



УДК 004.81+612.82+37.01+316.276

Научная статья / **Research Full Article**DOI: [10.15293/2658-6762.2403.05](https://doi.org/10.15293/2658-6762.2403.05)Язык статьи: русский / **Article language: Russian**

## Устойчивая динамика нейронных связей: новая концепция появления когнитивности

В. М. Трофимов<sup>1</sup><sup>1</sup> Кубанский государственный технологический университет, Краснодар, Россия

**Проблема и цель.** Проблема описания когнитивности как результата биологической эволюции нейронных процессов в головном мозге особенно трудна из-за необходимости привлечения целого комплекса наук и накопленных в них компетенций. Цель работы – выявить и обосновать такую динамику процессов взаимодействия в нейронной сети головного мозга, которая объясняет их высокую интенсивность и максимальную устойчивость в полосе физических ограничений существования белковых тел. Важный аспект этой цели – необходимость обосновать этапы биологической эволюции, ведущей к возникновению когнитивности (*mind*).

**Методология.** В работе применялись, главным образом, эвристические методы: аналогия, гипотетико-дедуктивный метод, моделирование и мысленный эксперимент. В аналогии привлекались точные результаты теории турбулентности, полученные из вариационного принципа. В моделировании использовались идеи метода подобия и размерностей, а также гидродинамического ламинарно-турбулентного перехода. В гипотетико-дедуктивном методе использовались идеи эволюционного метода происхождения видов.

**Результаты.** Автором сформулирована и обоснована концепция динамики высокоинтенсивных и максимально устойчивых процессов взаимодействия нейронов головного мозга. Главными результатами являются: выявленная аналогия между информационными процессами в живой и неживой природе с обоснованным общим ключом для их понимания; в рамках гидродинамической аналогии впервые предложена континуальная модель среды нейронных взаимодействий и обоснованы стадии эволюции нервной сети; сформулирована гипотеза перехода к когнитивности как следствие биологической эволюции нейронной сети.

**Заключение.** Принцип устойчивой динамики позволяет рассматривать с единой точки зрения когнитивные процессы от элементарных актов когнитивности до появления рефлексии в целом как акта сознания.

**Ключевые слова:** появление когнитивности; нейронные связи; устойчивая динамика; биологическая эволюция; континуальная модель.

**Библиографическая ссылка:** Трофимов В. М. Устойчивая динамика нейронных связей: новая концепция появления когнитивности // Science for Education Today. – 2024. – Т. 14, № 3. – С. 89–112. DOI: <http://dx.doi.org/10.15293/2658-6762.2403.06>

✉ Автор для корреспонденции: Виктор Маратович Трофимов, [vtrofimov9@yahoo.com](mailto:vtrofimov9@yahoo.com)

© В. М. Трофимов, 2024

### Постановка проблемы

Всё, что мы видим вокруг себя и в себе, существует благодаря устойчивости физических, химических, биологических структур и когнитивных (mind, разум, сознание) процессов. Мы знаем, что увеличение сложности условий существования материи: рост атомного номера элементов, потока энергии, импульса, контроль в растущем организме и другие воздействия – приводит к неустойчивости структур и процессов, определяя их эволюцию. Существуют естественные условия разветвления устойчивого процесса, включающие структурные преобразования разных видов, ветвление, вложенность разномасштабных связанных структур в пространстве причинно-следственных связей [22]. В данной работе мы выдвинем в качестве главного принцип устойчивой динамики и рассмотрим, как он реализуется (работает) или может реализоваться в наименее изученной части науки – о когнитивных процессах. Данные из современного состояния в этой области будем черпать, главным образом, ориентируясь на многолетние и наиболее системные, по-видимому, исследования академика К. В. Анохина<sup>1</sup> (МГУ), сформулированные в сжатом виде совсем недавно. Согласно этим (в том числе коллективным и комплексным) изысканиям проблема создания фундаментальной теории разбивается на три подзадачи: поиск предусловий появления когнитивности (mind) внутри биологической природы, переход к mind и собственно сама когнитивность, отвечающие, соответственно, на три ключевых вопроса: почему? как? что? Или, другими словами, приходится отвечать на трудные вопросы: почему природе понадобилось изобрести когнитивный субстрат? как она это сделала? что он

представляет собой в своей высшей форме – человеческого разума? В обзоре [10] среди четырех поощряемых журналами Nature и Science перспективных направлений науки об образовании выдвинуто расширение тематики и целей научного образования, в том числе в области именно когнитивных наук как имеющих непосредственную связь с прогрессом в образовании. О необходимости кардинальной смены парадигм в сторону критического подхода в пост-цифровом университете делается вывод в обзоре [20], подтверждая общую наметившуюся тенденцию трансформации границ в науке об образовании.

Начало нейронауки было заложено более ста лет назад фундаментальным вкладом Рамона-и-Кахаля, давшим удивительно точное описание морфологии и связности нервных клеток, представление о нейронах как о базовых строительных единицах любого мозга и принцип динамической поляризации [4]. Неоценим вклад отечественных ученых И. М. Сеченова, И. П. Павлова, П. К. Анохина, В. Б. Швыркова, позднее развитый в научных школах Н. П. Бехтеревой, К. В. Анохина, лингвиста-биолога Н. В. Черниговской, а также в трудах В. М. Аллахвердова, В. В. Васильева, А. М. Дубровского, С. В. Медведева, Е. Н. Соколова и других нейрофизиологов и нейропсихологов, разрабатывающих проблемы когнитивных наук.

Нейроны добавляют к своим окончаниям новые придатки и увеличивают свои связи с другими нервными клетками в резуль-

<sup>1</sup> Константин Анохин (МГУ) «Когнитом – гиперсетевая теория мозга», Санкт-Петербургский государственный университет, Институт когнитивных ис-

следований, Петербургский семинар по когнитивным исследованиям. URL: <https://yandex.ru/video/preview/11528313767329816444>

тате возрастающей функциональной приспособляемости. Еще Рамон-и-Кахаль (в 1894 г.)<sup>2</sup> полагал, что эти пластические явления более часты и распространены в коре головного мозга, в отличие от более стабильных центров, таких как ствол мозга и спинной мозг. Позднее выяснилось, что нервная система обладает еще и эластичностью [4; 8]. Возобновление роста периферических нервов после перерезки является хорошо известным примером регенерации нервной ткани. Другим примером удивительной устойчивости является эффект ретракции как столбнячного, так и ботулинического нейротоксинов на пресинаптические аксоны, оканчивающиеся на инфицированном мотонейроне [12]. Как только нейротоксическое воздействие прекращается, все пресинаптические окончания (несколько тысяч на мотонейрон) возвращаются к постсинаптической мембране в одинаковой пропорции и с одинаковой функциональностью, что позволяет полностью восстановить физиологию мотонейрона [12]. Таким образом, нервная система способна не только устойчиво изменять свои внутренние связи (для обучения), но и возвращаться в прежнее состояние после некоторых типов нервных повреждений (для регенеративных процессов).

Руководствуясь идеей слежения за одной нервной клеткой (нейроном), авторы [9; 13] в опытах с морскими моллюсками аплизиями показали, что кратковременная память моллюска на тактильные раздражители может объясняться изменением силы синаптической связи, а долговременная память требует анатомических изменений, в частности увеличения числа синаптических связей. Эта линия понимания природы памяти утвердилась и далее,

отведя, к сожалению, в сторону другую не менее интересную идею, разработанную Хэббом<sup>3</sup>, о том, что память поддерживается динамическими, непрерывными изменениями в замкнутых самовозбуждающихся нейронных цепях, и такие ревербераторные цепи ответственны, по крайней мере, за кратковременную память. Этому направлению в какой-то мере послужил и закон морфологического прогресса (Рамон-и-Кахаль, 1923 г.) [4]: нейроны будут добавлять к своим окончаниям новые придатки и увеличивать свои связи с другими нервными клетками в результате возрастающей функциональной приспособляемости. Что касается самих по себе (без динамики самовозбуждения) клеточных циклов, то было замечено, что они проявляют большую специфичность – повторение к одному и тому же нейрону весьма распространено [18], и это, отметим особо, важный факт. Замкнутые контуры, наличие (до 60 % мозга) изолирующего вещества – жира (в нем 75 % липиды), особо изолированные белым веществом (липиды) аксоны («провода») – все эти факты свидетельствуют как минимум о присутствии серьезной электрической системы, при первом взгляде напоминающей масляный трансформатор.

