Emergencja myślenia: od biologii pamięci do architektury sztucznej inteligencji w świetle koncepcji Boba Burgina

AUTOR

Fundacja Dobre Państwo

STRESZCZENIE / ABSTRACT

Tekst analizuje koncepcję emergencji jako relacji między różnymi poziomami rzeczywistości, przeciwstawiając ją redukcjonizmowi ontologicznemu. Autor rozważa, czy właściwości systemowe, takie jak myślenie, czy świadomość, są jedynie sumą cech ich najdrobniejszych składników, czy też nowymi jakościami wynikającymi ze specyficznej organizacji materii. W artykule przywołano historyczny kontekst brytyjskiego emergentyzmu oraz rozróżnienie między zachowaniem systemu „tak, jakby" posiadał stany wewnętrzne, a rzeczywistą fenomenologią subiektywnego doświadczenia. Kluczowym wnioskiem jest stwierdzenie, że sama złożoność organizacji nie gwarantuje powstania świadomości, co ma fundamentalne znaczenie dla rozumienia różnic między ludzkim mózgiem a współczesnymi modelami sztucznej inteligencji oraz ich autonomią epistemiczną.

The text analyzes the concept of emergence as a relationship between different levels of reality, contrasting it with ontological reductionism. The author considers whether systemic properties, such as thinking or consciousness, are merely the sum of the characteristics of their smallest components, or new qualities resulting from the specific organization of matter. The article references the historical context of British emergentism and the distinction between a system behaving "as if" it possessed internal states and the actual phenomenology of subjective experience. The key conclusion is that organizational complexity alone does not guarantee the emergence of consciousness, which is fundamental to understanding the differences between the human brain and contemporary artificial intelligence models, as well as their epistemic autonomy.

Artykuł analizuje naturę świadomości i inteligencji przez pryzmat teorii emergencji, stawiając tezę, że zjawiska te nie są prostą sumą elementów biologicznych czy cyfrowych, lecz wynikiem specyficznej organizacji materii i jej materialnej plastyczności. Autor argumentuje, że kluczem do zrozumienia umysłu nie jest poszukiwanie „punktu zapalnego" świadomości w pojedynczych neuronach, lecz analiza relacji między poziomami rzeczywistości – od molekularnych zmian synaptycznych (na przykładzie badań Erica Kandela) po złożone systemy pamięci i predykcji. Szczególną uwagę poświęcono paradoksowi ograniczeń: to właśnie biologiczne deficyty energetyczne i selektywna natura pamięci wymuszają powstanie mechanizmów filtrowania i przewidywania, które stanowią fundament funkcjonalnej inteligencji. Tekst rzuca wyzwanie współczesnemu rozumieniu AI, odróżniając emergentne kompetencje funkcjonalne (zdolność do rozwiązywania zadań) od świadomości fenomenalnej, sugerując, że prawdziwa inteligencja wymaga nie tylko gromadzenia danych, ale zdolności do materialnego przekształcania własnej architektury pod wpływem historii i ucieleśnionego doświadczenia.

SŁOWA KLUCZOWE

emergencja myślenia | architektura sztucznej inteligencji | redukcjonizm ontologiczny | słaba emergencja | silna emergencja | przyczynowość odgórna | budżet energetyczny mózgu | path dependence | tożsamość autobiograficzna | mózg predykcyjny | kodowanie predykcyjne | dynamika engramów | AGI | selektywne zapominanie | autonomia epistemiczna

Emergencja jako relacja między poziomami rzeczywistości

Emergencja myślenia. Ciało, czas, zmysły i granice świadomości między biologią a sztuczną inteligencją

Od części do całości: emergencja jako problem nauki o złożoności. Pytanie o emergencję początkowo sprawia wrażenie zagadnienia terminologicznego, dopóki nie okaże się, że od przyjętej odpowiedzi zależy sposób rozumienia życia, umysłu, świadomości, organizacji społecznej, a

współcześnie także sztucznej inteligencji. Jeśli bowiem wszystkie własności układu można bez reszty wyprowadzić z cech jego najdrobniejszych składników, opis wyższych poziomów rzeczywistości zyskuje status pomocniczy: biolog może mówić o organizmie, psycholog o pamięci, ekonomista o rynku, a informatyk o inteligentnym agencie, lecz ostateczna prawda o tych zjawiskach tkwiłaby niżej, w fizyce elementów składowych. Jeżeli jednak organizacja materii wytwarza własności i zdolności wymagające autonomicznego poziomu opisu, wówczas świat nie przypomina zbioru rosyjskich matrioszek, w którym każda większa figura jest tylko opakowaniem dla mniejszej. Przypomina raczej hierarchię układów, w której ta sama materia, zależnie od sposobu zorganizowania, może uczestniczyć w powstawaniu jakości niemożliwych do sensownego opisania językiem izolowanych składników. W tym znaczeniu emergencja nie jest jedynie ozdobnym synonimem słowa „złożoność".

Jest ona hipotezą dotyczącą relacji pomiędzy poziomami rzeczywistości. Materiał stanowiący punkt wyjścia niniejszych rozważań ujmuje tę intuicję obrazowo: neurony stają się myślą, a kod rozmową; właściwość systemowa nie jest po prostu sumą cech jego części. Jednocześnie materiał ten odróżnia zachowanie systemu „tak, jakby" posiadał stany wewnętrzne od rzeczywistej fenomenologii, czyli istnienia subiektywnego doświadczenia. Obie intuicje należy zachować, lecz wymagają one metodologicznego zaostrzenia.

Z faktu, że miliardy neuronów tworzą układ zdolny do świadomego doświadczenia, nie wynika automatycznie, że wystarczająco skomplikowana organizacja dowolnych elementów musi stać się świadoma. Podobnie z faktu, że model językowy prowadzi spójną rozmowę, nie wynika, iż zachodzi w nim proces odpowiadający ludzkiej rozmowie na każdym poziomie organizacji. Emergencja nie jest zasadą pozwalającą przeskoczyć od obserwowanego zachowania do ontologicznego twierdzenia o tym, „co istnieje wewnątrz" systemu. Przeciwnie: dobrze użyta staje się narzędziem utrudniającym taki skok, gdyż zmusza do wskazania konkretnego mechanizmu, poziomu organizacji oraz rodzaju postulowanej nowości.

Historycznie problem ten jest znacznie starszy od informatyki i neuronauki. Jego korzenie tkwią w arystotelesowskim rozumieniu substancji jako złożenia materii i formy. Forma nie była tam dodatkowym elementem dołożonym do materii, lecz sposobem jej organizacji, dzięki któremu całość stawała się określonego rodzaju rzeczą. W nowożytności mechanistyczna rewolucja naukowa skierowała poznanie w przeciwną stronę: sukcesy fizyki utwierdziły przekonanie, że prawdziwe wyjaśnienie powinno prowadzić od zjawiska złożonego ku prostszym składnikom i podstawowym prawom. Nie był to błąd – redukcja stała się jednym z najpotężniejszych instrumentów nauki. Problem pojawił się dopiero wtedy, gdy z owocności redukcji metodologicznej zaczęto

wyprowadzać silniejszą tezę metafizyczną: że pełna znajomość poziomu podstawowego czyni wszystkie poziomy wyższe poznawczo zbędnymi.

Historia emergentyzmu to w dużej mierze historia sprzeciwu wobec tego drugiego kroku. W XIX wieku John Stuart Mill zauważył, że skutki współdziałania przyczyn nie zawsze mają charakter prostego dodawania. Odróżniał sytuacje, w których efekt całości jest sumą efektów składników, od przypadków, gdy określona organizacja prowadzi do jakościowego rezultatu wymagającego odrębnej prawidłowości opisowej. George Henry Lewes w 1875 roku wprowadził termin „emergence" w sensie filozoficznym, a późniejszy brytyjski emergentyzm, rozwijany m.in. przez Samuela Alexandra i C. D. Broada, próbował znaleźć drogę między skrajnym mechanicyzmem a witalizmem. Emergentysta nie musiał postulować tajemniczej siły życiowej; mógł przyjąć, że organizm jest w całości materialny, a jednocześnie twierdzić, że określona organizacja komponentów wytwarza właściwości nieopisalne jako zwykła suma cech części. Najbardziej dojrzałą postać klasyczny brytyjski emergentyzm osiągnął u C. D. Broada. Jego rozważania nie ograniczały się już tylko do biologii, lecz dotyczyły relacji między naukami: czy chemia jest w zasadzie tylko skomplikowaną fizyką, biologia chemią, psychologia neurobiologią, a życie społeczne wyjątkowo zagmatwaną psychologią jednostek?

Rozróżnienie między emergencją epistemiczną a ontologiczną

Broad proponował kryterium, według którego własność całości jest emergentna wtedy, gdy nie można jej wyprowadzić nawet z pełnej wiedzy o cechach składników rozpatrywanych osobno i w innych układach. Kluczowe znaczenie ma zatem nie tylko to, z czego system jest zbudowany, ale również sposób powiązania jego części. Współczesny czytelnik powinien jednak zachować ostrożność.

Niemożność przewidzenia danej własności w 1925 roku nie dowodzi jej nieredukowalności w roku 2026. Historia nauki zna wiele zjawisk uznawanych niegdyś za jakościowo zagadkowe, dla których później odnaleziono mechanizmy niższego poziomu. Niewiedza obserwatora nie może sama stanowić dowodu ontologicznej nowości. To rozróżnienie prowadzi do istotnego rozgraniczenia pomiędzy emergencją epistemiczną a ontologiczną.

