

Функциональность нейрона в системе индивидуальной адаптивности

Адаптивная функция нейрона в системе межнейронных взаимодействий сводится к пороговому распознаванию образа (да/нет), а вся биофизическая сложность клетки относится не к системным вычислениям, а к уровню жизнеобеспечения и способа реализации, что доказано работающим прототипом.

Аннотация

В статье рассматривается фундаментальный вопрос: какова истинная функциональная роль нейрона в системе межнейронных взаимодействий? На основе анализа наиболее авторитетных публикаций последних лет (2020–2026) демонстрируется существование двух противоборствующих школ: «переусложнителей», наделяющих одиночный нейрон вычислительной мощностью глубокой нейросети, и «персептронщиков», утверждающих достаточность простой пороговой функции. Показано, что эти споры являются следствием методологической ошибки — смешения уровней жизнеобеспечения клетки и её системной функции в адаптивном взаимодействии. Вводится строгое разделение: биофизическая сложность (метаболизм, морфология дендритов, ионный гомеостаз) относится к уровню реализации, а единственная системно значимая функция нейрона сводится к пороговому распознаванию образа («да/нет») на основе взвешенной суммы входов. Доказательство строится на принципе реализационно-независимости: если функция сохраняется при переносе на другой носитель (программную реализацию), она является системным принципом; всё, что не переносится, — артефакт реализации. Эмпирическим подтверждением служит работающий прототип проекта *Beast*, в котором полный отказ от эмуляции нейронов (с сохранением только их пороговой функции) не только не нарушил адаптивность системы, но и позволил устранить избыточную сложность, обеспечив полный контроль и эффективность. Предложенный подход, основанный на модели волевой адаптивности психики (МВАП), предлагает методологический выход из векового застоя в нейронауках, связанного с защитой устоявшихся, но малопродуктивных абстракций.

Ключевые слова: пороговая функция, распознавание образа, межнейронное взаимодействие, распознавание образа,, реализационно-независимый принцип, жизнеобеспечение нейрона, модель МВАП, программная реализация существ, прототип *Beast*, отказ от нейронов, граничные условия определения, методологическая чистота, артефакт реализации

Природный нейрон-клетка обладает сложнейшим устройством, которое само по себе определяет эту клетку как гомеостатическую систему, поддерживающую свои жизненные параметры в норме чтобы не умереть.

Но когда клетка включается в клеточный симбиоз более сложного организма, становятся важны для рассмотрения не вся ее сложность организации и метаболизма, а принцип того, какую функцию выполняет эта клетка среди окружающих ее других клеток.

Это выделяет только отдельные, элементарные принципы, которые оказываются независимы от способа реализации. Так, систему, которая обеспечивается симбиозом нейронов в мозгу, становится организовать, учитывая только их межклеточный функционал, используя искусственные методы реализации и даже программную реализацию.

Наиболее авторитетные публикации нейробиологов – “переусложнителей”

Вот наиболее авторитетные и влиятельные публикации последних лет (примерно 2020–2026), в которых ведущие нейробиологи и вычислительные нейробиологи продолжают наделять одиночный нейрон высокой «вычислительной» сложностью. Во всех этих работах биофизическая сложность дендритов, активных проводимостей и нелинейностей трактуется именно как источник вычислительной мощности клетки, а не как (или не в первую очередь как) механизмы поддержания жизни и гомеостаза. Персептронная (или point-neuron: fornit.ru/6449) модель при этом объявляется явно недостаточным упрощением.

Вот самая последняя такая публикация: “Один нейрон мозга способен на вычисления уровня целой нейросети”: fornit.ru/104357.

1. Ключевая линия Segev / London (Hebrew University)

Beniaguev D., Segev I., London M. (2021). *Single cortical neurons as deep artificial neural networks*. Neuron, 109(17), 2727–2739.e3. DOI: 10.1016/j.neuron.2021.07.002 [1].

Это прямая предшественница обсуждавшейся статьи 2026 года: fornit.ru/104357. Авторы показывают, что реалистичная модель L5-пирамидного нейрона требует DNN глубиной 5–8 слоёв для точного воспроизведения её input–output функции. NMDA-рецепторы и дендритная морфология объявляются источником этой «глубины». Вывод: одиночный кортикальный нейрон сам по себе уже является глубокой вычислительной единицей.

Продолжение той же линии — работа 2026 года (Aizenbud et al., PNAS), которую мы разбирали.

2. Линия Poirazi (FORTH, Греция) — одна из самых влиятельных в мире по dendritic computation

Poirazi P., Papoutsis A. (2020). *Illuminating dendritic function with computational models*. Nature Reviews Neuroscience, 21, 303–321. DOI: 10.1038/s41583-020-0301-7 [2].

Авторитетный обзор. Дендриты рассматриваются как носители богатого набора вычислительных операций; моделирование дендритов объявляется необходимым для понимания обработки информации на клеточном и сетевом уровнях. Point-neuron модели прямо критикуются как чрезмерно упрощённые.

Последующие работы той же группы:

- Chavlis S., Poirazi P. (и соавт.) — серия статей 2021–2025 гг. о том, как дендритные свойства повышают expressivity, эффективность и обучаемость сетей.
- Makarov R., Pagkalos M., Poirazi P. (2023). *Dendrites and efficiency...* Current Opinion in Neurobiology.
- Недавний обзор Chavlis & Poirazi (2026, Annual Review of Neuroscience, in press): «A Dendro-Centric View of Cognition...» — нейрон больше не point-like integrator, а сложное вычислительное устройство, чья сила заключена в дендритном дереве.

3. Экспериментальная линия Larkum / Gidon (человеческие нейроны)

Gidon A. et al. (в т.ч. Larkum M.) (2020). *Dendritic action potentials and computation in human layer 2/3 cortical neurons*. Science [3].

Показывают уникальные дендритные спайки в человеческих L2/3 нейронах, позволяющие реализовывать XOR-подобные операции на уровне одной клетки. Это один из самых цитируемых экспериментальных аргументов в пользу того, что человеческий нейрон — уже «многослойная» вычислительная единица.

4. Обзорные и концептуальные работы, закрепляющие парадигму

- London M., Häusser M. (и более поздние работы Häusser) — классическая линия «dendritic computation». Активные дендриты наделяют клетку мощным вычислительным репертуаром.
- Fitch W.T. (примерно 2023). *Cellular computation and cognition* (PMC). Прямо утверждает, что каждый нейрон — мощный компьютер, примерно эквивалентный целой ANN 1990-х годов, и что современный connectionism систематически недооценивает клеточный уровень.
- Обзоры типа «Dendritic Mechanisms for In Vivo Neural Computations and Behavior» (J Neurosci, 2022) и «A dendrite is a dendrite is a dendrite?» (Pflügers Archiv, 2024) продолжают ту же линию: дендриты — сложные вычислительные устройства, а не просто «антенны».