В дальнейшем развитие методов визуализации и пополнение огромных коллекций нейронных данных [6] определили главную задачу как поиск новых подходов к пониманию нейронной структуры [1; 5]. Привлечение графов для кодирования связей в мозге позволило использовать хорошо развитые инструменты для структурной характеристики нервных сетей. Более того, эти инструменты во многом начали определять саму методологию

<sup>2</sup> Cajal S. R. The Croonian Lecture: La fine structure des centres nerveux // Proceedings of the Royal Society B. – 1894. – Vol. 55. – P. 444–467. URL: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:86020284>

<sup>3</sup> Hebb D. O. The Organization of behavior: A Neuropsychological Theory. – New York: John Wiley, 1949. URL: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/10643472/>

исследований, что в итоге повлияло, в том числе и негативно, на их эвристические возможности. Диффузионная магнитно-резонансная томография (дМРТ) применяется, чтобы характеризовать микроструктуру тканей и выстраивать анатомическую архитектуру сети мозга или структурные коннекты [7]. Функциональная магнитно-резонансная томография (фМРТ) привлекается иллюстрировать физиологически совместно активирующиеся мозговые сети или функциональный коннектом с помощью матриц структурной и функциональной связности, коэффициентов корреляции Пирсона сигналов фМРТ временных рядов пары областей мозга. Как структурные и функциональные коннекты связаны у отдельных людей и как они развиваются с течением времени [3], как научиться понимать данные [11], чтобы двигаться к индивидуальному прогнозированию [16], – это пока отдаленные перспективы исследований.

В [2] вычисляют корреляцию между топологическими показателями сети, количественным картированием восприимчивости и толщиной коры головного мозга в разных областях мозга как на индивидуальном, так и на усредненном по группам уровнях у пациентов с болезнью Альцгеймера. В [15] дан анализ современного состояния коннектомики, основанной на нейровизуализации, для картирования и прогнозирования нейродегенеративных процессов.

В [1] изменяют точку зрения на коннектом – рассматривают сетевую структуру более высокого порядка, где структура определяется количественно с использованием гиперграфов, симплициальных комплексов или теории многомерной информации [14]. При этом

стремятся переключить внимание на структуры моделирования, которые совместимы с существующими структурами данных, и сохранить знакомые и нейробиологически обоснованные определения, такие как структурная связность и функциональная связность.

Обзор литературы, с одной стороны, указывает на существенное продвижение в понимании архитектуры нейронной сети (развернутая модель гиперсети [19]), ее высокой устойчивости и пластичности<sup>4</sup> [4; 8; 9; 12; 13], включая цикличность структур<sup>5</sup> [18], с другой стороны, выявляет крайне скудные представления о динамике происходящих в сети информационных процессов. Многочисленные данные измерений последних лет [1; 2; 3; 5; 6; 7; 11; 15; 16] методами диффузионной и функциональной магнитно-резонансной томографии и другими методами позволяют использовать лишь интегральные характеристики структуры мозга, не объясняя структуры информационных потоков и тем более не приближая к пониманию зарождения и описания того, что есть когнитивность с точки зрения биологической эволюции (вопросы поставлены в [19]). Цель данной статьи – выявить и обосновать такую динамику процессов взаимодействия в нейронной сети головного мозга, которая объясняла бы их интенсивность, устойчивость и переход к когнитивности в условиях биологической эволюции.

### Методология исследования

Использовались следующие эвристические методы: аналогия, гипотетико-дедуктивный метод, элементы математического моделирования, включая теорию графов. В аналогии привлекались точные результаты теории

<sup>4</sup> Cajal S. R. The Croonian Lecture: La fine structure des centres nerveux // Proceedings of the Royal Society B. – 1894. – Vol. 55. – P. 444–467. URL: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:86020284>

<sup>5</sup> Hebb D. O. The Organization of behavior: A Neuropsychological Theory. – New York: John Wiley, 1949. URL: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/10643472/>

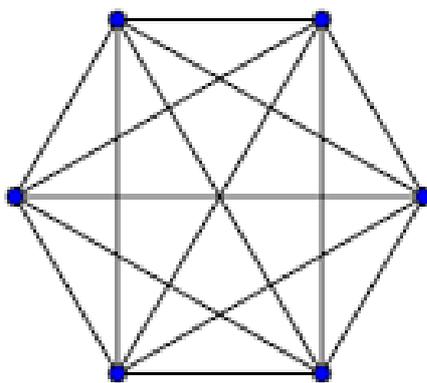
турбулентности, полученные из вариационного принципа. В моделировании использовались идеи метода подобия и размерностей, а также гидродинамического ламинарно-турбулентного перехода. В гипотетико-дедуктивном методе использовались идеи эволюционного метода происхождения видов, а также гипотетические представления о максимально эффективной и устойчивой передаче информации в условиях термодинамических ограничений существования белковых тел.

*Метод представления связей между нейронами с помощью графов*

Назначение мозга – производить обработку информации, породить мысли, идеи,

желания, а также хранить информацию, воспоминания, мысли и породить устойчивое «я». Поскольку все эти процессы и каждый по отдельности сложны и требуют *высокоинтенсивного* и крайне *устойчивого* взаимодействия между нейронами, разумно принять допущения: *i)* максимальной связности нейронов в коннектоме и *ii)* повышенной устойчивости процесса информационного взаимодействия между ними, исходя при этом из надмолекулярных и надгеномных представлений.

Вначале рассмотрим граф, все вершины которого *максимально* связаны друг с другом – полный граф (рис. 1). Будем полагать, что вершины графа изображают нейроны, а ребра – взаимодействия между ними. Пусть число вершин  $n = 6$ .



*Рис. 1.* Полный граф с  $n = 6$  вершинами  
*Fig. 1.* A complete graph with  $n = 6$  vertices

Поскольку каждая из  $n$  вершин связана с  $n - 1$  вершинами, а каждое ребро имеет две вершины, общее число рёбер равно  $n(n - 1)/2 = 15$  ребер-связей. Теперь попытаемся достигнуть того же результата интенсивности взаимодействия, но уже *в процессе*, в

динамике, подобно тому, как разворачивается направленная человеческая мысль, генерируя и удерживая в себе все больше и больше информации (рис. 2).

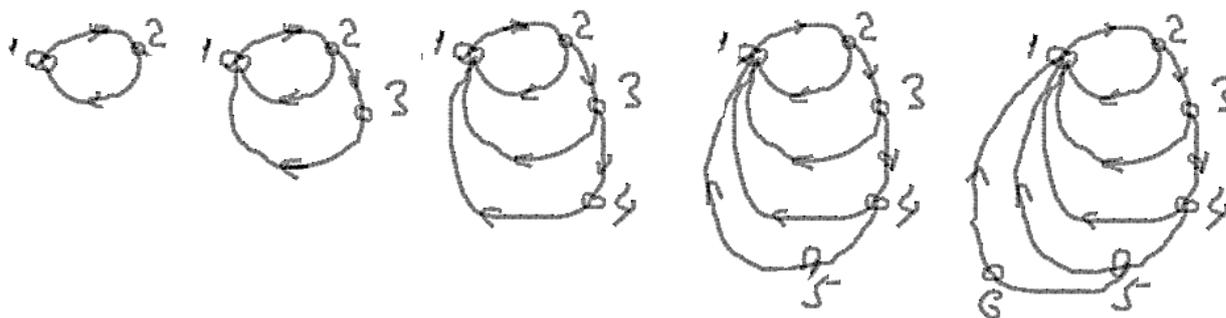


Рис. 2. Развертывание циклов в системе шести ( $n = 6$ ) нейронов

Fig. 2. The deployment of cycles in a system of six ( $n = 6$ ) neurons

На каждом шаге «мысль» движется в одном направлении, достигая всякий раз следующей вершины-нейрона и замыкая цикл возвратной петлей. Если подсчитать суммарное число таких последовательных шагов-достижений вершин до последней 6-ой, то получится  $1+2+3+4+5 = (n-1)n/2 = 15$ . Формально мы получили ту же суммарную связанность между шестью вершинами, но теперь картина совершенно иная: одновременно работают пять вложенных циклов.

*Метод аналогии с турбулентным движением в гидродинамике*

Эта структура поддерживающих друг друга циклов образует каскад потока информации от первой до шестой вершины. Такой каскад весьма близок по смыслу турбулентному (равновесному) каскаду энергии вихрей в гидродинамике (в случае же неравновесной турбулентности<sup>6</sup>). За время совершения наибольшего пятого цикла наименьший первый цикл успеет провернуться пять раз, второй цикл – четыре раза, третий – три, четвертый – два раза. В результате такой поток информации (от первой до шестой вершины)

кратно больше по величине и кратно устойчивее линейного, представляющего одну какую-нибудь цепь или цикл. Турбулентный режим течения жидкостей и газов возникает как статистически упорядоченный *сверхинтенсивный* обмен импульсами конечных масс среды, вызванный вихревыми образованиями в результате потери устойчивости ламинарного режима течения (в котором возможен только низкоэффективный молекулярный обмен импульсами) и перехода к *статистически максимально устойчивому* турбулентному режиму. Таким образом, имеются основания для более развернутого использования аналогии с турбулентным движением в контексте объявленной цели исследования.

