikul, M., Skórska, A. (2006). Rozwój zdolności mentalizacji. Z badań nad związkiem teorii umysłu, sprawności językowych i funkcji zarządzającej. *Psychologia Rozwojowa*, 11(2), 35–47.
- Kikuchi, M., Yoshimura, Y., Shitamichi, K., Ueno, S., Hiraishi, H., Munesue, T., ..., Minabe, Y. (2013). Anterior prefrontal hemodynamic connectivity in conscious 3- to 7-year-old children with typical development and autism spectrum disorder. *Plos One*, 8(2), e56087.
- Lloyd-Fox, S., Begus, K., Halliday, D., Pirazzoli, L., Blasi, A., Papademetriou, M., ..., Elwell, C.E. (2017). Cortical specialisation to social stimuli from the first days

- to the second year of life: A rural Gambian cohort. *Developmental Cognitive Neuroscience*, 25, 92–104.
- Lloyd-Fox, S., Blasi, A., Elwell, C.E. (2010). Illuminating the developing brain: The past, present and future of functional near infrared spectroscopy. *Neuroscience and Biobehavioral Reviews*, 34(3), 269–284.
- Lloyd-Fox, S., Blasi, A., Everdell, N., Elwell, C.E., Johnson, M.H. (2011). Selective cortical mapping of biological motion processing in young infants. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 23(9), 2521–2532.
- Ludlow, A.K., Heaton, P., Deruelle, C. (2013). Decoding actions and emotions in deaf children: Evidence from a biological motion task. *Journal of Cognition and Development*, 14(4), 561–572.
- MacLean, K. (2003). The impact of institutionalization on child development. *Development and Psychopathology*, 15(4), 853–884.
- Miguel, H.O., Lisboa, I.C., Gonçalves, Ó.F., Sampaio, A. (2017). Brain mechanisms for processing discriminative and affective touch in 7-month-old infants. *Developmental Cognitive Neuroscience*, 35, 20–27.
- Minagawa, Y., Xu, M., Morimoto, S. (2018). Toward Interactive Social Neuroscience: Neuroimaging the Real-World Interactions in Various Populations. *The Japanese Psychological Research*, 60(4), 196–224.
- Noonan, M.P., Mars, R.B., Sallet, J., Dunbar, R.I.M., Fellows, L.K. (2018). The structural and functional brain networks that support human social networks. *Behavioural Brain Research*, 355, 12–23.
- Olds, C., Pollonini, L., Abaya, H., Larky, J., Loy, M., Bortfeld, H., ..., Oghalai, J.S. (2016). Cortical Activation Patterns Correlate with Speech Understanding After Cochlear Implantation. *Ear and Hearing*, 37(3), e160–172.
- Onishi, K.H., Baillargeon, R. (2005). Do 15-month-old infants understand false beliefs? *Science*, 308(5719), 255–258.
- Peterson, C.C. (2004). Theory-of-mind development in oral deaf children with cochlear implants or conventional hearing aids. *Journal of Child Psychology and Psychiatry, and Allied Disciplines*, 45(6), 1096–1106.
- Pinti, P., Aichelburg, C., Lind, F., Power, S., Swingler, E., Merla, A., ..., Tachtsidis, I. (2015). Using Fiberless, Wearable fNIRS to Monitor Brain Activity in Real-world Cognitive Tasks. *Journal of Visualized Experiments*, (106), doi: 10.3791/53336
- Pinti, P., Tachtsidis, I., Hamilton, A., Hirsch, J., Aichelburg, C., Gilbert, S., Burgess, P.W. (2018). The present and future use of functional near-infrared spectroscopy (fNIRS) for cognitive neuroscience. *Annals of the New York Academy of Sciences*, doi: 10.1111/nyas.13948
- Reid, V.M., Hoehl, S., Striano, T. (2006). The perception of biological motion by infants: An event-related potential study. *Neuroscience Letters*, 395(3), 211–214.
- Richardson, H., Lisandrelli, G., Riobueno-Naylor, A., Saxe, R. (2018). Development of the social brain from age three to twelve years. *Nature Communications*, 9(1), 1027.