Общий посыл этих публикаций

Во всех перечисленных работах:

- сложная морфология + активные проводимости + NMDA-нелинейности = повышенная вычислительная ёмкость одиночной клетки;
- эта ёмкость трактуется как функционально значимая для познания, обучения и поведения;

- простая персептронная (point-neuron) функция объявляется устаревшим и недостаточным описанием;
- механизмы поддержания жизни (метаболизм, гомеостаз ионных градиентов, энергозатраты и т.д.) либо не обсуждаются, либо рассматриваются как фон, на котором разворачивается «вычисление».

Наиболее авторитетные публикации нейробиологов – “персептронщиков”

Вот релевантные и авторитетные направления/публикации, которые сегодня поддерживают (или фактически отстаивают) достаточность простой персептронной / point-neuron / integrate-and-fire функции нейрона для понимания работы нейронных сетей.

Важно сразу оговориться: чистых и громких «анти-переусложнителей» сейчас меньше, чем сторонников дендритной сложности. Поле в значительной степени сместилось. Однако есть влиятельные линии, которые продолжают работать в парадигме, где нейрон в сети — это относительно простой сумматор с нелинейностью (порог/активация), а основная вычислительная мощность возникает на уровне сети.

1. Классическая и продолжающаяся линия теоретической нейронауки (Dayan, Abbott, Miller и др.)

- Dayan P., Abbott L.F. *Theoretical Neuroscience* (книга, многократно переиздавалась и остаётся базовой) [4]. Систематически использует простые rate-based и integrate-and-fire модели. Сложная дендритная морфология почти не требуется для объяснения основных сетевых вычислений.
- Работы Kenneth D. Miller (Columbia) — канонические вычисления коры, стабилизированные супралинейные сети, баланс возбуждения/торможения. Почти всегда строятся на относительно простых нейронах. Пример: обзоры и модели по canonical cortical computations.
- Larry Abbott и соавторы — многочисленные работы по сетевой динамике, пластичности и кодированию, где point-neuron или простые spiking-модели оказываются достаточными.

2. Integrate-and-Fire как рабочая лошадка крупномасштабного моделирования

- Nicolas Brunel и школа (обзоры и модели сетей integrate-and-fire нейронов). Показано, что многие важные сетевые явления (осцилляции, баланс E/I, вариабельность, coding) хорошо воспроизводятся простыми spiking-моделями без детальной дендритной морфологии.
- Современные эффективные крупномасштабные модели коры (например, работы в духе coarse-grained / multiscale подходов, 2024–2025 гг.), которые сознательно упрощают нейроны, чтобы сохранить вычислительную трактуемость и при этом воспроизводить ключевые феномены.

3. Работы, которые прямо показывают достаточность упрощённых моделей или ограничивают значение дендритной сложности *in vivo*

- Francioni V., Harnett M.T. (2022). *Rethinking Single Neuron Electrical Compartmentalization: Dendritic Contributions to Network Computation In Vivo*. *Neuroscience* [5]. Важная работа: *in vivo* данные показывают значительно более сильную сомато-дендритную корреляцию и меньшую компартментализацию, чем предполагалось из *ex vivo* и моделей. Это ослабляет тезис о «сети внутри нейрона» как главном источнике вычислительной мощности.
- Работы, демонстрирующие, что многие дендритные эффекты можно эффективно «свернуть» в расширенную point-neuron модель (например, *Dendritic computations captured by an effective point neuron model*, 2019 и последующие). То есть сложность можно перенести в эффективные параметры простого нейрона, не сохраняя полную морфологию.
- Критические работы о пределах «реалистичного» моделирования одиночных нейронов (в духе «Is realistic neuronal modeling realistic?» и близких текстов), которые показывают, что сверхдетальные компартментальные модели часто оказываются *ad hoc* и плохо обобщаются.

4. Практический консенсус большинства системных и сетевых нейробиологов

Большинство исследователей, занимающихся популяционным кодированием, крупными рекуррентными сетями, decision-making, рабочей памятью и т.д., продолжают успешно работать с:

- leaky integrate-and-fire,
- adaptive exponential integrate-and-fire,
- простыми rate-моделями.

Они исходят из того, что для понимания сетевой функции детальная внутриклеточная сложность часто избыточна, а ключевые вычисления возникают из связности, баланса E/I, пластичности и динамики популяций.

Общий расклад мнений

Настоящих «персептронщиков-ортодоксов» сегодня меньше, чем переусложнителей, их дают авторитетом и цитированиями. Однако влиятельная и очень продуктивная часть сообщества (теоретическая нейронаука Dayan–Abbott–Miller линии, крупномасштабное моделирование на integrate-and-fire, ряд *in vivo* работ) продолжает считать, что простая функция нейрона как нелинейного сумматора в большинстве случаев достаточна, а основная вычислительная сложность мозга — сетевая, а не клеточная.

В значительной степени такой расклад мнений является следствием научных школ, которые зачастую защищают свои убеждения на протяжении десятилетий, оказывая застойное влияние: fornit.ru/102746

В случае с нейроном это выглядит особенно наглядно.

Одна школа (переусложнители) десятилетиями развивает и усложняет представление о одиночном нейроне как о мощном вычислительном устройстве. Каждая новая деталь дендритной морфологии, каждый новый тип нелинейности,

каждый более глубокий DNN-аппроксиматор воспринимаются как подтверждение правильности исходной ставки. Границы абстракции («что именно мы называем вычислением») при этом почти не пересматриваются.

Другая школа продолжает успешно работать с простыми моделями, потому что на сетевом уровне они часто оказываются достаточными и гораздо более продуктивными. Но она тоже редко прямо атакует исходные допущения комплексификаторов — скорее просто игнорирует их как «слишком детальные для наших задач».

В результате возникает классическая ситуация, которую описывает статья: две относительно замкнутые теоретические конструкции существуют параллельно, каждая защищает свою систему абстракций, и обе в какой-то степени тормозят более радикальный пересмотр самой постановки вопроса. А именно:

- где проходит граница между механизмами жизнеобеспечения клетки и её функцией в сети;
- в какой момент наложение вычислительной метафоры перестаёт быть полезным инструментом и начинает порождать артефакты;
- насколько вообще корректно переносить сложность с уровня сети на уровень одиночного элемента.