В каноническом примере турбулентного течения между двумя параллельными плоскостями оно может быть описано<sup>7</sup> из вариационного принципа в задаче об экстремуме функционала с осредненными параметрами течения и интерпретируется как суперпозиция вихрей (рис. 3), катящихся по стенке с постоянной скоростью качения (ниже этот пример рассмотрен подробно). При этом скорости

<sup>6</sup> Трофимов В. М. Турбулентные течения с ориентационными свойствами: монография. – Новосибирск: НГПУ, 2013. – 154 с. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=21517081>

<sup>7</sup> Миллионщиков М. Д. Некоторые проблемы турбулентности и турбулентного теплообмена // Турбулентные течения. – М.: Наука, 1974. – С. 5–18. URL: <http://www.libex.ru/detail/book761190.html>

вращения вихрей обратно пропорциональны их геометрическим размерам.

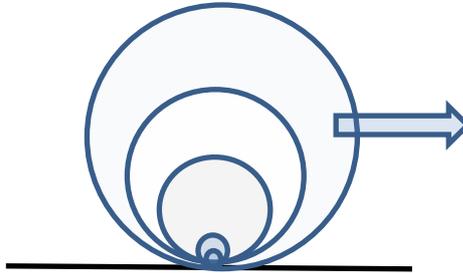


Рис. 3. Турбулентное течение: осреднённые вихри катятся по стенке с одинаковой скоростью качения, но разными скоростями вращения

Fig. 3. Turbulent flow: averaged vortices roll down the wall with the same rolling speed, but different speeds rotations

Турбулентный обмен импульсов здесь радикально интенсифицируется в перпендикулярном к течению направлении, превосходя на несколько порядков ламинарный (молекулярный) обмен. Заметим, что сам тип турбулентного движения выходит далеко за рамки гидродинамики и даже классической физики, вбирая в себя такие фундаментальные понятия, как неопределенность, необратимость, энтропия, диссипативные структуры, динамический хаос, фракталы, принцип асимметрии

функции распределения, и этот ряд понятий пока скорее расходится, чем исчерпывает турбулентность. Эвристический потенциал этой формы движения трудно переоценить, в частности в описании передачи информации в сложных системах.

Каждый нейрон можно рассматривать как функцию с несколькими (многими) входами и одним выходом – аксоном (рис. 4а).

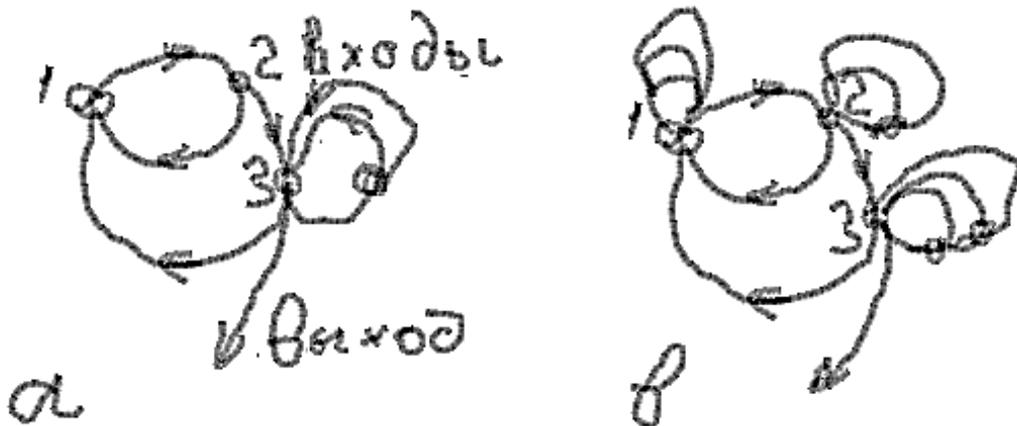


Рис. 4. Нейрон 3 имеет несколько входов и один выход (аксон):  
а – один дополнительный каскад; б – три дополнительных каскада

Fig. 4. Neuron 3 has several inputs and one output (axon):  
a – one additional cascade; b – three additional cascades

Входы нейрона 3 образованы (рис. 4a) вложенными циклами двух каскадов (левого и правого), которых может быть и много больше. Все они в данном случае работают на нейрон 3. Присоединенные каскады могут быть и у нейронов 1 и/или 2 (рис. 4b). Любой нейрон может быть включен в другие каскады, но любой нейрон в комплексе входов в него и выхода из него также может быть рассмотрен как отдельная *нейнъективная функция*. Устойчивость этой функции-нейрона обеспечивают каскады (один или несколько), поэтому нейрон вместе с обеспечивающими его информацией каскадами и одним выходом образуют устойчивое целое, которое имеет смысловое сходство с одной стороны, с *когом* как элементом *когнитома* (введены К. В. Анохиным, 2015) [19], а с другой стороны – это *динамическая структура*. На рисунке 4 изображен конкретный вариант базового элемента структуры коннектома, отражающий по своему смыслу турбулентный характер переноса информации, во всяком случае в некоторых основных чертах. Заметим, что аналогия с гидродинамикой турбулентности здесь неполная (как и любая аналогия), принимая во внимание, прежде всего, принципиально стохастическую природу турбулентного движения. Однако и это качество турбулентности имеет сходство в аспектах эволюции когнитивности и способе ее реализации, о чем будет сказано ниже.

Таким образом, допущения: *i*) максимальной связности нейронов в коннектопе и *ii*) повышенной устойчивости процесса информационного взаимодействия между ними – привели к требованию специфической динамики процесса взаимодействия нейронов. При этом базовым элементом коннектома становится не относительно статический нейрон, а динамический по природе относительно самостоятельный набор вложенных связанных

циклов – базисная структура, позволяющая удерживать во времени осмысливаемую информацию и открытая для её нелинейного наращивания в любом из нейронов посредством дополнительных каскадных процессов. Эти представления также согласуются с понятием когнитома как гиперсети [19] в отличие от коннектома (сети нейронов).

### Результаты исследования

На основе метода гидродинамической аналогии в контексте объявленной цели исследования, а также метода теории графов мы далее предложим континуальную модель среды нейронных взаимодействий и обоснование стадий эволюции нервной (нейронной) сети.

#### *Континуальная модель среды нейронных взаимодействий*

Пусть нейроны заполняют некоторое пространство равномерно с одинаковой плотностью заполнения, а обмены порциями информации происходят с некоторой средней длиной «свободного пробега» между случайными взаимодействиями (рис. 5a), которые обеспечены, по крайней мере, тем, что нейроны разделены синаптическими щелями и способны к перезамыканию. Такая среда обеспечивает случайные обмены порциями информации между нейронами, подобно тому как молекулы газа передают импульсы друг другу в результате соударений. Отличие состоит в том, что для выработки порций информации не обязательно движение нейронов – достаточно движения их отростков, аксонов. Далее информация от органов восприятия внешних раздражителей передается в среднем статистически упорядоченном режиме (рис. 5b) от нейрона к нейрону, образуя замкнутую петлю так, что нейроны перцепции взаимодействуют с моторными нейронами,

которые, в свою очередь, обеспечивают движение организма в целом, например, убежание от опасности. Такой режим передачи информации имеет черты аналогии с ламинарным движением жидкости или газа. Интенсивность передачи информации в выделенном объеме с характерным размером  $l$ , плотностью  $\rho$  информации на единицу объема, скоростью ее

передачи  $u$  и сопротивлению ее передачи  $\mu$  (например, за счет тормозящих потенциалов действия части нейронов) характеризует параметр  $\rho ul/\mu$  – аналог безразмерного числа Рейнольдса для течений жидкости.

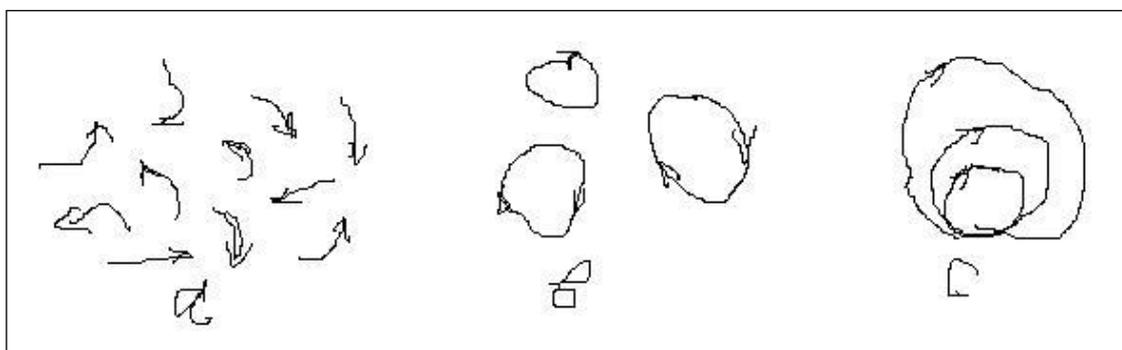


Рис. 5. Три стадии эволюции нервной сети: а – случайные взаимодействия; б – формирование одиночных петель обратной связи; с – устойчивая (турбулентная) форма связи петель

Fig. 5. Three stages of neural network evolution: a – random interactions; b – formation of single feedback loops; c – sustainable (turbulent) form of loop communication

При достаточно больших значениях числа Рейнольдса возникает снова статистически упорядоченный режим течения, но который уже называют турбулентной (рис. 5с), самой распространенной и самой устойчивой (статистически) формой движения не только в жидкостях и газах, но и во многих других физических средах и явлениях. Эта форма движения приводит к самому интенсивному переносу физических характеристик (в гидродинамике это импульс, энергия), а в данной модели (рис. 5с) – к максимуму переноса информации между нейронами. Роль динозавров в эволюции живого, возможно, недооценена в части развития когнитивности. Рост размеров  $l$  этих животных вплоть до гигантских – прекрасный биологический полигон (большие числа  $Re$ ) для поиска эволюцией вариантов эффектив-

ного управления подвижной, ориентирующейся в пространстве живой массой. Результат этого поиска сохранился для всех последующих форм организмов в таких, например, структурах мозга, как гипоталамус.