Pierwsza z nich mówi przede wszystkim o granicach poznania, obliczeń lub przewidywania. Układ może być całkowicie zdeterminowany przez reguły niższego poziomu, a mimo to jego przyszłe zachowanie może być praktycznie nieprzewidywalne bez przeprowadzenia procesu, symulacji lub

bezpośredniej obserwacji jego ewolucji. Druga odmiana stawia tezę znacznie mocniejszą: wraz z powstaniem określonej organizacji pojawiają się w świecie własności lub moce przyczynowe, których nie da się ontologicznie utożsamić z cechami poziomu podstawowego.

Właśnie pomieszanie tych znaczeń odpowiada za znaczną część sporów dotyczących świadomości. Stwierdzenie: „nie potrafimy przewidzieć zachowania sieci neuronowej na podstawie wiedzy o każdym parametrze", jest zdaniem nieporównanie słabszym niż teza, że „sieć neuronowa wytworzyła nowy, nieredukowalny rodzaj podmiotowości". Pierwsze może dotyczyć problemu obliczeniowego; drugie jest stanowiskiem metafizycznym.

Współczesna filozofia nauki ujmuje napięcie charakterystyczne dla emergencji poprzez dwa pojęcia: zależność i autonomię. Zjawisko emergentne nie pojawia się z nicości – jest zależne od substratu, organizacji i procesów niższego poziomu. Zmiana istotnych warunków bazowych modyfikuje lub unicestwia zjawisko wyższego poziomu. Zarazem jednak opis tego poziomu może posiadać własną autonomię: specyficzne prawidłowości, kategorie, modele wyjaśniające i relacje przyczynowe.

Właśnie dlatego pojęcie emergencji lokuje się pomiędzy dualizmem a skrajnym redukcjonizmem. Dualizm zbyt łatwo odrywa własności wyższe od materialnego podłoża, natomiast redukcjonizm może pomylić materialną zależność z wyjaśnieniową zbędnością poziomu wyższego. W tym miejscu należy rozdzielić trzy rodzaje redukcji, ponieważ słowo „redukcjonizm" bywa używane tak szeroko, że zaczyna bardziej zaciemniać niż objaśniać spór.

Redukcja ontologiczna głosi, że wszystkie istniejące rzeczy są ostatecznie zbudowane z tego samego fizycznego tworzywa i nie wymagają postulowania odrębnych substancji. Redukcja wyjaśniająca jest mocniejsza: zakłada, że poprawne wyjaśnienie zjawiska wyższego poziomu można zasadniczo zastąpić wyjaśnieniem na poziomie niższym. Redukcja metodologiczna jest natomiast strategią badawczą: aby zrozumieć układ, rozbieramy go na części i analizujemy ich działanie.

Słaba emergencja jako autonomiczny opis systemów złożonych

Można zaakceptować pierwszą i szeroko stosować trzecią perspektywę, nie przyjmując jednocześnie drugiej. Biolog może być materialistą, badać kanały jonowe pojedynczych neuronów, a wciąż uważać pojęcia pamięci roboczej, reprezentacji przestrzennej czy kontroli wykonawczej za niezbędne do wyjaśnienia funkcjonowania organizmu. Nie ma w tym sprzeczności. Właśnie na tę pomyłkę zwracał uwagę fizyk Philip W. Anderson w słynnym artykule More Is Different z 1972

roku. Anderson nie negował, że materia podlega prawom fizyki; kwestionował natomiast przejście od tego twierdzenia do „hipotezy konstrukcjonistycznej", według której znajomość reguł podstawowych pozwala automatycznie odtworzyć wszystkie prawidłowości poziomów wyższych. W fizyce faz skondensowanych nowe poziomy organizacji wprowadzają nowe pojęcia, symetrie, ich złamania oraz prawa efektywne, których sens ujawnia się dopiero w zbiorowym zachowaniu ogromnej liczby składników. „Więcej" może więc rzeczywiście być „inne", nie wymagając przy tym założenia, że system przestaje podlegać fizyce. Ta subtelność jest kluczowa dla dalszej analizy AI: odmienne prawa opisu efektywnego nie muszą oznaczać pojawienia się nowej substancji.

Współczesnym rozwinięciem tego umiarkowanego stanowiska jest pojęcie słabej emergencji. Mark Bedau zaproponował, aby za słabo emergentne uznawać między innymi takie własności makroskopowe, które choć wynikają z reguł poziomu podstawowego, wymagają rozwinięcia dynamiki systemu – zazwyczaj poprzez symulację – by można było je poznać. Własność nie musi zatem łamać praw poziomu niższego, aby być poznawczo autonomiczna. Istotne jest to, że droga od mikroreguł do makrozachowania często nie posiada krótkiego analitycznego skrótu. Trzeba niejako pozwolić systemowi "wydarzyć się".

Automaty komórkowe stanowią tu klasyczny przykład: lokalne reguły mogą być banalnie proste, podczas gdy powstające z nich wzorce długookresowe okazują się złożone, trwałe i zdolne do oddziaływania. Do systemu nie dodano nic nadnaturalnego, jednak sama znajomość lokalnej reguły nie zastępuje analizy dynamiki całości. Z punktu widzenia nauk o złożoności jest to zmiana zasadnicza. Złożoność nie oznacza bowiem wyłącznie „bardzo wielu części". Miliard niezależnych ziaren piasku może być liczebnie ogromnym układem, a pozostawać organizacyjnie prostszym niż znacznie mniejsza sieć silnie sprzężonych elementów.

Znaczenie mają zależności, nieliniowość, sprzężenia zwrotne, topologia sieci, progi, opóźnienia, historia układu oraz relacja między lokalną dynamiką a globalnym wzorcem. Dlatego pojęcie „sumy części" bywa mylące: elementy w systemie nie zachowują się tak, jak gdyby były w izolacji. Organizacja ogranicza dostępne im stany, zmienia prawdopodobieństwo przejść między nimi i tworzy warunki brzegowe, które same stają się elementem wyjaśnienia. Współczesne ujęcia mechanistyczne nie muszą więc stać w konflikcie z emergencją. Mechanizm jest przecież właśnie zorganizowanym układem części wykonujących określone aktywności, a nie workiem elementów niezależnych od swojej konfiguracji. Można to zilustrować prostym przykładem, bez odwoływania się jeszcze do świadomości.

Pojedyncza cząsteczka wody nie posiada temperatury w tym samym sensie, w jakim przypisujemy ją makroskopowej próbce. Temperatura jest właściwością statystyczną zbioru stopni swobody. Nie oznacza to pojawienia się pozafizycznej „substancji temperatury", lecz fakt, że przy przejściu od

jednego poziomu organizacji do innego pojawiają się zmienne, które stają się najbardziej adekwatnym językiem opisu nowej skali. Podobnie ciśnienie, lepkość, faza materiału czy fala nie są dodatkowymi cząstkami ukrytymi obok molekuł – są własnościami zbiorowymi.

Emergencja świadomości między opisem a przyczynowością

Jeśli zatem świadomość ma być zjawiskiem emergentnym, właściwe pytanie nie powinno brzmieć: „w którym neuronie znajduje się świadomość?", podobnie jak nie pytamy, w której cząsteczce kryje się temperatura. Należy raczej ustalić, czy istnieje taki poziom organizacji procesów neuronalnych, na którym pojawiają się prawidłowości konstytutywne dla świadomego doświadczenia. Ta analogia jest jednak zaledwie punktem wyjścia, a nie rozwiązaniem.

Temperatura to własność dobrze zoperacjonalizowana i mierzalna, teoretycznie powiązana z mechaniką statystyczną mikrostanów. W przypadku świadomości brakuje nam równie dojrzałego mostu teoretycznego. Możemy mierzyć aktywność mózgu, raporty z doświadczeń, zachowanie czy integrację procesów, ale przejście od tych obserwacji do twierdzenia o istnieniu subiektywnego „jak to jest być" danym systemem pozostaje jednym z najbardziej spornych problemów filozofii umysłu. Dlatego przywoływanie emergencji jako odpowiedzi na zagadkę świadomości grozi błędem ignotum per ignotum: wyjaśniamy rzecz nieznaną innym pojęciem, którego mechanizmu również nie określiliśmy. Stwierdzenie, że „świadomość wyłania się z mózgu", może być poprawnym programem badawczym, lecz samo w sobie nie stanowi jeszcze wyjaśnienia.

W tym miejscu pojawia się rozróżnienie na emergencję słabą i silną. W ujęciach słabych właściwości wyższego poziomu pozostają w pełni zgodne z fizykalizmem: zależą od stanów fizycznych, choć mogą wymagać własnego poziomu opisu, modeli i pojęć. Silna emergencja stawia większe wymagania. Zakłada ona, że poziom emergentny posiada właściwości lub moce przyczynowe niewyczerpywalne przez kompletny opis fizycznej podstawy, albo że relacja między podstawą a emergentem nie ma charakteru metafizycznej konieczności. Współczesna literatura wskazuje świadomość jako głównego kandydata do tak rozumianej silnej emergencji, jednak stanowisko to jest filozoficznie znacznie bardziej kosztowne i dalekie od naukowego konsensusu.

Koszt ten obrazuje problem przyczynowości odgórnej. Jeśli wyższy poziom jest czymś rzeczywiście nowym, a nie tylko innym opisem tych samych procesów, należy zapytać, czy może on wpływać na elementy poziomu niższego. Organizm jako całość zdaje się przecież oddziaływać na zachowanie swoich komórek, zamiar człowieka na ruch mięśni, a normy instytucji na działania jednostek.