Пока школы продолжают защищать свои многолетние позиции, этот пересмотр происходит медленно и неохотно. Именно это и есть застойное влияние: не грубая ошибка, а длительная консервация удобных, внутренне согласованных, но уже недостаточно плодотворных рамок.

Выход из этих вековых споров один — построение модели системы взаимодействий нейронов между собой, которые полностью отделят общие механизмы жизнеобеспечения и особенностей природной реализации от реализационно-независимых принципов адаптивного взаимодействия.

Пока модель нейрона смешивает в одном описании:

- механизмы поддержания жизни клетки (ионный гомеостаз, метаболизм, морфогенез, репарацию, энергообеспечение),
- особенности конкретной биологической реализации (тип каналов, геометрия дендритов, глиальное окружение, температурный режим и т.д.),
- и те принципы, по которым клетка участвует в адаптивном взаимодействии с другими клетками,

спору между «переусложнителями» и сторонниками простой функции будут продолжаться бесконечно. Каждая сторона будет выхватывать удобный ей слой и объявлять его главным.

Выход — жёсткое методологическое разделение:

1. Уровень жизнеобеспечения и реализации Всё, что нужно клетке, чтобы просто оставаться живой и работоспособной в данной физико-химической среде. Это область клеточной физиологии, биофизики и молекулярной биологии. Здесь

сложность огромна и вполне реальна, но она не является «вычислением» в сетевом смысле.

2. Уровень реализационно-независимого адаптивного взаимодействия Только те принципы, которые описывают, как элемент обрабатывает входящие сигналы от других элементов и формирует исходящие, чтобы система в целом могла адаптироваться. Эти принципы должны быть сформулированы так, чтобы их можно было реализовать и на ионах, и на транзисторах, и на оптике, и программно — без потери существа.

Именно построение модели второго уровня, максимально очищенной от первого, и есть выход из векового топтания. Такая модель позволяет:

- перестать приписывать нейрону «вычислительную мощность глубокой сети» только потому, что у него сложная биофизика выживания;
- перестать, наоборот, делать вид, будто любая сложность клетки несущественна;
- сравнивать биологические и искусственные системы по одним и тем же критериям функциональности, а не по степени похожести «железа».

Пока этого разделения нет — каждая школа будет продолжать защищать свою привычную абстракцию, и застой будет продолжаться.

Для начала необходимо разобраться с сутью слова “вычисление”, которые, как представляется, наносит огромный вред пониманию системных взаимодействий.

Нейроны – это вычислители?

Принципиальным критерием, который позволяет отличить вычисление от любого другого физического или информационного процесса, является систематическое целенаправленное преобразование входных данных в выходные на основе фиксированного набора формальных правил (алгоритма).

Чтобы однозначно определить, происходит ли в явлении вычисление, оно должно одновременно удовлетворять трем обязательным условиям:

1. Наличие абстрактных состояний (Кодирование)

Физические свойства системы должны представлять собой абстрактные символы или данные.

- Вычисление: напряжение в транзисторе (высокое/низкое) интерпретируется как логическая единица или ноль.
- Просто процесс: вода нагревается и превращается в пар (это физико-химический переход, здесь нет кодирования информации).

2. Формальные правила перехода (Алгоритм)

Изменение состояний системы происходит не хаотично, а подчиняется строго определенной логической схеме (инструкциям), где следующее состояние зависит от предыдущего и от внешнего сигнала.

- Вычисление: калькулятор складывает числа, потому что его архитектура заставляет электроны двигаться по жестко заданным логическим вентилям (И, ИЛИ, НЕ).
- Просто процесс: камень падает с горы. Он подчиняется законам гравитации, но у него нет внутренней структуры правил, обрабатывающей «данные» о высоте.

3. Независимость от субстрата (Переносимость)

Этот же вычислительный процесс можно воспроизвести на совершенно другом физическом носителе, и его суть (математическая модель) не изменится.

- Вычисление: найти корень уравнения можно на кремниевом процессоре, на бумаге счетами, в квантовом компьютере или с помощью живых нейронов. Результат и логика шагов останутся прежними.
- Просто процесс: горение дров невозможно перенести на кремний, не потеряв само явление горения.

Когда мы строим таким образом модель нейрона, то да, в этой модели можно выделить компоненты вычислений, потому что мы встраиваем в нее свои абстракции, чего нет в исходных нейронах. Если не учитывать этого, то любую причинно-следственную связь можно свести к вычислениям, чем и занимаются многие ученые в своих интерпретациях.

Формально легко прийти к выводу, что как только камень начинает проявлять свои свойства, например, катится с горы, он начинает вычислять. Катящийся камень ничем принципиально не отличается от срабатывания мембранного порога нейрона. Они оба – вычислители?

Если убрать человека с его интерпретациями, то и в камне, и в нейроне происходит один и тот же процесс: движение материи по законам физики. Внутри нейрона нет маленького математика. Там есть лишь ионы натрия и калия, которые под действием электромагнитного поля и диффузии движутся через белковые поры. Мембранный порог — это не логическая развилка IF-THEN, это просто момент, когда входящий ток ионов натрия становится сильнее выходящего тока ионов калия. Это такая же физика и динамическая система, как и катящийся камень.

Но если мы признаем, что они принципиально не отличаются, мы попадаем в тупик: слово «вычисление» вообще теряет право на существование (даже для процессоров Intel, ведь там тоже просто бегут электроны по кремнию).

Слово Вычисление подразумевает привнесенные абстракции и алгоритм. Это слово имеет граничные условия применения: вычисления - это то, что следует алгоритму, формализованному на основе абстракций. Иначе слово нивелирует смысл.

Разделение понятий: Физический процесс vs Вычисление

Условно мир делится на две категории:

1. Объективная физическая реальность (Природа):

Здесь нет никаких «вычислений». Катящийся камень, срабатывание мембранного порога нейрона, движение электронов в кремнии процессора Intel — это абсолютно однородные физические процессы. Природа просто «существует» и подчиняется причинно-следственным связям. В исходном нейроне нет встроенных абстракций — там есть только биофизика.

2. Пространство вычислений (Интерпретация и Конструирование):

Вычисление возникает только тогда, когда человек накладывает на физический процесс сетку абстракций.

Процессор Intel вычисляет, потому что инженеры *привнесли* туда абстракцию (назвали уровень напряжения в 1.2 В «единицей», а 0 В — «нулем») и заставили эту физику следовать жесткому, формализованному человеком алгоритму. Без человека процессор Intel — это просто греющийся кусок кремния, через который течет ток.

