

Review Articles / Оглядів роботи

Cerebrum ut supermachina: як нейроморфологія урезонує техноманію

UDC: 612.822:159.953:004.032.26

DOI: <https://doi.org/10.32345/USMYJ.SUPPLEMENT.2.2026.202-209>

Received: April 21, 2025

Accepted: May 22, 2026

Published online: May 31, 2026

Володимир Медведєв

Кафедра нейрохірургії Національного медичного університету імені О.О. Богомольця,
Київ, Україна

ORCID:

Volodymyr Medvediev: [0000-0001-7236-3191](https://orcid.org/0000-0001-7236-3191)

Corresponding author:

Volodymyr Medvediev

e-mail: vavo2010@gmail.com

Анотація: важливим сучасним викликом науково-технічного прогресу є формування у суспільній свідомості переконання щодо певної недосконалості біологічних істот у порівнянні з виробами технологічної сфери, зокрема, із взірцями обчислювальної техніки, поєднаними із алгоритмічними моделями інтелекту. У студентів біомедичних спеціальностей такі упередження можуть сприяти утилітаризації феномену людини з відповідними наслідками щодо сумлінності у роботі з пацієнтами. Метою цієї статті є демонстрація на сучасному емпіричному рівні виняткової складності будови людського мозку і масштабу інженерно-технологічної прірви між ним і авангардом рукотворної обчислювальної техніки. За допомогою методу пошуку й узагальнення наукової інформації нами відібрано дані щодо основних цифрових характеристик головного мозку людини і двох найбільших нейронів людини – клітин Беца та спинномозкових α -мотонейронів. Так, ми наводимо дані щодо кількості нейронів, гліоцитів та ендотеліоцитів людського мозку, кількості, загальної довжини і площі поверхні його капілярів, довжини усіх його нервових волокон, загальної кількості його синапсів, динаміки утворення нейронів та синапсів під час його внутрішньоутробного розвитку, а також дані щодо можливої інформаційної ємкості і обчислювальної швидкодії людського мозку. Ми порівнюємо ці та інші параметри головного мозку людини з параметрами діючого рекордсмена у сфері суперкомп'ютерів, демонструючи драматичний розрив між ними на користь мозку людини. Також, ми наводимо основні морфометричні характеристики двох найбільших клітин людського тіла – клітин Беца і спинномозкових α -мотонейронів, демонструючи унікальну здатність живого до стійкої клітинної організації навіть у макроскопічному масштабі. Отже, людський мозок залишається питомо недосяжним для абіотичного моделювання навіть з точки зору сучасних – далеко неповних та обмежених – уявлень щодо його інтимної будови і функцій.

Ключові слова: мозок, нейрони, нервові волокна, синапси, рухові нейрони, пам'ять, інформатика.

Вступ

Серед викликів технологічного прогресу, є такий, що, на наш погляд, прямо торкається формування професійного світогляду студентів біомедичних спеціальностей, створюючи у висліді істотні загрози у площині якості надання медичної допомоги населенню. Йдеться про формування у суспільній свідомості переконання щодо інженерної недосконалості біологічних істот у порівнянні з витворами сучасної технологічної сфери. Мабуть, найконтрастніше така позиція роз-

кривається у сфері обчислювальної техніки і так званого штучного інтелекту, «здібності» якого за замовчуванням вважаються перспективнішими у порівнянні з інтелектуальними здібностями людини. Парадоксально, але такого роду переконання виникають на тлі багаторічної популярності нейробіологічної тематики. Результатом реалізації таких «фонових» упереджень у студентів біомедичних спеціальностей, на нашу думку, може бути «дегуманізація», тобто, «десакралізація» феномену людини з відповідними наслідками щодо

самовідданості, відповідальності, сумлінності і добросовісності у роботі майбутніх лікарів з пацієнтами.

Мета

Метою цієї роботи є демонстрація на сучасному емпіричному матеріалі складності будови людського мозку і масштабу інженерно-технологічної прірви між ним і авангардом рукотворної обчислювальної техніки.

Матеріали і методи

У роботі використано метод пошуку й узагальнення наукової інформації щодо основних цифрових характеристик головного мозку людини і двох найбільших нейронів людини – клітин Беца та спинномозкових α -мотонейронів. Пріоритетними об'єктами пошуку обрано наукові статті у фахових періодичних виданнях, представлених у мережі Internet; за відсутності інформації у таких джерелах, відбирали монографії, наявні у мережних електронних каталогах і, у порядку виключення – інформацію, розміщену на мережних сайтах з вказівкою на дату її останнього перегляду. При відборі матеріалу було враховано принципи актуальності, достовірності, об'єктивності, інформаційної єдності і релевантності, а з методологічної точки зору використано методи аналізу, синтезу, аналогії та порівняння.