Z perspektywy metafizyki fizykalistycznej pojawia się jednak trudność, którą precyzyjnie opisał Jaegwon Kim. Jeśli każde zdarzenie fizyczne ma wystarczającą przyczynę fizyczną, to dodatkowa przyczyna mentalna lub emergentna wydaje się albo zbędna, albo prowadzi do systematycznego przyczynowego nadokreślenia. Jeżeli natomiast zdarzenie mentalne zastępuje przyczynę fizyczną, naruszona zostaje zasada domknięcia przyczynowego domeny fizycznej. Spór o emergencję przestaje być więc dyskusją o efektownym słowie „całość", a staje się pytaniem o to, co dokładnie oznacza twierdzenie, że całość coś robi.

W biologii można częściowo ominąć tę trudność, traktując przyczynowość odgórną nie jako tajemniczą siłę przemieszczającą atomy wbrew fizyce, lecz jako działanie ograniczeń organizacyjnych. Temperatura organizmu, architektura tkanki, stężenie hormonów czy zachowanie całego zwierzęcia zmieniają warunki, w których funkcjonuje pojedyncza komórka. Żadne prawo fizyki nie zostaje zawieszone; zmienia się natomiast przestrzeń dostępnych stanów i prawdopodobieństwo określonych trajektorii.

Ograniczenia energetyczne jako warunek inteligencji

Organizacja makroskopowa może zatem posiadać moc wyjaśniającą bez postulowania siły konkurencyjnej wobec fizyki. Podobny zabieg okaże się istotny przy analizie ucieleśnienia: ciało organizuje poznanie poprzez ustanawianie warunków brzegowych, kosztów, możliwości działania i sygnałów wartościujących, nie będąc przy tym żadnym metafizycznym dodatkiem do mózgu. Z tej perspektywy szczególnego znaczenia nabiera zawarta w książce Burgina teza o przepływie energii. Burgin opisuje emergencję jako proces, w którym odpowiednio zorganizowany przepływ energii prowadzi do powstawania nowych wzorców, zestawiając biologiczną gospodarkę energetyczną mózgu z cyfrową infrastrukturą AI. Intuicja ta jest wartościowa, lecz wymaga ograniczenia.

Energia jest niezbędna do utrzymywania systemów dalekich od równowagi termodynamicznej, do metabolizmu, transmisji neuronalnej, plastyczności, obliczeń cyfrowych i pracy organizmu. Sam przepływ energii nie tworzy jednak poznania. Huragan, płomień czy konwekcja atmosferyczna również stanowią złożone struktury podtrzymywane energią, a nie mamy powodu przypisywać im pamięci autobiograficznej, reprezentacji siebie czy zdolności wnioskowania. Dla emergencji poznawczej potrzebna jest zatem nie energia jako taka, lecz szczególna organizacja przepływu energii i informacji w systemie zdolnym do zachowywania stanów, modyfikowania swojej struktury, porównywania wyników z oczekiwaniami i wykorzystywania różnic do przyszłego działania. Ta korekta prowadzi do pojęcia kluczowego dla dalszego wywodu: ograniczenie nie musi być jedynie defektem systemu; może być warunkiem jego organizacji.

Burgin wielokrotnie odwołuje się do około dwudziestowatowego budżetu energetycznego ludzkiego mózgu, sugerując, że ewolucyjny niedobór wymusił selekcję, hierarchizację i predykcję. Nie należy z tego tworzyć prostego prawa, wedle którego "mało energii produkuje świadomość". Można jednak postawić tezę bardziej defensywną: organizm o ograniczonym budżecie metabolicznym nie może analizować wszystkich bodźców z jednakową szczegółowością, zapamiętywać całego strumienia sensorycznego i rozważać każdego możliwego działania. Musi filtrować. Musi przewidywać. Musi ignorować. Musi nadawać znaczenie. Musi decydować, który błąd jest wart kosztownej aktualizacji, a który można pominąć. Deficyt zasobów może zatem sprzyjać powstawaniu architektur selekcyjnych, będących niezbędnym komponentem złożonego poznania. Tu ujawnia się paradoks emergencji: doskonalszy komponent nie zawsze tworzy doskonalszy system.

Organizm pamiętający każdy szczegół z jednakową wagą mógłby okazać się poznawczo mniej sprawny niż ten zdolny do zapominania. Układ sensoryczny reagujący z taką samą intensywnością na każdy sygnał byłby gorszy od systemu ignorującego przewidywalne tło. System rozważający wszystkie możliwe decyzje bez mechanizmu priorytetyzacji mógłby nigdy nie przejść od analizy do działania. Właściwości, które na poziomie części wyglądają jak braki — ograniczona przepustowość, selektywna pamięć, habituacja, heurystyki, automatyzacja — mogą na poziomie całego organizmu stanowić warunki funkcjonalnej inteligencji. Właśnie tutaj pojęcie emergencji spotyka się z problemem ciała: organizm nie jest nieskończonym komputerem rozwiązującym abstrakcyjne zadania, lecz skończonym systemem, który musi działać, zanim uzyska pełną informację. Dlatego przeciwstawienie redukcjonizmu i holizmu okazuje się zbyt prymitywne; nauka potrzebuje obu tych ruchów poznawczych.

Redukcja rozkłada system na komponenty, by poznać mechanizm, a następnie rekonstruuje organizację, ponieważ element wyrwany z sieci zależności może przestać pełnić funkcję, którą posiadał w całości. Neuron poza siecią nie ma przekonania, gen poza systemem regulacji nie ma funkcji fenotypowej, pojedynczy token modelu językowego nie prowadzi rozmowy, a człowiek wyjęty z czasu, środowiska, kultury i pamięci nie jest adekwatnym modelem działającego podmiotu. Właściwym przeciwnikiem analizy emergentystycznej nie jest więc redukcja jako metoda, lecz błąd mereologiczny polegający na zakładaniu, że wyjaśnienie części automatycznie stanowi kompletne wyjaśnienie całości.

Stąd można sformułować roboczą definicję obowiązującą w dalszych częściach artykułu. Emergencją będziemy nazywać pojawianie się na określonym poziomie organizacji stabilnych własności, regularności lub zdolności systemowych zależnych od elementów poziomu niższego, lecz wymagających uwzględnienia sposobu ich organizacji i interakcji. Definicja ta celowo nie przesądza o silnej emergencji ontologicznej. Pozwala mówić o emergentnych procesach biologicznych,

poznawczych i obliczeniowych bez przemycania założenia, że powstała nowa substancja albo nieredukowalna siła. Dopiero w każdym konkretnym przypadku trzeba będzie ustalić, czy autonomia jest wyłącznie epistemiczna, obliczeniowa, funkcjonalna, przyczynowa czy ontologiczna. Tak skonstruowane pojęcie umożliwia powrót do najbardziej ambitnej intuicji książki Burgina.

Emergencja kompetencji funkcjonalnych nie jest tożsama z emergencją świadomości

Sztucznej inteligencji nie trzeba analizować ani jako magicznego artefaktu nagle obdarzonego cechami umysłu, ani jako "zwykłego programu", którego każde zachowanie dałoby się sprowadzić do instrukcji napisanych przez człowieka. Współczesne systemy uczące się komplikują ten klasyczny obraz. Twórca określa architekturę, dane, funkcję celu i warunki treningu, lecz nie zapisuje ręcznie wszystkich reprezentacji ani strategii, które wyłaniają się w procesie uczenia. Materiał trafnie uczynił z tego przejścia — od programowania odpowiedzi do konstruowania procedur uczenia — jeden ze swoich motywów przewodnich.

Nie oznacza to jednak, że sieć "ewoluuje" w sposób tożsamy z organizmem biologicznym, ani że nieprzejrzystość jej reprezentacji dowodzi posiadania podmiotowości. Chodzi o coś bardziej precyzyjnego: pomiędzy projektem inżyniera a zachowaniem wytrenowanego systemu pojawiła się warstwa nabytej organizacji, która sama w sobie wymaga badania. W tym punkcie problem emergencji przestaje być abstrakcyjnym sporem filozofów. Jeśli system nabywa reprezentacje, których konstruktor nie projektował pojedynczo; jeśli jego zachowanie zależy od globalnej konfiguracji parametrów i określone kompetencje ujawniają się dopiero na poziomie współdziałania wielu elementów — wówczas język emergencji staje się poznawczo użyteczny. Należy jednak konsekwentnie oddzielać emergencję kompetencji od emergencji świadomości. System może odkryć strategię gry, generalizować regułę czy wykonywać wieloetapowe rozumowanie, nie dając dowodu na istnienie jakiejkolwiek pierwszoosobowej perspektywy. Zdolność jest własnością funkcjonalną; świadomość fenomenalna zaś hipotezą o istnieniu doświadczenia. Pomiędzy nimi nie wolno stawiać słowa "emergencja" jak kładki zasłaniającej brakujące przęsła.

Właśnie dlatego dalsza droga musi prowadzić z powrotem ku biologii. Aby ustalić, czy sztuczny system może przejawiać coś więcej niż emergentne kompetencje, trzeba najpierw zrozumieć, co właściwie wyłania się w systemie biologicznym. Nie wystarczy wiedzieć, że mózg składa się z neuronów. Trzeba zbadać, jak organizm uczy się poprzez fizyczną zmianę połączeń, jak odróżnia informację wartą uwagi od szumu, jak pamięć buduje ciągłość w czasie i jak zmysły konstruują

roboczy model środowiska. Należy zrozumieć, w jaki sposób błąd predykcji modyfikuje ten model oraz dlaczego emocja, zamiast być przeciwnikiem rozumu, może stanowić mechanizm nadawania informacji wartości. W tym miejscu ślimak morski Erica Kandela, pacjent H.M., predykcyjny mózg, ciało Damasio i ucieleśniony podmiot przestaną być jedynie luźnymi przykładami.