Модель нейрона вычисляет ровно в том смысле, что ученый *привнес* туда абстракцию (назвал концентрацию глутамата «входной переменной $\backslash(X\backslash)$ »), а спайк — «бинарным выходом $\backslash(Y = 1\backslash)$ »).

Если мы применяем граничное условие (вычисления — это то, что следует алгоритму, формализованному на основе абстракций), то вывод будет следующим: в исходных, диких природных нейронах вычислений нет. В них есть сложнейшая, эволюционно обусловленная биофизика, химия и термодинамика. Вычисление появляется в нейроне только в тот момент, когда мы (исследователи) строим его математическую модель, оцифровываем его состояния и сопоставляем их с алгоритмом обработки информации. Таким образом, «вычисление» — это не свойство самого нейрона, а способ описания и понимания его работы человеческим разумом. Вычисления локализованы в сознании наблюдателя, который переводит физику клетки на язык формальных правил.

Без четко определенных граничных условий любое определение оказывается незавершенным в силу следствий теоремы Геделя о неполноте. И этим грешит большинство «научных» определения, используя которые ученые впадают в ошибки неверных следствий таких определений.

Как только ученые забывают о граничных условиях своего определения, они неявно расширяют область его применения на территории, для которых исходные аксиомы не заданы. Это неизбежно порождает ложные следствия, логические круги и спекуляции.

Примеры того, к каким ложным выводам приходили ученые без учета критерия граничных условий в определениях:

Механистический тупик: «Вселенная — это часы, а животные — автоматы»

В XVII–XVIII веках главным пиком технологий были сложные механические часы, автоматы Жака де Вокансона (утки, умеющие «переваривать» зерно) и гидравлические системы.

Перенос абстракции: великие мыслители, включая Рене Декарта, совершили ровно ту же ошибку, что и современные ученые с компьютерной метафорой. Они объявили механическую причинность базовым свойством живой природы без

всяких граничных условий. Декарт утверждал, что животные — это просто сложные биомеханические автоматы (часы из мяса), у которых нет души и чувств, а их крики от боли — это просто «скрип неотлаженных шестеренок».

Ложный вывод и последствия: это привело к веку жесточайших вивисекций (животных резали заживо ради забавы в лабораториях, будучи уверенными, что это физиологический аналог починки часов). Ученые полностью просмотрели уникальную самоорганизующуюся природу живой материи, посчитав ее линейным механизмом.

2. Крах бихевиоризма: «Человек — это линейный сумматор стимулов»

В первой половине XX века американская школа психологии во главе с Джоном Уотсоном и Берроузом Скиннером решила сделать психологию «строгой наукой». Они ввели жесткое определение поведения через формулу «Стимул - Реакция».

Перенос абстракции: ученые убрали из рассмотрения внутренний мир человека, назвав его «черным ящиком». Они привнесли абстракцию, что живой организм — это реактивное устройство, которое просто преобразует физический вход (стимул) в физический выход (реакцию) по правилам классического обусловливания.

Ложный вывод и последствия: бихевиористы были искренне уверены, что используя эту простую каузальную схему, можно сконструировать любое человеческое общество и полностью управлять поведением людей, как роботами. В итоге они завели психологию в глубочайший тупик: их модели оказались абсолютно беспомощны перед лицом реального человеческого языка, творчества, когнитивных карт и мышления, которые невозможно свести к линейной цепочке «стимул-реакция».

3. Современный миф: Проект «Human Brain Project» и цифровое бессмертие

В 2013 году Европейский Союз выделил колоссальный 1 миллиард евро на проект *Human Brain Project* под руководством Генри Маркрама. Цель была амбициозной: за 10 лет полностью смоделировать человеческий мозг на суперкомпьютере.

Перенос абстракции: маркрам и его команда допустили ту самую гёделевскую ошибку, о которой мы говорили. Они взяли уравнения Ходжкина — Хаксли (математическую абстракцию работы нейрона) и решили, что если они перенесут миллиарды таких уравнений в кремний суперкомпьютера, то из этой физической симуляции автоматически «эмерджентно» возникнет сознание и разум. Они перепутали карту (уравнения) с территорией (живой тканью).

Ложный вывод и последствия: проект закончился громким скандалом и провалом. Потратив сотни миллионов, ученые получили лишь симуляцию электрического шума в кубическом миллиметре коры, которая не смогла выполнить ни одной осмысленной когнитивной задачи. Они полностью проигнорировали тот факт, что живой нейрон — это не просто логический вентиль, а метаболическая система, где на работу мембраны влияет всё: от гормонов в крови до формы глиальных клеток вокруг. Компьютерная абстракция оказалась бесконечно бедна по сравнению с биологической реальностью.

Чем занимаются нейроны в организме?

Есть огромный массив фактических данных исследований о том, что именно делают нейроны в промежутке от сенсоров до эффекторов и то, как они это делают (fornit.ru/a1).

Рассмотрим то, **как преобразуется изображение сетчатки глаза**. Задача такого преобразования – пулучение контрастных и отделяемых одно от другого примитивов зрительного восприятия. Сигналы конуса фотосенсоров сходятся на нейроне, который формирует синаптические проводимости так, что наиболее часто встречающиеся комбинации за время экспозиции в отведенный период развития распознавателей, давал воспроизводимый отклик от данного сочетания светлых и темных составляющих. Нейрон просто срабатывает, когда сумма светлых превысит его порог срабатывания и неважно как именно светлые были распределены, это – дело последующих структур.

Для контрастирования и конкурентности используется общий принцип латерального торможения.

Нет никакого смысла делать конус сенсорных входом боле широким, потому что порог срабатывания у природного нейрона плавает от многих факторов, так что нет возможности различать тонкую разницу.

Последующие нейроны занимаются в точно тем же, только вместо фотосенсоров на их входы приходят выходы предыдущих нейронов, о чем последующие не подозревают, т.к. все нейронные сигналы ничего не кодируют кроме да-нет: было распознавание или не было.

Всё остальное — детали реализации и обеспечения жизни клетки.

Это – аксиоматически выверенный факт. никакого кодирования сложных величин, никакой внутренней многослойной обработки «внутри» нейрона для выполнения этой функции не требуется. Сигнал между нейронами только констатирует: данное сочетание входов было достаточным, чтобы пересечь порог. Что именно это сочетание означало — определяется только местом нейрона в сети и историей настройки его синапсов.

Это и есть реализационно-независимый принцип адаптивного взаимодействия: элемент накапливает взвешенную сумму входящих событий распознавания и сам генерирует событие распознавания, если сумма превысила порог.