Замечательно то, что при все еще наблюдающемся отсутствии общей теории турбулентности существуют точные решения, в частности [25], имеющее не менее замечательную геометрическую интерпретацию для весьма распространенных случаев турбулентных течений без заметного влияния внешних воздействий, таких как кривизна (продольный

градиент давления), неизотермичность, сжимаемость. В геометрической интерпретации<sup>8</sup> ламинарное течение представляет собой суперпозицию вихрей (рис. 6a), катящихся по стенке с безразмерной угловой скоростью  $d\tilde{u}/d\eta$  с линейной скоростью качения в точке

$\eta$  (расстояние от стенки), равной скорости потока  $\tilde{u}$  в этой точке. Турбулентное течение в этой интерпретации (рис. 6b) выглядит как система согласованных вихрей, катящихся с одинаковой скоростью качения (разной скоростью вращения).



Рис. 6. Критическое отличие ламинарного течения, определяемого статистикой молекулярного движения, от турбулентного течения, определяемого статистикой движения конечных масс:

a) в ламинарном течении вихри катятся по стенке с разными скоростями качения;

b) в турбулентном течении вихри взаимосогласованы и катятся с одинаковой скоростью качения.

Fig. 6. The critical difference between the laminar flow, determined by the statistics of molecular motion, and the turbulent flow, determined by the statistics of the movement of finite masses:

a) in the laminar flow, the vortices roll along the wall with different rolling speeds;

b) in the turbulent flow, the vortices are mutually consistent and roll at the same rolling speed.

*Доминирующая роль фактора устойчивости в физических, информационных и психофизиологических процессах*

К основным результатам данного исследования относится выявление фактора, определяющего аналогию между информационными процессами в живой и неживой природе. Чтобы понять ключевое сходство, связанное с фактором устойчивости в этих процессах, рассмотрим наиболее распространенный тип те-

чения жидкости и газа – обтекание твердой поверхности. Для турбулентного течения все вихри согласованы и катятся с одинаковой скоростью качения (рис. 6b). Это решение получено в исследовании проблем турбулентности<sup>9</sup> при единственном предположении, что развитая турбулентность характеризуется наивыгоднейшим распределением движения, устанавливающим экстремум функционала:

<sup>8</sup> Миллионщиков М. Д. Некоторые проблемы турбулентности и турбулентного теплообмена // Турбулентные течения. – М.: Наука, 1974. – С. 5–18. URL: <http://www.libex.ru/detail/book761190.html>

<sup>9</sup> Там же.

$$F = \int_{-\eta_0}^{+\eta_0} H \left( \eta, \tilde{u}, \frac{d\tilde{u}}{d\eta} \right) d\eta,$$

где

$$H = \tilde{u} + \frac{a}{2} \left( \eta \frac{d\tilde{u}}{d\eta} \right)^2$$

$a$  – произвольная постоянная, имеющая величину (из опытов) 0,39–0,40\*.

Примеч.: \* В работе<sup>10</sup> показано, что эта величина получается равной коэффициенту 2/5 в канонической формуле для момента инерции шара, если его радиус принят равным текущему расстоянию от стенки.

Note: \* The paper shows that this value is obtained equal to the coefficient 2/5 in the canonical formula for the moment of inertia of the ball, if its radius is assumed to be equal to the current distance from the wall.

После составления уравнения Эйлера (подробный вывод в указанном исследовании<sup>11</sup>) его первый интеграл дает геометрически интерпретируемый результат, изображен-

ный на рисунке 6b. Из него следует логарифмический закон распределения скоростей для области развившейся турбулентности, т. е. при  $\eta > \delta$  ( $\delta$  – толщина ламинарного подслоя непосредственно у границы стенки):

$$\tilde{u} = a^{-1} \ln(\eta - \delta) + const. \quad (1)$$

Главное преимущество турбулентной формы движения – это многократное (в 100–1000 раз) увеличение интенсивности переноса импульса, тепла, массы и других физических величин по сравнению с их переносом в ламинарном движении, а также статистическая устойчивость режима течения. Координата  $\eta$  связана с энергоемкостью вихрей: чем больше

масштаб вихря, тем больше его энергоемкость. Заметим, что решение (1) аналогично по структуре и смыслу формуле Шеннона для теоретической *верхней границы* скорости передачи информации ( $I$ ), которую можно передать с данной средней мощностью сигнала  $S$  через один аналоговый канал связи, подверженный аддитивному белому шуму мощности  $N$  в полосе пропускания  $B$  канала связи:

$$I = B \log_2 \left( 1 + \frac{S}{N} \right) \quad (2)$$

<sup>10</sup> Трофимов В. М. Турбулентные течения с ориентационными свойствами: монография. – Новосибирск: НГПУ, 2013. – С. 58. URL: <http://www.libex.ru/detail/book761190.html>

<sup>11</sup> Миллионщиков М. Д. Некоторые проблемы турбулентности и турбулентного теплообмена // Турбулентные течения. – М.: Наука, 1974. – С. 5–18. URL: <http://www.libex.ru/detail/book761190.html>

Зафиксируем также сходство выражения (1) по форме и, по сути, с основным психофизическим законом восприятия (закон Фехнера

$$I = K \ln S + C, \quad (3)$$

где  $I$  – субъективная величина ощущения,  
 $S$  – величина (интенсивность) раздражителя (стимула),  
 $K$  и  $C$  – константы.

Общее между закономерностями (1) – (3) то, что все они сообщают об устойчивой форме передачи максимального количества информации: абстрактной (2), психофизиологической (3) и информации о наибольшем передаваемом механическом импульсе в турбулентном течении (1). Это говорит о том, что природа, используя самый надежный способ передачи информации в физических, психофизических и (гипотетически) когнитивных процессах, выбирает наиболее устойчивую форму такой передачи, эмпирически проявляемую как турбулентная форма.

*Три этапа эволюции когнитивности с ответами на вопросы: почему? как? что? – в аспекте устойчивой динамики в нейронной сети*

Гипотеза состоит в том, что турбулентный тип взаимодействия определяет форму когнитивных процессов в нейронной сети мозга, главным образом вследствие наиболее устойчивого и интенсивного характера взаимодействий, наблюдающихся в распределённой среде при выполнении *таких физических условий*, которые соответствуют *полосе существования белковых тел*. Когнитивность, таким образом, появляется в три этапа эволюции динамики процессов, формирующихся в

или Вебера – Фехнера), устанавливающим логарифмическую зависимость между интенсивностью раздражителя и величиной субъективного ощущения:

нейронной сети : *i*) подготавливается в среде случайных взаимодействий нарастающей интенсивности между множеством нейронов в ответ на усложнение приспособительной системы поведения, *ii*) проявляется, по терминологии П. К. Анохина, в акцепторе действия, то есть в линейной «сети нейронов, охваченных кольцевым взаимодействием»<sup>12</sup> с обратной связью на уровне рефлексивных управленческих реакций организмов, переходящих при усилении концентрации таких взаимодействий в *iii*) самую (статистически) устойчивую каскадную форму (рис. 5с) с целостными «инкубаторами рефлексии» из согласованных петель обратной связи упорядоченных масштабов. Но поскольку плотность таких инкубаторов увеличивается в пространстве мозга, возникают условия для взаимодействия между ними по некоторому механизму через ассоциативные нейроны инкубаторов. Это возможно, благодаря синаптическим щелям, позволяющим пересоединять связи в системе инкубаторов-каскадов с образованием *невычислимой динамической гиперсети каскадов*. Это похоже на самовоспламенение всего коннектома с выходом на качественно новый уровень статистически устойчивого взаимодействия, устойчивость которого базируется на принципиальной неустойчивости к возникновению

<sup>12</sup> Анохин П. К. Особенности афферентного аппарата условного рефлекса и их значение для психологии //

Вопросы психологии. – 1955. – № 6. – С. 16-38.  
URL: [https://scepsis.net/library/id\\_859.html](https://scepsis.net/library/id_859.html)

новых связей между остающимися целостными «инкубаторами рефлексии». Действительно, если на этом уровне нет неустойчивости в точках ассоциативных нейронов, то нет и множественных связей, нет условий для возникновения статистически целостной сети мозга. И наоборот, если неустойчивость велика, имеется возможность генерировать *новые* инкубаторы рефлексии – *вне петель перцепции* и *вне петель обучения*. Повторяет ли этот надуровень то, что близко к турбулентной форме, следует выяснить. На устойчивость и интенсивность процессов на этом надуровне влияют универсализм кодировки (возможность конвертировать любой частный опыт в универсальный для данной личности), выявление доминанты на другое лицо (мама, члены семьи, значимые взрослые) и другие факторы, которых мы пока не знаем.