- Risch, N., Hoffmann, T.J., Anderson, M., Croen, L.A., Grether, J.K., Windham, G.C. (2014). Familial recurrence of autism spectrum disorder: Evaluating genetic and environmental contributions. *The American Journal of Psychiatry*, 171(11), 1206–1213.
- Rybakowski, F., Bialek, A., Chojnicka, I., Dziechciarz, P., Horvath, A., Janas-Kozik, M., ..., Dunajska, A. (2014). Zaburzenia ze spektrum autyzmu – epidemiologia, objawy, współzachorowalność i rozpoznawanie [Autism spectrum disorders – epidemiology, symptoms, comorbidity and diagnosis]. *Psychiatria Polska*, 48(4), 653–665.
- Saliba, J., Bortfeld, H., Levitin, D.J., Oghalai, J.S. (2016). Functional near-infrared spectroscopy for neuroimaging in cochlear implant recipients. *Hearing Research*, 338, 64–75.
- Scholkman, F., Holper, L., Wolf, U., Wolf, M. (2013). A new methodical approach in neuroscience: Assessing inter-personal brain coupling using functional near-infrared imaging (fNIRI) hyperscanning. *Frontiers in Human Neuroscience*, 7, 813.
- Sevy, A.B.G., Bortfeld, H., Huppert, T.J., Beauchamp, M.S., Tonini, R.E., Oghalai, J.S. (2010). Neuroimaging with near-infrared spectroscopy demonstrates speech-evoked activity in the auditory cortex of deaf children following cochlear implantation. *Hearing Research*, 270(1–2), 39–47.
- Simion, F., Regolin, L., Bulf, H. (2008). A predisposition for biological motion in the newborn baby. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 105(2), 809–813.
- Steinbrink, J., Villringer, A., Kempf, F., Haux, D., Boden, S., Obrig, H. (2006). Illuminating the BOLD signal: Combined fMRI-fNIRS studies. *Magnetic Resonance Imaging*, 24(4), 495–505.
- Steiner, A.M., Goldsmith, T.R., Snow, A.V., Chawarska, K. (2012). Practitioner's guide to assessment of autism spectrum disorders in infants and toddlers. *Journal of Autism and Developmental Disorders*, 42(6), 1183–1196.
- Strangman, G., Culver, J.P., Thompson, J.H., Boas, D.A. (2002). A quantitative comparison of simultaneous BOLD fMRI and NIRS recordings during functional brain activation. *Neuroimage*, 17(2), 719–731.
- Sundqvist, A., Lyxell, B., Jönsson, R., Heimann, M. (2014). Understanding minds: Early cochlear implantation and the development of theory of mind in children with profound hearing impairment. *International Journal of Pediatric Otorhinolaryngology*, 78(3), 537–543.
- Wellman, H.M., Cross, D., Watson, J. (2001). Meta-analysis of theory-of-mind development: The truth about false belief. *Child Development*, 72(3), 655–684.
- Zaidi, A.D., Birbaumer, N., Fetz, E., Logothetis, N., Sitaram, R. (2018). The hemodynamic initial-dip consists of both volumetric and oxymetric changes correlated to localized spiking activity. *BioRxiv*, doi: 10.1101/259895

Zhang, F., Roeyers, H. (2019). Exploring brain functions in autism spectrum disorder: A systematic review on functional near-infrared spectroscopy (fNIRS) studies. *International Journal of Psychophysiology*, 137, 41–53.

**Streszczenie.** Funkcjonalna spektroskopia bliskiej podczerwieni (ang. *near-infrared spectroscopy*, fNIRS) to technika badawcza pozwalająca na pomiar aktywności funkcjonalnej mózgu. W badaniach przy użyciu fNIRS mogą uczestniczyć młodsze dzieci i niemowlęta, a także osoby, u których występują przeciwwskazania do zastosowania innych technik neuroobrazowania. W związku z powyższym metoda ta jest coraz częściej stosowana w badaniach mechanizmów neurorozwojowych poznania społecznego. Co więcej, jej użycie zwiększa trafność ekologiczną badań, umożliwiając m.in. pomiar aktywności korowej podczas interakcji twarzą w twarz. W artykule omówiono podstawy teoretyczne techniki fNIRS, wskazano jej wady i zalety oraz dokonano przeglądu badań z zastosowaniem fNIRS, ilustrujących znaczenie tej techniki dla dalszego rozwoju dziedziny neuronauki społecznej.

**Słowa kluczowe:** fNIRS, poznanie społeczne, neuronauka społeczna, zaburzenia neurorozwojowe

Data wpłynięcia: 12.06.2019

Data wpłynięcia po poprawkach: 28.11.2019

Data zatwierdzenia tekstu do druku: 4.12.2019