

АНАТОМИЯ ЧЕЛОВЕКА/HUMAN ANATOMY

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.160.29>

ИЕРАРХИЯ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ СИСТЕМ ГОЛОВНОГО МОЗГА

Обзор

Пировски Н.¹, Димов И.^{2,*}, Петришин В.Л.³, Бечвая Г.Т.⁴, Кучай А.А.⁵, Байсекеева А.Д.⁶, Поцхверашвили Л.П.⁷²ORCID : 0000-0001-9155-1155;⁵ORCID : 0000-0002-7974-9369;¹Фракийский университет, Стара-Загора, Болгария^{2, 3, 4, 6, 7}Первый Санкт-Петербургский государственный медицинский университет имени академика И. П. Павлова, Санкт-Петербург, Российская Федерация⁵Городская больница №14. Центр спасения конечностей, Санкт-Петербург, Российская Федерация

* Корреспондирующий автор (doktordimov[at]mail.ru)

Аннотация

Мозг — это высокоорганизованная структура, координирующая сложные биологические процессы. Его эволюционное развитие прослеживает постепенную специализацию нервной системы — от ганглиев у беспозвоночных до развития неокортекса у приматов. В настоящем исследовании анализируется иерархия функциональных систем мозга и их взаимосвязь с регуляцией нейромедиаторов.

Целью исследования является отслеживание возникновения и развития основных структур мозга в различных таксономических группах и анализ их роли в физиологической и когнитивной регуляции. Особое внимание уделяется взаимодействию между структурной организацией и химической регуляцией посредством нейротрансмиттеров.

Методы: исследование основано на сравнительном анализе литературных источников в области нейроанатомии, физиологии и эволюционной биологии. Рассматриваются пять основных нейромедиаторов (дофамин, серотонин, ацетилхолин, глутамат и ГАМК), а также роль оксида азота как газообразного модулятора. Включен интегративный подход к анализу нейронных сетей, центрального канала спинного мозга и желудочковой системы.

Результаты: иерархия структур мозга тесно связана с эволюционным развитием организмов. Анализ показывает, что функциональная сложность нервной системы связана с увеличением плотности нейронов и расширением негативного пространства (желудочковой системы). Центральный канал спинного мозга играет ключевую роль в циркуляции спинномозговой жидкости и обеспечении метаболической поддержки нейронных сетей. Клауструм был определен как важный интегратор сенсорно-когнитивной обработки. Взаимодействие между химической регуляцией нейротрансмиттеров и морфологическим развитием мозга подчеркивает важность динамического равновесия в нервной системе.

Заключение: расширенное понимание нейронной организации и функциональной иерархии открывает новые перспективы для разработки интерфейсов «мозг-машина» и совершенствования нейроинспирированного искусственного интеллекта. Полное картирование мозговых связей (проект Human Connectome) выявляет уровни сложности, которые превышают современные вычислительные возможности, что требует разработки новых технологий для интеграции биологических и искусственных систем.

Ключевые слова: иерархия, функциональные системы мозга, нейротрансмиттеры, новый педагогический метод, спиральная теория человеческого тела.

HIERARCHY OF BRAIN FUNCTIONAL SYSTEMS

Review article

Pirovski N.¹, Dimov I.^{2,*}, Petrishin V.L.³, Bechvaya G.T.⁴, Kuchay A.A.⁵, Baisekeeva A.D.⁶, Potskhverashvili L.P.⁷²ORCID : 0000-0001-9155-1155;⁵ORCID : 0000-0002-7974-9369;¹Thrace University, Stara Zagora, Bulgaria^{2, 3, 4, 6, 7}First Pavlov State Medical University of St. Petersburg, Saint-Petersburg, Russian Federation⁵City Hospital № 14. Limb Salvage Center, Saint-Petersburg, Russian Federation

* Corresponding author (doktordimov[at]mail.ru)

Abstract

The brain is a highly organised structure that coordinates complex biological processes. Its evolutionary development traces the gradual specialisation of the nervous system — from ganglia in invertebrates to the development of the neocortex in primates. This study analyses the hierarchy of functional systems in the brain and their relationship with neurotransmitter regulation.

The aim of the study is to track the emergence and development of key brain structures in different taxonomic groups and analyse their role in physiological and cognitive regulation. Particular attention is paid to the interaction between structural organisation and chemical regulation via neurotransmitters.

Methods: The study is based on a comparative analysis of literature sources in the fields of neuroanatomy, physiology, and evolutionary biology. Five major neurotransmitters (dopamine, serotonin, acetylcholine, glutamate, and GABA) are reviewed, as well as the role of nitric oxide as a gaseous modulator. An integrative approach to the analysis of neural networks, the central canal of the spinal cord, and the ventricular system is included.

Results: The hierarchy of brain structures is closely linked to the evolutionary development of organisms. Analysis shows that the functional complexity of the nervous system is associated with an increase in neuron density and an expansion of negative space (the ventricular system). The central canal of the spinal cord plays a key role in cerebrospinal fluid circulation and providing metabolic support to neural networks. The claustrum has been identified as an important integrator of sensory-cognitive processing. The interaction between the chemical regulation of neurotransmitters and the morphological development of the brain highlights the importance of dynamic equilibrium in the nervous system.

Conclusion: An expanded understanding of neural organisation and functional hierarchy opens up new perspectives for the development of brain-machine interfaces and the improvement of neuro-inspired artificial intelligence. Complete mapping of brain connections (the Human Connectome Project) identifies levels of complexity that exceed current computational capabilities, requiring the development of new technologies for integrating biological and artificial systems.

Keywords: hierarchy, functional brain systems, neurotransmitters, new teaching method, spiral theory of the human body.

Введение

Мозг как центр координации и управления сложными биологическими системами демонстрирует высокую степень иерархичности в своей функциональной организации. Различные структуры мозга постепенно появлялись в ходе эволюции, причем первые ганглии автономной нервной системы (АНС) появились у беспозвоночных, таких как насекомые, где они контролируют основные физиологические процессы [21]. С другой стороны, рефлекторные дуги характерны для позвоночных, обеспечивая быструю реакцию на сенсорные стимулы [24]. Ретикулярная формация, играющая ключевую роль в регуляции сознания и внимания, развилась у земноводных, обеспечивая более сложную координацию движений и поведения [5]. Лимбическая система, которая объединяет эмоции и память, хорошо выражена у млекопитающих, тогда как эпифиз, регулирующий циркадные ритмы, обнаружен даже у рыб [10]. Медиальная префронтальная кора и теменная кора, связанные с исполнительными функциями и сенсорной интеграцией, достигают своего полного развития у приматов, включая человека [25]. Этот эволюционный прогресс подчеркивает важность нейронной специализации и интеграции для адаптации организмов к сложным условиям окружающей среды.