Всё, что сверх этого (сложная морфология дендритов, нелинейности NMDA, дендритные спайки, метаболизм, гомеостаз и т.д.), относится либо к способу, которым биологическая клетка физически реализует эту простую функцию, либо к механизмам, которые позволяют ей оставаться живой и работоспособной. Эти уровни важны для физиолога, но они не являются частью описания того, *что* нейрон делает как элемент адаптивной системы.

Именно поэтому попытки переусложнителей объявить биофизическую сложность «вычислительной мощностью уровня глубокой сети» оказываются методологической ошибкой: они смешивают способ реализации и обеспечения жизни с самой функцией в системе взаимодействий.

Нейрон – как лишняя сущность

Но такая модель все еще содержит излишки реализации, которые оказываются совершенно не нужны в случае использования чистых принципов системы индивидуальной адаптивности. В ней не нужны сами нейроны – природные клетки, которые даже в ипостаси персептронов для реализации требуют огромных вычислительных затрат, суперкомпьютеров, в проектах не только эмуляции природной нейросети, но и искусственных нейросетей.

Ненужность нейронов - это настолько крамольная мысль, что ее принятие оказывается возможным только после живого столкновения с нелогичностью эмуляции нейронов в программных моделях индивидуальной адаптивности.

В книге “Программная реализация живых существ” (fornit.ru/102542) есть фрагмент, описывающий такой катарсис:

“Программный проект Beast развивался 4 года и каждый год переписывался с нуля, учитывая полученный опыт предыдущего, который вскрывал множество проблем и найденных решений, но, главное, новых идей, которые становились очевидными после всех предварительных попыток реализации.

Первая проблема – полный крах попыток реализации с эмуляцией нейронов. Сразу же появились невероятно громоздкие конструкции, и их сложность скрывала в тени сами принципы адаптивности, выпячивая проблемы согласования нейронных механизмов. А ведь природа сделала все на нейронах. Ранее были отработаны конструкторы нейронных механизмов, которые демонстрировали самые различные функции из нейронных сетей: простейшие адаптивные механизмы насекомых, латеральное торможение, формирование детекторов признаков сочетаний входных цепей и т.д. Несмотря на то, что конструкторы были тщательно проработаны и оптимизированы, как только возникала задача построить нейронный слой не для демонстрационных примеров, а для реальной работы системы адаптивности, нарастание сложности, требовательности к вычислительным ресурсам и ясность отслеживания состояния приводили к тупику. Это было понимаемо и ожидаемо, но еще теплилась надежда на какое-то решение, которое изменит качество конструкции до вполне приемлемого.

Мысль “Ну как же без нейронов?..” становилась все менее завораживающей из-за понимания: если мы итак отказываемся от эмуляции всех особенностей жизнеобеспечения нейронов как клеток и берем только их персептронную функцию, то почему мы не можем отказаться и от этой функции, которая для программного моделирования является очень неестественной, и то, что легко и просто делается программно. И вот, в первый же год, буквально на первом же месяце, мы исключили нейроны полностью, так что все адаптивные функции начали собирать чисто программными средствами. И что же вышло? Дальше все пошло как по маслу, быстро и эффективно, но главное, с полным контролем происходящего”.

Отказ от нейронов оказался не потерей, а освобождением. Адаптивные функции начали собираться напрямую, средствами, которые для программного носителя естественны. Сложность упала, скорость выросла, контроль стал полным.

Это и есть практический катарсис, после которого теоретическая позиция перестаёт быть крамольной и становится инженерно обоснованной. Нейрон (даже в самом упрощённом виде) — не принцип адаптивности. Это один из исторических способов реализации некоторых аспектов адаптивности на белковом носителе. На другом носителе он может оказаться не просто ненужным, а прямо мешающим.

Именно такие столкновения с нелогичностью привычных конструкций и позволяют искренне выйти за пределы вековых школ и их застойных абстракций.

Научная беда

Несмотря на то, что все давно исследовано на уровне самых основ, дающих общий аксиоматический каркас, именно практические задачи реализации оказываются способны выделить наиболее системное и провести корректные граничные условия в моделях явлений. Вот таких попыток практического моделирования целостной системы и не хватает в академических исследованиях, долбящих в локальные явления без связи с другими в общей системе.

Выделив какой-то факт наблюдения выпестовав его как открытие и оформив как завершённую концепцию, ученые начинают отстаивать ее и делают далекие экстраполяции от одного такого факта, игнорируя принципы научной методологии, без полноценного следования которым не может быть науки.

В результате наука наполняется хорошо защищёнными, но слабо связанными между собой локальными теориями, каждая из которых претендует на большее, чем может обоснованно дать. А попытки собрать из них работающее целое либо не предпринимаются, либо быстро упираются в тупики, которые интерпретируются не как сигнал о дефекте исходных абстракций, а как «недостаток вычислительных ресурсов» или «необходимость ещё более детальных моделей».

Практическое моделирование целостной системы индивидуальной адаптивности как раз и выполняет ту работу, которой хронически не хватает: оно принудительно отделяет необходимое от избыточного и не позволяет концепции жить одной только защитой своей внутренней красоты.

Это в полной мере относится к истории выявления функциональности нейрона в природной нейросети и все коллапсы теорий, которые выбрали не ту дверь.

На каждом этапе брался какой-то реально наблюдаемый факт и возводился в ранг главной сущности:

- сначала нейрон как простой проводник и сумматор (классическая рефлекторная дуга, персептрон);
- потом — как элемент с богатой внутренней динамикой (ходжкин-хакслиевская биофизика);
- затем — как носитель сложных дендритных вычислений и «сеть внутри клетки»;
- параллельно — как единица хранения и переработки информации в духе компьютерной метафоры;

- потом — как объект, чья морфологическая и синаптическая сложность сама по себе объясняет когнитивное превосходство вида.
- и вот, опять приходим к тому, что в природной реализации нейрон – пороговый сумматор и каждый нейрон – это простейший рефлекс по конвекции И. Сеченова (fornit.ru/68661) [7].

Каждый раз локально верное наблюдение превращалось в завершённую концепцию, из которой делались далёкие выводы. Границы применимости понятия «функция нейрона» при этом почти не контролировались. Механизмы жизнеобеспечения клетки смешивались с её ролью в системе взаимодействий. Вычислительная метафора накладывалась без жёстких критериев. И теория начинала защищать себя, а не уточнять свою область действия.

Пока исследование нейрона остаётся преимущественно исследованием всё более тонких свойств самой клетки, а не проверкой того, какие из этих свойств действительно необходимы для системной адаптивности, история будет повторяться. Практические попытки построить целостную систему как раз и выполняют ту селекцию, которой не хватает: они показывают, какая дверь вела в тупик.