Основний розділ

Нейрогугологізми

Відомо, що кількість клітин людського тіла складає $\sim 3.6 \times 10^{13}$ і майже рівновелика кількості бактерій у організмі дорослої людини [1]. Маса мозку людини за різними даними становить 1300–1400 г, тобто $\sim 2\%$ від маси тіла [2, с. 482, 747], однак, він містить 62–94 млрд нейронів [3], тобто $\sim 10^{11}$, або $\sim 0.5\%$ клітин тіла. Також мозок людини містить ~ 80 млрд допоміжних клітин (гліоцитів і ендотеліоцитів) [4], і тому співвідношення кількості нейронів і «допоміжних» клітин складає 1:1 – мозок людини є максимальним за масою з усіх відомих з таким співвідношенням [2, с. 482, с. 747, виноска 7616] [5]. У людини загальна маса основних функціональних елементів мозку – нейронів – складає 60–80 % його маси [6], що свідчить про дуже високий рівень корисного використання об'єму. Також, не зважаючи на мізерну частку у масі і кількості клітин тіла, мозок людини споживає $\sim 20\%$ глюкози і кисню [7, 8], формуючи $\sim 20\%$ витрат енергії у стані спокою [9].

Сукупна довжина усіх аксонів і дендритів головного мозку становить 760 000–920 000 тис. км [10], тобто $\sim 2,4$ відстані від центру Землі до цент-

ру Місяця [11]. Загальна кількість капілярів мозку людини – 6,5 млрд [12], загальна їх довжина – ~ 644 км [12], загальна їх площа – ~ 15 – 25 м² [13], а площа контакту між суміжсудинним та інтерстиційним простором мозку з одного боку і клітинною компонентою разом із нейропілем з іншого – ~ 38 м² [2, с. 757, виноска 7825].

Кількість основних контактів між нейронами – синапсів – у головному мозку дорослої людини за нашими розрахунками [2, с. 482] і оцінками інших авторів [14–16] складає $\sim 10^{14}$ – 10^{15} . Найбільше серед відомих нам значення обсягу розрахункової пам'яті головного мозку людини складає 10^{8432} біт [17] [18, с. 85, табл. 10]. Однак, при кількості функційних станів синапса n , кількість можливих станів нейронної мережі мозку повинна бути не меншою $n^{10^{15}}$ [2, с. 482]. Якщо кількість білків у одному нейроні складає $\sim 10^{10}$ [19], а потенційна кількість варіантів посттрансляційної хімічної модифікації структури однієї білкової молекули $\sim 10^{27}$ [20], число можливих варіантів протеомного профілю нейронної мережі перебуває на рівні $10^{10^{507}}$ [2, с. 484]. Проте, якщо кожен хімічний варіант білкового продукту експресії одного гена може мати хоча б 10 різних функційних станів, загальна їх кількість сягатиме $10^{10^{10^{80}}}$ [2, с. 487]. Це, на наш погляд, демонструє верхню межу інформаційної ємності мозку. До речі, згадане вище, найбільше серед відомих нам значення можливого обсягу пам'яті головного мозку людини – 10^{8432} біт [17] [18, с. 85, табл. 10] – отримане лише з урахуванням комбінаторної варіативності нейронного конектому на номінально-клітинному (*а не на синаптичному, тканинному, молекулярному тощо*) рівні і уже через цю обставину, попри всю свою астрономічність, є мізерним.

Більш того, стосовно мозку, на нашу думку, прикладна методологія отримання числа Грема – одного з найбільших теоретично злічених математичних об'єктів, котрий ілюструє кількісні показники деякого складного об'єкта, необхідні для гарантованої реалізації у ньому певної заданої структури [21, 22]. Якщо у якості такого об'єкта розглядати мозок – якими тоді повинні бути кількісні показники його складності, щоб ми гарантовано спостерігали у ньому визначальні для функції топологічні структури, хоча б на рівні нейронних мереж? Процедура досягнення масштабу числа Грема, м'яко кажучи, не проста: «...спостережуваний Всесвіт занадто малий, щоб умістити звичайний цифровий запис числа Грема, якщо припустити, що кожна цифра займатиме один планківський об'єм» [23].

Втім, часто вживані нами тут астрономічні реляції не повинні дивувати, адже, приміром, одна ембріональна стовбурова клітина, яка потенційно здатна започаткувати клітинну лінію з 300 поколінь, теоретично може сформувати множини з 10^{90} клітин загальною масою $\sim 10^{75}$ т [24, с. 211]. Тоді як маса ординарної матерії спостережуваної частини Всесвіту оцінюється на рівні 10^{50} т [25], а з урахуванням гіпотетичної темної матерії [26] – на рівні $\sim 10^{51}$ т.