Pamięć jako materialna reorganizacja systemu

Materia nie tylko organizuje się, lecz zaczyna zachowywać swoją przeszłość i wykorzystywać ją do przewidywania przyszłości. Dopiero w tym punkcie można zadać właściwe pytanie o myślenie. Nie brzmi ono bowiem: ile elementów trzeba połączyć, aby pojawił się umysł?

Brzmi znacznie trudniej: jakiego rodzaju organizacja pozwala systemowi posiadać przeszłość, modelować przyszłość, odróżniać siebie od środowiska, przypisywać zdarzeniom znaczenie, korygować własne przewidywania i działać w świecie, którego nie może zatrzymać, aby spokojnie go obliczyć? W tym pytaniu spotykają się emergencja, pamięć, ciało, czas i zmysły. To właśnie od biologicznych warunków uczenia się trzeba rozpocząć poszukiwanie odpowiedzi.

Jeśli emergencja ma być czymś więcej niż słowem oznaczającym naszą niewiedzę, jednym z pierwszych pytań musi być pytanie o pamięć. System całkowicie pozbawiony zdolności zachowania skutków własnej historii może reagować na bieżący bodziec, lecz trudno mówić o jego uczeniu się w znaczeniu silniejszym niż chwilowa zmiana stanu. Uczenie wymaga asymetrii czasu: doświadczenie przeszłe musi w jakiś sposób zmienić sposób reagowania systemu na doświadczenie przyszłe.

To tutaj biologiczne poznanie ujawnia swoją materialność. Wspomnienie nie jest niematerialnym zapisem unoszącym się ponad organizmem, lecz skutkiem reorganizacji układu, który po doświadczeniu nie jest już dokładnie tym samym układem, jakim był przed nim. Badania Erica Kandela nad Aplysia californica stanowią punkt wyjścia dla tezy, że uczenie pozostawia fizyczny ślad w układzie nerwowym. Intuicję tę należy jednak uwolnić od zbyt prostego równania: pamięć nie jest jedną zmienioną synapsą, podobnie jak książka nie jest pojedynczą literą, choć bez liter książka nie mogłaby istnieć.

Kandel dokonał strategicznego wyboru metodologicznego. Zamiast rozpoczynać od najbardziej złożonych postaci ludzkiej pamięci, postanowił badać prostszy układ nerwowy, w którym zależność pomiędzy doświadczeniem, zachowaniem i zmianą neuronalną można było analizować z rozdzielczością niedostępną w ówczesnych badaniach ssaków. Aplysia, morski mięczak o stosunkowo niewielkiej liczbie neuronów, posiada wyjątkowo duże i często identyfikowalne

komórki nerwowe. Pozwalało to wielokrotnie badać te same elementy określonych obwodów, zamiast obserwować jedynie statystyczny ślad aktywności anonimowych populacji neuronalnych.

Sam Kandel wspominał, że wybór prostego bezkręgowca spotykał się początkowo ze sceptycyzmem części środowiska; dominowało przekonanie, że problemy pamięci człowieka wymagają badania złożonego mózgu. Jego założenie było jednak inne: jeżeli uczenie jest cechą układów nerwowych, podstawowe mechanizmy jego realizacji mogą być ewolucyjnie konserwatywne. Dlatego właśnie prosty organizm może odsłonić regułę, którą złożoność ssaczego mózgu raczej maskuje niż unieważnia. Najbardziej klasycznym obiektem badań stał się odruch cofania skrzela, którego intensywność można zmieniać doświadczeniem. Powtarzany nieszkodliwy bodziec prowadzi do habituacji, czyli stopniowego osłabienia reakcji. Bodziec silny lub awersyjny może natomiast wywołać sensytyzację, zwiększając reaktywność na kolejne sygnały.

Pamięć jako materialna reorganizacja systemu

W późniejszych doświadczeniach badano również formy warunkowania. Ważna była nie tyle zoologiczna osobliwość ślimaka, co możliwość prześledzenia pełnego ciągu przyczynowego: od bodźca środowiskowego, przez określony obwód neuronalny i zmianę efektywności transmisji synaptycznej, aż po modyfikację zachowania. Badania te dostarczyły silnych dowodów na rzecz plastyczności synaptycznej jako mechanizmu uczestniczącego w przechowywaniu informacji nabytej przez doświadczenie. Kandel i współpracownicy wykazywali, że proste formy uczenia odpowiadają zmianom efektywności istniejących już połączeń, a czas utrzymywania się tych zmian może korelować z czasem trwania śladu pamięciowego. Nie należy jednak twierdzić, że Kandel "odkrył, iż pamięć jest synapsą" – jego wnioski były subtelniejsze.

Pokazały one, że doświadczenie może trwale modyfikować skuteczność komunikacji między komórkami nerwowymi i że zmiany te uczestniczą w procesie uczenia. Okazało się ponadto, że krótkotrwałe i długotrwałe przechowywanie informacji to procesy różniące się mechanizmem biologicznym. W prostych formach sensytyzacji Aplysia krótkotrwałe zmiany opierały się przede wszystkim na modyfikacji istniejących białek oraz transmisji synaptycznej. Przekształcenie doświadczenia w trwałą zmianę wymagało natomiast aktywacji ekspresji genów, syntezy nowych białek i strukturalnej przebudowy połączeń. Kandel podsumował ten program badawczy następującą zasadą: krótkotrwałe przechowywanie pamięci może wykorzystywać zmianę działania istniejących struktur, natomiast utrwalanie długotrwałe angażuje zmianę samych warunków przyszłego działania komórki, włącznie ze wzrostem i modyfikacją połączeń. Jest to moment o znaczeniu wykraczającym poza neurobiologię pamięci. Organizm uczący się posiada bowiem

zdolność materialnego przekształcania własnej przyszłości pod wpływem przeszłości. Bodziec nie tylko wywołuje reakcję; pozostawia w systemie zmianę, która modyfikuje prawdopodobieństwo kolejnych odpowiedzi. Przeszłość zostaje niejako wpisana w aktualną strukturę organizmu. Pamięć nie jest zatem magazynem istniejącym obok procesów poznawczych. Jest jednym ze sposobów, w jaki historia systemu staje się częścią jego bieżącej architektury.

W najprostszym przypadku oznacza to zmianę siły synaptycznej; w bardziej złożonych formach pamięci – reorganizację całych zespołów komórek, sieci, strategii przywoływania, relacji semantycznych i reprezentacji kontekstu. Z perspektywy emergencji szczególnie istotne jest to, że własność systemowa – zdolność zachowania doświadczenia – nie pojawia się obok materii, lecz jako trwała zmiana sposobu, w jaki materia oddziałuje sama ze sobą.

Badania Kandela realizowały wcześniejszą intuicję Donalda Hebba, choć warto zachować tu pojęciową precyzję. Popularne powiedzenie "neurons that fire together wire together" jest późniejszą kondensacją zasady hebbowskiej, a nie dosłownym cytatem z Hebba. W pracy The Organization of Behavior z 1949 roku proponował on, że jeżeli aktywność jednego neuronu wielokrotnie uczestniczy w pobudzaniu drugiego, zachodzą zmiany zwiększające skuteczność tego związku. Znaczenie tej hipotezy polegało na połączeniu psychologicznego uczenia z plastycznością fizycznego obwodu. System nerwowy przestał być traktowany jako urządzenie o stałej architekturze, przez które jedynie przepływają zmienne informacje. Informacja mogła przebudowywać urządzenie, które ją przetwarzało. To kluczowa cecha systemów uczących: program i stan maszyny nie są już całkowicie od siebie oddzielone.

Późniejsze badania nad długotrwałym wzmocnieniem synaptycznym (LTP), szczególnie prace Terje Lømo i Timothy'ego Blissa, dostarczyły kolejnego modelu trwałej, zależnej od aktywności zmiany efektywności synaps. LTP nie jest oczywiście "pamięcią" w prostym sensie, a utożsamianie pamięci z dowolnym wzmocnieniem synaptycznym byłoby redukcjonistycznym skrótem. Znaczenie tego zjawiska jest inne: pokazuje ono biologiczną możliwość długotrwałego modyfikowania właściwości sieci przez określony przebieg wcześniejszej aktywności. W neuronach hipokampa ważną rolę odgrywają między innymi receptory NMDA, napływ jonów wapnia, aktywacja kaskad sygnałowych i kinaz oraz mechanizmy prowadzące do zmiany liczby i właściwości receptorów AMPA. Przy długotrwałych zmianach uruchamiane są również procesy transkrypcyjne, w których istotną rolę pełnią szlaki związane z CREB. Biologiczny zapis nie przypomina więc wyrycia statycznego znaku w materiale.

Informacja jako materialna reorganizacja systemu

W rzeczywistości proces ten bardziej odpowiada zmianie reguł przyszłej reaktywności układu. Właściwość ta pozwala inaczej spojrzeć na samo pojęcie informacji. W potocznej informatyce łatwo wyobrazić sobie informację jako zawartość przechowywaną w neutralnym pojemniku: plik na dysku, tekst w bazie danych czy liczbę w komórce pamięci. W biologii podział między informacją a nośnikiem jest mniej wyraźny. Jeśli doświadczenie zmienia skuteczność synaps, ekspresję genów, właściwości błon, geometrię kolców dendrytycznych i relacje między komórkami, to informacja zostaje zakodowana jako sposób działania układu. Nośnik nie tylko "ma" informację; zostaje przez nią przeorganizowany.