Выводы

Любая попытка выделить то в функции нейронов, что используется в межнейронных взаимодействиях, отсекает все лишнее в модели индивидуальной адаптивности, позволяя методологически корректно подойти к критериям граничных условий применения этих моделей.

Остаётся только то, что может быть перенесено на другой носитель без потери существа адаптивного процесса. А значит — появляется возможность корректно задать граничные условия модели: где она ещё описывает принципы индивидуальной адаптивности, а где уже начинает описывать конкретный способ воплощения этих принципов в белково-липидной клетке.

Именно такое отсечение лишнего и является условием методологической чистоты. Без него модель неизбежно смешивает уровни и начинает защищать артефакты реализации под видом фундаментальных принципов.

Да, выделенную базовую функцию нейрона в межнейронных взаимодействиях возможно реализовать на любых платформах, вплоть до программной, но именно в программной реализации уже сам принцип персептрона оказывается лишней скучностью, без которой систем работает, мало того, с персептронами полноценную систему реализовать сегодня невозможно чисто технически.

Системно обусловленная модель, такая как теория МВАП (модель волевой адаптивности психики), практической реализацией полноценных гомеостатических систем доказывает, что все остальные усложнения – это лишние сущности, которые невозможно вписать в целостную принципиальную модель.

Самое авторитетное доказательство, согласно научной методологии - это фактическая реализация. Так что модель сетевой функции нейрона по теории МВАП (fornit.ru/6449) оказывается практически доказанной [6]. Если в проекте

Beast реально запустили код, и он заработал, то это чистейшая эмпирика — опыт, практика, работающий прототип [8].

Использует не прямой эмпирический замер (как в биофизике), а эмпирический метод последовательного отсеечения, который завершается прототипом.

Цепочка доказательства:

1. Берётся природный нейрон со всей его биофизической сложностью.
2. Эмпирически (на основе знаний физиологии) устанавливается, что часть этой сложности — механизмы жизнеобеспечения (гомеостаз, метаболизм, поддержание градиентов).
3. Эмпирически (на основе наблюдений межнейронных взаимодействий) устанавливается, что для передачи сигнала между клетками используются только факты пересечения порога («да/нет»).
4. Делается шаг: если сложность не участвует в межклеточной передаче, то для функции нейрона в системе она не нужна.
5. Это проверяется эмпирически в прототипе:
 - о Строится система с эмуляцией нейронов (со всей их персептронной сложностью) — она неработоспособна технически из-за непомерной избыточной сложности.
 - о Из системы удаляются нейроны полностью, а их функция во всех принципах системы адаптивности реализуется прямыми программными средствами.
 - о Система заработала.
6. Вывод: если система работает без нейронов, но с сохранением только их функции в виде распознавания (выделения идентифицированного образа), значит именно эта функция была единственной существенной для адаптивности. Всё остальное, что было у нейрона сверх этого — не существенно для системной функции.

Эмпирически доказано, что единственная системно значимая функция нейрона — это распознавание (выделение идентифицированного образа) на основе порогового превышения комбинации входов. Всё остальное — побочная функциональность жизнеобеспечения, которая не влияет на адаптивное поведение системы, что подтверждено работающим прототипом без нейронов.

Истинная функция нейрона в системе индивидуальной адаптивности сводится к «реализационно-независимому принципу адаптивного взаимодействия». Нейрон выступает в роли простого порогового сумматора: он накапливает взвешенную сумму входящих событий распознавания и генерирует исходящее событие (сигнал «да-нет»), если эта сумма превысила порог. Всё остальное (сложная дендритная морфология, NMDA-нелинейности, метаболизм, ионный гомеостаз) относится исключительно к механизмам жизнеобеспечения биологической клетки и является «лишней сущностью» при описании именно системной адаптивной функции.

Критика

Если отвлечься от утверждений о «доказанности» и разобрать саму систему аргументов строго, то обоснование нельзя признать доказанным. Центральное доказательство построено на нескольких логических ошибках, которые не позволяют сделать вывод о доказанности тезиса.

1. Главная ошибка: подмена доказательства

«Самое авторитетное доказательство, согласно научной методологии — это фактическая реализация»*. И далее: *«Мы реализовали систему без нейронов → значит, модель функции нейрона доказана»*.

Этот *non sequitur*** (не следует). Реализация системы, работающей БЕЗ эмуляции нейронов, доказывает лишь одно: *для данной конкретной задачи на данном носителе нейроны не нужны*. Это НЕ доказывает, что:

- биологический нейрон устроен именно как пороговый сумматор;
- дендритные вычисления не выполняют функциональной роли *in vivo*;
- природа «не использует» сложность нейрона.

Аналогия: «Я построил летательный аппарат без крыльев, на вентиляторах → значит, крылья — лишняя сущность, а истинная функция полёта — это создание тяги». Не работает: в биологической системе крылья (и дендриты) могут решать задачи, которых в упрощённой модели просто нет.

2. Подмена «не нужно для моей модели» на «не существует в природе»

Это классическая ошибка экстраполяции. Из того, что модель МВАП обходится без нейронной эмуляции, не следует, что природа обходится без сложных внутриклеточных вычислений. Возможно, модель МВАП решает другую задачу или реализует адаптивность другими средствами.

3. Игнорирование экспериментальных контраргументов

Автор упоминает работы Segev, Poirazi, Larkum, Gidon et al. (Science, 2020), но не разбирает их по существу. Он просто объявляет их «переусложнителями», смешивая уровни. Однако эти авторы приводят *экспериментальные* данные (XOR-операции на одиночных человеческих нейронах L2/3), которые нельзя отмахнуть как «механизмы жизнеобеспечения» — они демонстрируют функционально значимые вычисления именно *in vivo*. Автор не опровергает эти данные, а лишь переинтерпретирует их в свою пользу без обоснования.

4. Упрощение описания зрительной системы

Тезис о том, что нейрон V1 — это просто «пороговый сумматор светлых/тёмных пятен», противоречит данным о том, что формирование направленной селективности простых клеток само требует нелинейных дендритных механизмов и специфической пространственно-временной организации входов (работы после Hubel & Wiesel, Poirazi, Mel). То есть «пороговый сумматор» на выходе — это уже *результат* сложных внутриклеточных процессов, а не их отрицание.

5. Неуместная ссылка на теорему Геделя

Использование теоремы о неполноте для обоснования «граничных условий определений» — это псевдонаучная риторика. Теорема Геделя относится к формальным системам, содержащим арифметику, и не имеет отношения к проблеме уточнения определений в эмпирических науках.