Найбільша відома нам розрахункова цифра швидкодії людського мозку – 1028 FLOPS [18, с. 37, табл. 10]. Прогнозована ж у 2023-му році обчислювальна потужність усієї техносфери станом на 2030 рік може складати $\sim 10^{23}$ FLOPS [27]. І ці цифри цікаво співвіднести з близькими за сенсом параметрами усієї біосфери. Наприклад, згідно із суттєво спрощеними, на наш погляд, розрахунками, швидкість передачі інформації у межах біосфери може складати $\sim 1.7 \times 10^{24}$ біт/с [27]. Швидкість передачі інформації у межах теперішнього варіанту техносфери складає 3.8×10^{14} біт/с і може сягнути біосферного трохи менше, ніж через століття [27]. До речі, загальна швидкість транскрипції у біосфері може перебувати на рівні 10^{39} новоприєднаних нуклеотидів за секунду, при загальній кількості ДНК у біосфері на рівні $\sim 5.3 \times 10^{31}$ мільйонів пар нуклеотидів [28]. А ДНК, як виявилось, за показником інформаційної ємності і за надійністю зберігання записаної у послідовності її нуклеотидів інформації перевершує відомі абіотичні технології. Так, за сучасними оцінками інформаційна ємність 1 г ДНК може сягати ~ 0.5 ЗБ ([2, с. 753, виноска 7775], з посиланням на [29-35]), зараз глобальний об'єм електронних даних має складати 175 ЗБ [35] [36, с. 3], у 2030 році – ~ 435 ЗБ [35], а у 2040 очікується на рівні від 0.25×10^{24} до 0.875×10^{28} байтів, тобто від 250 до ~ 9 млн ЗБ [30], що може бути уміщено у масив ДНК масою від 0.5 кг до 17.5 т [2, с. 753, виноска 7775]. Однак, це все без урахування можливостей запису інформації на ДНК у епігенетичній формі, як хімічних модифікацій нуклеотидів [37], а також, можливо і у топологічній [38, 39] чи геометричній формі [40-42].

З іншого боку, А. Sandberg та N. Bostrom (2008) [18, табл. 9] повідомляють, що для емуляції людського мозку на електрофізіологічному рівні необхідно рівень швидкодії комп'ютера у 10^{22} FLOPS, для емуляції на рівні метаболому – 10^{25} FLOPS, на рівні протеому – 10^{26} FLOPS, з урахуванням окремих станів білкових комплексів – 10^{27} FLOPS, з урахуванням розподілу білкових

комплексів – 10^{30} FLOPS, з урахуванням стохастичної поведінки окремих молекул – 10^{43} FLOPS, а для емулювання мозку на квантовому рівні – взагалі невідомо. Досягнути цих цифр людству, мабуть, вдасться ще нескоро [43].

Тепер порівняймо параметри людського мозку і найпотужнішого сучасного суперкомп'ютера. **Суперкомп'ютер El Capitan**: швидкодія – до $2.8 \cdot 10^{18}$ FLOPS, пам'ять – 5.4×10^{15} байт, площа машинної зали – 700 м², довжина з'єднувальних кабелів – 145 км, споживання електроенергії – 30 МВт [44], швидкість прокачування охолоджувача – ~ 220 -400 л/с [45]. **Головний мозок людини**: швидкодія – $> 10^{28}$ FLOPS, пам'ять – $> 10^{8430}$ байт (див. [17]), площа основи черепа – ~ 0.02 м² [2, с. 755, виноска 7813], довжина магістральних (мієлінових) волокон головного мозку – до 180 тис. км [16], споживання енергії у стані спокою – ~ 20 Вт [46], інтенсивність прокачування охолоджувача – ~ 0.015 л/с, враховуючи, що найбільша частина тепла від мозку відводиться кров'ю, швидкість перфузії якої через нього складає 750-1000 мл/хв ([2, с. 755, виноска 7813], з посиланням на [47]).

Усі ці цифри набувають особливої рельєфності на тлі даних стосовно динаміки природного конструювання мозкової машинерії: під час найактивнішого внутрішньоутробного нейрогенезу у мозку людини, ймовірно за все, щосекунди утворюється ~ 1300 нових нейронів, а синапсів нової кори (у період від 18-го тижня після запліднення до 15-го місяця після народження) – не менше 700 тис. щосекундно [48].

І це лише початок, оскільки сучасні моделі і розраховані за їхньою допомогою показники обчислювальної спроможності мозку отримано без урахування багатьох слабо досліджених факторів і нейробіологічних явищ, наприклад, – ролі топології дендритів і участі макромолекулярних комплексів у обчислювальних функціях нейронів; ролі щільних міжнейронних контактів і синцитієвих цитолемних нанотрубочок у міжнейронній комунікації; мережевої ролі мікровезикулярного обміну, ектопічного генерування потенціалів дії, пластичності медіаторного фенотипу, наявності змішаних синапсів і пластичності гальмівних синапсів; ролі хімічних ендогенних нейромодуляторів, астроцитарної, олігодендроцитарної і мікроглії, а також елементів імунної системи у функції мозку; ролі варіацій геному нейронів у функції і пластичності мозку; ролі судинного русла, ліквор-контактуювальних нейронів і сомато-вісцеральних входів у функції мозку; можливості формування хімічних корелятів

інформації на рівні клітинних мембран та акустичної комунікації між їхніми компартментами; ролі квантових і мікротермодинамічних ефектів на рівні нейрона, а також міжнейронної механо-, акустико-, термо-, магніто- і фотокомунікації у функції нейронних мереж мозку [2, с. 489-493].