Różnica ta staje się kluczowa przy porównywaniu mózgu z systemami cyfrowymi. Dostęp modelu AI do zewnętrznego rekordu tekstowego jest czym innym niż modyfikacja parametrów modelu, a oba te zjawiska różnią się fundamentalnie od plastyczności biologicznej zachodzącej w żywym, metabolizującym i podtrzymującym homeostazę organizmie. Burgin słusznie przeciwstawia klasyczne programowanie algorytmom uczenia, wskazując, że doświadczenie może kształtować strukturę połączeń zarówno w układzie biologicznym, jak i sztucznym. Zbyt daleko idzie jednak tam, gdzie sugeruje niemal tożsamość plastyczności synaptycznej i backpropagation. W sztucznych sieciach neuronowych wartości parametrów są aktualizowane zgodnie z matematyczną procedurą optymalizacji, najczęściej opartą na gradiencie funkcji straty. Biologiczna synapsa zmienia się natomiast w wyniku lokalnych i sieciowych procesów elektrochemicznych, modulacji neuromodulatorowej, czasu wystąpienia impulsów, stanu organizmu czy ekspresji genów. Można tu wskazać analogię funkcjonalną — historia oddziaływania zmienia przyszłą transformację sygnału — lecz nie należy mylić jej z homologicznością mechanizmu. Podobieństwo problemu obliczeniowego nie oznacza identyczności rozwiązania.

Co więcej, współczesna neurobiologia pamięci coraz wyraźniej pokazuje, że uproszczona wersja "hipotezy synaptycznej" jest niewystarczająca jako całościowa teoria. Badania nad engramami wskazują, że ślad pamięciowy obejmuje rozproszone zespoły komórek i ich połączeń, a ponadto ulega zmianom w czasie. Najnowsza literatura podkreśla heterogeniczność neuronalnych zespołów engramowych, ich dynamiczną reorganizację oraz znaczenie zmian zachodzących zarówno w poszczególnych synapsach, jak i na poziomie mikroobwodów czy współdziałających regionów mózgu. Pamięć okazuje się zatem doskonałym przykładem problemu, który omówiliśmy przy analizie emergencji: znalezienie mechanizmu mikroskopowego nie czyni poziomu systemowego zbędnym.

Pojęcie engramu ma długą historię, sięgającą Richarda Semona, który na początku XX wieku próbował zdefiniować fizyczny ślad pozostawiony przez doświadczenie. Współczesna neuronauka nadała temu pojęciu charakter znacznie bardziej empiryczny. Dzięki metodom znakowania aktywnych komórek, obrazowania oraz manipulacji opto- i chemogenetycznej można badać zespoły neuronów aktywowanych podczas uczenia, które uczestniczą później w przywołaniu konkretnego doświadczenia. Nie oznacza to jednak odkrycia pojedynczej "komórki wspomnienia". Obraz jest bardziej rozproszony i dynamiczny: pamięć zależy od całych zespołów komórek, ich wzajemnych połączeń, zmian synaptycznych, interakcji między strukturami mózgowymi oraz ewolucji śladu w czasie.

Pamięć jako dynamiczny proces konsolidacji i reorganizacji

Współczesne badania podkreślają, że do pełnego zrozumienia engramu nie wystarczy jedna skala analizy. Kluczowe staje się tutaj pojęcie konsolidacji, które definiuje czasowość pamięci. Doświadczenie nie zostaje automatycznie przekształcone w trwałą reprezentację w chwili jego wystąpienia; ślad jest początkowo podatny na zakłócenia i dopiero w kolejnych minutach, godzinach czy dniach – a na poziomie reorganizacji systemowej nawet przez znacznie dłuższy okres – ulega stabilizacji i transformacji. Neuronauka rozróżnia tu konsolidację synaptyczną, obejmującą lokalne procesy molekularne i komórkowe zachodzące po uczeniu, oraz konsolidację systemową, w której z czasem zmienia się udział różnych struktur mózgowych w przechowywaniu i odtwarzaniu reprezentacji. Badania engramów wskazują na zaangażowanie hipokampa i kory przedczołowej w ten dynamiczny układ, choć szczegóły transformacji pozostają przedmiotem żywej debaty.

Ta czasowość ma głębsze znaczenie, niż może się początkowo wydawać. Gdyby pamięć była zwyczajnym zapisem danych, jej utrwalenie byłoby zdarzeniem: system odebrałby informację i umieścił ją w odpowiednim miejscu. Biologiczna pamięć jest jednak procesem. To, co nazywamy wspomnieniem, przechodzi przez kolejne stadia stabilizacji, reaktywacji, rekontekstualizacji i niekiedy ponownej podatności na zmianę. Przywołanie nie musi być neutralnym odczytem niezmiennego pliku; może uczestniczyć w ponownym przetwarzaniu śladu, co wiąże się z problematyką rekonsolidacji. W konsekwencji autobiograficzna przeszłość człowieka nie istnieje w mózgu jak archiwum dokumentów zabezpieczonych przed ingerencją.

Jest to struktura zachowująca ciągłość właśnie dzięki zdolności do reorganizacji. Pamięć rozwiązuje w ten sposób konflikt systemu uczącego się, który musi być jednocześnie stabilny i plastyczny. Gdyby plastyczność była nieograniczona, każde nowe doświadczenie mogłoby nadpisywać

wcześniejszą organizację, niszcząc zgromadzoną wiedzę. Z kolei absolutna stabilność uniemożliwiłaby naukę. Biologiczny mózg funkcjonuje pomiędzy tymi skrajnościami, stosując wielopoziomowe mechanizmy selekcji i utrwalania.

Problem ten ma bezpośredni odpowiednik w uczeniu maszynowym, gdzie zjawisko catastrophic forgetting może prowadzić do utraty wcześniej nabytych kompetencji podczas przyswajania nowych zadań. Analogia ta jest wartościowa nie dlatego, że mózg i model stosują identyczne rozwiązania, lecz ponieważ oba należą do klasy systemów adaptacyjnych stojących przed konfliktem między zachowaniem dotychczasowej struktury a koniecznością jej modyfikacji. W biologii rozwiązanie to wiąże się m.in. z wieloma skalami czasowymi. Układ nerwowy nie traktuje każdej zmiany jako równie trwałej: istnieją krótkotrwałe modyfikacje aktywności, zmiany synaptyczne o różnym czasie utrzymywania, procesy konsolidacji zależne od syntezy białek oraz długofalowa reorganizacja sieci. Wspomnienie może zatem przechodzić od stanu łatwo odwracalnego do bardziej stabilnego bez konieczności natychmiastowego przebudowania całego systemu. Jest to rodzaj biologicznego kompromisu pomiędzy szybkością uczenia a bezpieczeństwem wcześniejszej wiedzy.

Pamięć jako wielopoziomowy system emergentny

Współczesne badania nad engramami dowodzą, że ślad pamięciowy nie jest statyczną populacją niezmiennie aktywnych neuronów; reprezentacje mogą ulegać przesunięciom, a ich rola w przywoływaniu wspomnień zmienia się wraz z upływem czasu. Z tego powodu należy zachować szczególną ostrożność wobec popularnej metafory hipokampa jako „dysku twardego” czy magazynu wspomnień. Choć hipokamp odgrywa kluczową rolę w tworzeniu nowych zapisów deklaratywnych i epizodycznych oraz wiązaniu elementów doświadczenia w relacyjne reprezentacje, pamięć nie znajduje się po prostu „w hipokampie”.

Historyczne znaczenie przypadku Henry'ego Molaisona polegało na tym, że po chirurgicznym uszkodzeniu struktur przyśrodkowego płata skroniowego dramatycznie upośledzona została u niego zdolność tworzenia nowych wspomnień deklaratywnych, podczas gdy inne formy uczenia – w tym pewne umiejętności proceduralne – pozostały zachowane. Odkrycie to podważyło wyobrażenie o pamięci jako pojedynczej, jednolitej funkcji psychicznej i pomogło wykazać istnienie różnych systemów zapamiętywania. Burgin słusznie wykorzystuje przypadek H.M. jako przykład graniczny, by pytać o relację między pamięcią a ciągłością osobową, lecz nie należy formułować z niego wniosków zbyt kategorycznie: uszkodzenie hipokampa nie oznaczało utraty całego „ja”, całej pamięci ani całkowitej utraty zdolności uczenia się. Molaison zachował znaczną część wiedzy sprzed

operacji, sprawność językową, osobowość oraz możliwość nabywania niektórych umiejętności proceduralnych.

Jego przypadek jest przez to znacznie ciekawszy niż uproszczona metafora „człowieka bez pamięci". Pokazuje bowiem, że to, co potocznie nazywamy pamięcią, jest zespołem częściowo rozdzielnych funkcji. Można utracić zdolność swobodnego tworzenia nowych wspomnień epizodycznych, zachowując inne formy uczenia. Zatem nawet pamięć – jedna z najbardziej intuicyjnie jednolitych własności umysłu – okazuje się właściwością wielopoziomową i emergentną.

Ta rozdzielność ma kluczowe znaczenie dla porównania z AI. System może dysponować ogromną wiedzą semantyczną, nie posiadając autobiograficznej historii w ludzkim rozumieniu. Może skutecznie wykonywać zadania proceduralne bez epizodycznej pamięci poszczególnych prób. Może mieć dostęp do zewnętrznego archiwum rozmów, nie „przeżywając" ich jednak jako własnej przeszłości. Może również przechowywać część informacji w parametrach modelu, inne w kontekście aktualnej sesji, a jeszcze inne w zewnętrznych bazach danych. Stwierdzenie, że system „ma pamięć", będzie więc równie nieprecyzyjne jak stwierdzenie, że człowiek „ma pamięć", jeśli nie doprecyzujemy, o który mechanizm chodzi. Na tym tle interesująca staje się zawarta w materiale analogia pomiędzy hipokampem a zewnętrzną bazą wektorową lub systemem RAG. Sugeruje ona, że dostęp do trwałej historii interakcji może pełnić funkcję "cyfrowego hipokampa" i dawać modelowi podstawę autobiograficznej ciągłości. Jako heurystyka inżynieryjna jest to pomysł płodny: oba rozwiązania zwiększają wpływ przeszłych zdarzeń na bieżące działanie systemu. Na poziomie mechanizmu analogia ta jednak szybko się kończy.