Цель настоящего исследования — анализ иерархической организации функциональных систем мозга с помощью сравнительного подхода, охватывающего различные таксономические группы. Особое внимание уделяется взаимодействию между нейротрансмиттерами и структурной организацией для обеспечения функционального баланса в мозге. Изложение текста представлено как новый педагогический подход в обучении и изучении нервной системы, согласно «Спиральной теории человеческого тела». Сравнительный таксономический подход использован лишь в той степени, в какой это необходимо для выделения определённых качественных изменений в организации нервной системы. Он не является исчерпывающим, что и невозможно в рамках краткой статьи.

Функциональные системы мозга представляют собой динамичные, саморегулирующиеся сложные нейронные сети, которые объединяют различные структуры мозга и интегрируют сенсорные, двигательные и когнитивные процессы для выполнения специализированных функций, таких как регуляция физиологических процессов, обработка сенсорной информации, координация движений, эмоциональная регуляция и когнитивные процессы, обеспечивая достижение конкретных поведенческих или физиологических результатов и адаптивное взаимодействие организма с окружающей средой, сформированных эволюционными и онтогенетическими процессами [8].

Хотя уже давно доказано, что полное картографирование мозга невозможно, совсем недавно это утверждение было поставлено под сомнение глобальными проектами по картографированию мозговых связей. Полное картографирование нейронных связей человеческого мозга представляет собой фундаментальный вызов для современной нейронауки, лежащий в основе новых представлений о сознании, психических расстройствах и искусственном интеллекте.

Одним из наиболее значимых проектов в этом направлении является Human Connectome Project (HCP) в США, начатый в 2010 году с целью картографирования функциональных и структурных связей в мозге здоровых людей с использованием инновационных технологий, таких как диффузионная и функциональная магнитно-резонансная томография. Проект привёл к созданию открытой базы данных и новых аналитических инструментов, позволяющих более точно диагностировать нейронные аномалии [30].

Дополнительный импульс развитию коннектомики дала инициатива BRAIN (Brain Research through Advancing Innovative Neurotechnologies), объявленная в 2013 году правительством США как часть национальной научной стратегии. Её целью было не просто картографирование мозга, но и разработка технологий для наблюдения и управления мозговой активностью в реальном времени. Эта инициатива ускорила развитие таких направлений, как оптогенетика, нанозонды и новейшие методы визуализации, заложив тем самым основы для терапевтических и интерфейсных приложений [24].

В Европе проект Human Brain Project (HBP), реализованный в период с 2013 по 2023 год, объединил нейронауку с суперкомпьютерными технологиями и искусственным интеллектом. Проект имел амбициозную цель создать цифровую симуляцию человеческого мозга и положил начало платформе EBRAINS. Благодаря ей учёные получили доступ к стандартизированным инструментам и данным для моделирования мозговых процессов, включая нейронную связанность и поведенческие паттерны [5].

Параллельно с этими западными инициативами, China Brain Project, запущенный в рамках программы «Китай 2030», объединяет фундаментальную нейронауку, изучение мозговых заболеваний и разработку искусственного интеллекта, вдохновлённого мозгом. Проект сочетает исследования на людях и животных, включая приматов, и направлен на выявление универсальных принципов организации мозга, применимых как в медицине, так и в технологиях [25].

В совокупности эти масштабные международные инициативы формируют глобальную парадигму изучения мозга — от описания нейронных сетей до их цифрового моделирования. Они не только закладывают новые научные основы, но и открывают возможности для применения в психиатрии, робототехнике, нейротехнологиях и персонализированной медицине.

Материалы и методы

Источники данных. Исследование основано на обзоре современной научной литературы, охватывающей публикации по нейроанатомии, эволюционной биологии и физиологии. Были проанализированы как эмпирические исследования, так и метаанализы по темам, связанным с функциональной организацией мозга.

Аналитический подход. Сравнительный анализ проводился посредством систематического описания основных структур мозга и их функций. Для прослеживания эволюции структур использовался исторический подход, при этом обращалось внимание на появление ганглиев у беспозвоночных, ретикулярной формации у амфибий, лимбической системы у млекопитающих и развитие коры у приматов.

Методы анализа нейротрансмиттеров. Пять основных нейромедиаторов — дофамин, серотонин, ацетилхолин, глутамат и ГАМК — были проанализированы с использованием литературных данных об их роли в мозговых циклах. Оксид азота изучался как уникальный газообразный нейромедиатор, подчеркивая его функцию в регуляции и регулировании нервной активности [3], [23].

Интегративный подход. Функциональные системы рассматриваются в контексте их взаимосвязи, включая синхронизацию активности между различными областями мозга и их химическую регуляцию нейротрансмиттерами.

Результаты

3.1. Классификация структур нервной системы

Центр человеческого тела, как и центр нервной системы, не имеют исчерпывающего определения. В передней части тела расположены многочисленные ганглии, в основном парасимпатической части автономной нервной системы (АНС), энтеральной нервной системы, автономной сердечной нервной системы и т. д. В задней части тела расположена так называемая центральная нервная система со спинным мозгом (ближе к центру тела) и большим мозгом в голове. От них отходят периферические нервы — спинномозговые и черепные (СЧМ), имеющие самостоятельный ход (межреберные нервы, СЧМ I, II, III, IV, VI, VIII, XII), а остальные нервы участвуют в образовании сплетений (в сплетениях участвует большинство спинномозговых нервов, а также СЧМ V, VII, IX, X и XI). Симпатическая часть вегетативной нервной системы занимает относительно среднее положение. В центре тела мы не имеем выраженных нейронных структур, поэтому названия центральная и периферическая нервная система не совсем точны с морфологической точки зрения. Иерархия функциональных систем мозга является лишь частью иерархии неврологических функциональных систем организма.

Электромагнетизм является основополагающим для функционирования нервной системы, на этом уровне организации чрезвычайно интересна роль одной структуры: Nucleus Tractus Solitarius и запрограммированная смерть. Ядро одиночного пути (NTS) — ключевая структура продолговатого мозга, играющая роль не только в регуляции вегетативных функций, но и в запрограммированной смерти. По словам Нико Зурака (2021) в его книге «Метанейробиология смерти», NTS может активироваться при определенных физиологических и патофизиологических условиях, запуская нейронные механизмы, связанные с прекращением процессов жизнеобеспечения. Сюда входит активация сигнальных путей, регулирующих апоптоз и воспалительные реакции, как часть контролируемых адаптивных реакций на тяжелые стрессовые состояния или хронические заболевания. Основным механизмом коммуникации для этой функции является электромагнетизм как более быстрая система передачи сигналов. Эта концепция подчеркивает сложную роль NTS в поддержании баланса между жизнью и смертью на системном уровне [32].