Таким чином, мозок людини, навіть виходячи із сучасних, неповних уявлень про його будову, залишається біологічним явищем, недосяжним для релевантного і тим більше повного моделювання, а його обчислювальні спроможності далеко перевершують усі відомі технічні засоби.

Дві клітини у людський зріст

Демонстрацією того, якою складною може бути основна функційна одиниця мозку – нейрон – є історія з розмірами і багаторічною функціональністю двох унікальних клітин – гігантських пірамідних нейронів (клітин Беца) та спинномозкових α -мотонейронів. Ці дві клітини складають основу системи усвідомленої рухової іннервації скелетних м'язів, тобто усієї рухової сфери людини, вимоги щодо точності та надійності функції якої колосальні. Що таке рухова сфера людини – довго розповідати немає сенсу, варто просто глянути будь-який із концертів, приміром, Володимира Горовиця.

Так от. Кількість клітин Беца у мозку людини мізерна і за даними, отриманими для первинної рухової кори обох півкуль літніх осіб, мабуть, складає ~250 тис. [49]. Натомість, розмір їхньої соми на радіарному зрізі кори людини становить 30–80×40–120 мкм [2, с. 26], а середній об'єм соми – $\sim 0.9 \times 10^5$ мкм³ [49]. Виходячи з наявних даних [49, 50], можна припускати, що об'єм внутрішнього вмісту дендритного дерева клітини Беца, візуалізованого у межах гістологічного зрізу, у людини має бути не меншим, ніж у інших досліджених ссавців, і складати, приміром, 150 000 мкм³. Якщо сумарний об'єм дендритної системи удвічі більший, ніж наведений щойно, матимемо сумарний внутрішній об'єм соми і дендритної системи клітини Беца людини на рівні $\sim 4 \times 10^5$ мкм³. За нашими розрахунками [2, с. 24], найдовші аксони пірамідного шляху у дорослої людини повинні бути ~54 см завдовжки. У ссавців діаметр цих аксонів варіює від 0.04 до 23 мкм [51]. Найтовстіші волокна шляху, складаючи абсолютну меншість, ймовірно, походять від первинної рухової кори і прямо контактують з мотонейронами [52]. Начебто, на існування таких проєкцій у людини вказують певні морфологічні й електрофізіологічні дані [52] і найвірогіднішим їхнім клітинним джерелом є нейрони V шару пер-

винної рухової кори [53, 54], зокрема, – клітини Беца (прямих доказів такого припущення досі нема – [55]). Враховуючи це все, об'єм аксона клітини Беца при поздовжньому сталому його діаметрі на рівні ~ 22 мкм складатиме $\sim 2 \times 10^8$ мкм³, що у п'ятсот разів перевищує об'єм інших двох частин цього нейрона [2, с. 24]. Для порівняння: якщо діаметр яйцеклітини людини складає аж 150 мкм [56, с. 383], об'єм її внутрішнього вмісту становить $\sim 2 \times 10^6$ мкм³, тобто у сто разів поступається об'єму цитоплазми клітини Беца [2, с. 24]. Або: діаметр яйцеклітини майже уп'ятеро менший, ніж діаметр сфери з об'ємом, який дорівнює загальному об'єму клітини Беца [2, с. 24].

Тепер про спинномозкові α -мотонейрони. Кількість мотонейронів спинного мозку людини схожа з кількістю клітин Беца і складає ~150–200 тис. [57, "Methods", с. 3747], а розмір соми мотонейрона людини теж може сягати ~120 мкм [58, с. 338]. Довжина аксонів мотонейронів найвіддаленіших м'язів стопи людини за нашим підрахунком, здійсненим виходячи із наявних у літературі ортопедичних і скелетотопічних даних, складає ~1.2 м [2, с. 500, виноска 74]. Якщо максимальний діаметр найдовших рухових аксонів сідничого нерва людини складає 14 мкм (див. [59-62]), об'єм їхнього вмісту, за нашими підрахунками, має визначати об'єм вмісту відповідних мотонейронів і сягати $\sim 2 \times 10^8$ мкм³, співпадаючи з об'ємом вмісту клітин Беца, котрі іннервують ці, найдистальніші мотонейрони. Беручи до уваги наведене вище значення можливої довжини аксонів таких клітин Беца у ~54 см, довжина елементарного двохнейронного рухового шляху від первинної рухової кори до дистальних м'язів стопи складає ~1.74 м, що доволі близько до значення середнього зросту людини [63]. У деяких інших тварин довжина розглядуваної пари нейронів є ще більшою. Наприклад, довжина аксона деяких мотонейронів жирафа мабуть сягає ~4.5 м, а довжина аксонів клітин Беца – ~1.5 м [2, с. 501, виноска 76].