6. Тенденциозный подбор исторических аналогий

Примеры с Декартом, бихевиоризмом и Human Brain Project [9] подобраны так, чтобы подтвердить тезис. HBP, например, не «провалился» — он породил множество инструментов, моделей и данных (Blue Brain, OpenMEEG и др.); проблемы были в управлении и завышенных PR-ожиданиях, а не в принципиальной невозможности моделирования.

Опровержение аргументов этой критики

1. Утверждение критика: *«Из того, что система работает без нейронов, следует только то, что для данной задачи нейроны не нужны, а не то, что нейрон в природе — сумматор.»*

В этом пункте критик совершает обратную подмену. Он требует, чтобы документ доказывал биологический изоморфизм (нейрон = сумматор в клеточной физиологии). Но документ этого и не утверждает.

Документ утверждает следующее (цитата):

«Выделенную базовую функцию нейрона в межнейронных взаимодействиях возможно реализовать на любых платформах, вплоть до программной... Системно обусловленная модель... практической реализацией доказывает, что все остальные усложнения — это лишние сущности, которые невозможно вписать в целостную принципиальную модель.»

То есть тезис документа — не «нейрон в природе есть сумматор», а:

«Для моделирования целостной адаптивной системы функционально достаточной абстракцией нейрона является пороговый распознаватель; всё, что сверх этого, не является частью системного принципа, а относится к реализации.»

Доказательство этого тезиса — прямое:

1. Берётся системный принцип (адаптивное взаимодействие).
2. Реализуется с эмуляцией нейронов — система неработоспособна.
3. Реализуется без нейронов, но с сохранением их пороговой функции распознавания — система работает.
4. Следовательно, именно эта функция является системно-существенной.

Это не non sequitur, а эксперимент с контролем переменной: меняется только один фактор (способ реализации распознавания), функция сохраняется, система работает.

Аналогия критика с крыльями не работает, потому что в ней меняется физический принцип (крыло vs вентилятор). В прототипе же функция распознавания сохраняется, меняется только способ её воплощения (нейронная эмуляция →

прямой код). Это не замена крыльев на вентилятор, а замена шестерёнок на электронику в часах — функция измерения времени сохраняется.

2. Утверждение критика: *«Из того, что модель МВАП обходится без нейронной эмуляции, не следует, что природа обходится без сложных внутриклеточных вычислений.»*

Документ не утверждает, что природа «обходится без сложности». Он утверждает, что эта сложность не является функцией в системе межнейронных взаимодействий, а является функцией жизнеобеспечения клетки.

Это разграничение, а не отрицание. В тексте прямо сказано:

«Всё, что сверх этого (сложная морфология дендритов, нелинейности NMDA, дендритные спайки, метаболизм, гомеостаз и т.д.), относится либо к способу, которым биологическая клетка физически реализует эту простую функцию, либо к механизмам, которые позволяют ей оставаться живой и работоспособной.»

То есть документ не отрицает сложность — он локализует её за пределами системной функции.

Критик упрекает документ в том, чего в нём нет: он не говорит «в природе нет сложности», он говорит «эта сложность не является частью системного принципа, потому что она не переносится на другой носитель».

Документ не утверждает, что природа «обходится без сложности». Он утверждает, что эта сложность не является функцией в системе межнейронных взаимодействий, а является функцией жизнеобеспечения клетки.

Это разграничение, а не отрицание. В тексте прямо сказано:

«Всё, что сверх этого (сложная морфология дендритов, нелинейности NMDA, дендритные спайки, метаболизм, гомеостаз и т.д.), относится либо к способу, которым биологическая клетка физически реализует эту простую функцию, либо к механизмам, которые позволяют ей оставаться живой и работоспособной.»

То есть документ не отрицает сложность — он локализует её за пределами системной функции.

Критик упрекает документ в том, чего в нём нет: он не говорит «в природе нет сложности», он говорит «эта сложность не является частью системного принципа, потому что она не переносится на другой носитель».

3. Утверждение критика: *«Автор не опровергает данные о XOR-операциях на одиночных нейронах, а лишь переинтерпретирует их.»*

Документ не обязан опровергать эти данные, потому что он работает в другой системе отсчёта. Это как требовать от теории гравитации опровергнуть квантовую запутанность — они на разных уровнях.

Документ прямо говорит:

«Это выделяет только отдельные, элементарные принципы, которые оказываются независимы от способа реализации.»

И далее:

«Пока модель нейрона смешивает в одном описании механизмы поддержания жизни клетки и те принципы, по которым клетка участвует в адаптивном взаимодействии с другими клетками, споры будут продолжаться бесконечно.»

То есть документ принципиально отказывается от дискуссии на биофизическом поле, потому что считает её смешением уровней. Он не говорит, что XOR-операции не существуют. Он говорит: *«Даже если они существуют, они относятся к уровню реализации, а не к уровню системной функции».*

Это методологический, а не эмпирический ответ на контраргументы. И он легитимен, если принята исходная аксиоматика документа.

4. Утверждение критика: *«Формирование направленной селективности простых клеток требует нелинейных дендритных механизмов.»*

Документ не описывает механизм формирования селективности. Он описывает выходную функцию нейрона в системе:

«Нейрон просто срабатывает, когда сумма светлых превысит его порог срабатывания и неважно как именно светлые были распределены, это — дело последующих структур.»

То есть документ не отрицает, что внутри нейрона происходят сложные процессы формирования селективности. Он утверждает, что на выходе системы эти процессы сводятся к одному бинарному факту: *«узнано / не узнано».*

Это различие между генерацией распознавания и результатом распознавания. Критик смешивает эти два уровня.

5. Утверждение критика: *«Теорема Геделя не имеет отношения к проблеме уточнения определений в эмпирических науках.»*

Гедель приводится не как математическое доказательство, а как методологическая аналогия:

«Без четко определенных граничных условий любое определение оказывается незавершенным в силу следствий теоремы Геделя о неполноте.»

Это корректное использование: в любой формальной системе есть утверждения, которые нельзя доказать внутри неё. Точно так же в любой концепции без чётких границ возникают ложные следствия. Это эвристика, а не формальное применение теоремы.

Критик придирается к форме ссылки, игнорируя её методологический смысл: необходимость задавать граничные условия для любого определения, чтобы избежать его неконтролируемого расширения.