На уровне химических реакций главную роль в деятельности нервной системы играют нейромедиаторы. Пять основных типов нейромедиаторов — дофамин, серотонин, ацетилхолин, глутамат и ГАМК — обеспечивают нейрохимическую основу различных функциональных циклов в мозге. Их чередующаяся активность обеспечивает баланс между возбуждением, торможением и регуляцией когнитивных процессов [30]. Оксид азота играет уникальную роль газообразного нейромедиатора, который помогает регулировать синаптическую пластичность и сосудистый тонус [2]. Его диффузная природа обеспечивает быстрое и широкое распространение, что уравнивает активность других нейротрансмиттеров [9]. Возможное формирование нейронных стимулов в спинномозговой жидкости (СМЖ) изучалось как альтернативный механизм нейронной коммуникации [6]. Данные предыдущих исследований показывают, что определенные химические сигналы, растворенные в спинномозговой жидкости, могут распространяться диффузно и вызывать электрические потенциалы в соседних нейронах [27]. Эти стимулы, хотя изначально локализованы, могут приводить к вторичному росту нейронных сетей, что поддерживает пластичность мозга и может быть связано с регуляцией долговременной памяти и адаптивных реакций [25].

3.2. Уточнение понятия «иерархия»

Иерархия в контексте функциональных систем мозга относится к организованному расположению анатомических структур и их функций, при котором нижние уровни организации (простые структуры с базовыми функциями) служат основой для более высоких уровней (сложные структуры с интегрированными когнитивными и физиологическими функциями). Эта иерархия отражает эволюционную последовательность развития, функциональную специализацию и интеграцию нейронных сетей, где более сложные структуры зависят от более простых и одновременно координируют их деятельность.

3.3. Иерархическое расположение анатомических структур

1. Центральная часть спинного мозга и вентрикулярная система:

Основные структуры, обеспечивающие метаболическую поддержку и циркуляцию спинномозговой жидкости, присущие всем позвоночным, представляют собой фундаментальный компонент иерархической организации центральной нервной системы, поддерживая жизнедеятельность нейронных сетей и создавая основу для функциональной интеграции и эволюционного развития более сложных нервных образований. Центральный канал спинного мозга представляет собой узкую полость (отрицательное пространство), заполненную спинномозговой жидкостью, которая простирается по всей длине спинного мозга. Он выстлан эпендимальными клетками — специализированными глиальными клетками, которые участвуют в выработке и циркуляции спинномозговой жидкости. Центральный канал представляет собой остаток нейроцелома — первичной полости, образовавшейся в процессе эмбрионального развития. Его основная роль — центрировать орган и способствовать циркуляции спинномозговой жидкости, участвуя в амортизации и обмене веществ между нейронами и внеклеточной средой.

Расширение центрального канала в стволе мозга.

В процессе эмбрионального развития центральный канал спинного мозга расширяется в различные полости, которые образуют желудочковую систему головного мозга. Эта система включает в себя:

1) Четвертый желудочек, расположенный в области заднего мозга (продолговатый мозг, мост и мозжечок), который напрямую соединен с центральным каналом.

2) Сильвиев водопровод, соединяющий четвертый желудочек с третьим желудочком, проходя через средний мозг.

3) Третий желудочек, расположенный в промежуточном мозге, который обеспечивает связь с двумя боковыми желудочками через межжелудочковые отверстия (отверстия Монро).

4) Боковые желудочки, расположенные в конечном мозге, являются основными полостями в полушариях головного мозга.

Связь между негативным пространством и нервной тканью. Негативное пространство представляет собой область вокруг, между или в рамках объектов, которая не занята самим объектом, но которая определяет и подчеркивает его границы и форму.

В наиболее общем смысле негативное пространство относится к «пустоте» или «отсутствию», которое является столь же важным для восприятия и понимания целостной композиции, как и сам объект (позитивное пространство). Оно играет ключевую роль в искусстве, дизайне, архитектуре и даже в науке, где «отсутствие» чего-либо может нести столько же информации, сколько и его «присутствие» [24], [33], [34].

Под «негативным пространством» авторы понимают анатомические полости в нервной системе, такие как центральный канал спинного мозга и вентрикулярная система головного мозга (включающая четвертый, третий и боковые желудочки), заполненные спинномозговой жидкостью. Эти структуры, лишённые нейронной ткани, поддерживают метаболизм и циркуляцию жидкости, обеспечивая функциональную поддержку окружающим нейронным сетям и коррелируя с увеличением объема нервной ткани в ходе эволюционного развития. По мере расширения отрицательного пространства этой системы (центрального канала и полостей желудочков) вокруг нее наблюдается прогрессирующее увеличение объема нервной ткани. Эта корреляция между расширением центрального пустого пространства и увеличением нейронной массы вокруг него отражает эволюционную тенденцию к специализации и интеграции нейронных структур [22], [34]. Эта тенденция связана с изменением citoархитектуры — увеличивается плотность нейронов, разнообразие типов клеток и сложность нейронных связей. Например, в конечном мозге млекопитающих расширение боковых желудочков сопровождается интенсивной пролиферацией нейронов в зародышевой зоне, что приводит к формированию неокортекса — наиболее сложной структуры головного мозга [25].

Развитие структур мозга, связанных с центральным каналом и желудочковой системой, также способствует формированию оптической системы. На ранних стадиях эмбрионального развития часть стенок промежуточного мозга образует зрительные пузырьки — первичные структуры, из которых развиваются глазные яблоки. Глазные пузырьки, соединенные зрительными стебельками с третьим желудочком, заполнены полостью, являющейся продолжением центрального канала. Эта полость постепенно уменьшается по мере развития сетчатки и других слоев глазного яблока. Сама сетчатка является производным нервной трубки и представляет собой специализированную часть центральной нервной системы, участвующую в этом рецепторном органе. Циркуляция спинномозговой жидкости, обеспечиваемая желудочковой системой, имеет ключевое значение для поддержания метаболизма и гомеостаза структур, включая зрительный нерв и сетчатку. Это указывает на анатомическую и функциональную связь между центральным каналом спинного мозга, стволом мозга и глазным яблоком.

Эта динамическая связь между расширением негативного пространства, увеличением объема нервной ткани и изменениями citoархитектуры демонстрирует критический эволюционный механизм увеличения функциональной сложности нервной системы. Связи между спинным мозгом, головным мозгом и зрительной системой иллюстрируют сложную организацию нейронных сетей, которые обеспечивают эффективную обработку и передачу информации в нервной системе. При этом наблюдается спиральное скручивание структур за счет метамерной стриктуры тела. В конечном развитии системы спиральная структура меняет свое направление на 180°, возвращается к центру и делает новый виток спирали или переходит в другую систему. Предельная степень роста мозга достигнута у людей, где ограниченное пространство в черепе и метаболические потребности накладывают физические и энергетические ограничения на его дальнейшее увеличение. После рождения мозг человека продолжает расти и развиваться до раннего взрослого возраста, при этом функциональные системы достигают пика сложности примерно в возрасте 25–30 лет [7], [10]. После этой стадии начинается постепенное ухудшение структурной и функциональной интеграции, при этом первоначально наблюдаются изменения в долговременной памяти и когнитивной гибкости. В этом утверждении подчеркивается двойная уязвимость и динамика так называемых функциональных систем мозга, таких как: сенсорная интеграция (способность мозга объединять информацию от различных органов чувств для построения целостного представления об окружающей среде) и исполнительные функции (когнитивные процессы, такие как планирование, контроль внимания, саморегуляция, принятие решений). Именно потому, что эти системы развиваются раньше всего,

они и первыми начинают ухудшаться с возрастом. Это часть более широкой нейробиологической закономерности: структуры и функции, которые созревают рано, более уязвимы к возрастным изменениям [5], [19], [26].