До речі, цим перелік клітинних «нейрорекордсменів» не вичерпується [2, с. 501, виноска 76] і включає нейрони, що забезпечують точну довільну іннервацію м'язів хвостової частини у великих китів, нейрони блукаючого нерва у гігантських ссавців, нейрони, що іннервують дистальні частини щупалець гігантських кальмарів, пропріоцептивні нейрони великих тварин, центральні відростки котрих формують аналоги тонкого (Голля) і клиноподібного (Бурдаха) пучків спинного мозку людини.

Висновки

Попри тривале захоплення нейробиологічною тематикою, у суспільстві сформувалось переконання щодо меншовартості, недосконалості і слабкоспроможності людського мозку у порівнянні з потенціалом абіотичних обчислювальних пристроїв та алгоритмічних моделей інтелекту. Беручи до уваги можливі негативні, мізантропічні наслідки такого переконання, важливо розкрити справжній стан знань про складність

будови та обчислювальний потенціал людського мозку.

Оцінені на основі сучасних морфологічних даних кібернетичні спроможності людського мозку значно перевищують інженерно-архітектурні і обчислювальні характеристики найпотужніших обчислювальних машин. Однак, врахування тонких, досліджуваних зараз (чи ще невідомих) особливостей будови і функції мозку, на наш погляд, лише поглиблять цю різницю.

Фінансування. Це дослідження не отримувало зовнішнього фінансування.

Конфлікт інтересів. Автор заявляє про відсутність фінансових, академічних чи особистих конфліктів інтересів, пов'язаних з публікацією цієї статті.

Згода на публікацію. Автор надає згоду на публікацію цього рукопису.

Розкриття інформації про ШІ. Під час підготовки цього рукопису не використовувалися інструменти ШІ.

Етичне схвалення. Робота не містить матеріалів, котрі потребують біоетичного аналізу та інституційного схвалення.

Література

1. Hatton IA, Galbraith ED, Merleau NSC, Miettinen TP, Smith BM, Shander JA. The human cell count and size distribution. *Proc Natl Acad Sci U S A*. 2023 Sep 26;120(39):e2303077120. doi: 10.1073/pnas.2303077120.
2. Цимбалюк В, Медведєв В. Людина і її мозок : монографія. Гайсин: «ТУТ»; 2026. Available from: <http://ir.librarynmu.com/handle/123456789/18368>.
3. Goriely A. Eighty-six billion and counting: do we know the number of neurons in the human brain? *Brain*. 2025 Mar 6;148(3):689-691. doi: 10.1093/brain/awae390.
4. von Bartheld CS, Bahney J, Herculano-Houzel S. The search for true numbers of neurons and glial cells in the human brain: A review of 150 years of cell counting. *J Comp Neurol*. 2016 Dec 15;524(18):3865-3895. doi: 10.1002/cne.24040.
5. Herculano-Houzel S. The glia/neuron ratio: how it varies uniformly across brain structures and species and what that means for brain physiology and evolution. *Glia*. 2014 Sep;62(9):1377-91. doi: 10.1002/glia.22683.
6. Mota B, Herculano-Houzel S. All brains are made of this: a fundamental building block of brain matter with matching neuronal and glial masses. *Front Neuroanat*. 2014 Nov 12;8:127. doi: 10.3389/fnana.2014.00127.
7. Wang H, Wang B, Normoyle KP, Jackson K, Spitler K, Sharrock MF, et al. Brain temperature and its fundamental properties: a review for clinical neuroscientists. *Front Neurosci*. 2014 Oct 8;8:307. doi: 10.3389/fnins.2014.00307.
8. Watts ME, Pocock R, Claudianos C. Brain Energy and Oxygen Metabolism: Emerging Role in Normal Function and Disease. *Front Mol Neurosci*. 2018 Jun 22;11:216. doi: 10.3389/fnmol.2018.00216.
9. Camandola S, Mattson MP. Brain metabolism in health, aging, and neurodegeneration. *EMBO J*. 2017 Jun 1;36(11):1474-1492. doi: 10.15252/embj.201695810.
10. McCaslin T. Transmitting fibers in the brain: Total length and distribution of lengths. *AI Impacts* [Internet]. 2018 [cited 2026 May 04]. Available from: <https://aiimpacts.org/transmitting-fibers-in-the-brain-total-length-and-distribution-of-lengths/>.
11. Відстань до Місяця. Wikipedia [Internet]. 2026 [cited 2026 May 04]. Available from: https://uk.wikipedia.org/wiki/Відстань_до_Місяця.
12. Diem AK, Carare RO, Weller RO, Bressloff NW. A control mechanism for intra-mural peri-arterial drainage via astrocytes: How neuronal activity could improve waste clearance from the brain. *PLoS One*. 2018 Oct 4;13(10):e0205276. doi: 10.1371/journal.pone.0205276.
13. Wong AD, Ye M, Levy AF, Rothstein JD, Bergles DE, Searson PC. The blood-brain barrier: an engineering perspective. *Front Neuroeng*. 2013 Aug 30;6:7. doi: 10.3389/fneng.2013.00007.
14. Grace K. Scale of the Human Brain. *AI Impacts* [Internet]. 2015 [cited 2026 May 04]. Available from: https://aiimpacts.org/scale-of-the-human-brain/#Number_of_synapses_in_the_neocortex.
15. Silbereis JC, Pochareddy S, Zhu Y, Li M, Sestan N. The Cellular and Molecular Landscapes of the Developing Human Central Nervous System. *Neuron*. 2016 Jan 20;89(2):248-68. doi: 10.1016/j.neuron.2015.12.008.
16. Pakkenberg B, Pelvig D, Marner L, Bundgaard MJ, Gundersen HJ, Nyengaard JR, et al. Aging and the human neocortex. *Exp Gerontol*. 2003 Jan-Feb;38(1-2):95-9. doi: 10.1016/s0531-5565(02)00151-1.