Таким образом, процесс появления устойчивых к внешним (и внутренним) вызовам организмов, который мы называем эволюцией, дает возможные ответы на вопросы: почему? – рост массы организма дает преимущество выживания, однако увеличивает сложность управления приспособительной системой с ответом на это эволюции; как? – линейные цепи нейронов с обратной связью (петли-акцепторы действий), способные удерживаться продолжительное время за счет организации в каскадную форму для обеспечения все более сложных функциональных систем (в частности, безусловные и естественные условные рефлексы); что? – основанная на огромной вариативности к образованию ассоциативных связей между «инкубаторами рефлексии» и эволюцией от первого инкубатора

рефлексии в постнатальном периоде и заканчивающейся системой устойчивых инкубаторов, обеспечивающих образ «я» к трем годам жизни с индивидуальным опытом (от внешних и внутренних раздражителей) и возможностью создавать мысли и желания без перцепции за счет накопленного множества разнообразных инкубаторов рефлексии (опыта) и перехода на новый надуровень рефлексии.

*О субъективности и ответе на вопрос кто?*

Предлагаемая схема системы согласованных инкубаторов устойчивой рефлексии в принципе согласуется с известной теорией гиперсети (К. В. Анохин, 2014 [19]), когов (ассоциативных нейронов) и других характерных черт теории. Прямой каскад рефлексии – в сторону увеличения масштабов – соответствует течению времени, а обратный может быть характерен для сновидений. И здесь возникает естественный вопрос<sup>13</sup> [19; 23]: а кто, собственно, ходит по сети, кто навигатор течения мысли? Как организуется направленное ее течение? Конечно, это зависит от сформированной индивидуальным опытом архитектуры сети (гиперсети [19]). Но даже если мы будем представлять динамическую гиперсеть – это все еще биологическая система. А кто ответствен за новую организацию в динамической гиперсети? Сам по себе фактор процесса организации, связанный с выбором *ориентации* выстраивания каскадного процесса, аналогичный вложению частичного порядка процессов в глубинной системе в линейный (полный) порядок, выходящий на поверхность, может быть самоподдерживающимся процессом «я»

<sup>13</sup> Chernigovskaya T., Natchin Yu., Menshutkin V. Principles of evolution of natural and computer languages and of physiological systems // *Becoming Loquens* — Bochum Publications in Evolutionary Cultural Semiotics, Bichakjian B., Chernigovskaya T., Kendon A.,

Moeller A. (eds), vol. 1, Peter Lang, Frankfurt am Main, Berlin, Bern, Bruxelles, New York, Oxford, Wien. — 2000. — P. 211–236.

[21]. Действительно, процесс ориентации выбора циклов, связанный с предшествующим опытом, позволяет двигаться к цели эффективнее. Компьютерный способ реализации предполагает качественно иную постановку задачи и неудовлетворителен хотя бы по причине ограничений, налагаемых динамикой процессов в нейронной гиперсети: никакие алгоритмы перебора вариантов не справятся по времени в условиях такой сложной архитектуры сети (2–5 км «проводов» в одном кубическом миллиметре). Можно предположить, что нужная ветвь в частичном порядке сети находится по «запаху», помеченному ранее специальным свойством субъективного

опыта. Такой выбор как минимум не поддается алгоритмизации, так как зависит от всего предшествующего индивидуального опыта и отчасти от характеристик врожденного ансамбля нейронов, но каков его «механизм» – остается вопросом. Поясним эту мысль с помощью простой схемы (рис. 7). Пусть нам требуется вычислить количество вариантов маршрута из нижнего левого угла  $A$  шахматной доски до верхнего правого угла  $B$  (рис. 7а). Всего ходов в каждом варианте 14 (разрешено делать ход только вправо или вверх). Тогда количество вариантов маршрута  $AB$  будет  $C(14, 7) = 1144$ . Можно ставить задачу о поиске оптимального (или правильного) варианта маршрута. Это типичная компьютерная постановка задачи.

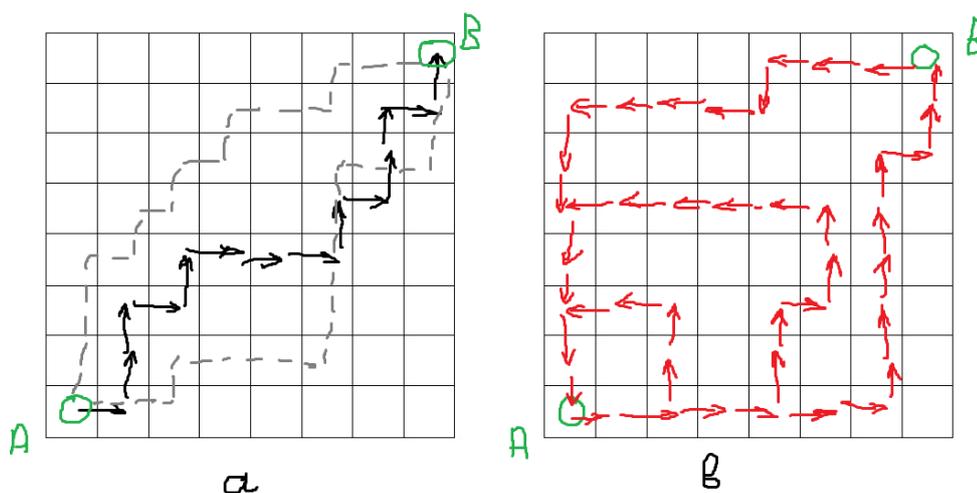


Рис. 7. Критическое отличие типичного машинного поиска оптимума от гипотетически человеческого подхода к решению задачи:

$a$  – перебор вариантов в компьютерной задаче;

$b$  – решение задачи человеком с опорой на субъективный опыт.

Fig. 7. The critical difference between a typical machine search for the optimum and a hypothetically human approach to solving the problem:

$a$  – search of options in a computer problem;

$b$  – solving a problem by a person based on subjective experience.

Справа (рис. 7b) показан «ход мысли» – ряд согласованных циклов, иллюстрирующих сохранение субъективного опыта и опоры на предшествующий опыт в решении задачи, как-то связанной с АВ. «Мысль» выбирает среди прошлого опыта то, что ведет наискорейшим образом к цели В и фиксирует новое достижение за, допустим, три-четыре цикла, т. е. сложность (затраты времени) порядка  $O(const)$ . В этом мысленном эксперименте разница между затратами – не менее трех порядков в пользу человеческого способа решать задачу.

Представим, что может происходить в элементарном акте когнитивности в нейронной сети. Пусть в некотором цикле нейронной цепи зафиксировано *физическое* состояние  $S_0$  в момент  $t_0$ . Это состояние, которое мы называем актом механической памяти (или просто памяти), поддерживается движением сигнала в замкнутом контуре (цикле). Далее из этого же нейрона происходит оборот сигнала в замкнутом цикле несколько большего масштаба (согласно представлению об «инкубаторе мысли»), возвращение в начальный нейрон в момент времени  $t_1$  и сравнение нового состояния  $S_1$  с прежним  $S_0$ . Если они отличаются, то возникает бит информации (мысли). Если не отличаются, информации нет. Информации нет, когда нейроны замкнутой цепи никак не связаны с другими замкнутыми цепями. Но субъективный опыт – это как раз связанные циклы. Значит информация при обороте по циклу обязательно появится. Этот акт сравнения произойдет в момент времени  $t_1$  и будет соответствовать *элементарному акту когнитивности* – рождению конечного малого «кубика» мысли. Поэтому можно заключить, что когнитивность – это множество элементарных

актов сравнения, связанных причинной связью во времени. Собственно, они и создают субъективное ощущение времени через последовательность событий. Второй важный вывод – это необходимость появления новых и новых точек когнитивности (порождения информации-мысли путем сравнения состояний), иначе нейронная сеть не изменяется и, соответственно, не работает. По отношению к этим новым точкам когнитивности устойчивость мысли есть результат неустойчивости их состояний когнитивности, ведущих к статистически упорядоченным и максимально устойчивым «инкубаторам мысли» (рис. 5с), как форме организации динамики, свойственной статистически наблюдаемому турбулентному движению (рис. 6b).

В силу логарифмической зависимости информации и масштабов структуры «инкубаторов рефлексии», проявляющейся не только в частных актах рефлексии, но и на разных стадиях онтогенеза, наибольшее влияние на значимые черты субъективности оказывают самые ранние временные отрезки жизни индивидуума (рис. 8) и вообще ранний опыт в любом направлении онтогенеза. С возрастом, как отмечается в ряде экспериментов [2; 15], происходит обособление фрагментов коннектома. В предложенной схеме это соответствует обособлению отдельных крупных систем «инкубаторов рефлексии». Это приводит к уменьшению лабильности и заканчивается ослаблением когнитивных способностей (достигнутых на максимуме) или, в ряде случаев, разрушением коннектома на фрагменты и утерей доступа к целым системам обособленных инкубаторов с утерей памяти и почти всех когнитивных способностей.