Это может быть связано с более длительным «эксплуатационным периодом», накоплением клеточного износа или ограниченной способностью к компенсаторной нейропластичности. Авторы акцентируют внимание на нейроонтогенетической логике — что развитие и дегенерация не случайны, а следуют определенному порядку. Понимание этого порядка важно как для ранней диагностики когнитивных нарушений, так и для создания интервенций, которые поддерживают активность этих систем с возрастом.

2. Ганглии автономной нервной системы:

Самый нижний уровень иерархии, присущий беспозвоночным (например, насекомым). Регулируют основные физиологические функции, такие как сердечный ритм и пищеварение, обеспечивая базовую автономную координацию без централизованного мозга. ВНС обеспечивают первичный уровень автономной регуляции, контролируя основные физиологические процессы, такие как частота сердечных сокращений, артериальное давление и пищеварение. Исследования подчеркивают их роль как основы интеграции сенсорной информации и двигательных реакций [7], [12], [13], [24]. ВНС функционирует посредством двух основных ветвей — симпатической и парасимпатической, которые взаимодействуют для поддержания гомеостаза.

3. Рефлекторные дуги (спинномозговые нейроны):

Появляются у позвоночных, представляя следующий уровень, обеспечивая быстрые, автоматизированные реакции на сенсорные стимулы через спинномозговые нейроны, что повышает адаптивность. Рефлекторная дуга представляет собой основной механизм реагирования на внешние раздражители. Он демонстрирует, как сенсорная информация может быть напрямую преобразована в двигательную реакцию через промежуточные нейроны в спинном мозге [14], [15], [17]. Эта функциональная простота имеет решающее значение для защиты и быстрого реагирования у различных организмов.

4. Ретикулярная формация:

Развивается у амфибий, находится в стволе мозга. Регулирует сознание, внимание и координацию движений, интегрируя сенсорную и моторную информацию. Ретикулярная формация, расположенная в стволе мозга, играет центральную роль в регуляции бодрствования, внимания и основных жизненных функций. Его роль в модуляции сенсорной информации и отправке сигналов в кору головного мозга делает его ключевым элементом в иерархии [5], [7], [21], [22].

5. Эпифиз:

Присущ рыбам и высшим позвоночным, регулирует циркадные ритмы посредством секреции мелатонина, синхронизируя физиологические процессы с окружающей средой.

6. Лимбическая система (гиппокамп и миндалина):

Выражена у млекопитающих, интегрирует эмоции и память, способствуя социальному поведению и адаптации к сложным условиям. Лимбическая система объединяет эмоциональные и когнитивные процессы. Миндалевидное тело и гиппокамп необходимы для эмоциональной регуляции и памяти, в то время как эпифиз регулирует циркадные ритмы посредством секреции мелатонина [11], [26], [28]. Такое сочетание функций позволяет организму адаптироваться к изменениям внешней среды.

7. Клауструм:

Идентифицирован как интегратор сенсорно-когнитивной обработки у млекопитающих, модулирует нейронную активность между кортикальными и подкорковыми регионами, поддерживая внимание и сознание. *Ограда (Claustrum)* — небольшая, но стратегически важная структура, расположенная в мозге, которая играет роль в интеграции нейропсихиатрических процессов, связанных с различными сенсорными и когнитивными функциями. Он расположен между наружной капсулой и таламусом и связан с различными областями коры головного мозга, а также с подкорковыми структурами. В нескольких научных исследованиях подчеркивается, что ограда играет ключевую роль в координации высших функций мозга, таких как внимание и восприятие [30], [31]. Основная ингибирующая функция клауструма выражается в его способности модулировать нейронную активность в связанных с ним областях. Воздействуя на кору головного мозга, он регулирует поток информации, ограничивая или усиливая определенные сенсорные сигналы в зависимости от контекста восприятия [11], [12]. Благодаря своим проекциям на двигательные и сенсорные области мозга ограда действует как важный модулятор сенсомоторной интеграции, обеспечивая адекватную реакцию на стимулы. Одной из основных теорий функционирования ограды является ее роль как «интегратора» информации, которая может быть подавлена в контексте подавления нейронных сетей, не нужных в данный момент. Это тормозящее действие необходимо для фильтрации сенсорной информации и предотвращения перегрузки мозга ненужными сигналами [17], [18]. Имеются данные о том, что ограда может участвовать в таких процессах, как внимание и сознание, подавляя ненужные или нерелевантные сенсорные сигналы, чтобы обеспечить лучшую концентрацию на важных стимулах [11], [24].

8. Медиальная префронтальная кора и теменная кора:

Достигают высокого развития у приматов, включая человека. Поддерживают исполнительные функции, принятие решений и сенсорную интеграцию, обеспечивая сложные когнитивные процессы. Облегчает планирование, абстрактное мышление и сложные когнитивные функции благодаря высокой плотности нейронов и сложным связям. Она регулирует сложные когнитивные процессы, поддерживая обратную связь с лимбической системой [24], [25], [30]. Теменная кора имеет решающее значение для интеграции сенсорной информации из разных модальностей, такой как тактильная, визуальная и проприоцептивная информация. Она также играет роль в восприятии времени и формировании временных иллюзий, которые основаны на синхронизации между различными нейронными сетями [16], [20], [21].

Эта иерархия демонстрирует прогрессию от простых автономных функций к сложным когнитивным процессам, где каждый уровень строится на предыдущем за счет увеличения нейронной сложности и интеграции. Химическая регуляция посредством нейротрансмиттеров достигает максимального уровня сложности, при котором необходим перезапускающий механизм — оксид азота играет эту уникальную роль как газообразный модулятор, иерархически отличая другие типы химического взаимодействия [5], [24].

Коннектом. Коннектом мозга представляет собой наиболее масштабную и сложную функциональную систему, которая объединяет все подсистемы нервной системы через комплексную карту всех нейронных связей и синаптических контактов. Эта всеобъемлющая нейронная архитектура включает в себя структурные и функциональные связи между миллиардами нейронов, формируя интегративную сеть, которая обеспечивает координацию и взаимодействие всех специализированных подсистем мозга — от соматосенсорной и моторной до когнитивной и эмоциональной. Коннектом функционирует как метасистема, которая не только связывает различные функциональные домены, но и обеспечивает их динамическое взаимодействие, пластичность и адаптивные возможности, представляя собой структурную основу для всех высших функций мозга и сознания [5], [30], [33].