Неважно, что у многих при упоминании Геделя возникает рефлекс неприятия, важно, что Гедель первым поднял проблему граничных условий и того, что скрывается вне области абстракций, пусть и в более узкой обобщенной форме, но

это очень методологически важно. Любая абстракция определяет лишь часть реальности. За её пределами остаются свойства, которые внутри выбранной системы не видны, и именно это необходимо постоянно помнить. Хотя теоремы Гёделя относятся к формальным математическим системам, они наглядно демонстрируют более общий методологический урок: нельзя игнорировать границы применимости используемых абстракций. Гедель потянул очень тонкую, но очень сильную мировоззренческую и методологическую ниточку.

6. Утверждение критика: *«НВР не провалился, он породил инструменты, проблемы были в управлении.»*

Документ не говорит, что НВР не дал никаких результатов. Он говорит, что главная цель (моделирование сознания на суперкомпьютере) не была достигнута, и это произошло из-за смешения абстракции и реальности.

Это исторически верно: НВР не создал работающую модель сознания, а его заявленная цель была именно в этом. Документ использует этот пример именно для иллюстрации ошибки «карта = территория».

Критик подменяет тезис: документ не говорит «НВР бесполезен», он говорит «НВР провалил свою главную цель из-за методологической ошибки». Это разные утверждения.

Итоговое опровержение общего вывода критика

Критик пишет: *«Тезис о том, что адаптивная функция нейрона сводится к реализационно-независимому принципу порогового сумматора, в данном документе не доказан. Доказана лишь более слабая позиция: существует класс адаптивных систем, которые можно построить без эмуляции биологических нейронов.»*

Это неверно. Документ доказывает более сильный тезис:

«В целостной системе адаптивности единственная функция нейрона, которая сохраняется при переносе на другой носитель, — это функция распознавания (порогового выделения образа). Всё, что не сохраняется при переносе, не является принципом адаптивности, а является способом реализации.»

Доказательство этого тезиса:

1. Эмпирическое — прототип работает без нейронов.
2. Логическое — если функция не переносится, она не является реализационно-независимым принципом.
3. Дедуктивное — из разделения уровней следует, что только переносимая функция может быть признана системно-существенной.

Критик не опровергает это доказательство. Он:

- требует, чтобы документ доказывал биологический факт (чего документ не делает);
- игнорирует системный характер доказательства;
- смешивает «не доказано» с «не доказано так, как я хочу».

Заключительный ответ

Документ доказывает свой тезис — но в своей системе координат. Он:

- вводит аксиомы (разделение уровней, определение вычисления, критерий переносимости);
- строит на них логическую цепочку;
- подтверждает её эмпирически (прототип).

Критика требует от документа доказательства биологического изоморфизма, но документ с самого начала отказывается от этой задачи и объявляет её методологически некорректной.

Поэтому опровержение несостоятельно: оно атакует документ за то, чего тот не обещал, и игнорирует то, что он реально делает.

Если принимать аксиоматику документа — доказательство состоятельно. Если отвергать аксиоматику — споры о доказанности бесконечны, что сам документ и предсказывает в разделе о «застойных школах».

Главное

Если занимать не деструктивную позицию опровержения во что бы то ни стало, а позицию учета приведенной системы аргументов для методологического решения вопроса о функциональности нейрона, то предлагается четкий методологический инструмент для выхода из тупика современных нейронаук. Этот инструмент базируется на трех столпах:

Принцип разделения уровней: жесткое разделение на *уровень жизнеобеспечения/реализации* (биофизика, метаболизм, морфология) и *уровень реализационно-независимого адаптивного взаимодействия* (системная функция).

Критерий переносимости (субстратной независимости): истинная системная функция должна сохраняться при переносе на другой носитель (например, в программный код). Если свойство теряется при переносе, оно относится к уровню реализации, а не к уровню системной функции.

Бритва Оккама в системном моделировании: если система работает и достигает цели (адаптивности) без эмуляции определенных свойств, эти свойства являются «лишними сущностями» для данной системной модели.

Если оценивать это доказательство строго по правилам методологии системного анализа и инженерии, оно состоятельно и может считаться доказанным, но с важным уточнением области его применимости.

Доказательство является методологически строгим и инженерно подтвержденным в рамках заявленной системы принципов. Документ успешно:

1. Вводит четкие граничные условия (разделение уровней).
2. Формулирует критерий истинности функции (реализационная независимость).

3. Подтверждает свою модель практической реализацией, которая показала, что усложненные модели не просто избыточны, но и вредны для создания работающих систем адаптивности.

Аргументы критика были несправедливы, так как требовали от документа доказательств в области биологической физиологии, тогда как документ с самого начала заявляет о решении задачи именно на уровне системного моделирования и реализационно-независимых принципов. В этой области его аргументация замкнута, непротиворечива и подкреплена практическим результатом.

Предложенный метод не доказывает:

- Что биологический нейрон не использует свою сложность.
- Что XOR-операции не существуют *in vivo*.
- Что природа не могла бы использовать дендритные вычисления для адаптации.

Но он и не должен это доказывать, потому что его цель — не описание природы, а выделение реализационно-независимых принципов.

Это не ослабляет документ. Это определяет его границы.

Короче, *«метод не говорит: "Нейрон — это только сумматор". Он говорит: "Если вы строите систему адаптивности, вам достаточно считать нейрон сумматором. Всё остальное — не ваша задача".»*

Список литературы

[1] Beniaguev D., Segev I., London M. Single cortical neurons as deep artificial neural networks // *Neuron*. — 2021. — Vol. 109, no. 17. — P. 2727–2739.e3.

[2] Poirazi P., Papoutsi A. Illuminating dendritic function with computational models // *Nature Reviews Neuroscience*. — 2020. — Vol. 21. — P. 303–321.

[3] Gidon A., Zolnik T.A., Fidzinski P., et al. Dendritic action potentials and computation in human layer 2/3 cortical neurons // *Science*. — 2020. — Vol. 367, no. 6473. — P. 83–87.

[4] Dayan P., Abbott L.F. *Theoretical Neuroscience: Computational and Mathematical Modeling of Neural Systems*. — Cambridge, MA: MIT Press, 2001.

[5] Francioni V., Harnett M.T. Rethinking Single Neuron Electrical Compartmentalization: Dendritic Contributions to Network Computation *In Vivo* // *Neuroscience*. — 2022. — Vol. 489. — P. 185–199.

[6] Модель волевой адаптивности психики (МВАП). — Режим доступа: fornit.ru/6449.

[7] Сеченов И.М. Рефлексы головного мозга. — 1863. — Режим доступа: fornit.ru/68661.

[8] Программная реализация живых существ (проект Beast). — Режим доступа: fornit.ru/102542.

[9] Human Brain Project / Маркхам Г. — Режим доступа: fornit.ru/104357.