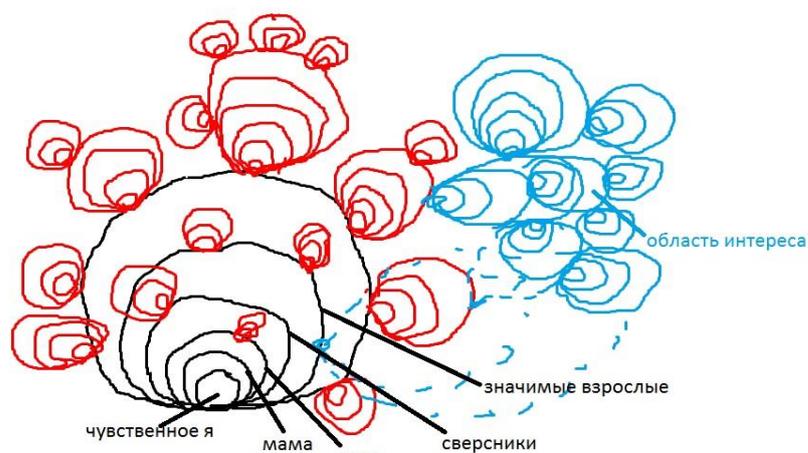


Рис. 8. Разрез части коннектома (когнитома)

Fig. 8. Section of a part of the connectome (cognitome)

*Примечание:* черным выделена область формирования «я», синим – область преимущественного интереса; пунктиром выделены циклы над системой каскадов, сверхциклы

*Note:* the area of formation of the “I” is highlighted in black, the area of primary interest is highlighted in blue; the dotted line highlights cycles above the cascade system, supercycles

По-видимому, сознание (consciousness) появляется не тогда, когда материя – пространство нейронов – «обезразмеривает» себя путем одиночной петли обратной связи (в функциональных системах), образуя число, т. е. информацию для контроля физиологических реакций, и еще не тогда, когда образуется устойчивый каскад обратных связей, упорядоченных по масштабам, создающий условия рефлексии и появления элементов когнитивности (рис. 5с), а лишь на этапе, когда множество ассоциативных нейронов включает все возможные помеченные индивидуальным опытом пути развития мысли в сверхциклах (и каскадах) сложной топологии сети, охватывающей почти весь мозг (пунктирные линии циклов на рисунке 8). Этот процесс возможен только при условии *принципиальной неустойчивости* потоков информации, когда множество точек (нейронов) роста новых каскадов («инкубаторов рефлексии») и ассоциативные связи между отдельными «инкубаторами рефлексии» с образованием качеств (квалий)

в сверх(супер)каскадах находят по следам мекток индивидуального опыта оформившуюся уже протомысль, которая еще не осознается – некому осознавать. Можно предположить далее, что информационные связи в нейронной сети, их топология и генерация потоков становятся настолько разнообразными и эффективными (гипертурбулентный режим – каскады каскадов), что снимается вопрос о brain, архитектуре коннектома и носителях информации, а на первое место выдвигается выбор ориентации – определенной устойчивой организации потока (информации), и тогда возникает сознание (conscience) – *субъективная реальность* одновременно с *обнаруживаемым объектом (конкретным выбранным «инкубатором рефлексии»)*. Это парное появление – ориентации (сознания) и выбранного ею (им) «инкубатора рефлексии» (объекта познания) – и называют, по-видимому, интенциональностью мышления.

### Обсуждение

Развиваемый в данной работе принцип устойчивой динамики приводит к наиболее выгодной форме для передачи информации в нервной сети, и она есть каскад согласованных по масштабам циклов. Циклическая структура связей нейронов играет ключевую роль в теории реверберативных процессов, развитой Хэббом<sup>14</sup>. Динамика этих и других осцилляций в циклах крайне мало изучена. Важно также отметить подтверждающие циклическое поведение в нейронной сети многочисленные наблюдения в [18], которые обнаруживают большую специфичность – повторение к одному и тому же нейрону – весьма распространено и также коррелирует с концепцией устойчивой динамики.

Если полагать, что информация (мысль) развертывается во времени во все большие масштабы с сохранением меньших масштабов, то глубина развертывания в нейронной сети может характеризовать субъективные отличия. Это согласуется с экспериментами в нейронной сети [17], в которых измерялись корреляции в разных временных окнах. Обнаруживаемые в опытах и относимые к субъективным различия существуют только в протяженных по времени процессах [17].

Ключевой аспект концепции устойчивой динамики – необходимость, в её рамках, обосновать этапы биологической эволюции, ведущей к возникновению когнитивности (mind). Сравним приведенные в данной работе положения с тремя принципами, выдвинутыми в теории [19]. Первый из них – способность генерировать функциональные системы – может быть усилен термином «устойчивые функциональные системы» и объяснен схемой каскадной архитектуры петель обратной связи.

Второй принцип [19] – наличие глубокой нервной сети – согласуется с тезисом о возникновении новых и включении старых ассоциативных нейронов (со своими соответствующими инкубаторами) или связей между «инкубаторами рефлексии», что, очевидно, невозможно в однослойной (неглубокой) нейронной сети. Третий принцип [19] – клетки сети должны обладать долговременной памятью – прямо связан с принципом устойчивой динамики сети и формой необходимой каскадной структуры для обеспечения такой устойчивости памяти. В [19] предлагается «провести отчетливую демаркацию между понятиями разума (mind) как специфической структуры и сознания (consciousness) как специфического процесса, протекающего внутри этой структуры», с тем, чтобы «научиться ясно различать проблемы “разум и мозг” и “сознание и мозг” как две принципиально разные проблемы, одна из которых о соотношениях понятий о двух структурах, а вторая – о процессах, протекающих в определенной структуре». Возможно, с методической точки зрения такое разделение оправдано сегодня, когда природа разума и сознания все-таки остается непонятой. Однако из предлагаемой в настоящей работе схемы происхождения когнитивности (рис. 5) можно говорить, скорее, об одновременном появлении специфической структуры нейронной сети и производства памяти и мышления. Объединяет биологическую эволюцию и появление разума только принцип устойчивости, благодаря которому появился качественно новый биологический орган, способный уступить центр сцены разуму – самому гибкому и пластичному ученику эволюции.

<sup>14</sup> Hebb D. O. The Organization of behavior: A Neuropsychological Theory. – New York: John Wiley, 1949.  
URL: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/10643472/>

В исследовании<sup>15</sup> идеальным изобретением определено такое, в котором объект исчезает, а его функция выполняется. Если мы подходим к феномену разума с последовательно научной точки зрения, рассматривая его как возникающую в процессе биологической эволюции субъективную реальность, производящую когнитивность, то мы убеждаемся, что разум можно отнести к идеальным изобретениям природы: функция его – мысль (производимая мозгом информация) – имеется, а биологический объект в актах сознания исчезает.

### Заключение

Предпринятая в настоящей работе попытка достигнуть нового понимания динамики процессов в нейронной сети головного мозга, исходя из инструментария, на первый взгляд, далекой от предмета исследования науки, привела к следующим результатам.

1. Главным принципом и критерием, позволяющим увидеть причины появления сети нейронов и логику биологической эволюции, приведшей к когнитивности, является принцип устойчивой динамики процессов в

сети, гарантирующих максимально интенсивный обмен информацией в полосе существования белковых тел.

2. На основе гидродинамической аналогии впервые предложена континуальная модель среды нейронных взаимодействий и обоснованы стадии эволюции нервной (нейронной) сети, включая гипотезу перехода к когнитивности.

3. Гипотеза состоит в том, что турбулентный тип взаимодействия возникает в ходе эволюции в результате резкого перехода от ламинарного типа и он же определяет форму передачи информации в когнитивных процессах вследствие наиболее *устойчивого* и *интенсивного* характера взаимодействий, которые только возможны в распределенной среде в условиях существования белковых тел.