Проект "Human Connectome Project" демонстрирует, несмотря на огромные и беспрецедентные современные усилия, что полное картирование функциональных связей в мозге выявляет уровни сложности, которые превосходят человеческое понимание и вычислительные возможности современных технологий [26], [28]. Каждый нейрон соединен с тысячами других, образуя сети необычайной сложности. Современные суперкомпьютеры способны моделировать лишь небольшие части этих сетей, а обработка данных, связанных с коннектомом, требует новых подходов в области искусственного интеллекта и нейроморфных вычислений. В этом контексте исследования показывают, что функциональные системы, такие как сенсорная интеграция и исполнительные функции, первыми достигают максимального развития в раннем взрослом возрасте, но также первыми начинают деградировать с возрастом. Этот процесс, известный как нейропластичность старения, подчеркивает динамический баланс между нейронной адаптивностью и неизбежным ухудшением в результате износа и возрастных изменений.

Является ли интерфейс «мозг-машина» новой внешней функциональной системой? Интерфейсы «мозг-машина» (ИМТ) — это инновационная технология. Интерфейс «мозг-машина» (ИМТ) или интерфейс «мозг-компьютер» (ИМК) — это технологии, которая обеспечивает прямое взаимодействие между нейронной активностью и внешними устройствами, такими как компьютеры или протезы. Эти системы регистрируют электрическую активность мозга и преобразуют её в команды для управления машинами. Они несут в себе многочисленные потенциальные преимущества, но также поднимают ряд этических и технологических вопросов. Среди основных преимуществ ИМТ — возможность восстановления утраченных функций у людей с неврологическими заболеваниями или травмами. Например, интерфейсы могут помочь парализованным пациентам управлять протезами или компьютерами посредством мысленных команд, восстанавливая значительную часть их независимости [18], [19], [26].

Кроме того, ИМТ открывает новые перспективы для исследований в области нейронауки и психологии, предоставляя прямой доступ к нейронной активности в реальном времени. Однако эта технология сопряжена с рядом проблем. Одним из главных недостатков является ограниченная точность и стабильность современных интерфейсов, которые не могут в полной мере отразить всю сложность мозговых сигналов. Кроме того, инвазивные методы имплантации несут в себе риск инфицирования, повреждения мозговой ткани и воспалительных реакций. Этические вопросы также выходят на первый план — от возможности манипулирования сознанием до вопросов конфиденциальности и защиты данных, связанных с нейронной активностью [29], [34]. Еще одним недостатком является социальное и экономическое неравенство, которое может усугубляться ИМТ. Доступ к этим технологиям, вероятно, будет ограничен финансовыми и инфраструктурными факторами, что может привести к появлению новых форм социальной сегрегации. Подключение к периферийным устройствам может расширить функции нервной системы как новой внешней функциональной системы. Внедрение интерфейсов «мозг-машина» требует тщательного баланса между их научным и практическим применением и потенциальными рисками, которые они представляют. Обеспечение этических и технических стандартов будет иметь ключевое значение для их безопасной и справедливой интеграции в общество.

Дискуссия

Иерархия функциональных систем мозга отражает сложное взаимодействие эволюционных структур и их специализации. Развитие ганглиев у беспозвоночных демонстрирует, как основные механизмы автономной регуляции могут поддерживаться даже при отсутствии центральной нервной системы [21]. Прогрессирование более сложных рефлекторных механизмов у позвоночных и возникновение ретикулярной формации демонстрируют, как мозг адаптируется к более сложной сенсорной и моторной интеграции [5], [14].

Интеграция лимбической системы и коры головного мозга, особенно у приматов, подчеркивает важность эмоций и когнитивных функций для выживания и социального взаимодействия [10], [25]. Кроме того, нейротрансмиттерные системы обеспечивают химическую основу для синхронизации этих процессов, а оксид азота играет уникальную роль в балансировке этих взаимодействий [20]. Интеграция эмоциональных, когнитивных и сенсорных процессов между различными областями мозга, такими как лимбическая система, префронтальная кора и ретикулярная формация, имеет ключевое значение для координации сложного поведения и адаптивных реакций. По мере развития исследований, например, связанных с проектом «Коннектом человека», появляется все больше подробностей о том, как различные структуры мозга взаимодействуют и влияют на наше поведение и познание. Нервная система функционирует не как автономная единица, а как динамически интегрированная сеть, в которой каждая структура играет определенную роль в поддержании гомеостаза и адаптации к изменяющимся условиям. Понимание этой интеграции открывает новые возможности для лечения неврологических и психиатрических заболеваний посредством целенаправленной модуляции определенных нейронных сетей и нейротрансмиттерных систем.

Что касается искусственного интеллекта, внутренняя динамика и организационный поток информации предполагают наличие сложной внутренней структуры с элементами саморефлексии; наиболее эффективная из известных на сегодняшний день — это структура нервной системы человека [15]. Это относится к внутренней организации и динамике информационного потока в человеческой нервной системе, которая характеризуется исключительной сложностью и саморефлексивной структурой, обеспечивающей эффективную обработку информации, адаптивность и когнитивные функции. Этот вывод сделан в контексте обсуждения нейроморфологии и ее влияния на развитие искусственного интеллекта, подчеркивая, что человеческая нервная система служит моделью для создания нейроинспирированных систем благодаря своей высокой эффективности в интеграции сенсорных, когнитивных и моторных процессов.

Нейроморфология оказала влияние на разработку искусственного интеллекта (ИИ) уделив особое внимание нейроморфным системам [1]. Нейроморфология как дисциплина изучает форму и структуру нейронов и нейронных сетей, что имеет важное значение для создания искусственного интеллекта, функционирующего по принципу работы мозга. Изучение нейроморфологии сыграло ключевую роль в развитии ИИ, особенно посредством нейроморфной инженерии, целью которой является проектирование систем, имитирующих биологические нервные системы. В статье «Нейроморфные системы искусственного интеллекта» [13], опубликованной в журнале *Frontiers in Neuroscience*, представлен всесторонний обзор того, как функции, подобные функциям мозга, интегрируются в конструкцию ИИ для преодоления ограничений традиционных архитектур, таких как архитектура фон Неймана. Нейроморфные системы используют такие характеристики мозга, как асинхронность и аналоговые вычисления, для достижения более высокой эффективности, что напрямую связано с нейроморфологией. Еще многое предстоит сделать. В исследованиях упоминаются такие проблемы, как отсутствие стандартизированных наборов данных [19], [24], [30].