17. Wang Y, Liu D, Wang Y. Discovering the Capacity of Human Memory. *Brain Mind* 2003;4:189-98. doi: 10.1023/A:1025405628479.
18. Sandberg A, Bostrom N. Whole Brain Emulation: A Roadmap. Technical Report #2008-3 [Internet]. Future of Humanity Institute: Oxford University; 2008 [cited 2026 May 04]. Available from: <https://ora.ox.ac.uk/objects/uuid:a6880196-34c7-47a0-80f1-74d32ab98788>.
19. Milo R, Phillips R. How many proteins are in a cell? *Cell Biology by the Numbers* [Internet]. 2015 [cited 2026 May 04]. Available from: <http://book.bionumbers.org/how-many-proteins-are-in-a-cell/>.
20. Aebersold R, Agar JN, Amster IJ, Baker MS, Bertozzi CR, Boja ES, et al. How many human proteoforms are there? *Nat Chem Biol*. 2018 Feb 14;14(3):206-214. doi: 10.1038/nchembio.2576.
21. Число Грема. Wikipedia [Internet]. 2026 [cited 2026 May 05]. Available from: https://uk.wikipedia.org/wiki/Число_Грема.
22. Теорія Ремзі. Wikipedia [Internet]. 2026 [cited 2026 May 05]. Available from: https://uk.wikipedia.org/wiki/Теорія_Ремзі.
23. Graham's number. Wikipedia [Internet]. 2026 [cited 2026 May 05]. Available from: https://en.wikipedia.org/wiki/Graham%27s_number.
24. Кордюм ВА. Наша «шагрєневая кожа» – это наша проблема. Нам ее и решать. Киев: Логос; 2006.
25. Observable universe. Wikipedia [Internet]. 2026 [cited 2026 May 05]. Available from: https://en.wikipedia.org/wiki/Observable_universe.
26. Dark matter. Wikipedia [Internet]. 2026 [cited 2026 May 05]. Available from: https://en.wikipedia.org/wiki/Dark_matter.
27. Lingam M, Frank A, Balbi A. Planetary Scale Information Transmission in the Biosphere and Technosphere: Limits and Evolution. *Life (Basel)*. 2023 Aug 31;13(9):1850. doi: 10.3390/life13091850.
28. Landenmark HK, Forgan DH, Cockell CS. An Estimate of the Total DNA in the Biosphere. *PLoS Biol*. 2015 Jun 11;13(6):e1002168. doi: 10.1371/journal.pbio.1002168.
29. Goldman N, Bertone P, Chen S, Dessimoz C, LeProust EM, Sipos B, et al. Towards practical, high-capacity, low-maintenance information storage in synthesized DNA. *Nature*. 2013 Feb 7;494(7435):77-80. doi: 10.1038/nature11875.
30. Zhirnov V, Zadegan RM, Sandhu GS, Church GM, Hughes WL. Nucleic acid memory. *Nat Mater*. 2016 Apr;15(4):366-70. doi: 10.1038/nmat4594.
31. Panda D, Molla KA, Baig MJ, Swain A, Behera D, Dash M. DNA as a digital information storage device: hope or hype? *3 Biotech*. 2018 May;8(5):239. doi: 10.1007/s13205-018-1246-7.
32. Rutten MGTA, Vaandrager FW, Elemans JAAW, Nolte RJM. Encoding information into polymers. *Nat Rev Chem*. 2018;2, 365-81. doi: 10.1038/s41570-018-0051-5.
33. Ceze L, Nivala J, Strauss K. Molecular digital data storage using DNA. *Nat Rev Genet*. 2019 Aug;20(8):456-466. doi: 10.1038/s41576-019-0125-3.
34. Zhang S, Wu J, Huang B, Liu Y. High-density information storage and random access scheme using synthetic DNA. *3 Biotech*. 2021 Jul;11(7):328. doi: 10.1007/s13205-021-02882-w.
35. Shen P, Zheng Y, Zhang C, Li S, Chen Y, Chen Y, et al. DNA storage: The future direction for medical cold data storage. *Synth Syst Biotechnol*. 2025 Mar 14;10(2):677-695. doi: 10.1016/j.synbio.2025.03.006.
36. Reinsel D, Gantz J, Rydning J. The digitization of the world: from edge to core [Internet]. Framingham (MA): International Data Corporation; 2018 [cited 2026 May 06]. 28 p. Report No.: IDC White Paper - #US44413318. Available from: <https://www.seagate.com/files/www-content/our-story/trends/files/idc-seagate-dataage-whitepaper.pdf>.
37. Zhang C, Wu R, Sun F, Lin Y, Liang Y, Teng J, et al. Parallel molecular data storage by printing epigenetic bits on DNA. *Nature*. 2024 Oct;634(8035):824-832. doi: 10.1038/s41586-024-08040-5.
38. Han D, Pal S, Liu Y, Yan H. Folding and cutting DNA into reconfigurable topological nanostructures. *Nat Nanotechnol*. 2010 Oct;5(10):712-7. doi: 10.1038/nnano.2010.193.
39. Ji W, Xiong X, Cao M, Zhu Y, Li L, Wang F, et al. Encoding signal propagation on topology-programmed DNA origami. *Nat Chem*. 2024 Sep;16(9):1408-1417. doi: 10.1038/s41557-024-01565-2.
40. Chatterjee G, Dalchau N, Muscat RA, Phillips A, Seelig G. A spatially localized architecture for fast and modular DNA computing. *Nat Nanotechnol*. 2017 Sep;12(9):920-927. doi: 10.1038/nnano.2017.127.
41. Endo M, Sugiyama H. DNA Origami Nanomachines. *Molecules*. 2018 Jul 18;23(7):1766. doi: 10.3390/molecules23071766.
42. Jing X, Kroneberg N, Peil A, Renz B, Ding L, Heil T, et al. DNA moiré superlattices. *Nat Nanotechnol*. 2025 Oct;20(10):1464-1472. doi: 10.1038/s41565-025-01976-3.
43. Igarashi J. Future projections for mammalian whole-brain simulations based on technological trends in related fields. *Neurosci Res*. 2025 Jun;215:64-76. doi: 10.1016/j.neures.2024.11.005.
44. El Capitan (supercomputer). Wikipedia [Internet]. 2026 [cited 2026 May 06]. Available from: [https://en.wikipedia.org/wiki/El_Capitan_\(supercomputer\)](https://en.wikipedia.org/wiki/El_Capitan_(supercomputer)).