Таким образом, доминирующая роль фактора устойчивости в физических, информационных и психофизиологических процессах заключается в том, что принцип устойчивой динамики позволяет рассматривать с единой точки зрения когнитивные процессы от элементарных актов когнитивности до появления рефлексии в целом как акта сознания.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Betzel R. F., Faskowitz J., Sporns O. Living on the edge: network neuroscience beyond nodes // Trends in Cognitive Sciences. – 2023. – Vol. 27 (11). – P. 1068–1084. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tics.2023.08.009>
2. Chen H., Yang A., Huang W., Du L., Liu B., Lv K., Luan J., Hu P., Shmuel A., Shu N., Ma G. Associations of quantitative susceptibility mapping with cortical atrophy and brain connectome in Alzheimer's disease: A multi-parametric study // NeuroImage. – 2024. – Vol. 290. – P. 120555. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2024.120555>
3. Ciarrusta J., Christiaens D., Fitzgibbon S. P., Dimitrova R., Hutter J., Hughes E., Duff E., Price A. N., Cordero-Grande L., Tournier J.-D., Rueckert D., Hajnal J. V., Arichi T., McAlonan G., Edwards A. D., Dafnis Batalle D. The developing brain structural and functional connectome

<sup>15</sup> Альтшуллер Г. С. Найти идею: Введение в ТРИЗ – теорию решения изобретательских задач. – М.: Альпина Бизнес Букс, 2008. – 402 с. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=22330007>



- fingerprint // *Developmental Cognitive Neuroscience*. – 2022. – Vol. 55. – P. 101117. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.dcn.2022.101117>
4. Delgado-García J. M. Cajal and the Conceptual Weakness of Neural Sciences // *Frontiers in Neuroanatomy*. – 2015. – Vol. 9. – P. 128. DOI: <https://doi.org/10.3389/fnana.2015.00128>
  5. Ghosh S., Raj A., Nagarajan S. S. A joint subspace mapping between structural and functional brain connectomes // *NeuroImage*. – 2023. – Vol. 272. – P. 119975. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2023.119975>
  6. Giusti C., Ghrist R., Bassett D. S. Two's company, three (or more) is a simplex // *Journal of Computational Neuroscience*. – 2016. – Vol. 41 (1). – P. 1–14. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10827-016-0608-6>
  7. Hong Y., Cornea E., Girault J.B., Bagonis M., Foster M., Kim S. H., Prieto J. C., Chen H., Gao W., Styner M. A., Gilmore J. H. Structural and functional connectome relationships in early childhood // *Developmental Cognitive Neuroscience*. – 2023. – Vol. 64. – P. 101314. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.dcn.2023.101314>
  8. Kolk S.M., Rakic P. Development of prefrontal cortex // *Neuropsychopharmacology*. – 2022. – Vol. 47 (1). – P. 41–57. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41386-021-01137-9>
  9. Kupfermann I. V., Castellucci H., Pinsker H., Kandel E. R. Neuronal correlates of habituation and dishabituation of the gill-withdrawal reflex in *Aplysia* // *Science*. – 1970. – Vol. 167. – P. 1743–1745. DOI: <https://doi.org/10.1126/science.167.3926.1743> URL: <https://www.science.org/doi/10.1126/science.167.3926.1743>
  10. Li Q., Yue J., Sun J., Chen S., Liu S., Li Z., Xin Y., Hu T. Frontier Development and Insights of International Educational Science Research in the journals Nature and Science: a Systematic Literature Review over 40 Years // *Science & Education*. – 2024. – P. 1–29. DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/s11191-024-00509-z>
  11. Mansour L. S., Di Biase M. A., Smith R. E., Zalesky A., Seguin C. Connectomes for 40,000 UK Biobank participants: A multi-modal, multi-scale brain network resource // *NeuroImage*. – 2023. – Vol. 283. – P. 120407. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2023.120407>
  12. Moreno-López B., De La Cruz R. R., Pastor A. M., Delgado-García J. M. Effects of botulinum neurotoxin type A on abducens motoneurons in the cat: ultrastructural and synaptic alterations // *Neuroscience*. – 1997. – Vol. 81 (2). – P. 457–478. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0306-4522\(97\)00199-1](https://doi.org/10.1016/S0306-4522(97)00199-1)
  13. Pinsker H., Kupfermann I. V., Castellucci H., Kandel E. R. Habituation and dishabituation of the gill-withdrawal in *Aplysia* // *Science*. – 1970. – Vol. 167. – P. 1740–1743. DOI: <https://doi.org/10.1126/science.167.3926.1740> URL: <https://www.science.org/doi/10.1126/science.167.3926.1740>
  14. Sporns O., Betzel R. F. Modular brain networks // *Annual Review of Psychology*. – 2016. – Vol. 67 (1). – P. 613–640. DOI: <https://doi.org/10.1146/annurev-psych-122414-033634>
  15. Vogel J. W., Corriveau-Lecavalier N., Franzmeier N., Pereira J. B., Brown J. A., Maass A., Botha H., Seeley W. W., Bassett D. S., Jones D. T., Ewers M. Connectome-based modelling of neurodegenerative diseases: towards precision medicine and mechanistic insight // *Nature Reviews Neuroscience*. – 2023. – Vol. 24 (10). – P. 620–639. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41583-023-00731-8>
  16. Wang J., He Y. Toward individualized connectomes of brain morphology // *Trends in Neurosciences*. – 2024. – Vol. 47 (2). – P. 106–119. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tins.2023.11.011>
  17. Wehrheim M. H., Faskowitz J., Sporns O., Fiebach C. J., Kaschube M., Hilger K. Few temporally distributed brain connectivity states predict human cognitive abilities // *NeuroImage*. – 2023. – Vol. 277. – P. 120246. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2023.120246>



18. Yang R., Vishwanathan A., Wu J., Kemnitz N., Ih D., Turner N., Lee K., Tartavull I., Silversmith W. M., Jordan C. S., David C., Bland D., Sterling A., Goldman M. S., Aksay E. R. F., Seung H. S. Cyclic structure with cellular precision in a vertebrate sensorimotor neural circuit // *Current Biology*. – 2023. – Vol. 33 (11). – P. 2340–2349. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cub.2023.05.010>
19. Анохин К. В. Когнитом: в поисках фундаментальной нейронаучной теории сознания // *Журнал высшей нервной деятельности им. И.П. Павлова*. – 2021. – Т. 71, № 1. – С. 39–71. DOI: <https://doi.org/10.31857/S0044467721010032> URL: <https://elibrary.ru/item.asp?doi=10.31857/S0044467721010032>
20. Ашилова М. С., Бегалинов А. С., Пушкарёв Ю. В., Бегалинова К. К., Пушкарёва Е. А. Трансформация системы высшего образования в условиях цифровых изменений: обзор исследований тенденций развития пост-цифрового университета // *Science for Education Today*. – 2023. – № 6. – С. 99–119. DOI: <http://dx.doi.org/10.15293/2658-6762.2306.05> URL: <http://en.sciforedu.ru/article/6043> URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=58731699>
21. Трофимов В. М. Об одной концепции топологии человеческой рефлексии в сравнении с конечными автоматами // *Science for Education Today*. – 2019. – № 5. – С. 110–124. DOI: <http://dx.doi.org/10.15293/2658-6762.1905.07> URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=41271743>
22. Трофимов В. М. О природе устойчивости процесса во времени // *Science for Education Today*. – 2021. – № 5. – С. 27–42. DOI: <http://dx.doi.org/10.15293/2658-6762.2105.02> URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=47136057>
23. Черниговская Т. В. Биология, среда и культура: от коммуникации животных к человеческому языку и познанию // *Вестник Санкт-Петербургского университета. Философия и конфликтология*. – 2020. – № 1. – С. 157–170. DOI: <https://doi.org/10.21638/spbu17.2020.113> URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=42906886>

Поступила: 10 апреля 2024

Принята: 10 мая 2024

Опубликована: 30 июня 2024

Автор ознакомился и одобрил окончательный вариант рукописи.

#### **Информация о конфликте интересов:**

Автор декларирует отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов в связи с публикацией данной статьи

#### **Информация об авторе**

##### **Трофимов Виктор Маратович**

доктор физико-математических наук, профессор,  
кафедра информационных систем и программирования,  
Кубанский государственный технологический университет,  
Московская ул., 2, 350072, Краснодар, Россия.  
ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0002-0691-6277>  
E-mail: [vtrofimov9@yahoo.com](mailto:vtrofimov9@yahoo.com)



## Sustainable dynamics of neural connections: A new concept of the emergence of cognition

Victor M. Trofimov  <sup>1</sup>

<sup>1</sup> Kuban State Technological University, Krasnodar, Russian Federation

### Abstract

**Introduction.** *The problem of describing cognition as a result of the biological evolution of neural processes in the brain is especially difficult due to the need to involve a whole range of sciences and the competencies accumulated in them. The aim of this work is to identify and substantiate such dynamics of interaction processes in the neural network of the brain which explains their high intensity and maximum stability in the band of physical limitations of the existence of protein bodies. An important aspect of this goal is the need to substantiate the stages of biological evolution leading to the emergence of cognition (mind).*

**Materials and Methods.** *The work mainly used heuristic methods: analogy, hypothetical-deductive method, modeling and thought experiment. The analogy involved the exact results of the theory of turbulence obtained from the variation principle. The modeling used the ideas of the similarity and dimensionality method, as well as the hydrodynamic laminar-turbulent transition. The hypothetical-deductive method used the ideas of the evolutionary method of the origin of species.*

**Results.** *The author formulated and substantiated the concept of dynamics of high-intensity and maximally sustainable processes of interaction of neurons of the brain. The main results include the following: the analogy is revealed between information processes in living and inanimate nature with a reasonable common key for their understanding; within the framework of hydrodynamic analogy, a continuum model of the environment of neural interactions is proposed for the first time and the stages of the evolution of the nervous network are substantiated; the hypothesis of the transition to cognition as a consequence of the biological evolution of the neural network is formulated.*