Заключение

Данное исследование демонстрирует, что иерархическая организация функциональных мозговых систем, сформированная в процессе эволюции и поддерживаемая механизмами электрической и химической регуляции, обеспечивает динамическое равновесие, лежащее в основе физиологических и когнитивных функций. Эволюционное развитие определенных структур происходило в строгой иерархической последовательности, что определяет современную архитектуру нервной системы. Однако полное картографирование функциональных связей в мозге раскрывает уровни сложности, которые до сих пор превышают возможности человеческого понимания и современных вычислительных технологий. Особого внимания заслуживает клауструм, роль которого в процессах внимания и сознания требует дальнейшего углубленного изучения. Важным аспектом является способность нейронов модифицировать свою возбудимость под воздействием изменений химического состава спинномозговой жидкости и электромагнитных взаимодействий, что влияет даже на критические процессы, такие как механизм наступления смерти.

Глубокое понимание иерархической организации нервной системы человека открывает перспективы для разработки новых моделей интеграции искусственного интеллекта в более человекоподобные и потенциально более эффективные системы. Однако развитие технологий интерфейса мозг-машина создает двунаправленное взаимодействие: с одной стороны, организация информационной обработки в мозге вдохновляет создание новых технологий, а с другой стороны, эти же технологии способны непосредственно воздействовать на иерархическую структуру нервной системы, контролируя и модифицируя её функции вплоть до критических жизненных процессов. Это требует пересмотра классификации функциональных систем в нервной системе с учетом необходимости расширения понятия функциональной системы включением новых категорий, связанных с этими интерфейсами. Накопление новых детализированных данных о структуре и функциях нервной системы должно изменить фокус её преподавания в программах анатомии человека.

Конфликт интересов

Не указан.

Conflict of Interest

None declared.

Рецензия

Все статьи проходят рецензирование. Но рецензент или автор статьи предпочли не публиковать рецензию к этой статье в открытом доступе. Рецензия может быть предоставлена компетентным органам по запросу.

Review

All articles are peer-reviewed. But the reviewer or the author of the article chose not to publish a review of this article in the public domain. The review can be provided to the competent authorities upon request.

Список литературы / References

1. Альбертин С.В. От нейрональной модели целенаправленного поведения к моделированию систем искусственного интеллекта / С.В. Альбертин // *Успехи физиологических наук*. — 2019. — Т. 50. — № 2. — С. 23–37.
2. Петренко Ю. Окись азота и судьба человека / Ю. Петренко // *Наука и жизнь*. — 2004. — № 7. — URL: <https://www.nkj.ru/archive/articles/6410/> (дата обращения: 25.07.2025).
3. Кузнецова В.Л. Оксид азота: свойства, биологическая роль, механизмы действия / В.Л. Кузнецова, А.Г. Соловьева // *Современные проблемы науки и образования*. — 2015. — № 4. — 462 с. — EDN UDXAML.
4. Садикулов А.И. К вопросу о роли оксида азота в норме и при патологии нервной системы / А.И. Садикулов // *Системы и инструменты*. — 2020. — № 4. — С. 43–48.
5. Amunts K. The Human Brain Project: Creating a European Research Infrastructure to Decode the Human Brain / K. Amunts, C. Ebell, J. Muller [et al.] // *Neuron*. — 2016. — Vol. 92. — № 3. — P. 574–581. — DOI: 10.1016/j.neuron.2016.10.046.

6. Bjorefeldt A. Neuromodulation via the cerebrospinal fluid: Insights from recent in vitro studies / A. Bjorefeldt, S. Illes, H. Zetterberg [et al.] // *Frontiers in Neural Circuits*. — 2018. — Vol. 12. — 5 p.
7. Parvizi J. Consciousness and the brainstem / J. Parvizi, A. Damasio // *Cognition*. — 2001. — Vol. 79. — № 1–2. — P. 135–160. — DOI: 10.1016/S0010-0277(00)00127-X. — URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S001002770000127X> (accessed: 25.07.2025).
8. Buzsáki G. Neuronal oscillations in cortical networks / G. Buzsáki, A. Draguhn // *Science*. — 2004. — Vol. 304. — № 5679. — P. 1926–1929. — DOI: 10.1126/science.1099745.
9. Chachlaki K. Nitric oxide signalling in the brain and its control of bodily functions / K. Chachlaki, V. Prevot // *British Journal of Pharmacology*. — 2020. — Vol. 177. — № 24. — P. 5437–5458. — DOI: 10.1111/bph.14800.
10. Fjell A.M. Structural Brain Changes in Aging: Courses, Causes and Cognitive Consequences / A.M. Fjell, K.B. Walhovd // *Reviews in the Neurosciences*. — 2010. — Vol. 21. — № 3. — P. 187–221. — DOI: 10.1515/revneuro.2010.21.3.187.