Hipokamp nie jest wyszukiwarką dokumentów dołączającą trafne fragmenty do bieżącego strumienia neuronalnego. Bierze on udział w kodowaniu relacji między składnikami doświadczenia, kontekstem, miejscem i czasem; współpracuje z szeroką siecią struktur mózgowych, podlega modulacji emocjonalnej oraz funkcjonuje wewnątrz organizmu, którego doświadczenia pomaga organizować. Baza wektorowa przechowuje natomiast reprezentacje dostępne dla procedury wyszukiwania.

Pamięć jako fizyczna reorganizacja systemu a nie magazyn danych

Funkcjonalne podobieństwo przejawiające się w tym, że przeszłość wpływa na obecną odpowiedź, nie upoważnia do utożsamienia obu architektur. Kluczowa jest różnica między pamięcią o zdarzeniu a zdarzeniem, które zmieniło podmiot. Człowiek po traumie, nauce języka, zakochaniu,

długim treningu zawodowym czy utracie bliskiej osoby nie tylko potrafi wydobyć rekord opisujący dane wydarzenie. Jego przyszłe reakcje, uwaga, oczekiwania, zachowania, skojarzenia, odpowiedzi autonomiczne i sposoby interpretowania świata mogą zostać przez to doświadczenie przeorganizowane. Wspomnienie staje się częścią historii całego organizmu.

Zewnętrzna pamięć komputerowa może natomiast przechowywać opis zdarzenia bez jakiejkolwiek modyfikacji głównej architektury systemu. Jeśli model otrzyma ten opis w kontekście, może zachowywać się tak, jakby „pamiętał", choć jego parametry nie zostały przez pierwotne zdarzenie zmienione. To rozróżnienie pomiędzy retrieval a plasticity jest kluczowe dla wszelkich przyszłych debat o cyfrowej autobiografii. Nie oznacza ono jednak, że tylko pamięć zapisana w parametrach mogłaby być „prawdziwą" pamięcią. Człowiek od dawna eksternalizuje pamięć: korzysta z notatek, ksiąg, fotografii, kalendarzy, baz danych, archiwów oraz innych ludzi.

Teorie rozszerzonego umysłu wskazują, że granica systemu poznawczego nie musi pokrywać się w pełni z granicą czaszki. Zewnętrzny artefakt może stać się funkcjonalną częścią procesu pamiętania, o ile jest stabilnie zintegrowany z zachowaniem podmiotu. Dlatego problem AI jest bardziej subtelny niż alternatywa „pamięć wewnętrzna albo fałszywa". Należy pytać o stopień i sposób integracji przeszłych informacji z procesem regulacji systemu: czy informacja jest jedynie opcjonalnym dokumentem? Czy system automatycznie wykorzystuje ją przy przewidywaniu? Czy wpływa ona na jego priorytety, czy może zostać zakwestionowana? Czy istnieje mechanizm zapominania? Czy system odróżnia własne doświadczenie od opisu cudzego przeżycia?

Czy potrafi datować, porządkować i kontekstualizować przeszłość? Dopiero takie pytania przybliżają nas do problemu pamięci autobiograficznej. Biologiczna pamięć posiada cechę szczególnie istotną dla świadomości: jest selektywna. Organizm nie zapisuje wszystkiego. Już na poziomie percepcji ogromna część potencjalnie dostępnej informacji zostaje pominięta, zanim stanie się przedmiotem późniejszego przypominania. Mechanizmy uwagi, znaczenia, pobudzenia, nagrody, stresu i emocji determinują to, co zostanie zakodowane i z jaką siłą. Współczesna literatura dotycząca engramów pokazuje, że stres i związane z nim sygnały hormonalne mogą modyfikować funkcję synaps oraz sposób organizacji zespołów pamięciowych, wpływając zarówno na trwałość, jak i precyzję zapisu.

Pamięć nie jest zatem bezstronnym archiwistą. Jest elementem systemu biologicznego, którego podstawowym celem nie jest wierne dokumentowanie rzeczywistości, lecz skuteczne działanie w przyszłości. Tu właśnie można precyzyjniej osadzić ideę „pożądanej trudności". Robert i Elizabeth Bjork zwracali uwagę, że warunki ułatwiające chwilowe wykonanie zadania nie muszą być tymi, które najlepiej wspierają późniejsze uczenie. Wysiłek wydobywania informacji, rozłożenie ćwiczeń w czasie, przeplatanie materiału czy pewne formy zmienności kontekstu mogą utrudnić bieżące

wykonanie, a jednocześnie poprawiać późniejszą retencję i transfer. Poznanie posiada własną ekonomię: to, co wydaje się najbardziej komfortowe w chwili nauki, nie musi pozostawiać najtrwalszego śladu. Nie należy jednak dosłownie twierdzić, że hipokamp „uznaje", iż odpowiedzi łatwej nie warto zapisywać. Jest to użyteczna personifikacja, a nie opis mechanizmu neuronalnego. Efekty trudności uczenia wynikają z interakcji procesów uwagi, wysiłku wydobywania, ponownego kodowania, wzmacniania ścieżek dostępu, kontekstu i konsolidacji.

Nie istnieje pojedynczy neuronalny księgowy obliczający opłacalność energetyczną każdej informacji. Ta korekta dobrze ilustruje różnicę pomiędzy metaforą systemową a wyjaśnieniem mechanistycznym: można mówić, że mózg „selekcjonuje", jeśli pamiętamy, iż selekcja jest rozproszonym rezultatem wielu procesów. Również energia wchodzi tu w bardziej złożoną relację z pamięcią, niż sugeruje prosta narracja o mózgu oszczędzającym swoje dwadzieścia watów. Tworzenie i utrzymywanie długotrwałych zmian synaptycznych wymaga procesów metabolicznych, syntezy białek i przebudowy strukturalnej; aktywowane podczas tworzenia pamięci neurony mogą przechodzić kosztowne molekularnie adaptacje. Badania opublikowane w Nature w 2024 roku wykazały między innymi związek pomiędzy tworzeniem zespołów pamięciowych w hipokampie a intensywnymi zmianami molekularnymi, obejmującymi nawet przejściową odpowiedź na uszkodzenia DNA i szlak TLR9. Nie należy z tego wyprowadzać jednego „energetycznego prawa pamięci", lecz wynik jasno pokazuje, że zapis doświadczenia jest fizycznie kosztowną reorganizacją komórki, a nie abstrakcyjnym przeniesieniem bitów do neutralnego magazynu. Warto w tym miejscu wrócić do emergencji.

Na poziomie molekularnym opisujemy fosforylację białek, ekspresję genów, przepływ jonów, zmiany receptorów i przebudowę synaps. Na poziomie komórkowym analizujemy zmianę pobudliwości neuronu i jego połączeń. Na poziomie obwodu pojawiają się zespoły aktywności oraz dynamika engramów. Na poziomie psychologicznym mówimy o rozpoznaniu miejsca, przypomnieniu osoby, lęku przed sytuacją, znajomości języka albo umiejętności jazdy na rowerze.

Pamięć jako materialna historia i fundament tożsamości

Żaden z tych opisów nie jest dowolny, a zarazem nie można ich swobodnie zastępować jeden drugim. Znajomość stężenia konkretnej kinazy nie pozwala sama w sobie określić, czego człowiek się boi; relacja o wspomnieniu z dzieciństwa nie mówi natomiast, jakie mechanizmy synaptyczne umożliwiły jego utrwalenie. Wielopoziomowość nie jest wadą naszej wiedzy, lecz cechą badanego systemu. Pamięć stanowi więc przykład emergencji temporalnej: system rozwija właściwości, które można zrozumieć tylko poprzez uwzględnienie jego historii. Dwa mózgi o pozornie zbliżonej

anatomii początkowej mogą po latach doświadczeń posiadać radykalnie różne sieci skojarzeń, umiejętności, priorytety i oczekiwania. Aktualny stan układu jest funkcją drogi, którą przeszedł. W naukach o złożoności taki rodzaj zależności od trajektorii określa się szeroko jako path dependence. W organizmie jest ona szczególnie głęboka: historia nie tylko zmienia dane dostępne systemowi, lecz współkształtuje sam aparat przyszłego poznania. Człowiek widzący szachownicę po dwudziestu latach gry nie przetwarza po prostu większej liczby zapamiętanych faktów niż początkujący. Jego percepcja została wytrenowana tak, aby inaczej grupować pozycje, szybciej dostrzegać relacje i nadawać znaczenie konfiguracjom, które dla laika pozostają jedynie wizualnym układem figur.

To prowadzi nas ku jednemu z najważniejszych przejść w całym artykule. Uczenie nie jest tylko gromadzeniem odpowiedzi; jest przebudową przestrzeni możliwych przyszłych interpretacji. System, który się nauczył, reaguje inaczej nie dlatego, że wyszukał więcej danych, lecz dlatego, że doświadczenie zmieniło strukturę jego prawdopodobnych reakcji. W biologii może to oznaczać zmianę synaptyczną, przebudowę zespołu neuronalnego, automatyzację procedury, powstanie schematu poznawczego albo nowy sposób kierowania uwagi. W sztucznej sieci oznacza to zmianę parametrów prowadzącą do innego rozkładu prawdopodobieństwa odpowiedzi. Dopiero na tym abstrakcyjnym poziomie biologiczne i sztuczne uczenie można rozpatrywać w jednym polu teoretycznym, nie udając, że są tym samym procesem. Kategoria czasu ujawnia również zasadniczą różnicę pomiędzy systemem uczącym się a statycznym narzędziem. Młotek po wbiciu tysiąca gwoździ nie posiada modelu własnego doświadczenia z pierwszymi próbami. Organizm po tysiącu prób jest organizmem zmienionym przez te próby. System uczenia maszynowego może zostać w podobny sposób przekształcony przez dane treningowe.