**Conclusions.** *The principle of sustainable dynamics allows us to consider cognitive processes from elementary acts of cognition to the emergence of reflection as a whole as an act of consciousness from a single point of view.*

### Keywords

*Emergence of cognition; Neural connections; Sustainable dynamics; Biological evolution; Continuum model.*

### For citation

Trofimov V. M. Sustainable dynamics of neural connections: A new concept of the emergence of cognition. *Science for Education Today*, 2024, vol. 14 (3), pp. 89–112. DOI:

<http://dx.doi.org/10.15293/2658-6762.2403.06>

  Corresponding Author: Victor M. Trofimov, [vtrofimov9@yahoo.com](mailto:vtrofimov9@yahoo.com)

© Victor M. Trofimov, 2024

**REFERENCES**

1. Betzel R. F., Faskowitz J., Sporns O. Living on the edge: Network neuroscience beyond nodes. *Trends in Cognitive Sciences*, 2023, vol. 27 (11), pp. 1068–1084. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tics.2023.08.009>
2. Chen H., Yang A., Huang W., Du L., Liu B., Lv K., Luan J., Hu P., Shmuel A., Shu N., Ma G. Associations of quantitative susceptibility mapping with cortical atrophy and brain connectome in Alzheimer's disease: A multi-parametric study. *NeuroImage*, 2024, vol. 290, pp. 120555. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2024.120555>
3. Ciarrusta J., Christiaens D., Fitzgibbon S. P., Dimitrova R., Hutter J., Hughes E., Duff E., Price A. N., Cordero-Grande L., Tournier J.-D., Rueckert D., Hajnal J. V., Arichi T., McAlonan G., Edwards A. D., Dafnis Batalle D. The developing brain structural and functional connectome fingerprint. *Developmental Cognitive Neuroscience*, 2022, vol. 55, pp. 101117. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.dcn.2022.101117>
4. Delgado-García J. M. Cajal and the conceptual weakness of neural sciences. *Frontiers in Neuroanatomy*, 2015, vol. 9, pp. 128. DOI: <https://doi.org/10.3389/fnana.2015.00128>
5. Ghosh S., Raj A., Nagarajan S. S. A joint subspace mapping between structural and functional brain connectomes. *NeuroImage*, 2023, vol. 272, pp. 119975. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2023.119975>
6. Giusti C., Ghrist R., Bassett D. S. Two's company, three (or more) is a simplex. *Journal of Computational Neuroscience*, 2016, vol. 41 (1), pp. 1–14. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10827-016-0608-6>
7. Hong Y., Cornea E., Girault J. B., Bagonis M., Foster M., Kim S. H., Prieto J. C., Chen H., Gao W., Styner M. A., Gilmore J. H. Structural and functional connectome relationships in early childhood. *Developmental Cognitive Neuroscience*, 2023, vol. 64, pp. 101314. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.dcn.2023.101314>
8. Kolk S. M., Rakic P. Development of prefrontal cortex. *Neuropsychopharmacology*, 2022, vol. 47 (1), pp. 41–57. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41386-021-01137-9>
9. Kupfermann I. V., Castellucci H., Pinsker H., Kandel E. R. Neuronal correlates of habituation and dishabituation of the gill-withdrawal reflex in *Aplysia*. *Science*, 1970, vol. 167, pp. 1743–1745. DOI: <https://doi.org/10.1126/science.167.3926.1743> URL: <https://www.science.org/doi/10.1126/science.167.3926.1743>
10. Li Q., Yue J., Sun J., Chen S., Liu S., Li Z., Xin Y., Hu T. Frontier Development and Insights of International Educational Science Research in the journals Nature and Science: A Systematic Literature Review over 40 Years. *Science & Education*, 2024, pp. 1–29. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11191-024-00509-z>
11. Mansour L. S., Di Biase M. A., Smith R. E., Zalesky A., Seguin C. Connectomes for 40,000 UK Biobank participants: A multi-modal, multi-scale brain network resource. *NeuroImage*, 2023, vol. 283, pp. 120407. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2023.120407>
12. Moreno-López B., De La Cruz R. R., Pastor A. M., Delgado-García J. M. Effects of botulinum neurotoxin type A on abducens motoneurons in the cat: Ultrastructural and synaptic alterations. *Neuroscience*, 1997, vol. 81 (2), pp. 457–478. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0306-4522\(97\)00199-1](https://doi.org/10.1016/S0306-4522(97)00199-1)
13. Pinsker H., Kupfermann I. V., Castellucci H., Kandel E. R. Habituation and dishabituation of the gill-withdrawal in *Aplysia*. *Science*, 1970, vol. 167, pp. 1740–1743. DOI:



- <https://doi.org/10.1126/science.167.3926.1740> URL:  
<https://www.science.org/doi/10.1126/science.167.3926.1740>
14. Sporns O., Betzel R. F. Modular brain networks. *Annual Review of Psychology*, 2016, vol. 67 (1), pp. 613–640. DOI: <https://doi.org/10.1146/annurev-psych-122414-033634>
  15. Vogel J. W., Corriveau-Lecavalier N., Franzmeier N., Pereira J. B., Brown J.A., Maass A., Botha H., Seeley W. W., Bassett D. S., Jones D. T., Ewers M. Connectome-based modelling of neurodegenerative diseases: Towards precision medicine and mechanistic insight. *Nature Reviews Neuroscience*, 2023, vol. 24 (10), pp. 620–639. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41583-023-00731-8>
  16. Wang J., He Y. Toward individualized connectomes of brain morphology. *Trends in Neurosciences*, 2024, vol. 47 (2), pp. 106–119. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tins.2023.11.011>
  17. Wehrheim M. H., Faskowitz J., Sporns O., Fiebach C. J., Kaschube M., Hilger K. Few temporally distributed brain connectivity states predict human cognitive abilities. *NeuroImage*, 2023, vol. 277, pp. 120246. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2023.120246>.
  18. Yang R., Vishwanathan A., Wu J., Kemnitz N., Ih D., Turner N., Lee K., Tartavull I., Silversmith W. M., Jordan C. S., David C., Bland D., Sterling A., Goldman M. S., Aksay E. R. F., Seung H. S. Cyclic structure with cellular precision in a vertebrate sensorimotor neural circuit. *Current Biology*, 2023, vol. 33 (11), pp. 2340–2349. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cub.2023.05.010> URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960982223006048>
  19. Anokhin K. V. Cognitom: In search of fundamental neuroscientific theory of consciousness. *Journal of Higher Nervous Activity*, 2021, vol. 71 (1), pp. 39–71. (In Russian) DOI: <https://doi.org/10.31857/S0044467721010032> URL: <https://elibrary.ru/item.asp?doi=10.31857/S0044467721010032>
  20. Ashilova M. S., Begalinov A. S., Pushkarev Y. V., Begalinova K. K., Pushkareva E. A. Transformation of the higher education system in the context of digital change: A research review on trends in the development of a post-digital university. *Science for Education Today*, 2023, vol. 13 (6), pp. 99–119. DOI: <http://dx.doi.org/10.15293/2658-6762.2306.05> URL: <http://en.sciforedu.ru/article/6043> URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=58731699>
  21. Trofimov V. M. The topology of human reflection: Comparison with finite automata. *Science for Education Today*, 2019, vol. 9 (5), pp. 110–124. (In Russian) DOI: <http://dx.doi.org/10.15293/2658-6762.1905.07> URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=41271743>
  22. Trofimov V. M. On the nature of the sustainability of the process in time. *Science for Education Today*, 2021, vol. 11 (5), pp. 27–42. (In Russian) DOI: <http://dx.doi.org/10.15293/2658-6762.2105.02> URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=47136057>
  23. Chernigovskaya T. V. Biology, environment and culture: From animal communication to human language and cognition. *Vestnik of Saint Petersburg University. Philosophy and Conflict Studies*, 2020, vol. 36 (1), pp. 157–170. (In Russian) DOI: <https://doi.org/10.21638/spbu17.2020.113> URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=42906886>

Submitted: 10 April 2024

Accepted: 10 May 2024

Published: 30 June 2024



This is an open access article distributed under the Creative Commons Attribution License which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited. (CC BY 4.0).





**The authors' stated contribution:**

Author reviewed the results of the work and approved the final version of the manuscript.

**Information about competitive interests:**

The author declare no apparent or potential conflicts of interest in connection with the publication of this article

**Information about the Authors**

**Victor Maratovich Trofimov**

Doctor of Physics-Mathematical Sciences, Professor,  
Department of Informational Systems and Computer Science,  
Kuban State Technological University,  
2, Moskovskaya str., 350072, Krasnodar, Russian Federation.  
ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0002-0691-6277>  
E-mail: [vtrofimov9@yahoo.com](mailto:vtrofimov9@yahoo.com)