11. Gitai D.L.G. Chronobiology of limbic seizures: Potential mechanisms and prospects of chronotherapy for mesial temporal lobe epilepsy / D.L.G. Gitai, T. Gomes de Andrade, Y.D.R. Ramos dos Santos [et al.] // *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*. — 2019. — Vol. 98. — P. 122–134. — DOI: 10.1016/j.neubiorev.2019.01.004.
12. Smith J.B. The claustrum / J.B. Smith, A.K. Lee, J. Jackson // *Current Biology*. — 2020. — Vol. 30. — № 23. — P. R1401–R1406. — DOI: 10.1016/j.cub.2020.09.069.
13. Hammer N. Comparison of Modified Thiel Embalming and Ethanol-Glycerin Fixation in an Anatomy Environment: Potentials and Limitations of Two Complementary Techniques / N. Hammer, S. Löffler, I. Bechmann [et al.] // *Anatomical Sciences Education*. — 2015. — Vol. 8. — № 1. — P. 74–85. — DOI: 10.1002/ase.1450.
14. Ivanov D. Neuromorphic Artificial Intelligence Systems / D. Ivanov, A. Chezhegov, M. Kiselev [et al.] // *Frontiers in Neuroscience*. — 2022. — Vol. 16. — DOI: 10.3389/fnins.2022.959626.
15. Insel T.R. The NIH BRAIN Initiative / T.R. Insel, S.C. Landis, F.S. Collins // *Science*. — 2013. — Vol. 340. — № 6133. — P. 687–688.
16. Dewey J. The reflex arc concept in psychology / J. Dewey // *Psychological Review*. 1896. — Vol. 3. — № 4. — P. 357–370. — DOI: 10.1037/h0070405.
17. Калайджиева Х. Философски проблеми, свързани с изкуствения интелект / Х. Калайджиева // *NotaBene*. — 2025. — № 67. — С. 84–88.
18. Andersen R.A. Multimodal integration for the representation of space in the posterior parietal cortex / R.A. Andersen // *Philosophical transactions of the Royal Society of London. Series B, Biological sciences*. — 1997. — Vol. 352. — P. 1421–1428. — DOI: 10.1098/rstb.1997.0128.
19. Edelstein L.R. The Claustrum: A Historical Review of Its Anatomy, Physiology, Cytochemistry and Functional Significance / L.R. Edelstein, F.J. Denaro // *Cellular and Molecular Biology*. — 2004. — № 50(6). — P. 675–702. — URL: https://www.researchgate.net/publication/8087100_The_claustrum_A_historical_review_of_its_anatomy_physiology_cytochemistry_and_functional_significance (accessed: 25.07.2025).
20. Lebedev M.A. Brain–Machine Interfaces: From Basic Science to Neuroprostheses and Neurorehabilitation / M.A. Lebedev, M.A.L. Nicolelis // *Physiological Reviews*. — 2017. — Vol. 97. — № 2. — P. 767–837. — DOI: 10.1152/physrev.00027.2016.
21. Leugering J. Neuromorphic Engineering: Artificial Brains for Artificial Intelligence / J. Leugering // *Annals of the New York Academy of Sciences*. — 2024. — Vol. 1542. — № 1. — P. 5–10. — DOI: 10.1111/nyas.15256.
22. Nicholls J.G. From Neuron to Brain / J.G. Nicholls [et al.]. — Sinauer Associates, 2011. — 765 p.
23. Picón-Pagès P. Functions and dysfunctions of nitric oxide in brain / P. Picón-Pagès, J. García-Buendía, F.J. Muñoz // *Biochimica et Biophysica Acta (BBA) — Molecular Basis of Disease*. — 2019. — Vol. 1865. — № 8. — P. 1949–1967.
24. Poo M.M. China Brain Project: Basic neuroscience, brain diseases, and brain-inspired computing / M.M. Poo, J.L. Du, N.Y. Ip [et al.] // *Neuron*. — 2016. — Vol. 92. — № 3. — P. 591–596.
25. Puelles L. A Developmental Ontology for the Mammalian Brain Based on the Prosomeric Model / L. Puelles, M. Harrison, G. Paxinos [et al.] // *Trends in Neurosciences*. — 2013. — Vol. 36. — № 10. — P. 570–578. — DOI: 10.1016/j.tins.2013.06.004.
26. Rakic P. Evolution of the Neocortex: A Perspective from Developmental Biology / P. Rakic // *Nature Reviews Neuroscience*. — 2009. — Vol. 10. — P. 724–735.
27. Skipor J. The choroid plexus–cerebrospinal fluid system: undervalued pathway of neuroendocrine signaling into the brain / Skipor, J.-C. Thiery // *Acta Neurobiologiae Experimentalis*. — 2008. — Vol. 68. — № 3. — P. 414–428. — DOI: 10.55782/ane-2008-1708.
28. Gibbons C.H. Basics of Autonomic Nervous System Function / C.H. Gibbons // *Handbook of Clinical Neurology*. — 2019. — Vol. 160. — P. 407–418. — DOI: 10.1016/B978-0-444-64032-1.00027-8.
29. Elderkin-Thompson V. Executive function and MRI prefrontal volumes among healthy older adults / V. Elderkin-Thompson, M. Ballmaier, G. Hellemann [et al.] // *Neuropsychology*. — 2008. — Vol. 22. — № 5. — P. 626–637. — DOI: 10.1037/0894-4105.22.5.626.
30. Van Essen D.C. The WU-Minn Human Connectome Project: An Overview / D.C. Van Essen [et al.] // *NeuroImage*. — 2013. — Vol. 80. — P. 62–79.
31. McCormick D.A. Convergence and Divergence of Neurotransmitter Action in Human Cerebral Cortex / D.A. McCormick, A. Williamson // *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*. — 1989. — Vol. 86. — № 20. — P. 8098–8102. — DOI: 10.1073/pnas.86.20.8098.
32. Yuste R. Four Ethical Priorities for Neurotechnologies and AI / R. Yuste, S. Goering, B. Agüera [et al.] // *Nature*. — 2017. — Vol. 551. — P. 159–163.