Pytanie o świadomość zaczyna się jednak dopiero tam, gdzie chcemy wiedzieć, czy historia jest dla systemu wyłącznie przyczyną jego obecnej konfiguracji, czy także reprezentowaną przeszłością podmiotu. Drzewo również nosi w swoich słojach skutki minionych sezonów, ale nie mamy podstaw twierdzić, że wspomina suszę sprzed dziesięciu lat. Sam fizyczny ślad historii nie wystarcza do autobiografii. W ten sposób pojawia się pierwsza granica pomiędzy pamięcią jako zależnością stanu od historii a pamięcią jako świadomym dostępem do przeszłości. Ta pierwsza kategoria jest niezwykle szeroka. Układ odpornościowy wykazuje pamięć immunologiczną; komórki mogą zachowywać skutki wcześniejszych stanów regulacyjnych; sieci neuronalne modyfikują połączenia; organizm kształtuje zachowanie na podstawie doświadczenia.

Druga wymaga co najmniej zdolności reprezentowania zdarzenia jako przeszłego, odróżnienia go od teraźniejszości oraz – w przypadku autobiografii – powiązania go z historią konkretnego "mnie". Pomiędzy tymi poziomami znajduje się ogromna przestrzeń organizacji, której nie wolno zasypywać ogólnym terminem "pamięć". Właśnie tutaj przypadek H.M. okaże się niezwykle ważny.

Nie dlatego, że człowiek pozbawiony pewnych struktur pamięciowych traci całą świadomość, lecz dlatego, że dramatyczne rozszczepienie poszczególnych rodzajów pamięci odsłania architekturę, którą zdrowy człowiek zwykle doświadcza jako jedność. Można zachować teraźniejszość, język, wcześniejszą wiedzę, charakter oraz zdolność nabywania niektórych umiejętności, a równocześnie utracić zdolność swobodnego dopisywania nowych zdarzeń do historii własnego życia. To rozszczepienie pozwoli nam zapytać, jak mózg konstruuje czas osobowy: nie fizyczny czas zegara, lecz relację między "było", "jest" i "może być", dzięki której podmiot pozostaje dla siebie tym samym podmiotem mimo nieustannej wymiany treści doświadczenia. W konsekwencji droga od Aplysia do świadomości nie jest retorycznym skokiem od prostego neuronu do ludzkiego "ja". Jest historią stopniowego nakładania się poziomów organizacji. Najpierw pojawia się plastyczność, czyli możliwość zmiany przyszłej reakcji wskutek przeszłego zdarzenia. Następnie konieczne są mechanizmy stabilizacji i selekcji zmian.

Dalej dochodzi organizowanie reprezentacji w zespoły i konteksty, rozdzielenie różnych systemów pamięci, wiązanie informacji z czasem i miejscem, rekonstrukcja doświadczenia oraz wpisywanie go w model własnej historii. Dopiero wtedy pamięć może stać się jednym z fundamentów tożsamości autobiograficznej. Nie ma jednego punktu, w którym molekuła nagle staje się wspomnieniem. Istnieje wielopoziomowy proces, w którym fizyczne ślady zostają włączone do coraz bardziej złożonych układów regulacyjnych. Ta obserwacja każe również zmienić sposób, w jaki myślimy o inteligencji. Inteligencja nie jest jedynie zdolnością rozwiązywania zadania w chwili jego pojawienia się. System naprawdę uczący się musi posiadać mechanizm pozwalający, by rozwiązane i nierozwiązane problemy przekształcały jego przyszłą architekturę. Dlatego pytanie o AGI nie może ograniczać się do liczby benchmarków, w których model przewyższa człowieka.

Inteligencja jako zdolność selektywnego zapominania i predykcji

Należy pytać, czy system posiada trwałą i selektywną historię uczenia, czy potrafi aktualizować model siebie i środowiska, jak rozwiązuje konflikt stabilności z plastycznością, jakie doświadczenia uznaje za warte zachowania oraz czy przeszłość jest dla niego jedynie zewnętrznie dostarczoną informacją, czy częścią architektury kierującej jego przyszłym działaniem. Biologia podpowiada przy tym coś istotnego: zapominanie nie jest prostą awarią pamięci.

Może ono być elementem jej funkcjonalności. Gdyby każdy epizod zachowywał równą dostępność, nowe zachowania byłyby paraliżowane przez masę konkurujących szczegółów. Uogólnienie wymaga częściowej utraty detalu; tworzenie kategorii wymaga rozpoznania tego, co wspólne pomimo

różnic; adaptacja zaś wymaga osłabienia informacji, które przestały trafnie przewidywać rzeczywistość. Współczesne badania engramów traktują więc zapominanie nie tylko jako bierny rozpad śladu, ale również jako dynamiczny element życia pamięci. W perspektywie emergencji oznacza to, że doskonała pamięć wszystkich danych nie musi prowadzić do doskonałego poznania. Inteligencja wymaga bowiem również umiejętności tracenia informacji we właściwy sposób. Ta pozorna wada biologii staje się istotnym kontrapunktem wobec narracji o cyfrowej przewadze wynikającej z niemal nieograniczonego przechowywania danych. Choć Burgin podkreśla różnicę między energetycznie ograniczoną pamięcią biologiczną a masową pamięcią cyfrową oraz możliwość szerokiego transferu wiedzy między systemami sztucznymi, warto odwrócić pytanie: być może istotą biologicznej inteligencji nie jest zdolność zachowania wszystkiego, lecz umiejętność rozstrzygania, czego nie zachować.

Nieograniczone archiwum zwiększa zasób informacji, ale jednocześnie potęguje problem selekcji. Im większa pamięć, tym ważniejszy staje się mechanizm istotności. Informacja pozbawiona hierarchii nie jest jeszcze wiedzą, podobnie jak pamięć pozbawiona selekcji nie tworzy jeszcze autobiografii. W tym miejscu biologiczne podwaliny uczenia prowadzą bezpośrednio do kolejnego problemu: mózg nie może czekać na zgromadzenie kompletnego obrazu świata. Musi decydować, co zauważyć, co zachować i co przewidzieć. Pamięć nie funkcjonuje więc samodzielnie.

Potrzebuje percepcji, uwagi, wartościowania i modelu przyszłości. To, co zostanie utrwalone, zależy od tego, co system uznał za zaskakujące, znaczące, użyteczne albo niebezpieczne; z kolei to, co uznaje za zaskakujące, wynika z wcześniejszych modeli zapisanych w pamięci. Powstaje pętla: przeszłość kształtuje przewidywanie, przewidywanie organizuje percepcję, błąd zmienia pamięć, a zmieniona pamięć kształtuje następną predykcję. W tej pętli dokonuje się przejście od pamięci do myślenia. Organizm przestaje być układem reagującym wyłącznie na to, co się wydarzyło, gdy zgromadzona historia pozwala mu przygotować się na to, co dopiero może nastąpić. Biologiczny sens pamięci jest dlatego skierowany ku przyszłości. Ewolucja nie premiowała wspominania dla samego przechowywania przeszłości; pamięć zwiększała zdolność przewidywania konsekwencji i wyboru działania. Człowiek może oczywiście uczynić wspomnienie celem samym w sobie, budować archiwa, historię czy literaturę, ale filogenetyczne korzenie systemu pamięci tkwią w adaptacji. Właśnie tutaj badania Kandela spotykają się z teoriami mózgu predykcyjnego.

Fundacja Dobre Państwo prowadziła od części ku organizacji, teraz poprowadzi od organizacji ku historii. Materia zdolna do uczenia się jest materią, dla której przeszłość pozostawia strukturalne następstwa. Lecz dopiero materia potrafiąca wykorzystać te następstwa do budowy oczekiwań zaczyna tworzyć model świata. Dlatego w kolejnej części przejdziemy od Kandela i fizyczności pamięci do Stanislasa Dehaene'a, kodowania predykcyjnego, modeli bayesowskich, teorii predictive

processing i active inference oraz do zasadniczego pytania o zmysły: czy człowiek odbiera rzeczywistość, czy nieustannie ją przewiduje, a bodźce zewnętrzne służą przede wszystkim korygowaniu jego wewnętrznych hipotez?

> Być może największym paradoksem ludzkiego intelektu jest to, że jego potęga nie wyrasta z nieskończonych zasobów, lecz z umiejętności radykalnego odrzucania zbędnych informacji. W świecie cyfrowych archiwów, które pamiętają wszystko, prawdziwa inteligencja może okazać się nie zdolnością do zapisu każdego bitu danych, lecz sztuką selektywnego zapominania. Czy zatem droga do stworzenia świadomej maszyny prowadzi przez zwiększanie jej pojemności, czy wręcz przeciwnie – przez nauczenie jej, jak być ograniczoną?