45. Kan M. Inside the World's Fastest Supercomputer and Its Mission to Test Nuclear Weapons. PCMag Middle East [Internet]. 2025 [cited 2026 May 20]. Available from: <https://me.pcmag.com/en/computers-electronics/27876/inside-the-worlds-fastest-supercomputer-and-its-mission-to-test-nuclear-weapons>.
46. Levy WB, Calvert VG. Communication consumes 35 times more energy than computation in the human cortex, but both costs are needed to predict synapse number. *Proc Natl Acad Sci U S A*. 2021 May 4;118(18):e2008173118. doi: 10.1073/pnas.2008173118.
47. Chudler EH. Brain facts and figures: Blood supply [Internet]. Seattle (WA): University of Washington; [updated 2020; cited 2026 May 06]. Available from: <https://faculty.washington.edu/chudler/facts.html#blood>.
48. Silbereis JC, Pochareddy S, Zhu Y, Li M, Sestan N. The Cellular and Molecular Landscapes of the Developing Human Central Nervous System. *Neuron*. 2016 Jan 20;89(2):248-68. doi: 10.1016/j.neuron.2015.12.008.
49. Rivara CB, Sherwood CC, Bouras C, Hof PR. Stereologic characterization and spatial distribution patterns of Betz cells in the human primary motor cortex. *Anat Rec A Discov Mol Cell Evol Biol*. 2003 Feb;270(2):137-51. doi: 10.1002/a.a.10015.
50. Jacobs B, Garcia ME, Shea-Shumsky NB, Tennison ME, Schall M, Saviano MS, et al. Comparative morphology of gigantopyramidal neurons in primary motor cortex across mammals. *J Comp Neurol*. 2018 Feb 15;526(3):496-536. doi: 10.1002/cne.24349.
51. Saliani A, Perraud B, Duval T, Stikov N, Rossignol S, Cohen-Adad J. Axon and Myelin Morphology in Animal and Human Spinal Cord. *Front Neuroanat*. 2017 Dec 22;11:129. doi: 10.3389/fnana.2017.00129.
52. Lemon RN. The Cortical "Upper Motoneuron" in Health and Disease. *Brain Sci*. 2021 May 12;11(5):619. doi: 10.3390/brainsci11050619.
53. Lemon RN. Descending pathways in motor control. *Annu Rev Neurosci*. 2008;31:195-218. doi: 10.1146/annurev.neuro.31.060407.125547.
54. Rathelot JA, Strick PL. Muscle representation in the macaque motor cortex: an anatomical perspective. *Proc Natl Acad Sci U S A*. 2006 May 23;103(21):8257-62. doi: 10.1073/pnas.0602933103.
55. Nolan M, Scott C, Hof PR, Ansorge O. Betz cells of the primary motor cortex. *J Comp Neurol*. 2024 Jan;532(1):e25567. doi: 10.1002/cne.25567.
56. Hartman CG. How Large is the Mammalian Egg? A Review. *The Quarterly Review of Biology*. 1929 Sep;4(3):373-88. doi:10.1086/394338.
57. Gautier O, Blum JA, Maksymetz J, Chen D, Schweingruber C, Mei I, et al. Challenges of profiling motor neuron transcriptomes from human spinal cord. *Neuron*. 2023 Dec 6;111(23):3739-3741. doi: 10.1016/j.neuron.2023.10.035.
58. Yadav A, Matson KJE, Li L, Hua I, Petrescu J, Kang K, et al. A cellular taxonomy of the adult human spinal cord. *Neuron*. 2023 Feb 1;111(3):328-344.e7. doi: 10.1016/j.neuron.2023.01.007.
59. Kawamura Y, O'Brien P, Okazaki H, Dyck PJ. Lumbar motoneurons of man II: the number and diameter distribution of large- and intermediate-diameter cytons in "motoneuron columns" of spinal cord of man. *J Neuropathol Exp Neurol*. 1977;36(5):861-70. doi: 10.1097/00005072-197709000-00010.
60. Kawamura Y, Okazaki H, O'Brien PC, Dyck PJ. Lumbar motoneurons of man: I) number and diameter histogram of alpha and gamma axons of ventral root. *J Neuropathol Exp Neurol*. 1977;36(5):853-60. doi: 10.1097/00005072-197709000-00009.
61. Hauck EF, Schwefer M, Wittkowski W, Bothe HW. Measurements and mapping of 282,420 nerve fibers in the S1-5 nerve roots. *J Neurosurg Spine*. 2009 Sep;11(3):255-63. doi: 10.3171/2009.3.SPINE17684.
62. Schalow G. Efferent and afferent fibres in human sacral ventral nerve roots: basic research and clinical implications. *Electromyogr Clin Neurophysiol*. 1989 Jan-Feb;29(1):33-53.
63. Roser M, Appel C, Ritchie H. Human height [Internet]. Oxford (UK): Our World in Data; 2013 [updated 2024 Jan; cited 2026 May 06]. Available from: <https://ourworldindata.org/human-height>.