33. Zingg B. Input–Output Organization of the Mouse Claustrum / B. Zingg, H.-W. Dong, H. Whit Tao [et al.] // *Journal of Comparative Neurology*. — 2018. — Vol. 526. — № 15. — P. 2428–2443. — DOI: 10.1002/cne.24502.
34. Zurak N. *Metaneurobiology of Death* / N. Zurak. — Academic Press, 2018. — 184 p.

Список литературы на английском языке / References in English

1. Albertin S.V. Ot nejronal'noj modeli celenapravlennoogo povedeniya k modelirovaniyu sistem iskusstvennogo intellekta [From Neural Model of Goal-Directed Behavior Towards the Modeling of Artificial Intellect] / S.V. Albertin // *Uspekhi fiziologicheskikh nauk* [Progress in Physiological Sciences]. — 2019. — Vol. 50. — № 2. — P. 23–37. [in Russian]
2. Petrenko Yu. Okis' azota i sud'ba cheloveka [Nitric oxide and human destiny] / Yu. Petrenko // *Nauka i zhizn'* [Science and Life]. — 2004. — № 7. — URL: <https://www.nkj.ru/archive/articles/6410/> (accessed: 25.07.2025). [in Russian]
3. Kuznetsova V.L. Oksid azota: svoystva, biologicheskaya rol', mekhanizmy dejstviya [Nitric oxide: properties, biological role, mechanisms of action] / V.L. Kuznetsova, A.G. Solovyova // *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya* [Modern Problems of Science and Education]. — 2015. — № 4. — 462 p. — EDN UDXAML. [in Russian]
4. Sadikulov A.I. K voprosu o roli oksida azota v norme i pri patologii nervnoj sistemy [The role of nitric oxide in health and disease of the nervous system] / A.I. Sadikulov // *Sistemy i instrumenty* [Systems and Instruments]. — 2020. — № 4. — P. 43–48. [in Russian]
5. Amunts K. The Human Brain Project: Creating a European Research Infrastructure to Decode the Human Brain / K. Amunts, C. Ebell, J. Muller [et al.] // *Neuron*. — 2016. — Vol. 92. — № 3. — P. 574–581. — DOI: 10.1016/j.neuron.2016.10.046.
6. Bjorefeldt A. Neuromodulation via the cerebrospinal fluid: Insights from recent in vitro studies / A. Bjorefeldt, S. Illes, H. Zetterberg [et al.] // *Frontiers in Neural Circuits*. — 2018. — Vol. 12. — 5 p.
7. Parvizi J. Consciousness and the brainstem / J. Parvizi, A. Damasio // *Cognition*. — 2001. — Vol. 79. — № 1–2. — P. 135–160. — DOI: 10.1016/S0010-0277(00)00127-X. — URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S001002770000127X> (accessed: 25.07.2025).
8. Buzsáki G. Neuronal oscillations in cortical networks / G. Buzsáki, A. Draguhn // *Science*. — 2004. — Vol. 304. — № 5679. — P. 1926–1929. — DOI: 10.1126/science.1099745.
9. Chachlaki K. Nitric oxide signalling in the brain and its control of bodily functions / K. Chachlaki, V. Prevot // *British Journal of Pharmacology*. — 2020. — Vol. 177. — № 24. — P. 5437–5458. — DOI: 10.1111/bph.14800.
10. Fjell A.M. Structural Brain Changes in Aging: Courses, Causes and Cognitive Consequences / A.M. Fjell, K.B. Walhovd // *Reviews in the Neurosciences*. — 2010. — Vol. 21. — № 3. — P. 187–221. — DOI: 10.1515/revneuro.2010.21.3.187.
11. Gitai D.L.G. Chronobiology of limbic seizures: Potential mechanisms and prospects of chronotherapy for mesial temporal lobe epilepsy / D.L.G. Gitai, T. Gomes de Andrade, Y.D.R. Ramos dos Santos [et al.] // *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*. — 2019. — Vol. 98. — P. 122–134. — DOI: 10.1016/j.neubiorev.2019.01.004.
12. Smith J.B. The claustrum / J.B. Smith, A.K. Lee, J. Jackson // *Current Biology*. — 2020. — Vol. 30. — № 23. — P. R1401–R1406. — DOI: 10.1016/j.cub.2020.09.069.
13. Hammer N. Comparison of Modified Thiel Embalming and Ethanol-Glycerin Fixation in an Anatomy Environment: Potentials and Limitations of Two Complementary Techniques / N. Hammer, S. Löffler, I. Bechmann [et al.] // *Anatomical Sciences Education*. — 2015. — Vol. 8. — № 1. — P. 74–85. — DOI: 10.1002/ase.1450.
14. Ivanov D. Neuromorphic Artificial Intelligence Systems / D. Ivanov, A. Chezhegov, M. Kiselev [et al.] // *Frontiers in Neuroscience*. — 2022. — Vol. 16. — DOI: 10.3389/fnins.2022.959626.
15. Insel T.R. The NIH BRAIN Initiative / T.R. Insel, S.C. Landis, F.S. Collins // *Science*. — 2013. — Vol. 340. — № 6133. — P. 687–688.
16. Dewey J. The reflex arc concept in psychology / J. Dewey // *Psychological Review*. 1896. — Vol. 3. — № 4. — P. 357–370. — DOI: 10.1037/h0070405.
17. Kalaydzhieva H. Filosofski problemi, sv'rzani s izkustveniia intelekt [Philosophical Problems Related to the Artificial Intelligence] / H. Kalaydzhieva // *NotaBene*. — 2025. — № 67. — P. 84–88. [in Bulgarian]
18. Andersen R.A. Multimodal integration for the representation of space in the posterior parietal cortex / R.A. Andersen // *Philosophical transactions of the Royal Society of London. Series B, Biological sciences*. — 1997. — Vol. 352. — P. 1421–1428. — DOI: 10.1098/rstb.1997.0128.
19. Edelstein L.R. The Claustrum: A Historical Review of Its Anatomy, Physiology, Cytochemistry and Functional Significance / L.R. Edelstein, F.J. Denaro // *Cellular and Molecular Biology*. — 2004. — № 50(6). — P. 675–702. — URL: https://www.researchgate.net/publication/8087100_The_claustrum_A_historical_review_of_its_anatomy_physiology_cytochemistry_and_functional_significance (accessed: 25.07.2025).
20. Lebedev M.A. Brain–Machine Interfaces: From Basic Science to Neuroprostheses and Neurorehabilitation / M.A. Lebedev, M.A.L. Nicolelis // *Physiological Reviews*. — 2017. — Vol. 97. — № 2. — P. 767–837. — DOI: 10.1152/physrev.00027.2016.
21. Leugering J. Neuromorphic Engineering: Artificial Brains for Artificial Intelligence / J. Leugering // *Annals of the New York Academy of Sciences*. — 2024. — Vol. 1542. — № 1. — P. 5–10. — DOI: 10.1111/nyas.15256.
22. Nicholls J.G. *From Neuron to Brain* / J.G. Nicholls [et al.]. — Sinauer Associates, 2011. — 765 p.
23. Picón-Pagès P. Functions and dysfunctions of nitric oxide in brain / P. Picón-Pagès, J. Garcia-Buendia, F.J. Muñoz // *Biochimica et Biophysica Acta (BBA) — Molecular Basis of Disease*. — 2019. — Vol. 1865. — № 8. — P. 1949–1967.
24. Poo M.M. China Brain Project: Basic neuroscience, brain diseases, and brain-inspired computing / M.M. Poo, J.L. Du, N.Y. Ip [et al.] // *Neuron*. — 2016. — Vol. 92. — № 3. — P. 591–596.

25. Puelles L. A Developmental Ontology for the Mammalian Brain Based on the Prosomeric Model / L. Puelles, M. Harrison, G. Paxinos [et al.] // *Trends in Neurosciences*. — 2013. — Vol. 36. — № 10. — P. 570–578. — DOI: 10.1016/j.tins.2013.06.004.
26. Rakic P. Evolution of the Neocortex: A Perspective from Developmental Biology / P. Rakic // *Nature Reviews Neuroscience*. — 2009. — Vol. 10. — P. 724–735.
27. Skipor J. The choroid plexus--cerebrospinal fluid system: undervaluated pathway of neuroendocrine signaling into the brain / Skipor, J.-C. Thiery // *Acta Neurobiologiae Experimentalis*. — 2008. — Vol. 68. — № 3. — P. 414–428. — DOI: 10.55782/ane-2008-1708.
28. Gibbons C.H. Basics of Autonomic Nervous System Function / C.H. Gibbons // *Handbook of Clinical Neurology*. — 2019. — Vol. 160. — P. 407–418. — DOI: 10.1016/B978-0-444-64032-1.00027-8.
29. Elderkin-Thompson V. Executive function and MRI prefrontal volumes among healthy older adults / V. Elderkin-Thompson, M. Ballmaier, G. Helleman [et al.] // *Neuropsychology*. — 2008. — Vol. 22. — № 5. — P. 626–637. — DOI: 10.1037/0894-4105.22.5.626.
30. Van Essen D.C. The WU-Minn Human Connectome Project: An Overview / D.C. Van Essen [et al.] // *NeuroImage*. — 2013. — Vol. 80. — P. 62–79.
31. McCormick D.A. Convergence and Divergence of Neurotransmitter Action in Human Cerebral Cortex / D.A. McCormick, A. Williamson // *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*. — 1989. — Vol. 86. — № 20. — P. 8098–8102. — DOI: 10.1073/pnas.86.20.8098.
32. Yuste R. Four Ethical Priorities for Neurotechnologies and AI / R. Yuste, S. Goering, B. Agüera [et al.] // *Nature*. — 2017. — Vol. 551. — P. 159–163.
33. Zingg B. Input–Output Organization of the Mouse Claustrum / B. Zingg, H.-W. Dong, H. Whit Tao [et al.] // *Journal of Comparative Neurology*. — 2018. — Vol. 526. — № 15. — P. 2428–2443. — DOI: 10.1002/cne.24502.
34. Zurak N. *Metaneurobiology of Death* / N. Zurak. — Academic Press, 2018. — 184 p.