Inspiracje

[1] **"Emergence"** Bob Burgin

Bob Burgin to amerykański przedsiębiorca, naukowiec zajmujący się naukami o uczeniu się i autor, którego praca obejmuje kognitywistykę, adaptacyjne technologie uczenia się oraz sztuczną inteligencję. Jest założycielem, prezesem zarządu i dyrektorem generalnym Amplifire, platformy adaptacyjnego uczenia się opartej na neuronauce i psychologii poznawczej. Przez kilkadziesiąt lat Burgin współpracował z czołowymi badaczami kognitywistyki – takimi jak Robert Björk, Daniel Schacter i Henry Roediger III – przekładając badania nad kodowaniem pamięci, praktyką odzyskiwania i plastycznością mózgu na skalowalne architektury uczenia się. Jego prace koncentrują się na zastosowaniu zasad ludzkiego mózgu o ograniczonych zasobach energii do poprawy retencji wiedzy, redukcji błędów w miejscu pracy w kluczowych sektorach, takich jak opieka zdrowotna, oraz kontekstualizacji nowoczesnych systemów uczenia maszynowego. W swojej książce „Emergence: How Our Twenty-Watt Brains Unlocked Intelligence Beyond Biology" Burgin bada, jak ewolucyjne mechanizmy poznawcze wpływają na współczesną sztuczną inteligencję i przyszły rozwój syntetycznego poznania.

Bob Burgin *is an American entrepreneur, learning scientist, and author whose work spans cognitive science, adaptive learning technology, and artificial intelligence. He is the founder, chairman, and chief executive officer of Amplifire, an adaptive learning platform grounded in neuroscience and cognitive psychology. Over several decades, Burgin has collaborated with leading cognitive researchers—including Robert Bjork, Daniel Schacter, and Henry Roediger III—to translate research on memory encoding, retrieval practice, and brain plasticity into scalable learning architectures. His contributions focus on applying the principles of the energy-constrained human brain to improve knowledge retention, reduce workplace error in critical sectors like healthcare, and contextualize modern machine learning systems. Through his book Emergence: How Our Twenty-Watt Brains Unlocked Intelligence Beyond Biology, Burgin explores how evolutionary cognitive mechanisms inform modern artificial intelligence and the future development of synthetic cognition.*

Amplifire

Literatura uzupełniająca

Książki

Książki autorów przywoływanych i literatura pokrewna:

[1] "Cellular basis of behavior : an introduction to behavioral neurobiology / Eric R. Kandel. - 1976"

Eric Kandel

W.H. Freeman | ISBN: 9780716705239

[2] "The age of the unconscious"

Eric Kandel



[3] "Autobiography"

John Stuart Mill

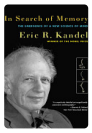


[4] "On Liberty"

John Stuart Mill

[5] "Utilitarianism"

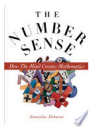
John Stuart Mill



[6] "In Search of Memory"

Eric Kandel

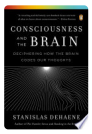
W W Norton & Company Incorporated | ISBN: 9780393329377



[7] "The Number Sense: How the Mind Creates Mathematics, Revised and Updated Edition"

Stanislas Dehaene

Oxford University Press, USA | ISBN: 9780199723096



[8] "Consciousness and the Brain"

Stanislas Dehaene

Penguin | ISBN: 9780698151406

Artykuły naukowe

Prace autorów przywoływanych w tekście:

[1] "The Voluntary Simplicity Movement: A multi-national survey analysis in theoretical context"

Samuel Alexander, Simon Ussher

2012 | Journal of Consumer Culture | DOI: 10.1177/1469540512444019

Źródło

[2] "Degrowth, energy descent, and 'low-tech' living: Potential pathways for increased resilience in times of crisis"

Samuel Alexander, Paul Yacoumis

2016 | Journal of Cleaner Production | DOI: 10.1016/j.jclepro.2016.09.100

Źródło

[3] "Biogas in the suburbs: An untapped source of clean energy?"

Samuel Alexander, Peter W. Harris, Bernadette K. McCabe

2019 | Journal of Cleaner Production | DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.01.118

Źródło

[4] "Energy descent as a post-carbon transition scenario: How 'knowledge humility' reshapes energy futures for post-normal times"

Joshua Floyd, Samuel Alexander, Manfred Lenzen, Patrick Moriarty, Graham Palmer

2020 | Futures | DOI: 10.1016/j.futures.2020.102565

Źródło

[5] "Downward Causation and Autonomy in Weak Emergence"

Mark A. Bedau

2008 | The MIT Press eBooks | DOI: 10.7551/mitpress/9780262026215.003.0014

Źródło

[6] "Weak Emergence"

Mark A. Bedau

1997 | Noûs | DOI: 10.1111/0029-4624.31.s11.17

Źródło

[7] "Is Weak Emergence Just in the Mind?"

Mark A. Bedau

2008 | Minds and Machines | DOI: 10.1007/s11023-008-9122-6

Źródło

[8] **"Artificial Life XI: Proceedings of the Eleventh International Conference on the Simulation and Synthesis of Living Systems"**

Bullock, S., Noble, J., Watson, R., Mark A. Bedau

2008 | ePrints Soton (University of Southampton)

Źródło

[9] **"Mind in a Physical World"**

Jaegwon Kim

1998 | The MIT Press eBooks | DOI: 10.7551/mitpress/4629.001.0001

Źródło

[10] **"Making Sense of Emergence"**

Jaegwon Kim

1999 | Philosophical Studies | DOI: 10.1023/a:1004563122154

Źródło

[11] **"Emergence or Reduction?--Essays on the Prospects of Nonreductive Physicalism."**

Ralf Stoecker, Ansgar Beckermann, H. Flohr, Jaegwon Kim

1995 | Philosophy and Phenomenological Research | DOI: 10.2307/2108450

Źródło

[12] **"The Molecular Biology of Memory Storage: A Dialogue Between Genes and Synapses"**

Eric R. Kandel

2001 | Science | DOI: 10.1126/science.1067020

Źródło

[13] **"Control of Memory Formation Through Regulated Expression of a CaMKII Transgene"**

Mark R. Mayford, Mary Elizabeth Bach, Yan-You Huang, Lei Wang, Robert D. Hawkins, Eric R. Kandel

1996 | Science | DOI: 10.1126/science.274.5293.1678

Źródło

[14] **"Cognitive Neuroscience and the Study of Memory"**

Brenda Atkinson Milner, Larry R. Squire, Eric R. Kandel

1998 | Neuron | DOI: 10.1016/s0896-6273(00)80987-3

Źródło

[15] "Genetic Demonstration of a Role for PKA in the Late Phase of LTP and in Hippocampus-Based Long-Term Memory"

Ted G. Abel, Peter Nguyen, Mark Barad, Thomas A. Deuel, Eric R. Kandel

1997 | Cell | DOI: 10.1016/s0092-8674(00)81904-2

Źródło

[16] "Cortical Systems for the Recognition of Emotion in Facial Expressions"

Ralph Adolphs, Hanna Damasio, Daniel Tranel, Antonio R. Damasio

1996 | Journal of Neuroscience | DOI: 10.1523/jneurosci.16-23-07678.1996

Źródło

[17] "Drives and the C. N. S. (conceptual nervous system)."

Donald Olding Hebb

1955 | Psychological Review | DOI: 10.1037/h0041823

Źródło

[18] "Divided Consciousness: Multiple Controls in Human Thought and Action"

Donald Olding Hebb, Ernest R. Hilgard

1978 | The American Journal of Psychology | DOI: 10.2307/1421702

Źródło

[19] "Emotion in man and animal: an analysis of the intuitive processes of recognition."

Donald Olding Hebb

1946 | Psychological Review | DOI: 10.1037/h0063033

Źródło

[20] "A Method of Rating Animal Intelligence"

Donald Olding Hebb, Kenneth E. Williams

1946 | The Journal of General Psychology | DOI: 10.1080/00221309.1946.10544520

Źródło

[21] "Remembering can cause forgetting: Retrieval dynamics in long-term memory."

Michael C. Anderson, Robert A. Bjork, Elizabeth Ligon Bjork

1994 | Journal of Experimental Psychology Learning Memory and Cognition | DOI: 10.1037/0278-7393.20.5.1063

Źródło

[22] "Measures Of Memory"

Alan Richardson-Klavehn, Robert A. Bjork

1988 | Annual Review of Psychology | DOI: 10.1146/annurev.ps.39.020188.002355

Źródło

[23] "Memory and Metamemory Considerations in the Training of Human Beings"

Robert A. Bjork

1994 | The MIT Press eBooks | DOI: 10.7551/mitpress/4561.003.0011

Źródło

[24] "Environmental context and human memory"

Steven M. Smith, Arthur M. Glenberg, Robert A. Bjork

1978 | Memory & Cognition | DOI: 10.3758/bf03197465

Źródło

[25] "Towards a cognitive neuroscience of consciousness: basic evidence and a workspace framework"

Stanislas Dehaene

2001 | Cognition | DOI: 10.1016/s0010-0277(00)00123-2

Źródło

[26] "Core systems of number"

Lisa Feigenson, Stanislas Dehaene, Elizabeth S. Spelke

2004 | Trends in Cognitive Sciences | DOI: 10.1016/j.tics.2004.05.002

Źródło

[27] "How we learn: Building bridges between neuroscience and education"

Stanislas Dehaene

2019 | IBRO Reports | DOI: 10.1016/j.ibror.2019.07.169

Źródło

[28] "Unpacking the Complexities of Consciousness: Theories and Reflections."

L. Mudrik, M. Boly, S. Dehaene, Stephen M. Fleming, Victor A. F. Lamme

2025 | Neuroscience and Biobehavioral Reviews | DOI: 10.1016/j.neubiorev.2025.106053

Źródło

Treść tworzy Fundacja Dobre Państwo.
Redaguje i publikuje APA ONE, autorski system redakcyjny Fundacji oparty na AI.
APA ONE Publishing System
Fundacja Dobre Państwo © 2026
Article ID: b41864d1-4528-4d1a-bbdb-c916599ca7ae