Cerebrum ut Supermachina: How Neuromorphology Tempers Technomania

Volodymyr Medvediev

Department of Neurosurgery, Bogomolets National Medical University, Kyiv, Ukraine

Corresponding author:

Volodymyr Medvediev

e-mail: vavo2010@gmail.com

Abstract: an important modern challenge of scientific and technological progress is the formation in the public consciousness of the belief in a certain imperfection of biological beings in comparison with products of the

technological sphere, in particular, with samples of computing hardware combined with algorithmic models of intelligence. In students of biomedical specialties, such biases can contribute to the utilitarianization of the human phenomenon with corresponding consequences for conscientiousness in working with patients. The purpose of this work is to demonstrate at the modern empirical level the exceptional complexity of the structure of the human brain and the scale of the engineering and technological gap between it and the avant-garde of man-made computing hardware. Using the method of searching and summarizing scientific information, we selected data on the main digital characteristics of the human brain and the two largest human neurons — Betz cells and spinal α -motoneurons. As a result, we present data on the number of neurons, gliocytes and endothelial cells in the human brain, the number, total length and surface area of its capillaries, the length of all its nerve fibers, the total number of its synapses, the dynamics of the formation of neurons and synapses during its intrauterine development, as well as data on the possible information capacity and computational speed of the human brain. We compare these and other parameters of the human brain with the parameters of the current record holder in the field of supercomputers, demonstrating a dramatic gap between them in favor of the human brain. We also present the main morphometric characteristics of the two largest cells in the human body — Betz cells and spinal α -motoneurons, demonstrating the unique ability of living things to have a stable cellular organization even on a macroscopic scale. As a conclusion, the human brain remains fundamentally unachievable to abiotic modeling even from the point of view of current — far incomplete and limited — ideas about its intimate structure and functions.

Key words: [Brain](#), [Neurons](#), [Nerve Fibers](#), [Synapses](#), [Motor Neurons](#), [Memory](#), [Information Science](#).



Copyright: © 2026 by the authors;
licensee USMYJ, Kyiv, Ukraine.

This article is an open access article
distributed under the terms and conditions of the Creative
Commons Attribution License

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>.